

***Model Perilaku Mekanik Beton dengan Campuran Daur Ulang Rigid Pavement***



**Oleh:**

**Lubab  
10202000004**

**Disetujui Untuk Diajukan dalam:  
Sidang Terbuka Disertasi Hari/Tanggal: Sabtu, 17 Mei 2025**

**Promotor**

**Prof. Dr. Ir. Antonius, M.T.**

**Ko – Promotor**

**Dr. Ir. Sumirin, MS.**

**PROGRAM DOKTOR TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG, SEMARANG  
2025**

## LEMBAR PENGUJI

Sidang Terbuka

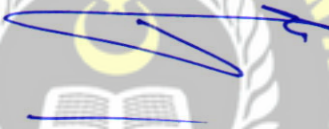
Hari : Sabtu, 17 Mei 2025

Promotor :



Prof. Dr. Ir. Antonius, M.T.

Ko-Promotor :



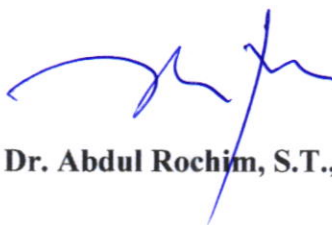
Dr. Ir. Sumirin, MS.

Penguji Eksternal :



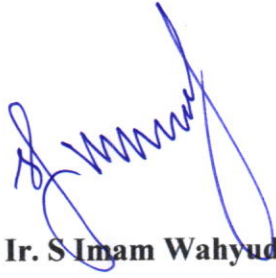
Prof. Dr. Ir. Han Ay Lie, M. Eng.

Penguji Internal :



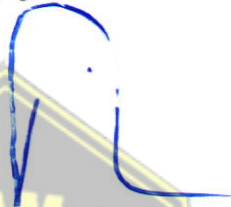
Dr. Abdul Rochim, S.T., M.T.

**Penguji Internal :**



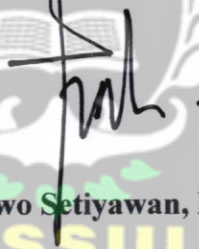
**Prof. Dr. Ir. S Imam Wahyudi, DEA.**

**Penguji Internal:**



**Prof. Ir. Pratikso, MST., Ph.D.**

**Penguji Internal :**



**Ir. Prabowo Setiyawan, M.T., Ph.D.**



**MODEL PERILAKU MEKANIK BETON DENGAN  
CAMPURAN DAUR ULANG *RIGID PAVEMENT***

**SIDANG TERTUTUP DISERTASI**

**Disusun untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan Mencapai Gelar Doktor**



**NIM: 10202000004**

**PROGRAM DOKTOR TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG  
SEMARANG**

**2025**

**HALAMAN PENGESAHAN**

**MODEL PERILAKU MEKANIK BETON DENGAN  
CAMPURAN DAUR ULANG *RIGID PAVEMENT***



Oleh:

**Lubab**

**NIM: 10202000004**

Disetujui untuk diajukan dalam :

**Promotor :**

**Prof. Dr. Ir. Antonius, M.T.**

**Ko-Promotor :**

**Dr. Ir. Sumirin, MS.**

**PROGRAM DOKTOR TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG  
SEMARANG  
2025**

**LEMBAR PENGUJI**  
**SIDANG UJIAN TERTUTUP DISERTASI**

Hari : Rabu, 16 April 2025

**Promotor :**

**Prof. Dr. Ir. Antonius, M.T.**

**Ko-Promotor :**

**Dr. Ir. Sumirin, MS.**

**Penguji :**

**Dr. Abdul Rochim, S.T., M.T.**

**Penguji :**

**Prof. Dr. Ir. S Imam Wahyudi, DEA.**

**Penguji :**

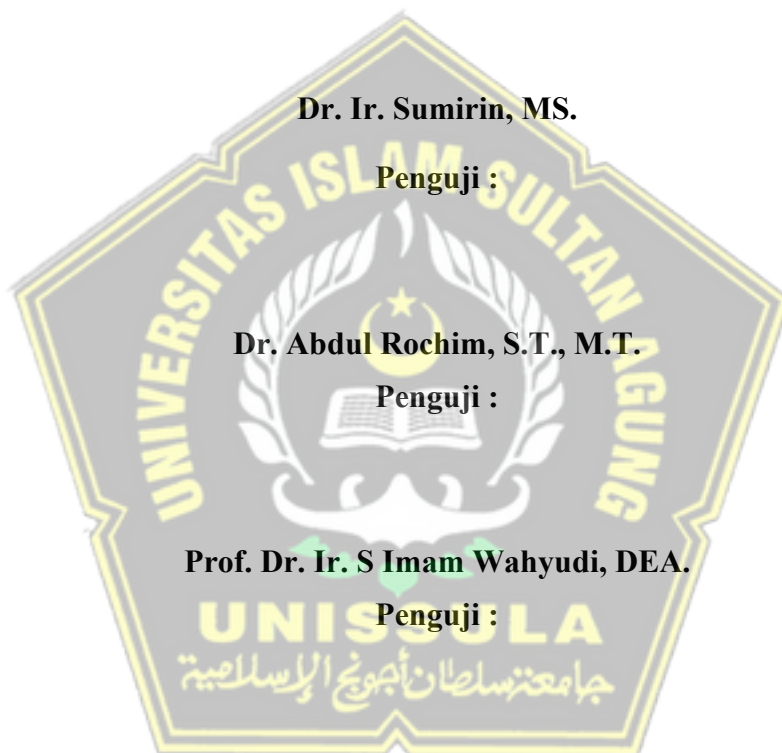
**Prof. Ir. Pratikso, MST., Pg.D.**

**Penguji :**

**Ir. Prabowo Setiyawan, M.T., Ph,D**

**Penguji Eksternal :**

**Prof. Dr. Ir. Han Ay Lie, M.Eng.**



## MOTTO

إِنَّ فِي خَلْقِ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ وَاخْتِلَافِ اللَّيْلِ وَالنَّهَارِ لَآيَاتٍ لِأُولِي  
الْأَلْبَابِ

*“inna fî khalqis-samâwâti wal-ardli wakhtilâfil-laili wan-nahâri la'âyâtil li'ulil-albâb”. (QS. Ali 'Imran:190)*

Arti : Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi, dan pergantian malam dan siang terdapat tanda-tanda (kebesaran Allah) bagi orang yang berakal.

وَلَا تُفْسِدُوا فِي الْأَرْضِ بَعْدَ إِصْلَاحِهَا وَادْعُوهُ خَوْفًا وَطَمَعًا إِنَّ  
رَحْمَتَ اللَّهِ قَرِيبٌ مِّنَ الْمُحْسِنِينَ

*“wa lâ tufsidû fil-ardli ba'da ishlâhihâ wad'ûhu khaufaw wa thama'â, inna rahmatallâhi qarîbum minal-muhsinîn”. (QS. Al-A'raf:56)*

Arti : Dan janganlah kamu berbuat kerusakan di bumi setelah (diciptakan) dengan baik. Berdoalah kepada-Nya dengan rasa takut dan penuh harap. Sesungguhnya rahmat Allah sangat dekat kepada orang yang berbuat kebaikan.

## PERSEMBAHAN

Puji Syukur ke hadirat Allah swt. atas limpahan taufik, Rahmat dan hidayahNya. Salawat serta salam kepada junjungan kita, Nabi Muhammad saw, beserta keluarga dan para pengikutnya.

Terkhusus untuk bapak (alm,Nuri Huda), dan ibu (almh.Mufiroh), bapak mertua (alm.Ibnu munaim) dan ibu mertua (alm.Suryati), terima kasih untuk kasih sayang, lelah, doa, semangat dan dukungan yang telah diberikan selama hayat beliau, untuk asuhan dan teladan-teladan yang telah membentuk pribadiku seperti sekarang ini.

Terima kasih untuk istriku tercinta (Nuri Imawaty,S.H) dan anak-anakku (Moh Ekky Bhagaskara,ST dr Nabila Salsabil Putri dan Akbar Putra lubab), atas segala pengorbanan, doa dan dukungan selama ini.

Terima kasih kepada bapak ibu Promotor, Ko-Promotor, Dosen Pengajar, Dosen Penguji, staf dan karyawan Program Doktor Teknik Sipil Universitas Islam Sultan Agung Semarang, semoga ilmu yang beliau berikan dicatat oleh Allah swt. sebagai amal jariyah yang tak putus-putus pahalanya. Aamiin.

Terima kasih kepada seluruh staf dan karyawan PT LAMDA UTAMA KONSULT. seluruh Direksi beserta staf PT Jasa Marga Solo - Ngawi, semoga dorongan dan dukungan yang telah diberikan dicatat oleh Allah swt. sebagai amal jariyah yang tak putus-putus pahalanya. Aamiin.

Penulis

## ABSTRAK

Pemanfaatan limbah konstruksi menjadi *Recycled Concrete Aggregate* (RCA) merupakan solusi berkelanjutan yang dapat mengurangi dampak lingkungan sekaligus mendukung efisiensi penggunaan sumber daya alam di industri konstruksi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja mekanik, mikro struktur, dan efisiensi biaya beton dengan RCA yang berasal dari limbah *rigid pavement* dan gedung, serta memodelkan campuran beton yang sesuai untuk aplikasi konstruksi berkelanjutan.

Penelitian dilakukan dengan variasi komposisi RCA sebesar 40%, 50%, dan 60%, menggunakan uji kuat tekan, kuat lentur, kuat tarik belah, serta modulus elastisitas. Struktur mikro dianalisis menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM), dan komposisi kimia melalui *Energy Dispersive X-Ray* (EDX). Selain itu, dilakukan evaluasi kebutuhan material dan analisis biaya produksi beton per meter kubik.

RCA dari *rigid pavement* menunjukkan struktur mikro yang lebih padat dan homogen dengan kandungan  $\text{SiO}_2$  sebesar 39,13% dan  $\text{CaO}$  sebesar 31,67%, sedangkan RCA dari gedung lebih berpori dan mengandung karbon lebih tinggi. Campuran 40% RCA rigid memberikan performa mekanik terbaik dengan kuat tekan 50,96 MPa, kuat lentur 49,02 kg/cm<sup>2</sup>, dan kuat tarik belah 3.537 MPa, melampaui mutu desain FS 45. Sementara itu, komposisi 50% dan 60% menunjukkan penurunan kekuatan dan lebih sesuai untuk aplikasi non-struktural. Peningkatan proporsi RCA berbanding lurus dengan kebutuhan air (hingga 194,55 liter/m<sup>3</sup>), dan menurunkan kebutuhan *admixture* dari 3,51 liter menjadi 2,63 liter. Dari sisi biaya, beton RCA 40% hanya memerlukan Rp. 701.970,43/m<sup>3</sup>, jauh lebih hemat dibanding beton normal sebesar Rp. 1.363.843,86/m<sup>3</sup>, dengan potensi efisiensi hingga 49%.

Penelitian ini menegaskan bahwa RCA rigid pada proporsi 40% merupakan solusi optimal secara teknis dan ekonomis, sekaligus mendukung transisi menuju praktik konstruksi yang lebih berkelanjutan. RCA dari gedung, meskipun lebih berpori, tetap memiliki potensi pemanfaatan pada aplikasi non-struktural setelah melalui proses pengolahan yang tepat.

**Kata kunci:** Agregat Daur Ulang, Beton Mutu Tinggi, Karakteristik Mikro Struktur, Konstruksi Berkelanjutan, *Rigid Pavement*.

## **ABSTRACT**

*The utilization of construction waste into Recycled Concrete Aggregate (RCA) offers a sustainable solution that can reduce environmental impact while supporting the efficient use of natural resources in the construction industry. This study aims to evaluate the mechanical performance, microstructural characteristics, and cost efficiency of concrete containing RCA sourced from rigid pavement and building demolition waste, as well as to model a suitable concrete mix design for sustainable construction applications.*

*The study was conducted using RCA replacement levels of 40%, 50%, and 60%, and involved compressive strength, flexural strength, split tensile strength, and modulus of elasticity tests. Microstructural analysis was carried out using Scanning Electron Microscopy (SEM), while chemical composition was examined through Energy Dispersive X-Ray (EDX). In addition, material requirement evaluations and production cost analyses were performed per cubic meter of concrete.*

*RCA derived from rigid pavement exhibited denser and more homogeneous microstructures, with SiO<sub>2</sub> content of 39.13% and CaO content of 31.67%, while RCA from buildings was more porous and contained higher carbon levels. The 40% RCA rigid mix delivered the best mechanical performance, with compressive strength of 50.96 MPa, flexural strength of 49.02 kg/cm<sup>2</sup>, and split tensile strength of 3.537 MPa, exceeding the FS 45 design standard. In contrast, the 50% and 60% RCA mixes showed reduced strength and were more suitable for non-structural applications. An increase in RCA proportion corresponded with higher water demand (up to 194.55 liters/m<sup>3</sup>) and lower admixture requirement (from 3.51 liters to 2.63 liters). In terms of cost, the 40% RCA mix only required IDR 701,970.43/m<sup>3</sup>, which is significantly more economical than normal concrete at IDR 1,363,843.86/m<sup>3</sup>, with a potential cost saving of up to 49%.*

*This study confirms that using 40% RCA rigid is the optimal solution in both technical and economic terms, while also supporting the transition to more sustainable construction practices. RCA from buildings, although more porous, can still be utilized for non-structural applications when properly processed.*

**Keywords:** *High-Performance Concrete, Microstructural Characteristics, Recycled Aggregate, Rigid Pavement, Sustainable Construction.*

## DAFTAR ISI

|                                                                                          |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ABSTRAK .....                                                                            | vi   |
| DAFTAR ISI.....                                                                          | viii |
| DAFTAR GAMBAR.....                                                                       | xi   |
| DAFTAR TABEL .....                                                                       | xiii |
| DAFTAR LAMPIRAN .....                                                                    | xvi  |
| BAB I    PENDAHULUAN .....                                                               | 1    |
| 1.1 Latar Belakang.....                                                                  | 1    |
| 1.2 Rumusan Masalah.....                                                                 | 6    |
| 1.3 Tujuan Penelitian .....                                                              | 6    |
| 1.4 Manfaat Penelitian .....                                                             | 7    |
| 1.5 Batasan Masalah Penelitian.....                                                      | 8    |
| BAB II    TINJAUAN PUSTAKA .....                                                         | 9    |
| 2.1 Model dan Peran Daur Ulang <i>Rigid Pavement</i> pada Beton.....                     | 9    |
| 2.2 Karakteristik Beton .....                                                            | 10   |
| 2.2.1 Kekuatan Tekan ( <i>Compressive Strength</i> ).....                                | 10   |
| 2.2.2 Kekuatan Tarik ( <i>Tensile Strength</i> ).....                                    | 11   |
| 2.2.3 Modulus Elastisitas ( <i>Elastic Modulus</i> ) .....                               | 11   |
| 2.2.4 Ketahanan Terhadap Deformasi ( <i>Resistance to Deformation</i> ).....             | 12   |
| 2.2.5 Ketahanan Terhadap Air ( <i>Resistance to Water</i> ).....                         | 12   |
| 2.2.6 Ketahanan Terhadap Siklus Pembekuan-Debeku ( <i>Freeze-Thaw Resistance</i> ) ..... | 12   |
| 2.2.7 Pengaturan Waktu ( <i>Setting Time</i> ).....                                      | 13   |
| 2.2.8 Warna dan Penampilan .....                                                         | 13   |
| 2.3 Penelitian Terdahulu.....                                                            | 19   |
| 2.4 <i>State of The Art, Research Gap</i> dan <i>Novelty</i> .....                       | 29   |
| 2.5 Kerangka Pikir.....                                                                  | 31   |
| BAB III    METODOLOGI PENELITIAN.....                                                    | 33   |

|                                                                     |           |
|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1 Lokasi Penelitian .....                                         | 33        |
| 3.2 Metode Pengumpulan dan Analisis Data .....                      | 33        |
| 3.3 Penentuan <i>Mix Design</i> .....                               | 36        |
| 3.3.1 Spesifikasi dan Kebutuhan Campuran .....                      | 36        |
| 3.4 Prosedur Percobaan <i>Mix Design</i> .....                      | 37        |
| 3.5 Uji Kuat Tekan dan Pengujian Kualitas Beton .....               | 38        |
| 3.6 Penentuan Model.....                                            | 40        |
| 3.7 Diagram Alir Penelitian .....                                   | 40        |
| <b>BAB IV DATA DAN ANALISIS .....</b>                               | <b>42</b> |
| 4.1 Data Material dan Komposisi Campuran.....                       | 42        |
| 4.1.1 Gradasi Agregat.....                                          | 42        |
| 4.1.2 <i>Trial Mix</i> .....                                        | 47        |
| 4.1.3 Prosedur Pengujian Kuat Tekan Beton .....                     | 53        |
| 4.2 Hasil Pengujian Kuat Tekan .....                                | 55        |
| 4.2.1 Kuat Tekan Beton RCA 40% pada Umur 3, 7, dan 28<br>Hari.....  | 55        |
| 4.2.2 Kuat Tekan Beton RCA 50% pada Umur 3, 7, dan 28<br>Hari.....  | 58        |
| 4.2.3 Kuat Tekan Beton RCA 60% pada Umur 3, 7, dan 28<br>Hari.....  | 61        |
| 4.3 Hasil Pengujian Kuat Lentur .....                               | 63        |
| 4.3.1 Kuat Lentur Beton RCA 40% pada Umur 3, 7, dan 28<br>Hari..... | 65        |
| 4.3.2 Kuat Lentur Beton RCA 50% pada Umur 3, 7, dan 28<br>Hari..... | 68        |
| 4.3.3 Kuat Lentur Beton RCA 60% pada Umur 3, 7, dan 28<br>Hari..... | 72        |
| 4.4 Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah.....                           | 76        |
| 4.5 Hasil Analisis Mikro Struktur RCA .....                         | 80        |
| 4.5.1 Struktur Mikro RCA Gedung .....                               | 80        |
| 4.5.2 Struktur Mikro RCA <i>Rigid Pavement</i> .....                | 90        |
| 4.6 Rekapitulasi Hasil Pengujian .....                              | 98        |

|                                                                                         |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.6.1 Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton RCA<br>40%, 50%, dan 60% .....      | 98         |
| 4.6.2 Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton RCA<br>40%, 50%, dan 60% .....     | 103        |
| 4.6.3 Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton<br>RCA 40%, 50%, dan 60%..... | 109        |
| 4.6.4 Rekapitulasi Hasil Pengujian SEM-EDX RCA Gedung<br>dan <i>Rigid</i> .....         | 109        |
| <b>BAB V PEMBAHASAN DAN HASIL PENELITIAN.....</b>                                       | <b>111</b> |
| 5.1 Perbandingan Kinerja Beton RCA dan Beton Konvensional                               | 111        |
| 5.2 Pengaruh Proporsi RCA terhadap Kuat Tekan, Lentur,<br>dan Tarik.....                | 113        |
| 5.2.1 Pengaruh Proporsi RCA terhadap Kuat Tekan .....                                   | 118        |
| 5.2.2 Pengaruh Proporsi RCA terhadap Kuat Lentur .....                                  | 122        |
| 5.2.3 Pengaruh Proporsi RCA terhadap Kuat Tarik Belah...                                | 126        |
| 5.2.4 Analisis Hasil dan Implikasi Penggunaan RCA.....                                  | 128        |
| 5.3 Keterkaitan Struktur Mikro RCA dengan Kinerja Beton .....                           | 130        |
| 5.4 Perbandingan Biaya Beton RCA dan Beton Normal.....                                  | 133        |
| 5.5 Evaluasi Keberlanjutan Penggunaan RCA .....                                         | 138        |
| 5.5.1 Dampak Lingkungan, Ekonomi dan Sosial .....                                       | 139        |
| 5.6 Tantangan dan Solusi dalam Implementasi RCA di<br>Industri Konstruksi.....          | 140        |
| <b>BAB VI KESIMPULAN, IMPLIKASI, DAN REKOMENDASI .....</b>                              | <b>142</b> |
| 6.1 Kesimpulan .....                                                                    | 142        |
| 6.2 Implikasi Penelitian.....                                                           | 144        |
| 6.3 Rekomendasi.....                                                                    | 145        |
| 6.4 Penutup.....                                                                        | 146        |
| <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>                                                             | <b>147</b> |
| <b>LAMPIRAN.....</b>                                                                    | <b>151</b> |

## DAFTAR GAMBAR

|             |                                                                                                                         |    |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 2.1  | Benda Uji Beton Poles Dicampur dengan Semen Putih dan RCA Kasar Saja.....                                               | 14 |
| Gambar 2.2  | Konsep Desain Campuran .....                                                                                            | 14 |
| Gambar 2.3  | Fraksi Terbagi Magnetik (M1) (125-150, 150-212 dan 212-250 $\mu\text{m}$ ) (a) dan Semen serta Konten Agregat (b) ..... | 16 |
| Gambar 2.4  | (a) Pengaturan Uji Lentur. (b) Peralatan Pelat Panas untuk Evaluasi Konduktivitas Termal.....                           | 17 |
| Gambar 2.5  | Posisi Penelitian.....                                                                                                  | 32 |
| Gambar 3.1  | Lokasi Penelitian Jalan Tol Solo – Kertosono .....                                                                      | 33 |
| Gambar 3.2  | Alur Skema Sistem Daur Ulang Beton .....                                                                                | 34 |
| Gambar 3.3  | Diagram Alir Penelitian.....                                                                                            | 41 |
| Gambar 4.1  | Kurva Gradasi Agregat Halus terhadap Batas.....                                                                         | 43 |
| Gambar 4.2  | Kurva Gradasi RCA terhadap Batas SNI 03-2834-2000.....                                                                  | 44 |
| Gambar 4.3  | Kurva Gradasi Kombinasi RCA 40%, 50%, dan 60% terhadap Batas SNI 03-2834-2000 .....                                     | 46 |
| Gambar 4.4  | Pembuatan Sampel Uji Kuat Tekan .....                                                                                   | 54 |
| Gambar 4.5  | Sampel Uji Kuat Tekan .....                                                                                             | 54 |
| Gambar 4.6  | Pengujian Kuat Tekan Beton.....                                                                                         | 55 |
| Gambar 4.7  | Pembuatan Sampel Uji Kuat Lentur.....                                                                                   | 63 |
| Gambar 4.8  | Sampel Uji Kuat Lentur.....                                                                                             | 64 |
| Gambar 4.9  | Pengujian Kuat Lentur Beton .....                                                                                       | 64 |
| Gambar 4.10 | Sampel Pengujian Kuat Tarik.....                                                                                        | 77 |
| Gambar 4.11 | Pengujian Kuat Tarik.....                                                                                               | 77 |
| Gambar 4.12 | Grafik Perbandingan Pengujian Kuat Tarik Belah Beton RCA 40%, 50%, dan 60% .....                                        | 79 |
| Gambar 4.13 | Hasil Pengujian SEM Sampel 1 RCA Gedung 45X, 250X, 2500X, dan 4000X.....                                                | 81 |
| Gambar 4.14 | Hasil Pengujian EDX PURE Sampel 1 RCA Gedung .....                                                                      | 83 |

|             |                                                                            |     |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gambar 4.15 | Hasil Pengujian EDX OXIDE Sampel 1 RCA Gedung .....                        | 84  |
| Gambar 4.16 | Hasil Pengujian SEM Sampel 2 RCA Gedung 45X, 250X, 2500X, dan 4000X.....   | 85  |
| Gambar 4.17 | Hasil Pengujian EDX PURE Sampel 2 RCA Gedung .....                         | 87  |
| Gambar 4.18 | Hasil Pengujian EDX OXIDE Sampel 2 RCA Gedung .....                        | 88  |
| Gambar 4.19 | Hasil Pengujian SEM Sampel 1 RCA Rigid 45X, 250X, 2500X, dan 4000X .....   | 91  |
| Gambar 4.20 | Hasil Pengujian EDX PURE Sampel 1 RCA <i>Rigid</i> .....                   | 92  |
| Gambar 4.21 | Hasil Pengujian EDX OXIDE Sampel 1 RCA <i>Rigid</i> .....                  | 93  |
| Gambar 4.22 | Hasil Pengujian SEM Sampel 2 RCA Rigid 45X, 250X, 2500X, dan 4000X .....   | 95  |
| Gambar 4.23 | Hasil Pengujian EDX PURE Sampel 2 RCA <i>Rigid</i> .....                   | 96  |
| Gambar 4.24 | Hasil Pengujian EDX PURE Sampel 2 RCA <i>Rigid</i> .....                   | 97  |
| Gambar 4.25 | Grafik Perbandingan Pengujian Kuat Tekan Beton RCA 40%, 50%, dan 60%.....  | 103 |
| Gambar 4.26 | Grafik Perbandingan Pengujian Kuat Lentur Beton RCA 40%, 50%, dan 60%..... | 108 |
| Gambar 5.1  | Grafik Hubungan RCA dengan Semen .....                                     | 114 |
| Gambar 5.2  | Grafik Hubungan RCA dengan Air.....                                        | 115 |
| Gambar 5.3  | Grafik Hubungan RCA dengan Admixture.....                                  | 116 |
| Gambar 5.4  | Grafik Hubungan RCA dengan Fine Agg .....                                  | 117 |
| Gambar 5.5  | Hubungan RCA dengan Kuat Tekan Umur 3 Hari .....                           | 119 |
| Gambar 5.6  | Hubungan RCA dengan Kuat Tekan Umur 7 Hari .....                           | 120 |
| Gambar 5.7  | Hubungan RCA dengan Kuat Tekan Umur 28 Hari .....                          | 121 |
| Gambar 5.8  | Hubungan RCA dengan Kuat Lentur Umur 3 Hari.....                           | 123 |
| Gambar 5.9  | Hubungan RCA dengan Kuat Lentur Umur 7 Hari.....                           | 124 |
| Gambar 5.10 | Hubungan RCA dengan Kuat Lentur Umur 28 Hari.....                          | 125 |
| Gambar 5.11 | Hubungan RCA dengan Kuat Tarik Belah Umur 28 Hari .....                    | 127 |
| Gambar 5.12 | Persen Rata-Rata Komposisi Kimia RCA Gedung dan RCA <i>Rigid</i> .....     | 131 |

## DAFTAR TABEL

|            |                                                                        |    |
|------------|------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 2.1  | Campuran Beton Ditentukan Menurut Desain Komposit Orde Kedua.....      | 15 |
| Tabel 2. 2 | Fitur Mekanik dan Termal pada Campuran RX Terpilih.....                | 17 |
| Tabel 2.3  | Penelitian Terdahulu .....                                             | 19 |
| Tabel 2.4  | Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Penelitian Ini .....             | 30 |
| Tabel 3.1  | Perkiraan Perbandingan Campuran (untuk setiap 1 m <sup>3</sup> ) ..... | 39 |
| Tabel 3.2  | Variasi Campuran.....                                                  | 39 |
| Tabel 4.1  | Data Gradasi Agregat Halus (Pasir Merapi) .....                        | 42 |
| Tabel 4.2  | Data Gradasi Agregat Kasar (RCA).....                                  | 44 |
| Tabel 4.3  | Gradasi Kombinasi RCA 40% .....                                        | 45 |
| Tabel 4.4  | Gradasi Kombinasi RCA 50% .....                                        | 46 |
| Tabel 4.5  | Gradasi Kombinasi RCA 50% .....                                        | 46 |
| Tabel 4.6  | Penyesuaian Proporsi RCA .....                                         | 48 |
| Tabel 4.7  | Data Material dan <i>Trial Mix</i> .....                               | 49 |
| Tabel 4.8  | <i>Trial Mix</i> Beton dengan RCA 40%.....                             | 50 |
| Tabel 4.9  | <i>Trial Mix</i> Beton dengan RCA 50%.....                             | 52 |
| Tabel 4.10 | <i>Trial Mix</i> Beton dengan RCA 60%.....                             | 53 |
| Tabel 4.11 | Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton dengan RCA 40% pada Umur 3 Hari.....  | 55 |
| Tabel 4.12 | Hasil Uji Kuat Tekan Beton dengan RCA 40% pada Umur 7 Hari....         | 56 |
| Tabel 4.13 | Hasil Uji Kuat Tekan Beton dengan RCA 40% pada Umur 28 Hari..          | 57 |
| Tabel 4.14 | Hasil Uji Kuat Tekan Beton dengan RCA 50% pada Umur 3 Hari....         | 58 |
| Tabel 4.15 | Hasil Uji Kuat Tekan Beton dengan RCA 50% pada Umur 7 Hari...          | 59 |
| Tabel 4.16 | Hasil Uji Kuat Tekan Beton dengan RCA 50% pada Umur 28 Hari..          | 60 |
| Tabel 4.17 | Hasil Uji Kuat Tekan Beton dengan RCA 60% pada Umur 3 Hari....         | 61 |
| Tabel 4.18 | Hasil Uji Kuat Tekan Beton dengan RCA 60% pada Umur 7 Hari....         | 62 |
| Tabel 4.19 | Hasil Uji Kuat Tekan Beton dengan RCA 60% pada Umur 28 Hari..          | 62 |
| Tabel 4.20 | Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton dengan Campuran 40% RCA pada         |    |

|                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Umur 3 Hari .....                                                                                                       | 65  |
| Tabel 4.21 Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton dengan Campuran 40% RCA pada Umur 7 Hari .....                             | 66  |
| Tabel 4.22 Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton dengan Campuran 40% RCA pada Umur 28 Hari .....                            | 68  |
| Tabel 4.23 Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton dengan Campuran 50% RCA pada Umur 3 Hari .....                             | 69  |
| Tabel 4.24 Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton dengan Campuran 50% RCA pada Umur 7 Hari .....                             | 70  |
| Tabel 4.25 Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton dengan Campuran 50% RCA pada Umur 28 Hari .....                            | 71  |
| Tabel 4.26 Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton dengan Campuran 60% RCA pada Umur 3 Hari .....                             | 73  |
| Tabel 4.27 Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton dengan Campuran 60% RCA pada Umur 7 Hari .....                             | 74  |
| Tabel 4.28 Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton dengan Campuran 60% RCA pada Umur 28 Hari .....                            | 76  |
| Tabel 4.29 Hasil Pengujian Kuat Tarik Beton dengan Campuran RCA Sebesar 40%, 50%, Dan 60% .....                         | 78  |
| Tabel 4.30 Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton dengan Campuran Limbah <i>Rigid Pavement</i> Sebesar 40% ..... | 99  |
| Tabel 4.31 Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton dengan Campuran Limbah <i>Rigid Pavement</i> Sebesar 50% ..... | 100 |
| Tabel 4.32 Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton dengan Campuran Limbah <i>Rigid Pavement</i> Sebesar 50% ..... | 101 |
| Tabel 4.33 Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton 40% RCA .....                                                 | 104 |
| Tabel 4.34 Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton 50% RCA .....                                                 | 105 |
| Tabel 4.35 Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton 60% RCA .....                                                 | 107 |
| Tabel 4.36 Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton RCA 40%, 50%, dan 60% .....                              | 109 |
| Tabel 4.37 Rekapitulasi Hasil Pengujian SEM-EDX RCA Gedung dan <i>Rigid</i> ..                                          | 110 |
| Tabel 5.1 Hubungan RCA dengan Semen .....                                                                               | 114 |

|            |                                                         |     |
|------------|---------------------------------------------------------|-----|
| Tabel 5.2  | Hubungan RCA dengan Air .....                           | 115 |
| Tabel 5.3  | Hubungan RCA dengan Admixture .....                     | 116 |
| Tabel 5.4  | Hubungan RCA dengan Fine Agg .....                      | 117 |
| Tabel 5.5  | Hubungan RCA dengan Kuat Tekan Umur 3 Hari .....        | 119 |
| Tabel 5.6  | Hubungan RCA dengan Kuat Tekan Umur 7 Hari .....        | 120 |
| Tabel 5.7  | Hubungan RCA dengan Kuat Tekan Umur 28 Hari .....       | 121 |
| Tabel 5.8  | Hubungan RCA dengan Kuat Lentur Umur 3 Hari.....        | 123 |
| Tabel 5.9  | Hubungan RCA dengan Kuat Lentur Umur 7 Hari.....        | 124 |
| Tabel 5.10 | Hubungan RCA dengan Kuat Lentur Umur 28 Hari.....       | 125 |
| Tabel 5.11 | Hubungan RCA dengan Kuat Tarik Belah Umur 28 Hari ..... | 127 |
| Tabel 5.12 | Persen Rata-Rata Komposisi Kimia RCA Gedung .....       | 131 |
| Tabel 5.13 | Harga Beton Normal FS 45 .....                          | 134 |
| Tabel 5.14 | Harga Beton RCA 40% FS 45.....                          | 134 |
| Tabel 5.15 | Harga Beton RCA 50% FS 45.....                          | 135 |
| Tabel 5.16 | Harga Beton RCA 60% FS 45.....                          | 135 |



## DAFTAR LAMPIRAN

|             |                                                            |     |
|-------------|------------------------------------------------------------|-----|
| Lampiran 1  | Job Mix Formula Pengujian Kuat Tekan dan Kuat Lentur ..... | 151 |
| Lampiran 2  | Pengujian Kuat Tekan Tiga Hari.....                        | 152 |
| Lampiran 3  | Pengujian Kuat Tekan Tujuh Hari.....                       | 153 |
| Lampiran 4  | Pengujian Kuat Tekan Dua Pulu Delapan Hari.....            | 154 |
| Lampiran 5  | Rekapitulasi Pengujian Kuat Tekan .....                    | 155 |
| Lampiran 6  | Pengujian Kuat Lentur Tiga Hari .....                      | 156 |
| Lampiran 7  | Pengujian Kuat Lentur Tujuh Hari .....                     | 157 |
| Lampiran 8  | Pengujian Kuat Lentur Dua Pulu Delapan Hari .....          | 158 |
| Lampiran 9  | Rekapitulasi Pengujian Kuat Lentur.....                    | 159 |
| Lampiran 10 | Job Mix Formula Pengujian Tarik Belah .....                | 160 |
| Lampiran 11 | Hasil Pengujian Tarik Belah.....                           | 161 |
| Lampiran 12 | Hasil Pengujian EDX OXIDE Gedung 1 .....                   | 162 |
| Lampiran 13 | Hasil Pengujian EDX PURE Gedung 1.....                     | 163 |
| Lampiran 14 | Hasil Pengujian SEM Gedung 1 .....                         | 164 |
| Lampiran 15 | Hasil Pengujian EDX OXIDE Gedung 2 .....                   | 167 |
| Lampiran 16 | Hasil Pengujian EDX PURE Gedung 2 .....                    | 168 |
| Lampiran 17 | Hasil Pengujian SEM Gedung 2.....                          | 169 |
| Lampiran 18 | Hasil Pengujian EDX OXIDE Rigid 1 .....                    | 171 |
| Lampiran 19 | Hasil Pengujian EDX PURE Rigid 1 .....                     | 172 |
| Lampiran 20 | Hasil Pengujian SEM Rigid 1.....                           | 173 |
| Lampiran 21 | Hasil Pengujian EDX OXIDE Rigid 2 .....                    | 175 |
| Lampiran 22 | Hasil Pengujian EDX PURE Rigid 2 .....                     | 176 |
| Lampiran 23 | Hasil Pengujian SEM Rigid 2.....                           | 177 |
| Lampiran 24 | Harga Beton Normal FS 45 .....                             | 179 |
| Lampiran 25 | Analisis Harga Beton Normal FS 45 .....                    | 180 |
| Lampiran 26 | Harga Beton RCA 40 % FS 45.....                            | 181 |
| Lampiran 27 | Harga Beton RCA 50 % FS 45.....                            | 182 |
| Lampiran 28 | Harga Beton RCA 50 % FS 45.....                            | 183 |
| Lampiran 29 | Analisis Harga Beton RCA FS 45 .....                       | 184 |

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Industri konstruksi menghasilkan jumlah limbah yang signifikan setiap tahunnya, termasuk limbah dari pembongkaran *rigid pavement* atau jalan beton. Limbah ini sering kali berakhir di tempat pembuangan sampah, menyebabkan masalah lingkungan dan tantangan dalam pengelolaan limbah. Produksi beton konvensional memerlukan penggunaan bahan baku dalam jumlah besar, seperti batu pecah, pasir, dan semen. Penggunaan material baru ini dapat menguras sumber daya alam yang berharga dan meningkatkan jejak karbon industri konstruksi. Limbah konstruksi, termasuk limbah *rigid pavement*, memiliki potensi untuk dimanfaatkan kembali dalam pembuatan campuran beton. Dengan pendekatan daur ulang, limbah tersebut dapat diubah menjadi sumber daya yang berharga bagi industri konstruksi (Ramadevi & Chitra, 2017).

Semakin banyak kesadaran akan pentingnya praktik konstruksi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Pengembangan model campuran beton dengan daur ulang limbah *rigid pavement* dapat menjadi langkah positif dalam mewujudkan praktik konstruksi yang lebih berkelanjutan. Pengelolaan limbah konstruksi yang tidak tepat dapat menciptakan dampak negatif terhadap lingkungan, seperti penumpukan limbah dan degradasi lahan (Sree, 2021).

Berdasarkan latar belakang ini, penelitian dan pengembangan dalam model campuran beton dengan daur ulang limbah *rigid pavement* menjadi semakin penting untuk mengatasi tantangan lingkungan dan kelangkaan sumber daya dalam industri konstruksi. Di seluruh dunia, kawasan perkotaan menghasilkan sekitar 1,3 miliar ton sampah padat per tahun. Limbah beton dikumpulkan dari tempat pembuangan sampah di kampus perguruan tinggi, dipisahkan, dihancurkan dengan *jaw crusher*, diayak, dicuci, dan digunakan untuk beton dengan proporsi campuran K-25, sebagai pengganti agregat alam dengan proporsi 0%, 30%, 60%, dan 100%. Pada pengujian, ditemukan bahwa kuat tekan meningkat dan kuat tarik belah serta kuat lentur yang

diamati hampir sama dengan campuran beton normal. Oleh karena itu, penggunaan agregat beton daur ulang menunjukkan kinerja yang dapat diterima sehubungan dengan sifat mekanik. Agregat daur ulang yang diperoleh dari limbah beton lebih bersudut dan memiliki daya serap serta berat jenis yang lebih tinggi dibandingkan agregat kasar alami, sehingga menghasilkan peningkatan kekuatan dan daya dukung beban. Namun, penelitian lebih lanjut untuk mengetahui pengaruhnya terhadap daya tahan dan peningkatan kemampuan kerja masih diperlukan (Ramadevi & Chitra, 2017). Penelitian ini bertujuan untuk melakukan eksperimen di mana agregat daur ulang dihasilkan dari limbah *C&D (Construction and Demolition)*, sehingga membuka jalan bagi pengelolaan puing-puing beton yang lebih efektif.

Beton merupakan campuran bahan pengikat—biasanya semen, agregat, dan air. Agregat umumnya dianggap bahan pengisi inert karena tidak terlibat dalam reaksi kimia serius dalam prosesnya, yang menyumbang 60 hingga 80 persen volume dan 70 hingga 85 persen berat beton. Meskipun agregat dianggap sebagai bahan pengisi *inert*, agregat merupakan komponen penting yang menentukan sifat termal dan elastis beton, serta stabilitas dimensinya. Agregat diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu agregat kasar dan halus (Sree, 2021).

Selain itu, eksploitasi sumber daya alam yang berlebihan oleh industri konstruksi telah menyebabkan penipisan sumber daya alam. Oleh karena itu, industri konstruksi terpaksa mencari pengganti bahan baku konvensional yang ekonomis dan berkelanjutan, seperti pasir sungai, agregat alam, dan semen. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa limbah seperti ban karet bekas, silika asap, kaca, terak, abu kolam, abu dasar, metakaolin, batu, dan lainnya, dapat secara efektif menggantikan sebagian atau seluruh bahan konvensional yang digunakan untuk beton (Rana *et al.*, 2016).

Berbagai penelitian telah menyelidiki pengaruh agregat daur ulang yang berasal dari limbah beton terhadap performa beton struktural yang diproduksi. Dengan memanfaatkan agregat daur ulang yang diperoleh dari puing-puing konstruksi dan pembongkaran, kita dapat menghemat sumber daya agregat alam, mengurangi kebutuhan akan ruang di tempat pembuangan akhir (TPA), dan mendorong pemanfaatan bahan bangunan yang lebih berkelanjutan (Shaaban *et al.*,

2023). Namun, dibandingkan dengan agregat alami, mortar semen yang terikat pada agregat beton daur ulang menunjukkan porositas yang lebih tinggi, kapasitas penyerapan air yang lebih besar, dan kekuatan yang lebih rendah. Akibatnya, karakteristik mekanik dan ketahanan beton yang baru dituang dan dikeraskan, yang terbuat dari agregat beton daur ulang, dapat terkena dampak negatif. Penelitian ini menyajikan penelitian eksperimental yang komprehensif untuk menguji sifat mekanik sisa dan ketahanan terhadap serangan asam pada campuran beton agregat daur ulang (RAC) baik untuk beton normal maupun mutu tinggi, dengan menggunakan model pengepakan kompresibel. Agregat daur ulang digunakan sebagai agregat kasar dan halus. Dua belas campuran dirancang dan dicetak, dan kinerjanya dievaluasi berdasarkan berbagai parameter kekuatan (kekuatan tekan, kekuatan tarik belah, dan kekuatan lentur), serta sifat ketahanan terhadap serangan asam (Shaaban *et al.*, 2023).

Saat ini, bangunan ramah lingkungan menjadi isu krusial dalam industri konstruksi. Langkah menuju beton berkelanjutan melibatkan upaya untuk meminimalkan dampak lingkungan dari produksi beton, sekaligus mengurangi emisi CO<sub>2</sub> global. Secara global, industri beton mengkonsumsi sumber daya alam dalam jumlah besar yang tidak mencukupi untuk memenuhi permintaan yang terus meningkat. Pada saat yang sama, sejumlah besar bangunan tua dan bangunan lainnya telah mencapai akhir masa pakainya dan sedang dibongkar, menghasilkan beton yang hancur. Sebagian dari limbah beton ini digunakan sebagai bahan timbunan, dan sebagian besar lainnya dibuang ke tempat pembuangan sampah. Mendaur ulang beton dengan menggunakannya sebagai pengganti agregat baru dalam beton dapat mengurangi limbah beton dan menghemat sumber daya alam (Fanijo *et al.*, 2023).

Beton yang sudah dibongkar dapat digunakan sebagai agregat beton daur ulang (RCA) untuk keperluan konstruksi. Dalam sebuah penelitian, dibandingkan kuat tekan beton yang terbuat dari 100% agregat kasar daur ulang dengan beton yang menggunakan 100% agregat kasar alami. Nilai kuat tekan beton agregat alami (NAC) dijadikan sebagai kontrol. Sebanyak 24 silinder beton (150 x 300 mm) masing-masing untuk NAC dan RCA dicor, sehingga total menjadi 48 silinder beton. Tiga silinder untuk setiap kategori disembuhkan masing-masing selama 3

hari, 7 hari, 21 hari, dan 28 hari. Rasio campuran beton 1:2:4 dan 1:1.5:3 digunakan pada kedua kasus. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat tekan RAC lebih tinggi dibandingkan NAC pada usia awal sebelum hari ke-12. Setelah hari ke-12, kuat tekan NAC lebih tinggi dibandingkan RAC pada usia lanjut. Ini menunjukkan bahwa RAC lebih cocok untuk beton *quick set* yang memerlukan kekuatan awal (Ogar, 2017).

Beton berkelanjutan semakin populer sebagai hasil penelitian terhadap bahan limbah, seperti agregat daur ulang (RA). Strategi ini tidak hanya melindungi lingkungan, tetapi juga memenuhi permintaan material beton. Dengan menggunakan pendekatan kecerdasan buatan (AI) tingkat lanjut, penelitian ini mengantisipasi kekuatan tarik belah (STS) dari sampel beton yang menggunakan RA. Tiga teknik pembelajaran mesin—*artificial neural networks* (ANN), *decision trees* (DT), dan *random forests* (RF)—diperiksa terhadap database yang ditentukan. Hasilnya menunjukkan bahwa model RF memiliki tingkat presisi yang tinggi dibandingkan dengan model DT dan ANN dalam memprediksi STS beton berbasis RA. Tingginya nilai koefisien determinasi dan rendahnya nilai *mean absolute error* (MAE), *mean square error* (MSE), dan *root mean square error* (RMSE) memberikan bukti signifikan atas keakuratan dan presisi model RF. Selain itu, uji statistik dan teknik validasi silang *k-fold* digunakan untuk memvalidasi model ini. Pentingnya parameter masukan dan tingkat kontribusinya juga diselidiki menggunakan analisis sensitivitas dan analisis SHAP (Amin, 2022).

Hasilnya menunjukkan bahwa dampak lingkungan secara keseluruhan dapat dikurangi hingga 5% ketika menggunakan partikel beton daur ulang yang sangat halus sebagai SCM dalam produk berbasis semen melingkar. Ini juga dapat mengurangi emisi gas rumah kaca sebesar 41 kg CO<sub>2</sub> eq./ton semen (sekitar 80 juta ton CO<sub>2</sub> eq./tahun). Dampak lingkungan dapat dikurangi lebih lanjut dengan penggunaan HAS yang mengandalkan bahan bakar nabati (*biofuel*) dibandingkan bahan bakar fosil (Moreno-Juez *et al.*, 2020).

Karena terbatasnya sumber agregat alami, agregat beton daur ulang dapat digunakan sebagai bahan yang sesuai dan ekonomis untuk produksi beton daur ulang. Penggunaan agregat daur ulang pada beton dapat merusak beberapa sifat mekanik beton. Desain campuran optimum yang dibuat dengan agregat daur ulang

perlu mempertimbangkan aspek lingkungan, ekonomi, serta sifat segar dan pengerasan beton. Pada tahap pertama penelitian ini, campuran beton daur ulang dengan berbagai tingkat penggantian agregat halus dan agregat kasar diuji sebagai pengganti agregat alami. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggantian agregat halus hingga 30% tidak memberikan pengaruh negatif yang signifikan terhadap sifat segar dan pengerasan beton, seperti berat jenis segar, kemampuan kerja, dan kuat tekan. Oleh karena itu, desain campuran ini dapat dipilih sebagai desain campuran daur ulang yang optimal. Untuk memperluas penerapan beton daur ulang pada struktur yang memerlukan kekuatan tarik dan lentur, pada tahap kedua dilakukan pengujian terhadap pengaruh penambahan serat polipropilena dan baja terhadap kekuatan tarik dan lentur beton daur ulang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan ijuk sebagai pengganti sebagian semen tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat segar beton, namun efektif meningkatkan kuat tarik dan lentur beton daur ulang, serta meningkatkan ketahanan terhadap retak dan perilaku getas beton saat terjadi keruntuhan (Bidabadi *et al.*, 2020).

Makalah R.S Paranhos dan kawan-kawan bertujuan untuk mengusulkan platform pemilahan guna meningkatkan kualitas agregat daur ulang dengan menggunakan teknik pemrosesan mineral tambahan dan metode pemilahan tambahan. Berbagai teknik, seperti *jig*, hidrosiklon, dan pemilahan berbasis sensor, telah dianggap berhasil dalam menyortir agregat daur ulang yang berkualitas. Proses baru ini disajikan berdasarkan platform daur ulang yang sudah ada, dengan tambahan pemisahan beton daur ulang. Peningkatan kepadatan dan pengurangan penyerapan air dipelajari, serta hubungan antara kadar air dan kepadatan agregat dianalisis pada tiga tingkat kualitas agregat daur ulang (Paranhos *et al.*, 2016).

Penggunaan bahan lokal dan bahan buangan dalam pembuatan beton telah banyak dilakukan, namun masih memerlukan kajian lebih lanjut mengenai kelayakan bahan tersebut. Di Indonesia, banyak bahan lokal dan buangan yang dapat digunakan dalam campuran beton semen, seperti *slag* dan abu terbang (*fly-ash*). Penelitian juga telah dilakukan terhadap limbah katalis bekas dari pengolahan minyak di Balongan, Indramayu, yang berpotensi meningkatkan performa beton sebagai *admixture* mineral. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan 10% katalis bekas dan 10% *filler slag* dalam campuran beton semen standar setelah umur

28 hari, belum memenuhi persyaratan kuat tekan beton semen untuk perkerasan jalan. Namun, dengan penambahan 20% katalis bekas dan 20% *filler slag*, kuat tekan beton meningkat menjadi lebih dari 30 MPa. Penggunaan *superplasticizer* sebanyak 1,5% justru menurunkan kuat tekan menjadi kurang dari 30 MPa (U.P. Jalan, 2005).

Beton adalah salah satu material pilihan dalam konstruksi karena memiliki banyak keunggulan dibanding bahan-bahan lain. Dengan meningkatnya penggunaan beton, kebutuhan akan material penyusunnya, termasuk agregat, juga meningkat. Saat ini, penggunaan beton bekas sebagai bahan penyusun beton baru mulai diperhitungkan untuk mendukung konsep pembangunan yang ramah lingkungan. Penggunaan beton bekas sebagai pengganti agregat kasar lebih dikenal sebagai agregat daur ulang. Sebuah penelitian dilakukan untuk menentukan kuat tekan yang dihasilkan dari penggunaan beton bekas sebagai pengganti agregat kasar. Pengujian kuat tekan dilakukan pada 30 benda uji dengan variasi perendaman selama 7 dan 14 hari. Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan beton bekas mampu mencapai kuat tekan yang direncanakan, dengan nilai optimal mencapai 24,41 MPa pada penambahan 10% beton bekas (Margareth, 2017).

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang dikemukakan, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana memanfaatkan limbah *rigid pavement* secara efektif dalam pembuatan campuran beton?
2. Apakah karakteristik fisik dan mekanik campuran beton dengan limbah *rigid pavement* dapat memenuhi standar kualitas konstruksi?
3. Bagaimana pengaruh penggunaan limbah *rigid pavement* terhadap biaya dan keberlanjutan struktur beton dalam proyek konstruksi, dengan fokus pada pengurangan dampak lingkungan dan pengelolaan limbah?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk memodelkan campuran beton dengan menggunakan beton limbah *rigid pavement*. Secara khusus penelitian ini

berfokus pada:

1. Menciptakan model campuran beton yang memanfaatkan limbah *rigid pavement* sebagai bahan baku utama.
2. Menilai karakteristik fisik, mekanik, dan keberlanjutan dari beton yang diproduksi menggunakan limbah *rigid pavement*.
3. Menganalisis biaya penggunaan beton daur ulang untuk mendukung keberlanjutan dalam proyek konstruksi.

#### 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah:

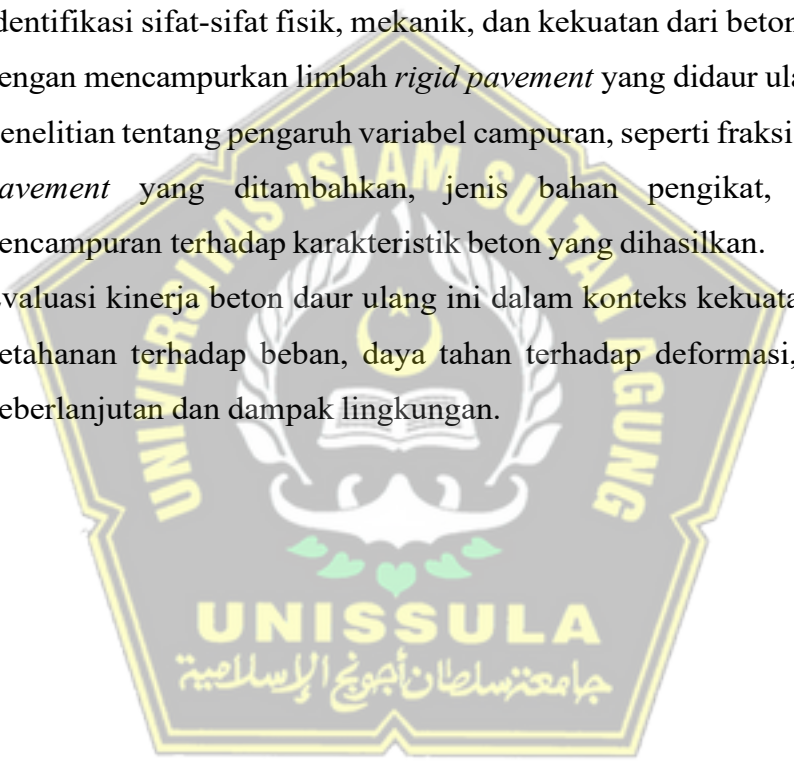
1. Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan model campuran beton yang inovatif dengan memanfaatkan limbah *rigid pavement* sebagai bahan baku utama. Model campuran ini dapat digunakan sebagai referensi untuk mengembangkan campuran beton yang lebih efisien dan ramah lingkungan dalam industri konstruksi.
2. Penelitian ini memberikan manfaat dalam mengevaluasi sifat fisik, mekanik, dan keberlanjutan beton yang dihasilkan dari limbah *rigid pavement*. Hasil evaluasi ini dapat memberikan informasi penting mengenai daya tahan, kekuatan, dan ketahanan beton terhadap faktor lingkungan, sehingga memungkinkan pengembangan beton dengan performa yang lebih baik dan berkelanjutan.
3. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi penggunaan beton daur ulang dalam proyek konstruksi dan infrastruktur guna mendukung prinsip keberlanjutan. Dengan memanfaatkan limbah *rigid pavement*, penelitian ini dapat membantu mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan serta meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan dalam industri konstruksi. Mendorong pengembangan teknologi dan praktik konstruksi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan, yang pada akhirnya akan mendukung inovasi dalam industri konstruksi, serta mempercepat adopsi praktik daur ulang dalam skala yang lebih luas.

## 1.5 Batasan Masalah Penelitian

Pada penelitian ini hanya dilakukan pada ruas cakupan permasalahan.

Batasan Masalah:

1. Pembatasan masalah dalam penelitian ini terletak pada penggunaan limbah *rigid pavement* yang diambil dari tol Solo-Ngawi, yang memiliki karakteristik material spesifik. Hal ini membatasi generalisasi hasil penelitian, terutama jika diaplikasikan di luar pulau, mengingat potensi perbedaan keseragaman material yang dipengaruhi oleh kondisi lokal dan sumber material yang berbeda.
2. Identifikasi sifat-sifat fisik, mekanik, dan kekuatan dari beton yang dibuat dengan mencampurkan limbah *rigid pavement* yang didaur ulang.
3. Penelitian tentang pengaruh variabel campuran, seperti fraksi limbah *rigid pavement* yang ditambahkan, jenis bahan pengikat, dan proses pencampuran terhadap karakteristik beton yang dihasilkan.
4. Evaluasi kinerja beton daur ulang ini dalam konteks kekuatan struktural, ketahanan terhadap beban, daya tahan terhadap deformasi, serta aspek keberlanjutan dan dampak lingkungan.



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Model dan Peran Daur Ulang *Rigid Pavement* pada Beton

Untuk menyajikan model yang lebih terperinci dalam penelitian tentang campuran beton dengan daur ulang limbah *rigid pavement*, berikut adalah pendekatan yang dapat diambil untuk Model Campuran Beton dengan Daur Ulang Limbah *Rigid Pavement*. Pertama, dilakukan analisis bahan baku dengan mengidentifikasi karakteristik limbah *rigid pavement* yang akan didaur ulang, termasuk komposisi, ukuran partikel, dan sifat-sifat fisiknya. Selanjutnya, evaluasi berbagai jenis bahan tambahan dan aditif yang dapat meningkatkan kinerja campuran beton, seperti *superplastisizer*, bahan pengikat alternatif, atau serat penguat, dilakukan. Setelah itu, pengembangan formula campuran beton perlu mempertimbangkan berbagai rasio dan proporsi antara bahan baku tradisional dan limbah *rigid pavement*.

Eksperimen pencampuran kemudian dilakukan untuk menguji kinerja campuran dalam hal kekuatan tekan, kekuatan tarik, ketahanan terhadap deformasi, dan kepadatan. Uji laboratorium juga dilakukan untuk mengevaluasi sifat-sifat mekanik campuran beton, termasuk modulus elastisitas, kekuatan tekan, ketahanan terhadap retak, dan daya tahan terhadap beban siklik. Analisis menggunakan teknik seperti uji tarik, uji lentur, dan uji kompresi diperlukan untuk menilai performa mekanik campuran. Selanjutnya, simulasi numerik atau uji struktural dilakukan untuk mengevaluasi kinerja campuran beton dalam konteks aplikasi struktural yang sesungguhnya, seperti jalan raya, jembatan, atau lantai bangunan. Penilaian terhadap kekuatan struktural, kekuatan geser, ketahanan terhadap kelelahan, dan respons terhadap beban dinamis juga menjadi bagian dari proses evaluasi.

Selain itu, evaluasi dampak lingkungan dari penggunaan limbah *rigid pavement* dalam campuran beton dilakukan, termasuk analisis mengenai potensi penurunan emisi karbon dan pengurangan limbah konstruksi. Untuk lebih memahami aspek keberlanjutan, analisis siklus hidup (*life cycle analysis*) juga diperlukan untuk membandingkan aspek keberlanjutan dan ekonomi antara beton

daur ulang dan beton konvensional. Langkah berikutnya adalah pengembangan metode pencampuran dan teknologi produksi untuk memastikan kualitas dan konsistensi campuran beton daur ulang. Penelitian juga dilakukan untuk menilai efisiensi energi, pengurangan limbah, dan peningkatan produktivitas dalam produksi campuran beton.

## 2.2 Karakteristik Beton

Karakteristik beton dapat mencakup berbagai sifat fisik, mekanik, dan teknis yang menentukan kualitas dan kinerja material tersebut. Berikut adalah beberapa karakteristik utama beton:

### 2.2.1 Kekuatan Tekan (*Compressive Strength*)

Kekuatan tekan adalah kemampuan beton untuk menahan tekanan atau beban tekan, dan merupakan salah satu sifat mekanik paling penting yang digunakan dalam desain struktural. Kekuatan tekan biasanya diukur dalam satuan MPa (*Megapascal*) dan dapat bervariasi tergantung pada komposisi campuran, umur beton, serta kondisi pengeringan atau pemadatan. Berbagai penelitian tentang beton telah banyak dilakukan oleh para ahli, termasuk penelitian yang melibatkan material, komposisi, dan bahan tambahannya. Dalam penelitian ini, penulis menggunakan agregat kasar bekas dalam campuran beton dengan harapan dapat meningkatkan kuat tekan beton.

Penelitian ini menggunakan 30 benda uji yang terdiri dari 6 kondisi, dengan 3 variasi ukuran agregat kasar, yaitu agregat kasar dengan ukuran 10-20 mm, 20-30 mm, dan 30-40 mm. Tiga kondisi lainnya menggunakan agregat bekas pecahan beton. Hasil uji kuat tekan beton yang dilakukan di Laboratorium Universitas Muhammadiyah Palembang menunjukkan bahwa kuat tekan beton karakteristik untuk beton yang menggunakan agregat kasar *split* Lahat dengan ukuran 10-20 mm, 20-30 mm, dan 30-40 mm secara berturut-turut adalah 251,2 kg/cm<sup>2</sup>, 242,666 kg/cm<sup>2</sup>, dan 237,155 kg/cm<sup>2</sup>. Sedangkan untuk beton yang menggunakan agregat kasar *split* bekas dengan ukuran 10-20 mm, 20-30 mm, dan 30-40 mm, didapatkan hasil kuat tekan beton karakteristik secara berturut-turut sebesar 243,389 kg/cm<sup>2</sup>, 231,022 kg/cm<sup>2</sup>, dan 225,956 kg/cm<sup>2</sup> (Junaidi, 2015).

Selain itu, dilakukan uji  $F_s$  dengan nilai 45, menggunakan kubus beton berukuran 15 x 15 x 60 cm. Uji ini dilakukan untuk menilai stabilitas beton terhadap beban eksentrik, di mana beton diuji untuk menentukan faktor keamanannya. Faktor keamanan  $F_s$  45 menunjukkan bahwa beton memiliki kekuatan yang cukup besar untuk menahan beban hingga 45 kali lebih besar daripada beban desain yang diterimanya. Uji ini memberikan informasi tambahan terkait kekuatan dan daktilitas dari beton yang diuji, sehingga memberikan gambaran komprehensif tentang kinerja mekanik campuran beton daur ulang yang digunakan.

Dengan demikian, hasil uji kuat tekan dan uji  $F_s$  menunjukkan bahwa penggunaan agregat bekas dalam campuran beton masih menghasilkan performa yang layak secara struktural, dengan faktor keamanan yang tinggi dan kekuatan tekan yang cukup untuk memenuhi standar konstruksi.

#### **2.2.2 Kekuatan Tarik (*Tensile Strength*)**

Kekuatan tarik adalah kemampuan beton untuk menahan tegangan tarik. Secara umum, beton memiliki kekuatan tarik yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan kekuatan tekan. Meskipun beton unggul dalam menahan beban tekan, kelemahan dalam kekuatan tarik dapat menjadi titik lemah dalam desain struktural, terutama pada elemen yang mengalami gaya tarik, seperti balok atau pelat yang melentur. Karena itu, sering kali digunakan penambahan serat, seperti serat baja atau serat polipropilena, atau teknik lainnya, seperti penguatan menggunakan baja tulangan, untuk meningkatkan kekuatan tarik beton dan memperbaiki kinerja beton dalam aplikasi struktural.

#### **2.2.3 Modulus Elastisitas (*Elastic Modulus*)**

Modulus elastisitas adalah ukuran kekakuan beton, yang menggambarkan seberapa cepat beton dapat kembali ke bentuk aslinya setelah diberi beban. Modulus elastisitas merupakan parameter penting dalam analisis struktural karena mempengaruhi deformasi elastis beton ketika menerima beban. Semakin tinggi modulus elastisitas, semakin kaku beton, dan semakin kecil deformasi yang terjadi saat beban diterapkan. Nilai modulus elastisitas biasanya berkorelasi dengan kekuatan tekan beton, di mana beton dengan kekuatan tekan yang lebih tinggi

umumnya memiliki modulus elastisitas yang lebih tinggi, membuatnya lebih tahan terhadap perubahan bentuk sementara di bawah beban.

#### **2.2.4 Ketahanan Terhadap Deformasi (*Resistance to Deformation*)**

Beton harus memiliki kemampuan untuk menahan deformasi yang mungkin terjadi akibat beban yang diterapkan atau perubahan suhu. Kemampuan ini sangat penting untuk menjaga integritas struktural beton dalam berbagai kondisi operasional. Kemampuan beton untuk menahan deformasi dapat ditingkatkan dengan menggunakan agregat yang tepat, memastikan proporsi campuran yang baik, serta menerapkan teknik pencampuran yang benar. Penggunaan agregat berkualitas tinggi dapat memberikan stabilitas struktural yang lebih baik, sementara proporsi campuran yang seimbang antara semen, agregat, dan air dapat membantu mengoptimalkan kekuatan dan daya tahan beton. Teknik pencampuran yang tepat juga memastikan distribusi yang merata dari bahan penyusun, sehingga beton dapat lebih efektif menahan deformasi akibat perubahan beban atau suhu.

#### **2.2.5 Ketahanan Terhadap Air (*Resistance to Water*)**

Beton yang baik harus memiliki ketahanan terhadap penetrasi air dan perubahan dimensi yang disebabkan oleh penyerapan air. Ketahanan terhadap air sangat penting untuk mencegah berbagai jenis kerusakan yang dapat terjadi, seperti kerusakan akibat siklus pembekuan-pencairan, korosi pada baja tulangan, dan serangan bahan kimia agresif. Penyerapan air yang berlebihan oleh beton dapat mengakibatkan ekspansi, retak, dan degradasi material, yang pada akhirnya akan mengurangi umur layan struktur beton. Oleh karena itu, beton harus dirancang dengan densitas yang tepat, bahan aditif yang sesuai, serta proporsi campuran yang optimal untuk meminimalkan penyerapan air dan meningkatkan daya tahan terhadap kondisi lingkungan yang keras.

#### **2.2.6 Ketahanan Terhadap Siklus Pembekuan-Debeku (*Freeze-Thaw Resistance*)**

Beton harus mampu bertahan terhadap siklus pembekuan-debeku yang berulang tanpa mengalami kerusakan signifikan. Ketahanan ini sangat penting,

terutama di daerah dengan iklim yang mengalami perubahan suhu ekstrem. Ketika air yang terkandung dalam pori-pori beton membeku, volume air akan mengembang, yang dapat menyebabkan tekanan internal pada beton. Jika beton tidak memiliki ketahanan yang memadai, tekanan ini dapat menyebabkan retak atau kerusakan pada struktur beton seiring waktu. Penggunaan bahan aditif tertentu, seperti *air-entraining agents*, dan desain campuran beton yang tepat dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap siklus pembekuan-debeku, sehingga memperpanjang umur layan struktur beton dalam kondisi lingkungan yang sulit.

#### **2.2.7 Pengaturan Waktu (*Setting Time*)**

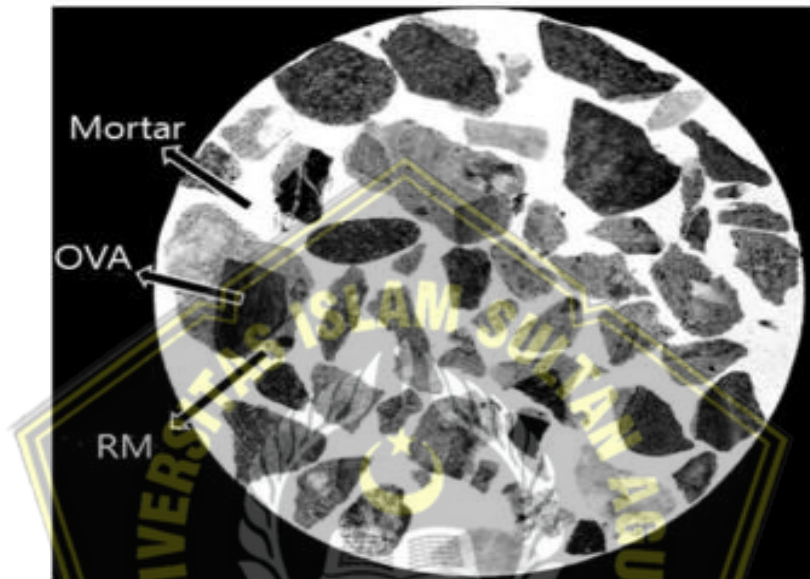
Pengaturan waktu adalah durasi yang diperlukan beton untuk mulai mengeras setelah dicampur dan dicor. Proses ini sangat penting karena mempengaruhi waktu yang tersedia untuk pengecoran, pemadatan, dan pembentukan beton sebelum beton mengeras. Waktu pengaturan dapat dikontrol dengan penambahan bahan kimia tertentu dalam campuran, seperti *retarder* untuk memperlambat pengaturan atau *accelerator* untuk mempercepatnya. Selain itu, modifikasi proporsi campuran, seperti penyesuaian jumlah air, semen, atau agregat, juga dapat mempengaruhi kecepatan pengaturan beton, sehingga memungkinkan pengendalian yang lebih baik sesuai dengan kondisi cuaca dan kebutuhan proyek konstruksi.

#### **2.2.8 Warna dan Penampilan**

Meskipun bukan termasuk karakteristik mekanik, penampilan visual beton juga sangat penting dalam aplikasi arsitektural dan dekoratif. Aspek ini meliputi elemen seperti warna, tekstur, dan hasil akhir (*finish*) permukaan yang diinginkan. Menggabungkan karakteristik estetika ini dalam desain campuran beton yang optimal merupakan kunci untuk memastikan kinerja yang baik serta keberhasilan dalam berbagai aplikasi konstruksi, terutama yang berfokus pada estetika.

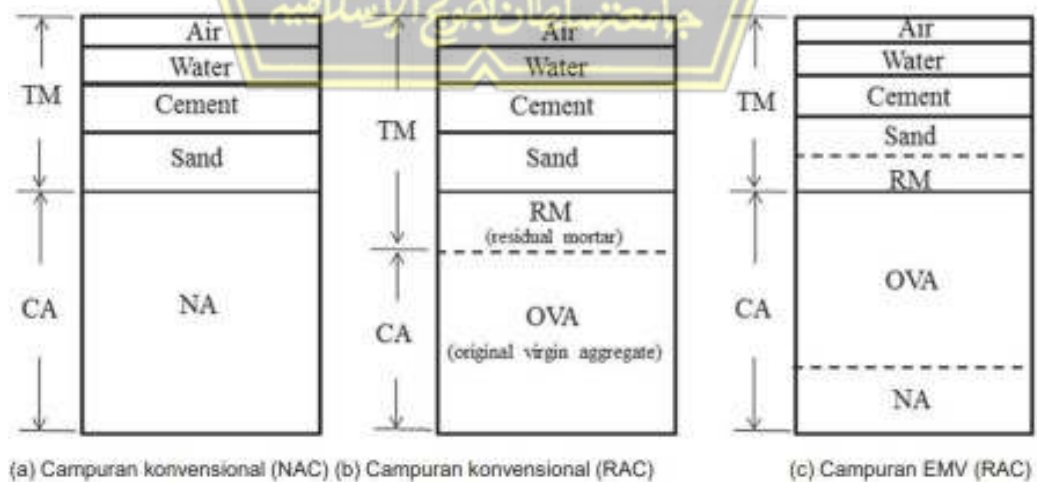
Dalam penelitian untuk menilai pengaruh metode proporsi campuran yang berbeda—metode ACI konvensional, metode *Equivalent Mortar Volume* (EMV) asli, dan metode EMV yang dimodifikasi—terhadap sifat mekanik beton menggunakan agregat daur ulang (RCA), empat seri campuran beton dibuat. Desain campuran ini menggunakan revisi metode EMV, metode EMV asli, serta desain

campuran konvensional, dengan berbagai jenis agregat RCA kasar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rasio mortar total dalam beton agregat daur ulang (RCA) pada desain campuran konvensional lebih besar dibandingkan dengan campuran beton agregat alami (NAC). Penelitian ini melibatkan pengujian benda uji beton yang dipoles dan dicampur dengan semen putih serta RCA kasar untuk menilai karakteristik visual dan mekanik (Yang & Lee, 2017).



Sumber: Yang & Lee, 2017

**Gambar 2.1 Benda Uji Beton Poles Dicampur dengan Semen Putih dan RCA Kasar Saja**



Sumber: Yang & Lee, 2017

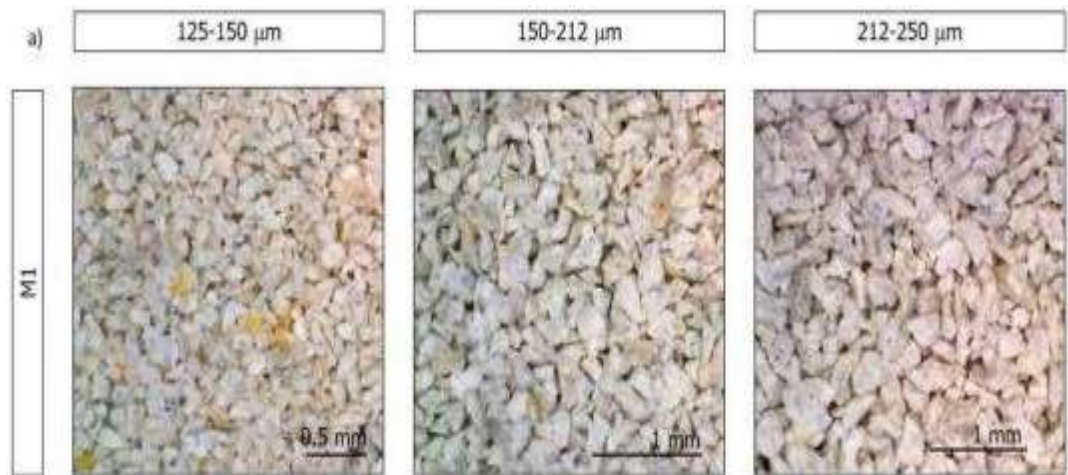
**Gambar 2.2 Konsep Desain Campuran**

**Tabel 2.1 Campuran Beton Ditentukan Menurut Desain Komposit Orde Kedua**

| Campuran beton ditentukan menurut desain komponen orde kedua |       |                   |          |              |        |                   |          |              |        |
|--------------------------------------------------------------|-------|-------------------|----------|--------------|--------|-------------------|----------|--------------|--------|
| Campuran                                                     | Bobot | Agregat Kasar (%) |          |              |        | Agregat Halus (%) |          |              |        |
|                                                              |       | Alami             | Kongkrit | Keramik Bata | Mortar | Alami             | Kongkrit | Keramik Bata | Mortar |
| 1                                                            | 0.45  | 100               | 1        | 0            | 1      | 100               |          |              | 0      |
| 2                                                            | 0.74  | 100               | 1        | 0            | 1      |                   |          | 0            | 0      |
| 3                                                            | 0.74  | 100               | 1        | 0            | 1      | 0                 | 0 0 100  | 100 0        | 0      |
| 4                                                            | 0.45  | 100               | 0        | 0            | 0      | 0                 | 50       | 50           | 0      |
| 5                                                            | 0.74  | 1                 | 1        | 0            | 100    | 1                 | 0        | 0            | 100    |
| 6                                                            | 0.45  | 1                 | 1        | 0            | 100    | 1                 | 0        | 50           | 50     |
| 7                                                            | 0.45  | 1                 | 1        | 0            | 100    | 1                 | 50       | 0            | 50     |
| 8                                                            | 0.74  | 1                 | 1        | 0            | 100    | 1                 | 25       | 33           | 33     |
| 9                                                            | 0.45  | 1                 | 1        | 100          |        | 1                 | 0        | 0            | 100    |
| 10                                                           | 0.74  | 1                 | 1        | 100          | 0      | 1                 | 0        | 50           | 50     |
| 11                                                           | 0.74  | 0                 | 0        | 100          | 0      | 0                 | 50       | 0            | 50     |
| 12                                                           | 0.45  | 1                 | 1        | 100          | 0      | 1                 | 33       | 33           | 33     |
| 13                                                           | 0.74  | 1                 | 1        | 50           | 50     | 100               | 0        | 0            | 0      |
| 14                                                           | 0.45  | 1                 | 1        | 50           | 50     | 1                 | 0        | 100          | 0      |
| 15                                                           | 0.45  | 1                 | 1        | 50           | 50     | 1                 | 100      | 0            | 0      |
| 16                                                           | 0.74  | 1                 | 1        | 50           | 50     | 1                 | 50       | 50           | 0      |
| 17                                                           | 0.45  | 1                 | 100      | 0            | 0      | 1                 | 0        | 0            | 100    |
| 18                                                           | 0.74  | 0                 | 500      | 0            | 0      | 0                 | 0        | 50           | 50     |
| 19                                                           | 0.74  | 1                 | 500      | 0            | 0      | 1                 | 50       | 0            | 50     |
| 20                                                           | 0.45  | 1                 | 500      | 0            | 0      | 1                 | 33       | 33           | 33     |
| 21                                                           | 0.74  | 1                 | 50       | 0            | 50     | 100               |          | 0            | 0      |
| 22                                                           | 0.45  | 1                 | 50       | 0            | 50     | 1                 |          | 100          | 0      |
| 23                                                           | 0.45  | 1                 | 50       | 0            | 50     | 1                 | 0 0      | 0            | 0      |
| 24                                                           | 0.74  | 1                 | 50       | 0            | 50     | 1                 | 100 50   | 50           | 0      |
| 25                                                           | 0.45  | 0                 | 50       | 50           | 0      | 100               | 0        | 0            | 0      |
| 26                                                           | 0.74  | 1                 | 50       | 50           | 0      | 1                 | 0        | 100          | 0      |
| 27                                                           | 0.74  | 1                 | 50       | 50           | 0      | 1                 | 100      | 0            | 0      |
| 28                                                           | 0.45  | 1                 | 50       | 50           | 0      | 1                 | 50       | 50           | 0      |
| 29                                                           | 0.74  | 1                 | 33       | 33           | 33     | 1                 | 0        | 0            | 100    |
| 30                                                           | 0.45  | 1                 | 33       | 33           | 33     | 1                 | 0        | 50           | 50     |
| 31                                                           | 0.45  | 1                 | 33       | 33           | 33     | 1                 | 50       | 0            | 50     |
| 32                                                           | 0.74  | 0                 | 33       | 33           | 33     | 0                 | 33       | 33           | 33     |
| 33                                                           | 0.60  | 0                 | 50       | 25           | 25     | 0                 | 33       | 33           | 33     |
| 34                                                           | 0.60  | 0                 | 0        | 50           | 50     | 0                 | 33       | 33           | 33     |
| 35                                                           | 0.60  | 1                 | 25       | 50           | 25     | 1                 | 33       | 33           | 33     |
| 36                                                           | 0.60  | 1                 | 50       | 50           | 50     | 1                 | 33       | 33           | 33     |
| 37                                                           | 0.60  | 1                 | 25       | 0            | 50     | 1                 | 33       | 33           | 33     |
| 38                                                           | 0.60  | 1                 | 50       | 25 50        | 0      | 1                 | 33       | 33           | 33     |
| 39                                                           | 0.60  | 0                 | 33       | 33           | 33     | 0                 | 50       | 25           | 25     |
| 40                                                           | 0.60  | 0                 | 33       | 33           | 33     | 0                 | 50       | 50           | 50     |
| 41                                                           | 0.60  | 0                 | 33       | 33           | 33     | 0                 | 25       | 50           | 25     |
| 42                                                           | 0.60  | 1                 | 33       | 33           | 33     | 1                 | 50       |              | 50     |
| 43                                                           | 0.60  | 1                 | 33       | 33           | 33     | 1                 | 25       | 0            | 50     |
| 44                                                           | 0.60  | 1                 | 33       | 33           | 33     | 1                 | 50       | 25           | 0      |
| 45                                                           | 0.60  | 1                 | 33       | 33           | 33     | 1                 | 33       | 50 33        | 33     |
| 46                                                           | 0.60  | 0                 | 33       | 33           | 33     | 0                 | 33       | 33           | 33     |
| 47                                                           | 0.60  | 0                 | 33       | 33           | 33     | 0                 | 33       | 33           | 33     |
| 48                                                           | 0.60  | 0                 | 33       | 33           | 33     | 0                 | 33       | 33           | 33     |
| 49                                                           | 0.45  | 25                | 25       | 25           | 25     | 25                | 25       | 25           | 25     |
| 50                                                           | 0.74  | 25                | 25       | 25           | 25     | 25                | 25       | 25           | 25     |

Sumber: Carrico, A. *et al.*, 2021

Proses pemisahan baru bertujuan untuk mendapatkan semen daur ulang dan pasir daur ulang berkualitas tinggi dari limbah beton yang telah mengeras. Campuran awal, yang mengandung pasta semen dalam jumlah terbesar (32,6% berat) dengan ukuran partikel antara 125-250  $\mu\text{m}$ , berhasil mengurangi kandungan semen hingga hanya 60% berat, yang lebih rendah dari yang diharapkan berdasarkan tingkat pemisahan yang ditemukan dalam analisis. Selanjutnya, campuran awal tersebut dibagi lagi menjadi fraksi-fraksi yang lebih sempit, yaitu 125-150  $\mu\text{m}$ , 150-212  $\mu\text{m}$ , dan 212-250  $\mu\text{m}$ . Gambar 2.3 menunjukkan bahan magnetik yang diperoleh setelah satu kali pemindaian pada setiap fraksi ukuran, serta kandungan semen dan agregat masing-masing.



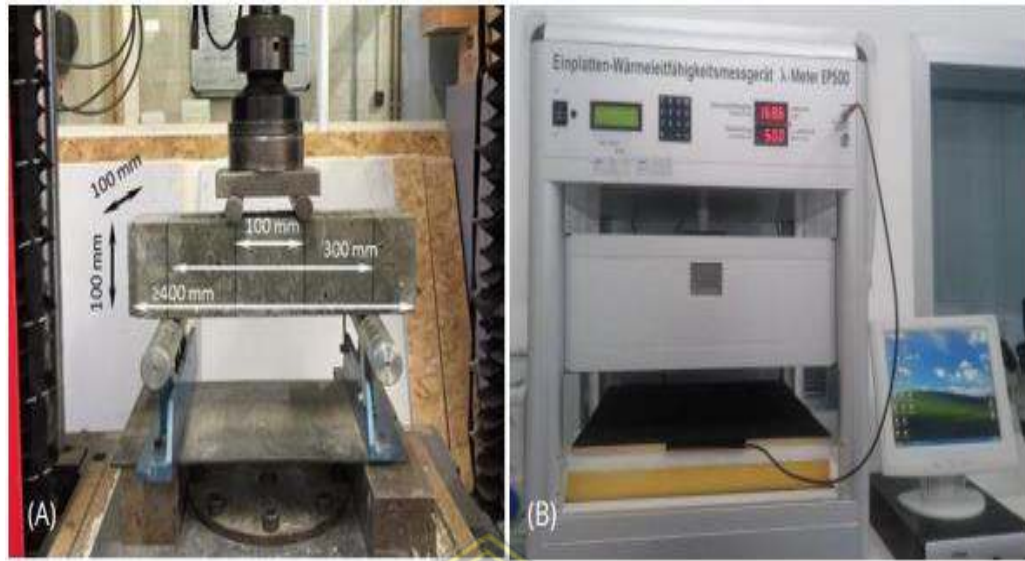
B)



Sumber: Carrico, A. *et al.*, 2021

**Gambar 2.3 Fraksi Terbagi Magnetik (M1) (125-150, 150-212 dan 212-250 µm) (a) dan Semen serta Konten Agregat (b)**

Penilaian sifat mekanik dan termal dilakukan setelah desain campuran dipilih, dengan karakterisasi komprehensif pada beton SUS-CON. Hasil uji laboratorium untuk campuran RX4 (dilakukan sesuai dengan standar yang relevan) ditampilkan pada Tabel 5. Sifat segar beton, kuat tekan, dan kepadatan beton yang mengeras dinilai memuaskan, serta data diperoleh terkait kinerja termal dari campuran tersebut. Kuat tekan, modulus Young, dan *rasio Poisson* dinilai oleh *Magnetti Building*, sebagai mitra proyek industri. (a) (b).



Sumber: Hasil Dokumentasi Penulis, 2024

**Gambar 2.4 (a) Pengaturan Uji Lentur. (b) Peralatan Pelat Panas untuk Evaluasi Konduktivitas Termal**

**Tabel 2. 2 Fitur Mekanik dan Termal pada Campuran RX Terpilih**

| FITUR MEKANIK DAN TERMAL PADA CAMPURAN RX TERPILIH |            |                    |            |
|----------------------------------------------------|------------|--------------------|------------|
| Parameter                                          | Standar    | uom                | nilai      |
| Kemerosotan                                        | EN 12350-2 | cm                 | 23         |
| Kepadatan segar                                    |            | kg/m <sup>3</sup>  | 1636       |
| Kepadatan (28 hari)                                | EN 12350-6 | kg/m <sup>3</sup>  | 1440       |
| Kuat tekan (28 hari) Lentur.                       | EN 12390-3 | MPa                | 6.8        |
| kekuatan (28 hari)                                 | EN 12390-5 | MPa                | 1.3        |
| UPV                                                | EN 12504-4 | MS                 | 1613.32    |
| Modulus muda                                       | UNI 6556   | IPK                | 1.0        |
| Rasio Poisson                                      |            | -                  | 0,05       |
| Konduktivitas termal (10°C)                        | EN 12664   | W/mK               | 0,344      |
| Kapasitas panas                                    |            | J/g·°C             | 1.275      |
| Kapasitas penyimpanan termal                       |            | kWh/m <sup>3</sup> | 7.577      |
| Koefisien ekspansi linier (70°C)                   |            | °C <sup>-1</sup>   | - 3.36E-05 |

Sumber: Vinai *et al.*, 2016

Produksi panel dan struktur tiruan serta sistem pemantauan dilakukan untuk mendemonstrasikan kelayakan produk SUS-CON dalam bangunan skala penuh dan kinerja sebenarnya dalam hal efisiensi energi. Dua maket dibuat menggunakan komponen panel; satu dengan panel SUS-CON dan yang lainnya menggunakan komponen panel berbasis semen Portland sebagai referensi. Maket ini dibangun di

ACCIONA Demo-Park, yang merupakan Fasilitas Lokakarya Pusat ACCIONA di San Sebastián de los Reyes, Madrid (Vinai *et al.*, 2016).

Makalah oleh Abdulmatin *et al.* (2019) menyelidiki sifat-sifat balok beton yang terbuat dari bahan limbah industri. Dalam penelitian ini, dua produk samping, yaitu residu kalsium karbida (CR) dan abu ampas tebu (BA), digabungkan dan digunakan sebagai pengganti semen Portland, sementara 100% agregat beton daur ulang (RCA) digunakan untuk menggantikan agregat alami dalam pembuatan perkerasan beton *interlocking*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa balok beton dengan pengikat CR dan BA tanpa modifikasi mengalami penurunan massa jenis, serta daya serap air yang lebih tinggi dibandingkan balok beton dengan bahan pengikat yang lebih halus. Meskipun demikian, kuat tekan beberapa balok beton tetap cukup tinggi untuk memenuhi Standar Industri Thailand (TIS 827), yaitu lebih dari 40,0 MPa pada umur pengujian tidak kurang dari 7 hari. Namun, ketahanan abrasi balok beton menurun karena RCA dalam campurannya, meskipun hal ini dapat diperbaiki dengan meningkatkan kehalusan bahan pengikat. Penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi CR, BA, dan RCA dalam proporsi campuran yang tepat dapat menjadi alternatif yang ramah lingkungan untuk pembuatan *paving block* beton *interlocking* (Abdulmatin, Tangchirapat, & Jaturapitakkul, 2019).

Karena beton memiliki kelemahan inheren terhadap tegangan, berbagai upaya dilakukan untuk mengatasinya dengan menambahkan serat, seperti polimer yang diperkuat serat karbon (CFRP), polimer yang diperkuat serat kaca (GFRP), serat *polipropilen* (PPF), dan serat baja tahan karat (SSF) ke dalam campuran beton. Penelitian ini melibatkan eksperimen penggunaan serat GFRP, CFRP, dan SSF, baik sendiri-sendiri maupun dalam kombinasi, untuk meningkatkan sifat mekanik beton. Selanjutnya, silinder beton dicor dan diuji untuk kuat tekan dan kuat tariknya, dengan 10% fly ash digunakan sebagai pengganti semen pada semua benda uji. Penelitian ini juga menguji rasio tulangan serat 1% dan 1,5% untuk mengetahui pengaruhnya terhadap sifat mekanik beton. Hasil pengujian menunjukkan bahwa rasio tulangan serat sebesar 1% memberikan kontribusi yang signifikan terhadap peningkatan kuat tarik, yang mencapai peningkatan sebesar 26%, sementara kuat tekan meningkat sebesar 11% dibandingkan dengan spesimen kontrol (Khoso, Raad, & Parvin, 2019).

### 2.3 Penelitian Terdahulu

Kajian terhadap penelitian-penelitian terdahulu sangat penting untuk memahami perkembangan teori dan temuan yang ada terkait topik penelitian ini. Berbagai studi sebelumnya memberikan wawasan yang berharga mengenai berbagai aspek yang telah diteliti, serta menunjukkan kesenjangan atau area yang masih perlu pengembangan lebih lanjut. Penelitian terdahulu ini memberikan dasar yang kokoh dalam merumuskan tujuan dan hipotesis penelitian, serta mendasari kerangka pikir yang akan digunakan dalam penelitian ini.

**Tabel 2.3 Penelitian Terdahulu**

|    |                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|----|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. | Judul             | <i>Comprehensive review on the use of recycled concrete aggregate for pavement construction: Properties, performance, and sustainability.</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|    | Penulis dan Tahun | Fanijo, <i>et al.</i> (2023)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|    | Jenis Pengujian   | Pengujian perkerasan (uji kinerja), evaluasi lingkungan komparatif.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|    | Hasil             | Kinerja perkerasan dilakukan dari tiga perspektif: penggunaan RCA untuk sublapisan perkerasan, lapisan kaku, dan lapisan fleksibel, serta teknik uji evaluasi terpisah. Evaluasi lingkungan komparatif mengungkapkan bahwa penyertaan RCA berkontribusi terhadap pencapaian keberlanjutan dalam meminimalkan dampak bahaya kesehatan, <b>timbulan limbah</b> , dan tekanan pada lokasi TPA dibandingkan konstruksi perkerasan konvensional.  |
| 2. | Judul             | <i>The Effects of Recycled Aggregates on Compressive Strength of Concrete.</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|    | Penulis dan Tahun | Ogar, I. F. (2017).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|    | Jenis Pengujian   | Uji tekan beton pada umur awal dan lanjut.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|    | Hasil             | Hasil penelitian menunjukkan dengan jelas bahwa kuat tekan Beton Daur Ulang (RAC) lebih tinggi dibandingkan dengan NAC pada umur awal sebelum hari ke-12. Dari grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa kuat tekan RAC lebih tinggi dibandingkan dengan NAC pada umur awal, sedangkan pada umur lanjut, kuat tekan NAC lebih tinggi dibandingkan RAC. Ini berarti bahwa RAC lebih cocok digunakan untuk beton dengan kebutuhan kekuatan awal. |

**Tabel 2.4 Penelitian Terdahulu (Lanjutan)**

|    |                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|----|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3. | Judul             | <i>Split Tensile Strength Prediction of Recycled Aggregate-Based Sustainable Concrete.</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|    | Penulis dan Tahun | Amin, Ahmad, A., Khan, <i>et al.</i> (2022).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|    | Jenis Pengujian   | Uji kekuatan tarik beton berbasis RCA, uji statistik.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|    | Hasil             | Model Random Forest (RF) menunjukkan presisi yang tinggi dibandingkan dengan model <i>Decision Tree</i> (DT) dan <i>Artificial Neural Network</i> (ANN) dalam memprediksi kekuatan tarik beton berbasis agregat daur ulang. Hasil ini menunjukkan koefisien determinasi yang tinggi dan <i>error</i> yang rendah, memberikan bukti signifikan atas keakuratan dan presisi model RF.                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 4. | Judul             | <i>Micromechanics of ITZ- Aggregate Interaction in Concrete Part II: Strength Upscaling.</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|    | Penulis dan Tahun | Königsberger, <i>et al.</i> (2014).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|    | Jenis Pengujian   | Simulasi mikromechanics.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|    | Hasil             | Model yang disajikan mempertimbangkan ikatan sempurna di semua antarmuka dan awalnya menyelesaikan ITZ yang utuh; ini sangat cocok untuk mempelajari perilaku elastis murni sistem, hingga tingkat beban sesaat sebelum terjadinya retakan pertama.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 5. | Judul             | <i>Mechanical properties of recycled aggregate concrete proportioned with modified equivalent mortar volume method for paving applications.</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|    | Penulis dan Tahun | Yang, S., <i>et al.</i> (2017).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|    | Jenis Pengujian   | Uji tekan, uji lentur, uji daya dukung beban ultimit.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|    | Hasil             | Berdasarkan uji tekan dan lentur, hasil menunjukkan bahwa penambahan pasir pada perekat meningkatkan sifat mekaniknya ketika pasir berjumlah 50% dari total berat perekat. Namun, pengaruhnya terhadap modulus elastisitas sangat kecil. Penggunaan perekat dengan pasir halus meningkatkan daya dukung beban ultimit, keuletan, kekakuan dan ketangguhan balok beton bertulang yang diperkuat dengan CFRP. Rasio pasir halus terhadap perekat sama dengan 1 dianggap yang terbaik dalam hal pengurangan biaya, menjaga kemampuan kerja, serta menjaga sifat mekanik. Terakhir, penggunaan pasir halus dengan perekat memberikan pengurangan biaya perekat yang signifikan dan meningkatkan |

**Tabel 2.5 Penelitian Terdahulu (Lanjutan)**

|    |                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|----|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    |                   | ketahanan perekat terhadap suhu.                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 6. | Judul             | <i>Use of Fly Ash in Recycled Aggregate Concrete.</i>                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|    | Penulis dan Tahun | Sree, S. R. (2021).                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|    | Jenis Pengujian   | Uji kekuatan, uji permeabilitas.                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|    | Hasil             | Penelitian ini membahas karakteristik kekuatan beton agregat alami dan daur ulang dengan menggunakan <i>fly ash</i> . Manfaat yang paling penting adalah berkurangnya permeabilitas terhadap air dan bahan kimia agresif. <i>Fly ash</i> meningkatkan kekuatan dan mengurangi permeabilitas beton terhadap bahan kimia tersebut. |
| 7. | Judul             | <i>Use of recycled concrete aggregates in production of green cement-based concrete composites.</i>                                                                                                                                                                                                                              |
|    | Penulis dan Tahun | Makul, N., <i>et al.</i> (2021).                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|    | Jenis Pengujian   | Uji kekuatan beton, analisis komposisi beton.                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|    | Hasil             | Melalui studi kritis dan analitis ini, dapat dikatakan bahwa RCA memiliki kemungkinan digunakan dalam produksi beton struktural berkinerja tinggi tergantung pada sumber dan jenis agregat daur ulang, sedangkan RCA dapat digunakan secara luas dan aman untuk memproduksi beton ramah lingkungan.                              |
| 8. | Judul             | <i>Experimental Investigation on Mechanical Properties of Sustainable Roller Compacted Concrete Pavement (RCCP) Containing Waste Rubbers as Alternative Aggregates.</i>                                                                                                                                                          |
|    | Penulis dan Tahun | Ömer Faruk Keles, Osman Ünsal Bayrak, Halim Ferit Bayata (2024).                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|    | Jenis Pengujian   | Uji mekanik perkerasan beton, uji ketahanan.                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|    | Hasil             | Penelitian ini menyelidiki penggunaan karet bekas sebagai agregat alternatif dalam RCCP. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan agregat karet dapat meningkatkan beberapa sifat mekanik RCCP, sehingga menjadi solusi yang lebih berkelanjutan untuk konstruksi perkerasan jalan.                                                 |
| 9. | Judul             | <i>Fatigue Damage Evolution of Modified Recycled Aggregate Concrete.</i>                                                                                                                                                                                                                                                         |
|    | Penulis dan Tahun | Yonggui Wang, Yongguo Liu, dan Xingguo Wang (2024).                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|    | Jenis Pengujian   | Uji kelelahan, uji regangan, uji porositas.                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

**Tabel 2.6 Penelitian Terdahulu (Lanjutan)**

|    |                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | Hasil             | Penelitian ini membahas kinerja kelelahan dari beton agregat daur ulang (MRAC) yang dimodifikasi dengan penambahan serat <i>basalt</i> (BF) dan <i>nano</i> -silika (NS). Ditemukan bahwa BF dan NS secara signifikan meningkatkan umur kelelahan, kinerja regangan, dan porositas. Studi ini juga memperkenalkan model kerusakan kelelahan komposit baru. |
| 10 | Judul             | <i>Influence of Coir Fibre and Recycled Aggregate on Bond Strength of Pavement Quality Concrete.</i>                                                                                                                                                                                                                                                       |
|    | Penulis dan Tahun | K. Poongodi, P. Murthi, dan P. Revathi (2022).                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|    | Jenis Pengujian   | Uji kekuatan ikatan, uji tekan, uji tarik beton.                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|    | Hasil             | Penelitian ini menilai pengaruh serat sabut kelapa dan agregat kasar daur ulang (CRA) terhadap kekuatan ikatan beton kualitas perkerasan (PQC). Ditemukan bahwa penggunaan 25% CRA dan 1% serat sabut kelapa dapat meningkatkan kekuatan ikatan hingga 45% tanpa mengurangi kekuatan tekan dan tarik beton.                                                |
| 11 | Judul             | <i>Graphene Oxide Nano-Engineered Recycled Aggregate Concrete for Sustainable Construction: A Critical Review.</i>                                                                                                                                                                                                                                         |
|    | Penulis dan Tahun | Dong Lu, Fulin Qu, Piyush Punetha, Xiaohui Zeng, Zhiyu Luo, dan Wengui Li (2024).                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|    | Jenis Pengujian   | Uji kekuatan, uji durabilitas beton.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|    | Hasil             | Tinjauan ini membahas penggunaan <i>graphene oxide</i> (GO) dalam meningkatkan kinerja beton agregat daur ulang (RAC). GO membantu mempercepat hidrasi semen serta meningkatkan sifat mekanik, durabilitas, dan mikro struktur RAC, sehingga menjadikannya bahan konstruksi yang lebih berkelanjutan.                                                      |
| 12 | Judul             | <i>Mesoscale Fracture Simulation of Recycled Aggregate Concrete Under Uniaxial Compression Based on Cohesive Zone Model.</i>                                                                                                                                                                                                                               |
|    | Penulis dan Tahun | Chunqi Zhu, Eryu Zhu, Bin Wang, Zhu Zhang, dan Mingyang Li (2024).                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|    | Jenis Pengujian   | Simulasi <i>fracture</i> , uji tekan <i>uniaxial</i> .                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

**Tabel 2.7 Penelitian Terdahulu (Lanjutan)**

|    |                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|----|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | Hasil             | Penelitian ini menyelidiki sifat tekan dan perilaku retakan beton agregat daur ulang (RAC) menggunakan pendekatan simulasi <i>mesoscale</i> . Hasilnya mengidentifikasi parameter mekanik utama, seperti kekakuan elemen dan energi fraktur, yang mempengaruhi perilaku tegangan-regangan dan mode kerusakan pada RAC.                            |
| 13 | Judul             | <i>Study on the Mechanical Properties of Recycled Brick Coarse Aggregate Concrete Based on Finite Element Modeling.</i>                                                                                                                                                                                                                           |
|    | Penulis dan Tahun | Yu Zeng, Hui Guo, Jinsong Lei, Yanbo Hu, dan Zhenchao Yang (2024).                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|    | Jenis Pengujian   | Uji kekuatan tekan, uji tarik, pemodelan elemen hingga.                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|    | Hasil             | Penelitian ini menganalisis sifat mekanik beton dengan agregat kasar dari bata daur ulang (RBCA) melalui pemodelan elemen hingga. Ditemukan bahwa tingkat penggantian agregat bata mempengaruhi kekuatan tekan lebih dari kekuatan tarik, serta bahwa porositas memiliki pengaruh signifikan terhadap distribusi retakan.                         |
| 14 | Judul             | <i>Thermogravimetric Analysis (TGA) for Characterization of Self-Cementation of Recycled Concrete Aggregates in Pavement.</i>                                                                                                                                                                                                                     |
|    | Penulis dan Tahun | Chong Wang, Cyrille Chazallon, Sandrine Braymand, dan Pierre Hornych (2024).                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|    | Jenis Pengujian   | Uji termogravimetri (TGA), uji kekuatan.                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|    | Hasil             | Penelitian ini menggunakan TGA untuk menilai sifat <i>self-cementing</i> dari agregat beton daur ulang (RCA). Studi ini menunjukkan bahwa kandungan semen yang belum terhidrasi berkontribusi pada peningkatan kekuatan dan kekakuan RCA seiring waktu, terutama dalam lapisan perkerasan, sehingga meningkatkan kinerjanya dalam jangka panjang. |
| 15 | Judul             | <i>Eccentric Compression Behaviors of Iron Tailings and Recycled Aggregate Concrete-Filled Steel Tube Columns.</i>                                                                                                                                                                                                                                |
|    | Penulis dan Tahun | Yansheng Du, Chuanchuan Shi, Shao-Bo Kang, Mohammed Amer, Bingzhen Zhao, Yutong Zhang (2024).                                                                                                                                                                                                                                                     |
|    | Jenis Pengujian   | Uji kompresi eksentrik, simulasi metode elemen hingga (FEM).                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

**Tabel 2.8 Penelitian Terdahulu (Lanjutan)**

|    |                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | Hasil             | Penelitian ini mengevaluasi perilaku kolom baja berisi beton (CFT) yang menggabungkan pasir <i>tailing</i> bijih besi (IOT) dan agregat daur ulang (RCA) di bawah beban eksentrik. Hasil menunjukkan bahwa meskipun kekuatan tekan dan tarik menurun dengan peningkatan rasio RCA, rasio RCA yang lebih tinggi meningkatkan daktilitas kolom. Peningkatan rasio kelangsingan mengurangi kapasitas beban puncak sekitar 5-6%. Simulasi metode elemen hingga (FEM) digunakan untuk memvalidasi hasil percobaan, menunjukkan kesesuaian yang kuat dengan nilai eksperimental. |
| 16 | Judul             | <i>The Effect of Hybrid Basalt Fibres on the Mechanical and Structural Characteristics of Geopolymer Concrete Containing Geopolymer-Coated Recycled Concrete Aggregates.</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|    | Penulis dan Tahun | Bahareh Nikmehr, Bidur Kafle, Ahmed Wadood Al Zand, Riyadh Al-Ameri (2024).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|    | Jenis Pengujian   | Uji kekuatan tarik, uji beban akhir, uji deformasi.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|    | Hasil             | Studi ini mengkaji pengaruh serat <i>basalt</i> pada sifat mekanik dan struktural beton <i>geopolymer</i> yang mengandung agregat beton daur ulang yang dilapisi <i>geopolymer</i> . Hasil menunjukkan bahwa penambahan serat <i>basalt</i> meningkatkan kekuatan tarik belah, beban akhir, dan deformasi pada titik kegagalan. Serat <i>basalt</i> membantu mencegah retak dan meningkatkan kinerja mekanik secara keseluruhan. Beton dengan serat <i>basalt</i> juga memiliki defleksi lebih besar saat beban maksimum.                                                  |
| 17 | Judul             | <i>Recycled Aggregate Concrete Using Seawater: Optimizing Concrete's Sustainability.</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|    | Penulis dan Tahun | Carolina Caracol, Lena Kravchanka, Miguel Bravo, Jorge de Brito, Francisco Agrela, Julia Rosales (2024).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|    | Jenis Pengujian   | Uji kekuatan tekan beton, uji ketahanan.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

**Tabel 2.9 Penelitian Terdahulu (Lanjutan)**

|    |                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|----|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | Hasil             | Makalah ini meneliti beton agregat daur ulang yang menggunakan air laut dalam proses pencampuran. Penggunaan air laut bertujuan untuk mengoptimalkan keberlanjutan beton dengan mengurangi kebutuhan air tawar dan memanfaatkan sumber daya yang tersedia. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan air laut memiliki efek minimal pada kekuatan tekan beton selama proporsi dan komposisi agregat dipertahankan dengan benar, sekaligus mengurangi dampak lingkungan dari konsumsi air tawar.                                                                                                                                                                                          |
| 18 | Judul             | <i>Evaluation of strength and modulus of elasticity (Ec) of concrete incorporated with recycled aggregate and rice straw ash (RSA).</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|    | Penulis dan Tahun | Vikas Prabhakar, Mehtab Alam, Rajan L. Wankhade (2024).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|    | Jenis Pengujian   | Uji kekuatan tekan, uji modulus elastisitas.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|    | Hasil             | Penelitian ini mengevaluasi dampak penambahan abu jerami padi (RSA) dan agregat kasar daur ulang (RCA) pada beton. RSA digunakan sebagai bahan pengganti sebagian semen, sedangkan RCA menggantikan agregat alami. Hasil menunjukkan bahwa penambahan RSA dan RCA secara signifikan mempengaruhi kekuatan tekan dan modulus elastisitas beton. Penggantian hingga 10% RSA memberikan hasil yang optimal, dengan peningkatan kekuatan tekan dan modulus elastisitas dibandingkan campuran kontrol. Namun, pada penggantian di atas 10%, kinerja menurun. Secara keseluruhan, beton dengan RSA dan RCA menunjukkan peningkatan ketahanan terhadap siklus pembekuan-debeku dan serangan sulfat. |
| 19 | Judul             | <i>Effect of recycled concrete powder-cement composite coating modification on the properties of recycled concrete aggregate and its concrete.</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|    | Penulis dan Tahun | Xin Ren, Jiping Yang, Wenlin Chen, Yifan Huang, Guan Wang, Jiawei Niu, Jinliang Wu (2024).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|    | Jenis Pengujian   | Uji kekuatan tekan, uji kekuatan lentur, uji ketahanan pori.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

**Tabel 2.10 Penelitian Terdahulu (Lanjutan)**

|     |                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | Hasil             | <p>Penelitian ini mengeksplorasi efek modifikasi pelapisan komposit serbuk beton daur ulang (RCP) pada agregat beton daur ulang (RCA). Modifikasi pelapisan menggunakan kombinasi semen dan RCP menunjukkan peningkatan signifikan pada sifat fisik RCA, seperti penurunan nilai penghancuran dan abrasi lebih dari 20%. Beton dengan RCA yang dilapisi menunjukkan peningkatan kekuatan tekan, kekuatan lentur, dan ketahanan pori. Pengujian menggunakan resonansi magnetik nuklir (NMR) menunjukkan pengurangan signifikan dalam pori kapiler dan besar. Pelapisan ini meningkatkan kualitas RCA, menjadikannya lebih kompetitif dibandingkan agregat alami dalam konteks keberlanjutan bangunan.</p> |
| 20. | Judul             | <i>A Green Way of Producing High Strength Concrete Utilizing Recycled Concrete.</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|     | Penulis dan Tahun | Shaaban, M., at all. (2023).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|     | Jenis Pengujian   | Uji kekuatan beton, uji ketahanan sulfat.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|     | Hasil             | <p>Temuan menunjukkan bahwa agregat beton daur ulang dapat dimanfaatkan dalam produksi beton berkekuatan tinggi, dengan nilai sifat mekanik yang secara signifikan dapat diterima dibandingkan dengan beton yang mengandung agregat alami. Selain itu, penambahan <i>Silica Fume</i> sebagai pengganti semen pada beton berperan penting dalam meningkatkan ketahanan sulfat. Dalam hal pemanfaatan produk beton, beton daur ulang dan signifikansinya dalam penelitian ini memainkan peran penting dalam pelestarian lingkungan.</p>                                                                                                                                                                    |
| 21. | Judul             | <i>Research on the influence of particle size distribution of high-quality recycled coarse aggregates on the mechanical properties of recycled concrete.</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|     | Penulis dan Tahun | Zong, S., Chang, C., Rem, P., Gebremariam, A. T., Di Maio, F., & Lu, Y. (2025).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

**Tabel 2.11 Penelitian Terdahulu (Lanjutan)**

|     |                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | Jenis Pengujian   | Pengujian eksperimen dilakukan untuk mengamati pengaruh distribusi ukuran partikel (PSD) dari agregat kasar daur ulang berkualitas tinggi ( <i>HqRCA</i> ) terhadap sifat mekanik beton daur ulang. Tiga batas PSD yang berbeda (atas, tengah, dan bawah) diuji dengan dua kondisi pemadatan beton yang berbeda.                                                                                                       |
|     | Hasil             | Hasil penelitian menunjukkan bahwa distribusi ukuran partikel (PSD) hanya memiliki pengaruh terbatas terhadap kekuatan tekan dan kekuatan belah tarik beton daur ulang. Namun, kondisi pemadatan yang lebih baik meningkatkan sifat mekanik beton, terutama dalam ketahanan terhadap tarik. Beton daur ulang memiliki potensi untuk menggantikan agregat alami sepenuhnya dalam aplikasi rekayasa praktis.             |
| 22. | Judul             | <i>Effect of X-ray CT characterized pore structure on the freeze-thaw resistance of 3D printed concrete with recycled coarse aggregate</i>                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|     | Penulis dan Tahun | Liu, C., Liu, H., Wu, Y., Wu, J., & Ding, S. (2025)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|     | Jenis Pengujian   | Pengujian difokuskan pada pengaruh struktur pori yang dikarakterisasi dengan <i>X-ray</i> CT terhadap ketahanan beton cetak 3D yang mengandung agregat kasar daur ulang (RCA) terhadap siklus beku-cair ( <i>freeze-thaw</i> ). Pencitraan mikro struktur menggunakan <i>X-ray</i> CT dan pemindaian elektron digunakan untuk menganalisis struktur pori pada beton.                                                   |
|     | Hasil             | Meskipun penggunaan RCA meningkatkan kerusakan akibat siklus beku-cair pada beton cetak 3D, peningkatan rasio penggantian RCA tidak selalu memperburuk kerusakan tersebut. Pori-pori berbentuk <i>ellipsoid</i> yang unik dalam beton cetak 3D dengan RCA berperan dalam merusak ketahanan terhadap siklus beku-cair, dengan pengaruh terbesar berasal dari pori-pori mortar lama dan zona transisi antar butir (ITZ). |
| 23. | Judul             | <i>The long-term re-cementation of recycled concrete aggregate in road sub-base and its impacts on pavement performance</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|     | Penulis dan Tahun | Cheng, H., Wang, Y., Liu, J., Poon, C.-S., Ren, P., Liu, Y., & Chen, Z. (2024)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

**Tabel 2.12 Penelitian Terdahulu (Lanjutan)**

|     |                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | Jenis Pengujian   | Penelitian ini melibatkan analisis jangka panjang tentang re-sementasi agregat beton daur ulang (RCA) yang telah digunakan dalam lapisan <i>sub-base</i> jalan selama 13 tahun. Pengujian termasuk pengukuran sifat fisik, kimia, dan mekanik dari RCA yang mengalami re-sementasi, serta analisis menggunakan teknik pemodelan modulus acak untuk mengevaluasi dampaknya pada kinerja jalan.                                              |
|     | Hasil             | Penelitian menemukan bahwa seiring berjalannya waktu, RCA mengalami proses re-sementasi yang meningkatkan modulus material, dengan penurunan porositas sekitar 7,8%. Re-sementasi ini meningkatkan kekakuan lapisan <i>sub-base</i> , mengurangi regangan lapisan aspal, dan membantu mengurangi retak bawah atas dan deformasi permanen pada jalan. Namun, re-sementasi yang berlebihan meningkatkan risiko terjadinya retakan reflektif. |
| 24. | Judul             | <i>Strength-based RSM optimization of concrete containing coarse recycled concrete aggregate and raw-crushed wind-turbine blade</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|     | Penulis dan Tahun | Hurtado-Alonso, N., Manso-Morato, J., Revilla-Cuesta, V., & Skaf, M. (2025)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|     | Jenis Pengujian   | Metode <i>Response Surface Methodology</i> (RSM) digunakan untuk mengoptimalkan komposisi campuran beton yang mengandung agregat kasar daur ulang (RCA) dan serat dari turbin angin yang dihancurkan. Pengujian dilakukan pada campuran beton dengan variasi kandungan RCA dan bahan serat untuk menentukan kekuatan beton yang optimal.                                                                                                   |
|     | Hasil             | Hasil RSM menunjukkan bahwa penggantian RCA dengan turbin angin yang dihancurkan dalam beton dapat meningkatkan kekuatan lentur jika persentase RCA dibatasi pada 80% dan serat dari turbin angin dibatasi pada 3-7%. Kombinasi ini menghasilkan beton dengan kekuatan kompresi lebih dari 30 MPa dan kekuatan lentur sekitar 5 MPa, menjadikannya cocok untuk aplikasi rekayasa konvensional.                                             |
| 25. | Judul             | <i>Recycling coarse aggregates from concrete using high voltage pulses</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|     | Penulis dan Tahun | Dong, L., Fu, Y., He, M., Huang, W. (2025)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

**Tabel 2.13 Penelitian Terdahulu (Lanjutan)**

|  |                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|--|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | Jenis Pengujian | Penelitian ini menggunakan teknik pulsa tegangan tinggi (HVP) untuk mendaur ulang agregat kasar beton dengan cara fraktur selektif. Pengujian melibatkan penggunaan konfigurasi elektroda paralel untuk memaksimalkan selektivitas fraktur dan efisiensi energi dalam proses fragmentasi beton.                                                                                                                                                                                 |
|  | Hasil           | Teknik HVP terbukti efektif dalam membebaskan agregat kasar dari matriks beton tanpa merusak integritas mekaniknya. Agregat yang dihasilkan memiliki kualitas lebih baik dibandingkan dengan yang diproses dengan penghancur konvensional, dengan tingkat pemulihan agregat mencapai 89,7%. Teknik ini juga lebih hemat energi dibandingkan dengan metode penghancuran konvensional, mengurangi konsumsi energi dan meminimalkan produksi material halus yang tidak diinginkan. |

Sumber: Studi Pustaka, 2024.

#### 2.4 *State of The Art, Research Gap* dan *Novelty*

Penelitian-penelitian sebelumnya telah mengeksplorasi berbagai aspek penggunaan *Recycled Concrete Aggregate* (RCA), mulai dari studi kekuatan mekanik (Ogar, 2017; Yang et al., 2017), evaluasi keberlanjutan (Fanijo et al., 2023), hingga pemodelan numerik atau mikroskopik (Königsberger et al., 2014; Zhu et al., 2024). Inovasi bahan tambahan seperti penggunaan *fly ash* (Sree, 2021), serat *basalt* (Wang et al., 2024), *graphene oxide* (Lu et al., 2024), dan abu jerami (Prabhakar et al., 2024) juga mulai berkembang untuk meningkatkan kinerja beton daur ulang.

Namun, sebagian besar studi tersebut masih terbatas dalam beberapa hal: penggunaan RCA dari sumber yang tidak spesifik, fokus pada beton struktural biasa, pendekatan pengujian yang parsial, dan minimnya integrasi aspek keberlanjutan dengan data teknis.

Dari tinjauan literatur, terdapat beberapa celah penelitian yang belum banyak diisi dan menjadi dasar perlunya dilakukan penelitian ini, seperti dapat dilihat pada Tabel 2.3:

**Tabel 2.14 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Penelitian Ini**

| Aspek Penelitian        | Penelitian Terdahulu                                                   | Penelitian Ini                                                              |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Sumber RCA              | RCA dari sumber umum (bangunan lama, limbah konstruksi tidak spesifik) | RCA dari <i>rigid pavement</i> (perkerasan jalan beton kaku)                |
| Tujuan Penggunaan       | Umumnya untuk beton struktural biasa, atau non-struktural umum         | Untuk beton mutu tinggi (FS 45) pada perkerasan jalan                       |
| Analisis Keberlanjutan  | Terbatas pada isu keberlanjutan secara umum (Fanijo et al., 2023)      | Menggunakan pendekatan <i>Life Cycle Analysis</i> (LCA) secara komprehensif |
| Jenis Pengujian         | Uji tekan, tarik, atau simulasi numerik secara terpisah                | Gabungan uji kuat tekan, tarik belah, modulus elastisitas, dan durabilitas  |
| Analisis Mikro struktur | SEM hanya untuk RCA gedung (Königsberger et al., 2014)                 | Perbandingan SEM dan EDX RCA <i>rigid</i> vs RCA gedung                     |
| Fokus Aplikasi          | Struktural umum atau panel pracetak, bukan jalan                       | Spesifik untuk aplikasi jalan berkelanjutan                                 |
| Pendekatan Analitik     | Simulasi atau model statistik (RF, ANN, FEM, RSM)                      | Analisis komprehensif berbasis performa + keberlanjutan                     |
| Pendekatan Eksperimen   | Fokus uji kuat tekan atau tarik jangka pendek                          | Kinerja mekanik jangka panjang dan ketahanan lingkungan                     |

Sumber: Studi Pustaka 2024.

Penelitian ini memiliki **kebaruan yang menonjol** dalam konteks pemanfaatan *Recycled Concrete Aggregate* (RCA), khususnya yang berasal dari limbah perkerasan beton kaku (*rigid pavement*), yang selama ini belum banyak diteliti secara spesifik dalam literatur. Tidak seperti studi-studi terdahulu yang umumnya menggunakan RCA dari bangunan atau konstruksi umum, penelitian ini secara khusus mengeksplorasi potensi RCA dari *rigid pavement* yang memiliki karakteristik fisik dan mikro struktur yang berbeda. Selain itu, penelitian ini memfokuskan pengembangan campuran beton mutu tinggi (FS 45) untuk aplikasi perkerasan jalan, yang menuntut kinerja mekanik dan durabilitas jangka panjang — suatu pendekatan yang belum menjadi fokus utama dalam studi-studi sebelumnya yang cenderung hanya membahas beton struktural konvensional.

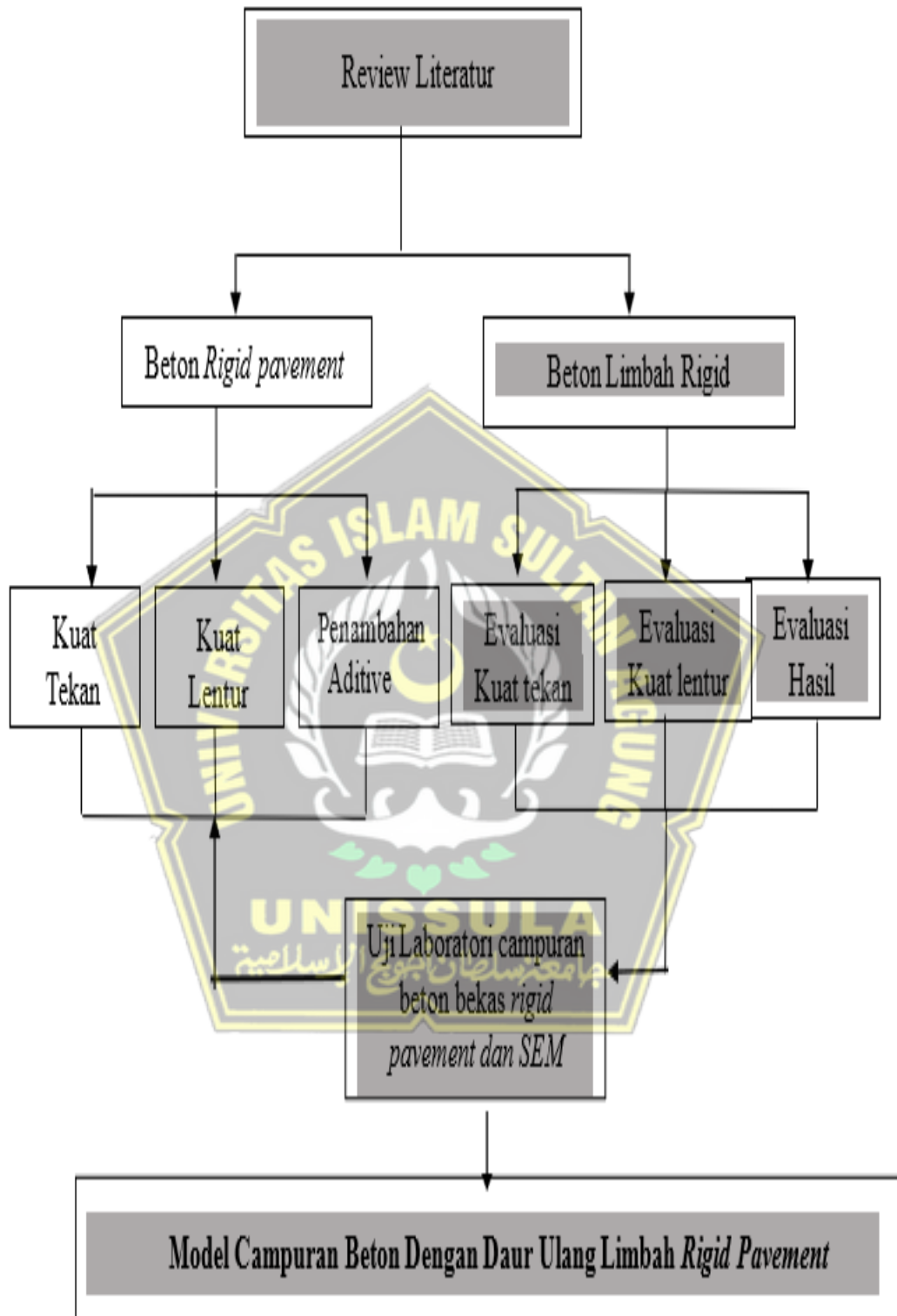
Kebaruan lainnya terletak pada pendekatan pengujian yang komprehensif, di

mana penelitian ini menggabungkan uji kuat tekan, tarik belah, dan modulus elastisitas, serta memperkuat temuan melalui analisis mikro struktur menggunakan teknik *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *Energy Dispersive X-ray* (EDX). Analisis mikro struktur ini dilakukan dengan membandingkan RCA dari dua sumber berbeda, yakni *rigid pavement* dan gedung, untuk memperoleh gambaran yang lebih objektif terhadap kualitas RCA. Tidak hanya itu, penelitian ini juga memasukkan pendekatan keberlanjutan melalui analisis *Life Cycle Assessment* (LCA) guna mengukur dampak lingkungan dari penggunaan RCA dibandingkan dengan beton konvensional. Dengan pendekatan tersebut, penelitian ini tidak hanya menghasilkan kontribusi teknis terhadap bidang teknik sipil, tetapi juga memberikan nilai tambah dalam aspek lingkungan dan ekonomi yang sangat relevan dengan arah pembangunan infrastruktur berkelanjutan.

## 2.5 Kerangka Pikir

Model Campuran Beton dengan Daur Ulang Limbah *rigid pavement* diperkenalkan sebagai alternatif dari pendekatan konvensional dalam menghitung campuran beton. Penggunaan limbah beton atau beton bekas dari *rigid pavement* memerlukan kerangka pikir yang lebih rinci dibandingkan metode konvensional, karena material daur ulang memiliki sifat yang berbeda dari bahan baku segar. Penyesuaian dalam proporsi campuran dan evaluasi kinerja beton daur ulang sangat penting untuk memastikan kualitas dan ketahanan beton. Dasar penelitian menghubungkan teori, fakta observasi, dan kajian literatur, ini berfungsi sebagai panduan untuk memecahkan masalah penelitian dan merumuskan hipotesis.

Kerangka pikir ini disajikan dalam bentuk bagan alur yang dilengkapi penjelasan penjelasan kualitatif. Kerangka berpikir juga dikenal sebagai kerangka konseptual yang menggambarkan bagaimana teori berhubungan dengan factor factor yang diidentifikasi sebagai masalah penting. Fungsi kerangka pikir ini dapat memahami konsep teori dan variable dalam penelitian, merumuskan penelitian yang relevan, menganalisis data adalah lebih focus, menghubungkan dasar teori dengan pelaksanaan penelitian, Menyusun hipotesis dan merumuskan kesimpulan, kerangka berpikir juga digunakan untuk penelitian tentang inovasi bagaimana inovasi dapat menciptakan kebaruan dan kompatibel.



Sumber: Hasil Analisis Penulis, 2024

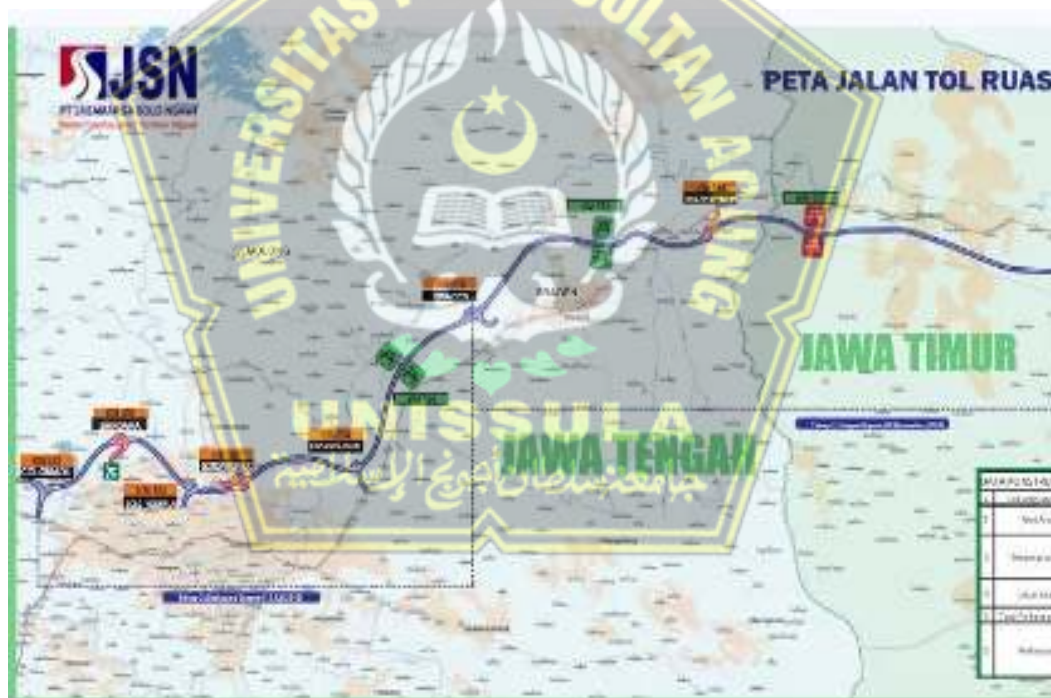
**Gambar 2.5 Posisi Penelitian**

## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Lokasi Penelitian

Kajian ini dilakukan pada perbaikan Jalan Tol Jakarta-Solo-Kertosono, yang merupakan bagian dari Tol Trans Jawa dan diresmikan pada tahun 2018. Peneliti memilih lokasi penelitian di jalan tol ini karena kawasan tersebut berkembang pesat, sehingga muncul kebutuhan untuk memanfaatkan limbah bongkaran beton *rigid pavement* dalam proses perbaikan.



Sumber: Proyek rekonstruksi permukaan jalan pada ruas Jalan Tol Solo-Ngawi, 2024.

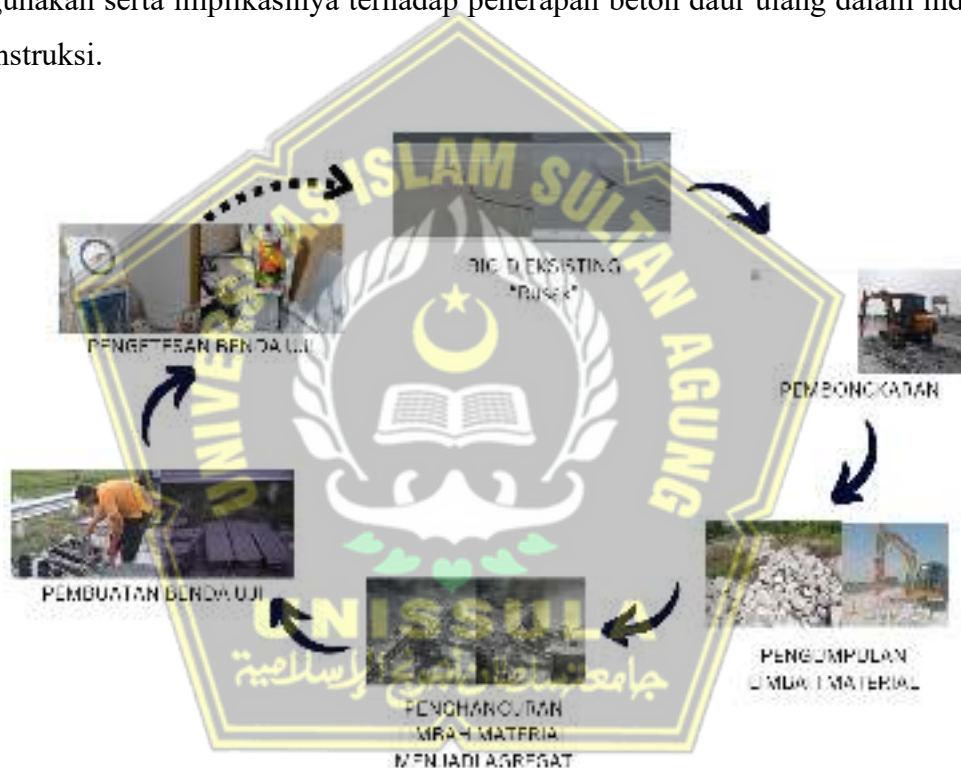
**Gambar 3.1 Lokasi Penelitian Jalan Tol Solo – Kertosono**

#### 3.2 Metode Pengumpulan dan Analisis Data

Pengambilan sampel beton dilakukan di lokasi pengumpulan material bongkaran beton yang telah ditentukan oleh Badan Pengusahaan Jalan Tol (BUJT),

dalam hal ini PT Jasa Marga Solo-Ngawi. Material bongkaran beton kemudian dihancurkan menggunakan alat pemecah batu (*stone crusher*), dan hasil pecahan tersebut disaring menggunakan beberapa ukuran saringan. Setelah penyaringan, dilakukan *grading* material untuk menentukan apakah diperlukan penambahan material kasar, medium, atau halus.

Penelitian ekstensif telah dilakukan untuk mengeksplorasi metode daur ulang beton dan penggabungan bahan limbah konstruksi lainnya ke dalam campuran beton, dengan tujuan menyelidiki pengaruhnya terhadap sifat-sifat mekanik dan fisik beton. Tinjauan komprehensif ini mengkaji berbagai kombinasi material yang digunakan serta implikasinya terhadap penerapan beton daur ulang dalam industri konstruksi.



Sumber: Hasil Analisis Penulis, 2024

**Gambar 3.2 Alur Skema Sistem Daur Ulang Beton**

Penggunaan *recycled concrete aggregate* (RCA) untuk memproduksi beton agregat daur ulang (RAC) dibandingkan dengan penggunaan agregat alami (NA) untuk memproduksi beton agregat alami (NAC) tidak menunjukkan keuntungan yang signifikan dari segi kinerja material, manfaat lingkungan, atau kelayakan finansial. Studi yang telah dilakukan menunjukkan bahwa langkah-langkah adaptasi untuk memproduksi RAC sebagai produk daur ulang menghadapi *trade-*

*off* antara manfaat dan tantangan, yang sering kali dianggap marginal jika hanya melihat satu dimensi tertentu.

Metodologi evaluasi yang komprehensif dan terintegrasi disarankan, mencakup berbagai aspek seperti keuangan, lingkungan langsung dan tidak langsung, serta dampak sosial. Metode *cost-benefit assessment* (CBA) digunakan untuk menggabungkan semua dimensi tersebut, dengan hasil berupa *net present value* (NPV) yang mencerminkan manfaat bagi masyarakat. Dalam studi ini, alternatif penggunaan RCA untuk memproduksi RAC didefinisikan sebagai "Kasus Proyek", sedangkan situasi tanpa penggunaan RCA disebut "Kasus Dasar" (Wijayasundara, Mendis, & Crawford, 2017).

Studi lain mengevaluasi dampak penggunaan agregat kasar daur ulang berkualitas tinggi terhadap kinerja material dan struktur beton. Elemen beton pracetak dipilih dan dihancurkan, menghasilkan agregat daur ulang yang dipelajari lebih lanjut. Ditemukan bahwa elemen beton berkualitas tinggi yang diproses melalui penghancuran skala industri mampu menghasilkan agregat daur ulang dengan kualitas yang lebih baik. Elemen beton yang dipilih memiliki jumlah tulangan minimum. Empat campuran beton dirancang dengan berbagai rasio agregat daur ulang dan dipelajari dari segi sifat material, mekanik, dan daya tahannya (De Brito, Ferreira, Pacheco, Soares, & Guerreiro, 2016).

Pemisahan adalah langkah penting dalam proses daur ulang beton karena memungkinkan tercapainya agregat daur ulang yang lebih bersih serta penggunaan kembali konstituen beton lainnya secara lebih efisien. Teknik *hydraulic closure* yang dihasilkan dari pasta semen terhidrasi pada limbah beton, dengan suhu produksi yang lebih rendah dan emisi karbon dioksida yang berkurang, menjadi semakin populer. Namun, penerapannya sangat bergantung pada keberhasilan pemisahan antara pasta semen dan agregat yang terkandung dalam beton. Metode baru yang dipatenkan melibatkan *comminution* mekanis dan proses magnetik intensitas tinggi untuk memisahkan fraksi semen dan agregat halus. Efektivitas metode ini dievaluasi menggunakan gambar, *termogravimetri*, difraksi sinar-X, dan uji serangan asam. Pasta semen daur ulang yang dihasilkan setelah aktivasi termal mencapai kekuatan mekanis sekitar 70% dari pasta referensi yang menggunakan semen dari pasta limbah yang tidak terkontaminasi (Carriço, Bogas, Hu, Real, &

Costa Pereira, 2021).

### 3.3 Penentuan *Mix Design*

Penentuan *mix design* dalam penelitian ini didasarkan pada hasil uji gradasi agregat, yang digunakan sebagai acuan dalam merancang variasi campuran beton. Komposisi campuran dirancang untuk mengevaluasi performa beton dengan proporsi *Recycled Concrete Aggregate* (RCA) sebesar 40%, 50%, dan 60% dari total agregat. Pemilihan variasi ini mempertimbangkan keseimbangan proporsional antara agregat kasar daur ulang dan total agregat (agregat halus dan kasar). Misalnya, pada campuran 40% RCA, komposisi agregat terdiri atas 40% RCA dan 60% pasir. Jika digunakan RCA di bawah 40%, seperti 30%, maka perlu ditambahkan agregat kasar alami (batu pecah) sebesar 10% untuk mempertahankan proporsi total agregat, sehingga menjadi 30% RCA, 10% batu pecah, dan 60% pasir. Sebaliknya, jika proporsi RCA melebihi 60%, misalnya 70%, maka komposisi agregat akan menjadi 30% RCA dan 70% pasir, yang secara teknis tidak ideal karena kandungan pasir yang terlalu tinggi dapat menurunkan kohesi dan kekuatan mekanik beton. Oleh karena itu, rentang 40–60% dipilih sebagai batas realistis dan representatif dalam perbandingan proporsi RCA terhadap total agregat, guna memperoleh hasil campuran beton yang optimal.

Setiap variasi campuran kemudian diuji melalui uji kuat tekan dan kuat lentur pada umur 3, 7, dan 28 hari untuk menilai kinerja mekanik jangka pendek hingga menengah. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memperoleh campuran beton yang memenuhi persyaratan teknis sebagai material struktural, baik untuk perkerasan jalan beton maupun aplikasi bangunan lainnya sesuai dengan kondisi lapangan. Penelitian ini secara khusus mengkaji potensi pemanfaatan limbah *rigid pavement* sebagai agregat kasar pengganti sebagian, dengan fokus pada pencapaian kekuatan tekan dan lentur beton yang memadai sesuai standar perkerasan beton mutu tinggi.

#### 3.3.1 Spesifikasi dan Kebutuhan Campuran

Pada tahap perancangan campuran beton, spesifikasi dan kebutuhan campuran harus ditentukan dengan cermat agar beton yang dihasilkan memenuhi standar kekuatan dan ketahanan yang diinginkan. Berikut adalah spesifikasi

campuran beton yang digunakan dalam penelitian ini:

- Mutu Beton: FS 45
- Umur Beton: Uji kuat tekan dilakukan pada 3, 7, dan 28 hari
- Jenis Semen: OPC Tipe I
- Jenis Agregat Kasar: Limbah *rigid pavement* (pecahan beton bekas)
- Jenis Agregat Halus: Pasir alami (Sungai)
- Ukuran Maksimum Agregat Kasar: 25 mm
- W/C Ratio (*Water-Cement*): 0.4 (tentatif, tergantung pengujian awal *slump*)

Komposisi bahan campuran beton dirancang untuk mencapai kekuatan tekan yang optimal, dengan memperhatikan proporsi masing-masing bahan agar sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan. Berikut adalah komposisi bahan campuran beton yang digunakan dalam penelitian ini:

- Semen: 400 kg/m<sup>3</sup>
- Air: 160 liter/m<sup>3</sup> (d disesuaikan agar sesuai dengan target *slump*)
- Agregat Kasar (Limbah *rigid pavement*): 950 kg/m<sup>3</sup>
- Agregat Halus (Pasir): 750 kg/m<sup>3</sup>
- Aditif: 1%

### 3.4 Prosedur Percobaan *Mix Design*

Prosedur percobaan *mix design* dilakukan dengan langkah-langkah yang sistematis untuk memastikan campuran beton yang dihasilkan memiliki kualitas dan performa yang sesuai dengan spesifikasi. Berikut adalah langkah-langkah yang diambil dalam prosedur percobaan *mix design* ini:

- Persiapan Agregat Daur Ulang: Limbah beton *rigid pavement* harus dihancurkan hingga mencapai ukuran agregat yang diinginkan (maks. 25 mm). Agregat ini juga perlu dicuci untuk menghilangkan partikel debu atau residu yang dapat mengganggu ikatan semen.
- Penyerapan Air Agregat Daur Ulang: Karena agregat daur ulang seringkali memiliki daya serap lebih tinggi, uji penyerapan air harus dilakukan untuk menentukan kebutuhan air yang tepat.
- *Trial Mix*: Lakukan uji coba campuran (*trial mix*) untuk menentukan *slump* yang diinginkan (75–100 mm untuk *workability* normal) dengan mengatur

rasio air-semen.

### 3.5 Uji Kuat Tekan dan Pengujian Kualitas Beton

Untuk memastikan kualitas dan kekuatan beton yang dihasilkan sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan, dilakukan serangkaian uji dan pemantauan. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi perkembangan kekuatan beton serta memverifikasi sifat mekanik dan ketahanan beton terhadap kondisi lapangan yang sesungguhnya. Berikut adalah prosedur pengujian yang dilakukan:

#### 5. Uji Kuat Tekan

- Siapkan spesimen silinder atau kubus untuk uji kuat tekan sesuai standar (SNI atau ASTM).
- Uji kuat tekan dilakukan pada umur 3, 7, dan 28 hari untuk mengetahui perkembangan kekuatan beton.
- Catat dan analisis hasil untuk melihat apakah beton daur ulang memenuhi kekuatan yang diinginkan dan bagaimana sifat mekanik lainnya seperti modulus elastisitas dan kuat lentur.

#### 6. Pengujian dan Pemantauan Kualitas

- Uji *Slump*: Untuk memastikan nilai *slump* beton berada dalam rentang yang diinginkan untuk memastikan *workability* yang optimal. Uji ini penting untuk menilai konsistensi adukan beton.
- Uji Berat Jenis dan Penyerapan Agregat: Dilakukan untuk mengetahui kebutuhan air yang lebih akurat dalam campuran beton serta untuk menilai karakteristik agregat, yang dapat mempengaruhi kekuatan dan daya tahan beton.
- Uji Kuat Tekan: Uji kuat tekan dilakukan menggunakan mesin uji tekan dengan spesimen beton yang telah dibentuk sesuai dengan standar. Uji ini mengukur kemampuan beton untuk menahan beban tekan.
- Pemantauan Daya Tahan: Uji ketahanan terhadap air dan potensi korosi penting jika beton digunakan di lingkungan yang berisiko tinggi mengalami korosi. Hal ini membantu menilai daya tahan beton dalam kondisi ekstrem.
- Uji *Flow* (FS 45): Untuk memastikan beton memiliki tingkat fluida yang cukup, uji *flow* dilakukan untuk memastikan bahwa adukan beton

memenuhi standar FS 45. Uji ini mengukur kemampuan beton untuk mengalir dengan baik tanpa kehilangan kestabilan atau homogenitas.

**Tabel 3.1 Perkiraan Perbandingan Campuran (untuk setiap 1 m<sup>3</sup>)**

| No | Bahan         | Jumlah    |
|----|---------------|-----------|
| 1  | Semen         | 400 kg    |
| 2  | Air           | 160 liter |
| 3  | RCA           | 950 kg    |
| 4  | Agregat Halus | 750 kg    |
| 5  | Aditif        | 1 %       |

Sumber: Hasil Analisis Penulis, 2024

Poin Penting:

1. Pengaturan Ulang *W/C Ratio*: Rasio air-semen disesuaikan untuk mengoptimalkan *workability* dan kekuatan tekan.
2. Variasi Campuran: Membuat beberapa variasi persentase agregat daur ulang (40%, 50%, 60%) untuk melihat efeknya pada kekuatan beton.

**Tabel 3.2 Variasi Campuran**

| No | Bahan         | Variasi Campuran |                 |                 |
|----|---------------|------------------|-----------------|-----------------|
|    |               | 1<br>(RCA 40 %)  | 2<br>(RCA 50 %) | 3<br>(RCA 60 %) |
| 1  | Semen         | 400 kg           | 360 kg          | 320 kg          |
| 2  | Air           | 150 liter        | 187,5 liter     | 225 liter       |
| 3  | RCA           | 570 kg           | 712.5 kg        | 855 kg          |
| 4  | Agregat Halus | 750 kg           | 600 kg          | 500 kg          |
| 5  | Aditif        | 1,35 %           | 1,35 %          | 1,35 %          |

Sumber: Hasil Analisis Penulis, 2024

3. Pengujian Lanjutan: Melakukan pengujian tambahan seperti uji modulus elastisitas dan ketahanan terhadap klorida jika beton akan digunakan pada lingkungan yang agresif.

*Mix design* ini memberikan gambaran awal bagi penelitian yang lebih lanjut.

Uji coba (*trial mix*) dilakukan untuk memastikan bahwa campuran ini sesuai dengan spesifikasi dan tujuan penelitian.

### 3.6 Penentuan Model

Berdasarkan hasil validasi uji campuran beton yang dilakukan di laboratorium melalui pengujian-pengujian yang dijelaskan dalam sub-bab 3.5, dapat disimpulkan bahwa model campuran terbaik yang memungkinkan penggunaan limbah *rigid pavement* sebagai bahan agregat dapat menghasilkan beton dengan karakteristik yang sesuai dengan persyaratan yang ditetapkan. Beton ini tidak hanya memenuhi standar kualitas dan kinerja, tetapi juga mempertahankan atau bahkan meningkatkan sifat mekanik yang diperlukan, sehingga limbah *rigid pavement* dapat dimanfaatkan secara efektif dalam pembuatan beton baru. Proses ini memastikan bahwa limbah tersebut dapat digunakan kembali, memberikan nilai tambah, dan mengurangi dampak lingkungan dari pembuangan limbah beton.

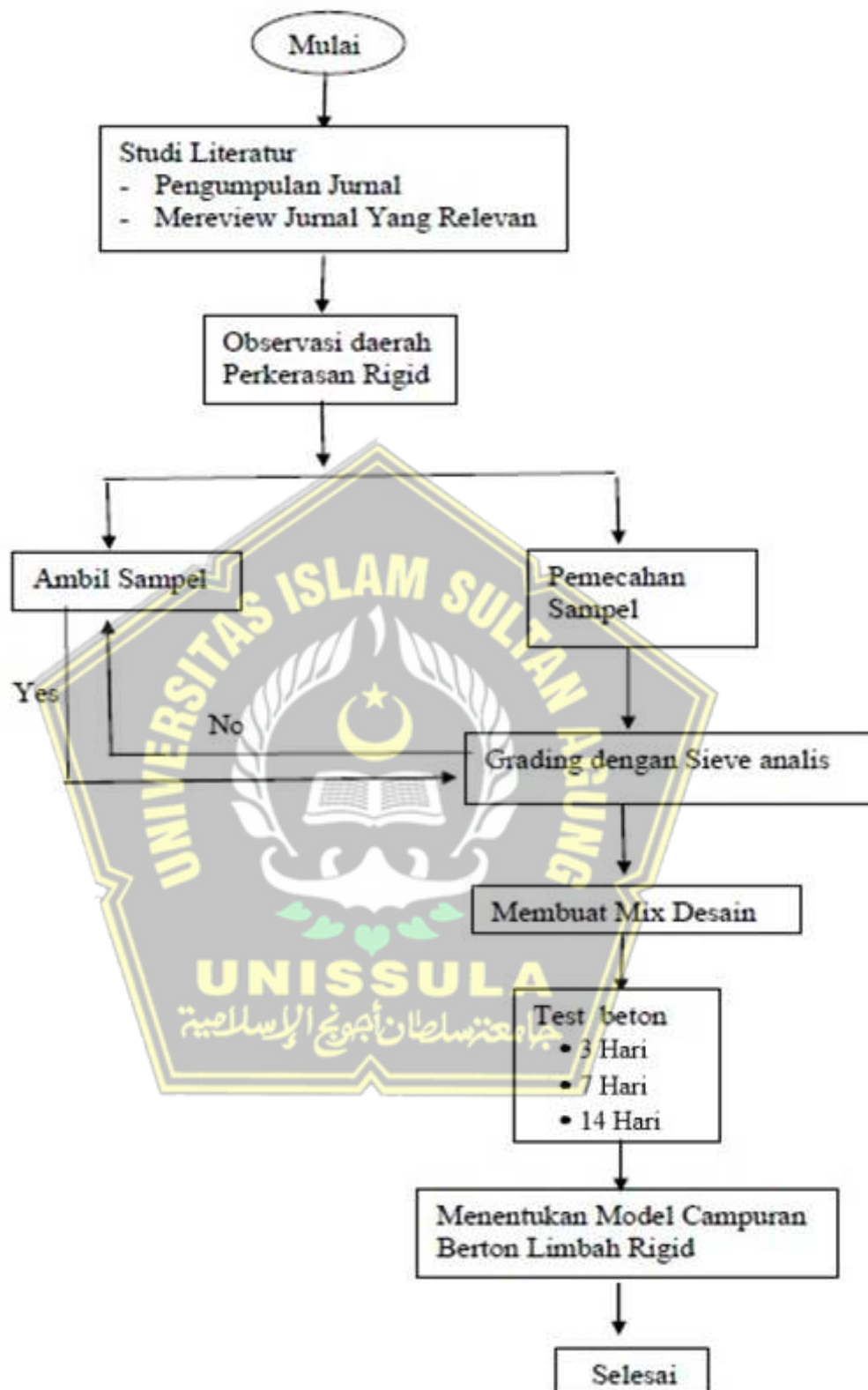
### 3.7 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian adalah representasi visual dari representasi dari proses yang digunakan untuk menggambarkan Langkah langka yang akan diikuti dalam sebuah penelitian ,diagram ini juga berisi garis penghubung yaitu panah dan kotak yang mewakili alur kerja proses, melalui diagram ini dapat dengan cepat menganalisis merancang dan mendokumentasikan suatu program yang menjadikan bagian penting penelitian

Diagram alir membantu audiens untuk secara efektif memahami hasil penelitian, pengumpulan data , design penelitian ,tinjauan literatur, dan bagian lain dari desertasi, karena dapat memberikan gambaran setiap bagian dengan lebih cepat

Elemen yang dapat dimasukkan dalam diagram alir perencanaan adalah urutan, Tindakan, bahan yang masuk atau keluar dari proses , keputusan yang harus dibuat ,orang yang terlbab ,waktu yang terlibat pada setiap Langkah dan test uji dan pengukuran proses.

Berikut adalah diagram alir penelitian yang menunjukkan langkah-langkah penelitian dari identifikasi masalah hingga kesimpulan dan rekomendasi.



Sumber: Hasil Analisis Penulis, 2024

**Gambar 3.3 Diagram Alir Penelitian**

## BAB IV

### DATA DAN ANALISIS

#### 4.1 Data Material dan Komposisi Campuran

##### 4.1.1 Gradasi Agregat

Gradasi agregat merupakan salah satu faktor penting yang memengaruhi kinerja beton, khususnya dalam hal *workability*, kekuatan, dan durabilitas. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan analisis gradasi terhadap tiga jenis agregat yang digunakan, yaitu agregat halus (pasir Merapi), agregat kasar daur ulang (*Recycled Concrete Aggregate/RCA*), serta kombinasi RCA dengan proporsi 40%, 50%, dan 60%. Analisis ini bertujuan untuk memastikan bahwa distribusi ukuran partikel berada dalam rentang standar menurut SNI 03-2834-2000, serta untuk mengevaluasi kontribusinya terhadap karakteristik mekanik beton yang dihasilkan.

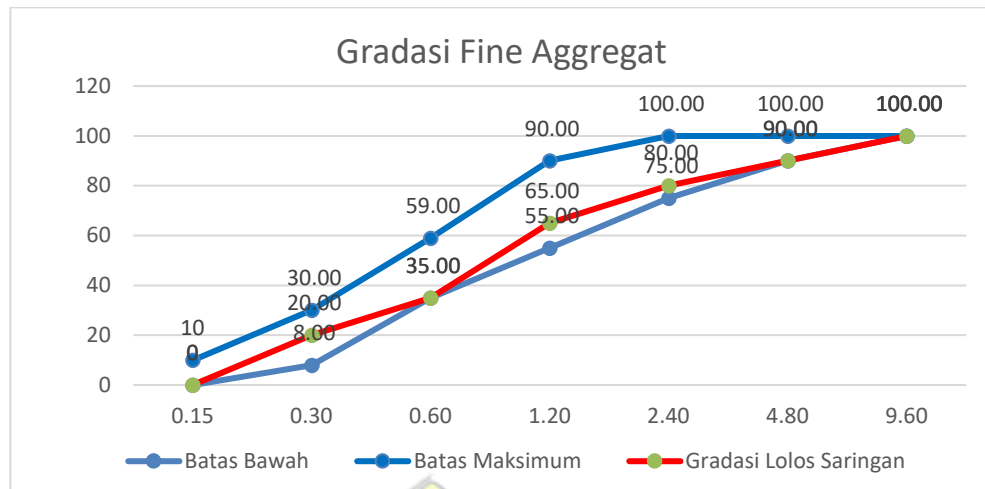
##### 1. Gradasi Agregat Halus

Analisis gradasi agregat halus dilakukan untuk menilai kelayakan agregat yang digunakan dalam campuran beton. Uji ini bertujuan untuk memastikan bahwa distribusi butiran pasir berada dalam rentang gradasi yang dapat diterima, sehingga dapat mendukung *workability* dan kekuatan mekanik beton.

**Tabel 4.1 Data Gradasi Agregat Halus (Pasir Merapi)**

| GRADASI AGREGAT HALUS |     |             |       |       |          |
|-----------------------|-----|-------------|-------|-------|----------|
| mm                    | SNI | Pasir Kasar |       | Lolos | Tertahan |
| 9.5                   | 9.6 | 100.0       | 100.0 | 100.0 | -        |
| 4.8                   | 4.8 | 90.0        | 100.0 | 90.0  | 10.0     |
| 2.3                   | 2.4 | 75.0        | 100.0 | 80.0  | 10.0     |
| 1.2                   | 1.2 | 55.0        | 90.0  | 65.0  | 15.0     |
| 0.6                   | 0.6 | 35.0        | 59.0  | 35.0  | 30.0     |
| 0.3                   | 0.3 | 8.0         | 30.0  | 20.0  | 15.0     |
| 0.2                   | 0.2 | -           | 10.0  | -     | 20.0     |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024



Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024.

**Gambar 4.1 Kurva Gradasi Agregat Halus terhadap Batas SNI 03-2834-2000**

Berdasarkan Tabel 4.1 dan Gambar 4.1, pasir yang digunakan merupakan pasir Merapi, dengan karakteristik dominan pada fraksi menengah hingga kasar. Pada ukuran saringan 2,4 mm dan 4,8 mm, nilai lolos mencapai 90% dan 100%, menunjukkan distribusi yang seragam dan kecenderungan sebagai pasir kasar. Hanya sedikit material yang tertahan di saringan ukuran besar, dan sebagian besar material berada dalam rentang tengah. Nilai lolos saringan 0,6 mm sebesar 35% dan 1,2 mm sebesar 65% menunjukkan bahwa pasir ini memiliki keseimbangan antara partikel halus dan kasar.

Hasil menunjukkan bahwa kurva gradasi pasir berada di antara batas bawah dan batas atas SNI. Hal ini menunjukkan bahwa pasir memiliki kelecakan yang baik, sekaligus mendukung kekuatan beton dengan minim risiko segregasi. Komposisi ini cocok digunakan untuk campuran beton mutu tinggi karena distribusi agregat halus yang merata meningkatkan kepadatan dan ikatan antar partikel.

Secara keseluruhan, agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini memenuhi spesifikasi gradasi agregat halus menurut standar nasional dan dapat dipertimbangkan sebagai komponen utama dalam perancangan campuran beton RCA yang optimal.

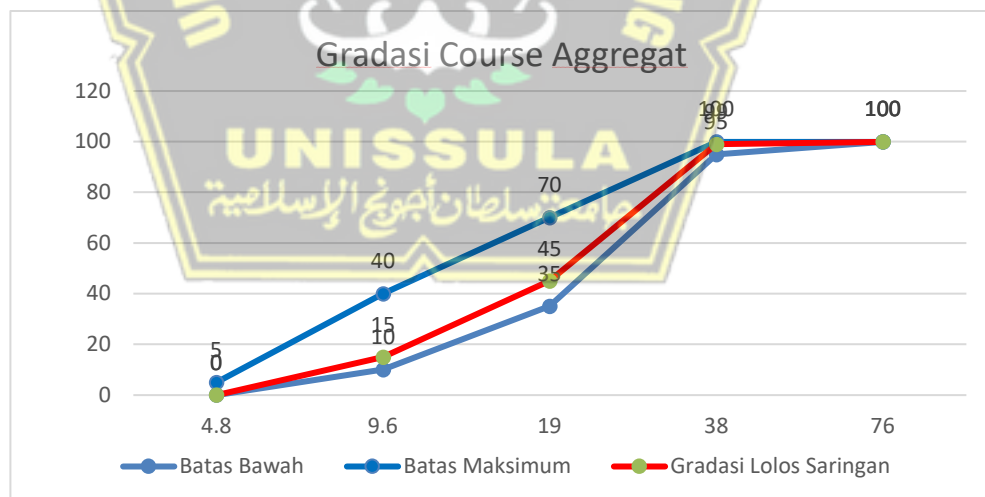
## 2. Gradasi Agregat Kasar (RCA)

Agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari *Recycled Concrete Aggregate* (RCA) yang diambil dari limbah perkerasan kaku (*rigid pavement*) proyek Tol Solo–Ngawi. Untuk memastikan kelayakan RCA sebagai substitusi agregat kasar dalam campuran beton, dilakukan pengujian gradasi terhadap material tersebut. Hasil pengujian ini dibandingkan dengan batas bawah dan atas gradasi agregat kasar menurut standar SNI 03-2834-2000.

**Tabel 4.2 Data Gradasi Agregat Kasar (RCA)**

| GRADASI RCA |     |             |     |       |          |
|-------------|-----|-------------|-----|-------|----------|
| mm          | SNI | Pasir Kasar |     | Lolos | Tertahan |
| 75          | 76  | 100         | 100 | 100   | 0        |
| 37          | 38  | 95          | 100 | 99    | 1        |
| 19          | 19  | 35          | 70  | 45    | 54       |
| 9.5         | 9.6 | 10          | 40  | 15    | 30       |
| 4.75        | 4.8 | 0           | 5   | 0     | 10       |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024.



Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024.

**Gambar 4.2 Kurva Gradasi RCA terhadap Batas SNI 03-2834-2000**

Berdasarkan Tabel 4.2 dan Gambar 4.2, RCA menunjukkan karakteristik gradasi yang masih berada dalam batas yang disyaratkan. Pada saringan 19

mm, persentase lolos mencapai 45%, menunjukkan dominasi fraksi menengah. Sementara pada saringan 38 mm dan 76 mm, nilai lolos masing-masing adalah 100%, menandakan bahwa semua partikel RCA dapat melewati saringan terbesar. Di sisi lain, partikel kecil seperti yang tertahan di saringan 4,8 mm dan 9,6 mm hanya menyumbang 6% dan 15%, yang berarti RCA memiliki proporsi butiran halus yang relatif rendah.

Kurva gradasi RCA dalam Gambar 4.2 menunjukkan bahwa sebaran butiran RCA cenderung mirip dengan agregat kasar alami namun sedikit lebih kasar. Hal ini dapat mendukung kekuatan tekan beton, namun perlu dikombinasikan dengan agregat halus yang baik agar dapat menghasilkan beton dengan *workability* yang tetap optimal.

Secara umum, hasil gradasi menunjukkan bahwa RCA layak digunakan dalam komposisi campuran beton struktural, dengan catatan bahwa perlu penyesuaian terhadap komposisi agregat halus untuk mencapai keseimbangan gradasi yang ideal. Kombinasi yang tepat akan mempengaruhi kohesi beton, mengurangi rongga, dan meningkatkan performa mekanik secara keseluruhan.

### 3. Gradasi Kombinasi RCA 40%, 50%, 60%

Setelah dilakukan pengujian gradasi terhadap agregat halus dan agregat kasar RCA secara terpisah, langkah berikutnya adalah menganalisis kombinasi agregat kasar RCA pada komposisi 40%, 50%, dan 60% yang digunakan dalam penelitian ini. Tujuan dari analisis ini adalah untuk melihat bagaimana variasi proporsi RCA dalam campuran beton memengaruhi distribusi ukuran agregat secara keseluruhan, serta mengevaluasi apakah komposisi kombinasi tersebut masih berada dalam batas yang ditentukan oleh SNI 03-2834-2000.

**Tabel 4.3 Gradasi Kombinasi RCA 40%**

| kombinasi lolos RCA 40% |     |        |      |       |          |
|-------------------------|-----|--------|------|-------|----------|
| mm                      | SNI | coarse | fine | lolos | tertahan |
| 75                      | 76  | 60     | 40   | 100   | 0        |
| 37                      | 38  | 59.4   | 36   | 95.4  | 4.6      |
| 19                      | 19  | 27     | 32   | 59    | 36.4     |
| 9.5                     | 9.6 | 9      | 26   | 35    | 24       |
| 4.75                    | 4.8 | 0      | -    | 35    | 0        |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024.

**Tabel 4.4 Gradasi Kombinasi RCA 50%**

| kombinasi lolos RCA 50% |     |        |       |       |          |
|-------------------------|-----|--------|-------|-------|----------|
| mm                      | SNi | course | fine  | lolos | tertahan |
| 75                      | 76  | 50     | 50.00 | 100   | 0        |
| 37                      | 38  | 49.5   | 45.00 | 94.5  | 5.5      |
| 19                      | 19  | 22.5   | 40.00 | 62.5  | 32       |
| 9.5                     | 9.6 | 7.5    | 32.50 | 40    | 22.5     |
| 4.75                    | 4.8 | 0      | 17.50 | 17.5  | 22.5     |

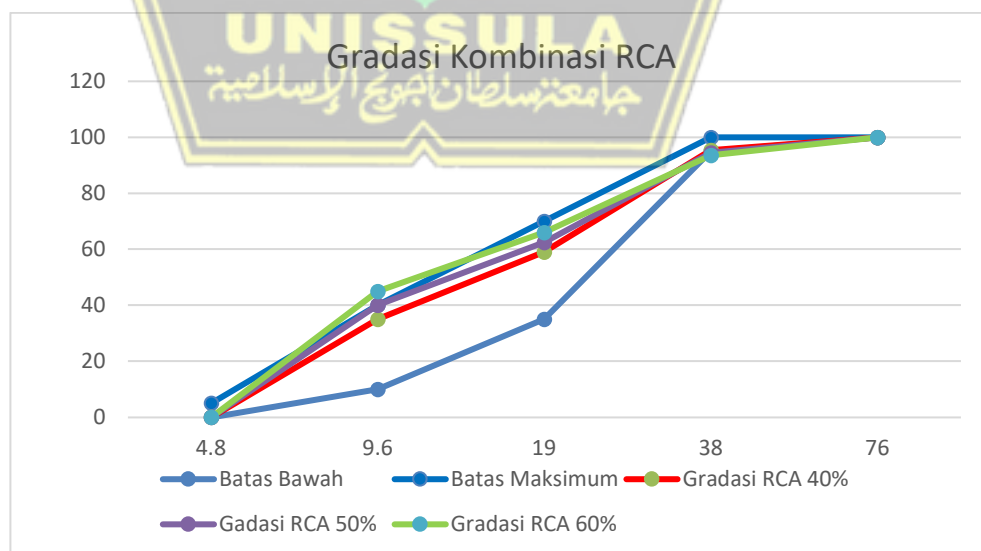
Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024.

**Tabel 4.5 Gradasi Kombinasi RCA 50%**

| kombinasi lolos 60% |     |        |       |       |          |
|---------------------|-----|--------|-------|-------|----------|
| mm                  | SNi | course | fine  | lolos | tertahan |
| 75                  | 76  | 40     | 60.00 | 100   | 0        |
| 37                  | 38  | 39.6   | 54.00 | 93.6  | 6.4      |
| 19                  | 19  | 18     | 48.00 | 66    | 27.6     |
| 9.5                 | 9.6 | 6      | 39.00 | 45    | 21       |
| 4.75                | 4.8 | 0      | 21.00 | 21    | 24       |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024.

Data gradasi dari masing-masing kombinasi ditunjukkan pada Tabel 4.3, Tabel 4.4, dan Tabel 4.5, sementara kurva distribusi lolos saringan dari masing-masing kombinasi divisualisasikan dalam Gambar 4.3 di bawah ini.



Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024.

**Gambar 4.3 Kurva Gradasi Kombinasi RCA 40%, 50%, dan 60%**

### terhadap Batas SNI 03-2834-2000

Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh kombinasi RCA masih berada dalam rentang batas bawah dan atas SNI, dengan RCA 40% menunjukkan kurva gradasi yang paling mendekati zona ideal. Komposisi ini menunjukkan keseimbangan yang lebih baik antara fraksi halus dan kasar, sehingga memberikan kepadatan optimal dan *workability* yang baik dalam campuran beton.

Sebaliknya, gradasi RCA 60% mulai menunjukkan kecenderungan peningkatan fraksi halus, yang berpotensi menyebabkan peningkatan kebutuhan air pencampur dan menurunkan performa mekanik, seperti yang tercermin dalam hasil kuat tekan dan daya rekat pada usia 28 hari. RCA 50% menempati posisi menengah dengan karakteristik yang masih dapat diterima untuk aplikasi struktural ringan hingga menengah.

#### 4.1.2 Trial Mix

Pengujian GRADE FS 45 *Trial Mix* dilakukan pada tanggal 20 November 2024 di Laboratorium Aries Putra Beton. Material yang digunakan dalam campuran meliputi semen, agregat kasar, agregat halus, air, dan *admixture*. Semen Gresik digunakan sebesar 400 kg per m<sup>3</sup> SSD, dengan bobot aktual 16,00 kg untuk skala *trial mix*. Agregat kasar berasal dari limbah perkerasan kaku (*rigid pavement*) proyek Tol Solo–Ngawi yang telah didaur ulang menjadi *Recycled Concrete Aggregate* (RCA), dengan volume 570 kg per m<sup>3</sup> SSD dan berat penggunaan sebesar 22,80 kg. Agregat halus menggunakan pasir Merapi dengan gradasi yang dominan pada fraksi menengah hingga kasar. Volume pasir disesuaikan dari 750 kg per m<sup>3</sup> menjadi 757,5 kg setelah koreksi kadar air (*moisture content*, MC) sebesar 1,0%, dengan bobot penggunaan aktual sebesar 30,30 kg. Air yang digunakan berasal dari sumber artesis, dengan volume tercatat sebesar 142,5 kg setelah penyesuaian. Sebagai tambahan, digunakan *admixture Visco* dengan dosis 1,35% atau setara 0,22 kg (216 ml) untuk meningkatkan *workability* beton.

Pada pelaksanaan *trial mix*, proporsi RCA mengalami penyesuaian akibat perbedaan densitas dibandingkan agregat kasar alami. Untuk campuran RCA 40%, setelah dikoreksi berdasarkan densitas aktual, proporsinya meningkat menjadi 44%. Hal ini menunjukkan bahwa RCA memiliki densitas lebih tinggi dan volume lebih

kecil untuk berat yang sama, dibandingkan agregat konvensional. Penyesuaian serupa terjadi pada variasi RCA 50% dan 60%, yang masing-masing berubah menjadi 54% dan 63%. Penyesuaian ini penting untuk menjaga total berat agregat sesuai dengan desain campuran. Perubahan ini terjadi karena RCA yang digunakan memiliki densitas lebih tinggi, sehingga beratnya lebih besar meskipun volumenya lebih kecil. Penyesuaian ini memastikan bahwa berat total agregat tetap sesuai dengan persentase yang diinginkan, meskipun proporsi volume RCA dalam campuran beton mengalami perubahan.

Analisis gradasi sebelumnya menunjukkan bahwa RCA 40% menghasilkan distribusi partikel yang paling mendekati zona optimal dalam standar SNI 03-2834-2000, menghasilkan kombinasi agregat kasar dan halus yang seimbang. Komposisi ini mendukung kelecakan yang baik dan kekuatan tekan yang optimal. Sebaliknya, pada campuran RCA 60%, dominasi fraksi halus dari RCA menyebabkan peningkatan kebutuhan air dan menurunkan performa beton. Oleh karena itu, penyesuaian proporsi RCA tidak hanya memperhitungkan densitas, tetapi juga mempertimbangkan kualitas gradasi untuk mencapai performa beton yang diharapkan secara teknis dan struktural.

**Tabel 4.6 Penyesuaian Proporsi RCA**

| Variasi Campuran | Rencana Proporsi RCA | Proporsi RCA Setelah Penyesuaian | Keterangan                                                                                            |
|------------------|----------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| RCA 40%          | 40%                  | 44%                              | Proporsi RCA disesuaikan setelah penimbangan karena densitas RCA lebih tinggi.                        |
| RCA 50%          | 50%                  | 54%                              | Penyesuaian densitas RCA membuat volumenya lebih sedikit meskipun beratnya lebih besar.               |
| RCA 60%          | 60%                  | 63%                              | Proporsi RCA berubah sesuai dengan penyesuaian densitas yang lebih tinggi dibandingkan agregat alami. |

Sumber: Hasil Analisis, 2024

Evaluasi terhadap *trial mix* menunjukkan hasil *slump flow* sebesar 65 cm, dengan tingkat *workability* dan *pumpability* yang dinyatakan baik. Rasio agregat terhadap semen (*Agg/Cement*) adalah 3.350, sementara rasio agregat kasar terhadap total agregat (*C. Agg/Agg*) tercatat sebesar 44%. Perbandingan air terhadap semen

(W/C) adalah 0.38, dengan densitas campuran mencapai 2418.80 kg/m<sup>3</sup>. *Yield* material tercatat sebesar 22.580%, sementara volume realisasi adalah 0.031 m<sup>3</sup>. Secara keseluruhan, data ini menunjukkan bahwa komposisi *trial mix* memenuhi kriteria untuk penggunaan beton struktural.

**Tabel 4.7 Data Material dan *Trial Mix***

| GRADE : Fc 45 Trial Mix                                  |               |        |                    |      |                  |                     |                  |         | DATE                        | 20 Nov 24      |
|----------------------------------------------------------|---------------|--------|--------------------|------|------------------|---------------------|------------------|---------|-----------------------------|----------------|
|                                                          |               |        |                    |      |                  |                     |                  |         | LOCATION                    | Area Pura Batu |
| MATERIAL                                                 | SOURCE        | SIZE   | WTDIFF<br>THER 500 | PC   | WTDIFF<br>ADJUST | WTDIFF<br>TRIAL MIX | WTDIFF<br>ACTUAL | REMARKS | FINAL MIX DATA & EVALUATION |                |
| CEMENT                                                   |               |        | 100                |      | 100              | 10.0                | 10.0             |         | SUPPLY                      | 10.00          |
| GRAVEL AGG.                                              | 10.500 - 10mm | 10mm   | 570                |      | 570              | 22.50               | 22.50            |         | COMPACT                     | 0.03           |
| FIN FINE                                                 | 10mm          | 10mm   | 200                | 1.0% | 200              | 20.00               | 20.00            |         | COMPACT                     | 0.03           |
| WATER                                                    | 10mm          |        | 150                |      | 150              | 5.00                | 5.00             |         | COMPACT                     | 0.03           |
| ADJUSTMENT                                               | 10mm          |        | 150                |      | 150              | 5.00                | 5.00             |         | COMPACT                     | 0.03           |
| TOTAL                                                    |               |        | 1000               |      | 1000             | 50.00               | 50.00            |         | COMPACT                     | 0.03           |
| CYLINDER/CUBE COMPRESSIVE STRENGTH (KG/CM <sup>2</sup> ) |               |        |                    |      |                  |                     |                  |         |                             | CONCLUSION     |
| Age                                                      | 10.500 - 10mm | 10mm   | 10.00              |      | 10.00            | 10.00               | 10.00            |         | 10.00                       |                |
| 1                                                        | 25.400-24     | (10mm) | 34.00              |      | 34.00            | 34.00               | 34.00            |         | 34.00                       |                |
| 1                                                        | 25.400-24     | (10mm) | 42.16              |      | 42.16            | 42.16               | 42.16            |         | 42.16                       |                |
| 6                                                        | 25.400-24     | (10mm) | 43.52              |      | 43.52            | 43.52               | 43.52            |         | 43.52                       |                |
| 6                                                        | 25.400-24     | (10mm) | 38.76              |      | 38.76            | 38.76               | 38.76            |         | 38.76                       |                |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

Hasil uji kuat tekan menunjukkan performa beton yang bervariasi berdasarkan umur. Pada umur 3 hari, pengujian dilakukan pada tanggal 23 November 2024. *Load* sebesar 2500 kN menghasilkan *modulus of rupture* sebesar 34.00 kg/cm<sup>2</sup> atau 75.56% dari target desain. Pada pengujian lain di hari yang sama dengan *load* sebesar 3100 kN, dihasilkan *modulus of rupture* sebesar 42.16 kg/cm<sup>2</sup> atau 93.69%. Selanjutnya, pada umur 6 hari, pengujian dilakukan pada tanggal 26 November 2024. Dengan *load* sebesar 3200 kN, diperoleh *modulus of rupture* sebesar 43.52 kg/cm<sup>2</sup> atau 96.71%. Pada pengujian lain dengan *load* sebesar 2850 kN, dihasilkan *modulus of rupture* 38.76 kg/cm<sup>2</sup> atau 86.13%.

Pengujian beton dengan campuran limbah *rigid pavement* sebesar 40%, 50%, dan 60% pada umur 3, 7, dan 28 hari dilakukan untuk mengevaluasi kinerja mekanis dan ketahanan lingkungan beton melalui uji kuat tekan, kuat lentur, kuat tarik belah, serta analisis ketahanan terhadap air dan korosi menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*). Hasil pengujian diharapkan memberikan wawasan

mengenai pengaruh variasi limbah *rigid pavement* terhadap kekuatan dan durabilitas beton, sekaligus mendukung upaya pemanfaatan material daur ulang dalam konstruksi yang lebih berkelanjutan. Berikut merupakan (JMF) *Job Mix Formula* beton dengan campuran limbah *rigid pavement* sebesar 40%, 50%, dan 60% dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 4.8 Trial Mix Beton dengan RCA 40%**

| GRADE : TRIAL MIX 40% RCA |                 |      |                    |       |                  |                     |                  |         | DATE                      | 20-Nov-21         |
|---------------------------|-----------------|------|--------------------|-------|------------------|---------------------|------------------|---------|---------------------------|-------------------|
|                           |                 |      |                    |       |                  |                     |                  |         | LOCATION                  | Artes Putra Beton |
| MATERIAL                  | SOURCE          | SIZE | VOLUME<br>1 M3 SSD | MC    | VOLUME<br>ADJUST | VOLUME<br>TRIAL MIX | VOLUME<br>ACTUAL | REMARKS | TRIAL MIX DATA EVALUATION |                   |
| CEMENT                    | Gresik          |      | 400                |       | 400              | 16.00               | 16.00            |         | SLUMP Flow                | 65 cm             |
| COARSE AGG.               | Td Solo - kg/m3 | RCA  | 570                |       | 570              | 32.80               | 32.80            |         | WORKABILITY               | OK                |
|                           |                 |      |                    |       |                  |                     |                  |         | PUMPABILITY               | OK                |
|                           |                 |      |                    |       |                  |                     |                  |         | AGG/CEMENT                | 0.250             |
| FINE AGG.                 | Merapi          | 100% | 750                | 1.18% | 750.5            | 18.00               | 18.00            |         | C. AGG/AGG                | 4.4%              |
|                           |                 |      |                    |       |                  |                     |                  |         | W/C                       | 0.38              |
|                           |                 |      |                    |       |                  |                     |                  |         |                           |                   |
| WATER                     | artesis         |      | 150                |       | 147.5            | 5.90                | 4.90             |         |                           |                   |
| AD MIXTURE                | WROD            |      | 1.38%              |       | 5.40             | 0.22                | 0.22             |         | CODE SP.                  | Ps 45 TOTAL       |
|                           |                 |      |                    |       |                  | (21.6 m3)           |                  |         | VOL/TOTAL MIX             | 0.01 m3           |
|                           |                 |      |                    |       |                  |                     |                  |         |                           |                   |
| TOTAL                     |                 |      | 1370.0             |       | 1425.4           | 45.62               | 75.62            |         |                           |                   |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

Data pengujian *trial mix* untuk *GRADE: TRIAL MIX 40% RCA* menunjukkan pemanfaatan agregat kasar daur ulang (*recycled concrete aggregate* - RCA) sebagai substitusi dalam campuran beton dengan proporsi 40%. Dari segi komposisi material, penggunaan semen Gresik sebanyak 400 kg dengan agregat kasar RCA sebanyak 570 kg, agregat halus pasir Merapi sebanyak 750 kg, dan air dari sumber artesis sebesar 150 liter mencerminkan formulasi beton yang bertujuan untuk mencapai keseimbangan antara kuat tekan, *workability*, dan efisiensi biaya. Rasio air terhadap semen (W/C) sebesar 0,38 tergolong rendah, yang mendukung tercapainya kekuatan beton yang baik sekaligus mengurangi risiko segregasi dan *bleeding*. Hasil *slump flow* sebesar 65 cm menunjukkan tingkat kelecakan (*workability*) yang cukup baik untuk memenuhi kebutuhan konstruksi, sementara kemampuan campuran untuk dipompa juga dilaporkan berada pada tingkat yang memadai (*Pumpability: OK*), mengindikasikan bahwa campuran ini dapat digunakan untuk metode pengecoran yang lebih fleksibel di lapangan.

Namun, terdapat beberapa hal yang perlu mendapatkan perhatian lebih lanjut. *Yield* beton yang tercatat sebesar 22,58% menunjukkan adanya ketidaksesuaian antara volume yang direncanakan ( $0,04 \text{ m}^3$ ) dengan volume realisasi ( $0,031 \text{ m}^3$ ), menghasilkan deviasi negatif sebesar -22,46%. Penurunan volume ini kemungkinan besar disebabkan oleh penyusutan selama proses pencampuran, tingginya penyerapan air oleh RCA, atau potensi kerugian material selama pengangkutan dan penanganan di lapangan. Pengaruh sifat fisik dan kimia RCA, seperti tingkat porositas dan penyerapan air yang lebih tinggi dibandingkan agregat alami, perlu dievaluasi lebih lanjut, terutama untuk menentukan perlakuan awal yang diperlukan, seperti perendaman atau penambahan air tambahan untuk mengurangi kehilangan air efektif dalam campuran.

Dari segi proporsi material, rasio AGG/CEMENT sebesar 3,350 dan komposisi agregat kasar terhadap total agregat sebesar 44% menunjukkan keseimbangan yang cukup baik, dengan formulasi ini mengakomodasi kebutuhan stabilitas mekanis dan *workability* beton. Namun, untuk memastikan keandalan campuran ini di berbagai kondisi konstruksi, disarankan untuk melakukan pengujian tambahan seperti uji kuat tekan, durabilitas, dan ketahanan terhadap siklus pembekuan-pencairan atau serangan kimia. Dengan densitas campuran sebesar  $2418,80 \text{ kg/m}^3$ , beton ini diperkirakan memiliki karakteristik kuat tekan yang memadai untuk aplikasi struktural.

Secara keseluruhan, *trial mix* ini menunjukkan potensi besar dalam penggunaan RCA sebagai material daur ulang yang ramah lingkungan, namun pengoptimalan *yield* dan evaluasi lebih lanjut terhadap sifat mekanis serta durabilitas sangat penting untuk memastikan keberhasilan implementasi di lapangan. Penyesuaian lebih presisi terhadap kadar air, metode penanganan agregat, dan pengendalian deviasi antara volume rencana dan realisasi perlu menjadi fokus dalam penyempurnaan berikutnya.

Melanjutkan evaluasi *trial mix* dengan 40% RCA, pengujian dengan proporsi 50% RCA dirancang untuk menguji batas optimal penggunaan material daur ulang ini. Peningkatan proporsi RCA diharapkan memberikan wawasan lebih mendalam mengenai pengaruhnya terhadap kuat tekan, *workability*, durabilitas, serta efisiensi produksi. Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.9 berikut ini.

**Tabel 4.9 Trial Mix Beton dengan RCA 50%**

| GRADE : TRIAL MIX 50% RCA |                  |      |                    |      |                  |                     |                  | DATE     | 20-Nov-24                   |             |
|---------------------------|------------------|------|--------------------|------|------------------|---------------------|------------------|----------|-----------------------------|-------------|
|                           |                  |      |                    |      |                  |                     |                  | LOCATION | Aries Putra Beton           |             |
| MATERIAL                  | SOURCE           | SIZE | VOLUME<br>1 M3 SSD | MC   | VOLUME<br>ADJUST | VOLUME<br>TRIAL MIX | VOLUME<br>ACTUAL | REMARKS  | TRIAL MIX DATA & EVALUATION |             |
| CEMENT                    | Gresik           |      | 360.0              |      | 360              | 14.40               | 14.40            |          | SLUMP Flow                  | 65 cm       |
|                           |                  |      |                    |      |                  |                     |                  |          | WORKABILITY                 | OK          |
| COARSE AGG.               | Tol Solo - Ngawi | RCA  | 712.5              |      | 712.5            | 28.50               | 28.50            |          | PUMPABILITY                 | OK          |
|                           |                  |      |                    |      |                  |                     |                  |          | AGG/CEMENT                  | 3.646       |
| FINE AGG.                 | Merapi           | 100% | 600                | 1.0% | 606              | 24.24               | 24.24            |          | C. AGG/AGG                  | 54%         |
|                           |                  |      |                    |      |                  |                     |                  |          | W/C                         | 0.52        |
|                           |                  |      |                    |      |                  |                     |                  |          |                             |             |
| WATER                     | artesis          |      | 187.5              |      | 181.5            | 7.26                | 7.26             |          |                             |             |
| ADMIXTURE                 | Viscop           |      | 1.35%              |      | 4.86             | 0.19                | 0.19             |          | CODE SP.                    | Ps 45 TRIAL |
|                           |                  |      |                    |      |                  | (170 ml)            |                  |          |                             |             |
|                           |                  |      |                    |      |                  |                     |                  |          | VOL TRIAL MIX               | 0.04 M3     |
| TOTAL                     |                  |      | 1860.0             |      | 1864.86          | 74.59               | 74.59            |          |                             |             |

Sumber: Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

Hasil dari pengujian *trial mix* dengan 50% RCA menunjukkan upaya signifikan meningkatkan penggunaan material daur ulang dalam campuran beton. Komposisi material diatur untuk menyeimbangkan kinerja dan pabrikan proyek. Dalam hal ini, semen Gresik 360 kg digunakan, lebih rendah ketimbang sebelumnya, namun disandingkan dengan proporsi Agregat Kasar RCA sebesar 712,5 kg, setara 54% dari total agregat. Agregat Halus Merapi sebanyak 600 kg dan kadar air 1%, sedangkan air dari sumber Artetis sebanyak 144 liter diperoleh dengan W/C sebesar 0,47 diperoleh. Dalam jumlah 1,35% atau 170 ml diperlukan *admixture* untuk mengimbangi *workability* campuran yang 65 cm *slump flow* dan *pumpability* juga “OK”. Hasil rasio *AGG/CEMENT* sebanyak 4,102 menunjukan dominasi agregat, yang merupakan stabilitas struktur beton.

Meskipun demikian, kandungan RCA sebanyak 50% juga menentukan manajemen jumlah air, mengingat RCA porositasnya juga nyata jauh lebih kuat menyerap air ketimbang agregat alam. Pencampuran merujuk komposisi menunjukkan karena mekanis dan manufaktur yang selaras meskipun dengan rasio material daur ulang yang meningkat. Pengujian lanjutan tes dua aspek proses konstruksi yang tertentu mengequivalenkan tekanan kuat dan durabilitas diperlukan untuk menjamin beton aplikasi konstruksi. Penelitian untuk campuran ini secara

umum memiliki potensi besar dalam mendukung keberlanjutan sektor konstruksi tanpa mengorbankan kinerja dan struktural.

**Tabel 4.10 Trial Mix Beton dengan RCA 60%**

| GRADE : TRIAL MIX 60% RCA |                  |      |                    |      |                  |                     |                  |         | DATE                        | 20-Nov-24         |
|---------------------------|------------------|------|--------------------|------|------------------|---------------------|------------------|---------|-----------------------------|-------------------|
|                           |                  |      |                    |      |                  |                     |                  |         | LOCATION                    | Aries Putra Beton |
| MATERIAL                  | SOURCE           | SIZE | VOLUME<br>1 M3 SSD | MC   | VOLUME<br>ADJUST | VOLUME<br>TRIAL MIX | VOLUME<br>ACTUAL | REMARKS | TRIAL MIX DATA & EVALUATION |                   |
| CEMENT                    | Gresik           |      | 320.0              |      | 320.0            | 12.80               | 12.80            |         | SLUMP Flow                  | 65 cm             |
|                           |                  |      |                    |      |                  |                     |                  |         | WORKABILITY                 | OK                |
| COARSE AGG.               | Tol Solo - Ngawi | RCA  | 855                |      | 855              | 34.20               | 34.20            |         | PUMPABILITY                 | OK                |
|                           |                  |      |                    |      |                  |                     |                  |         | AGG/CEMENT                  | 4.234             |
|                           |                  |      |                    |      |                  |                     |                  |         | C. AGG/AGG                  | 63%               |
| FINE AGG.                 | Merapi           | 100% | 500                | 1.0% | 505              | 20.20               | 20.20            |         | W/C                         | 0.70              |
|                           |                  |      |                    |      |                  |                     |                  |         |                             |                   |
|                           |                  |      |                    |      |                  |                     |                  |         |                             |                   |
| WATER                     | artesis          |      | 225                |      | 220              | 8.80                | 8.80             |         |                             |                   |
| ADMEXTURE                 | Visco            |      | 1.35%              |      | 4.32             | 0.17                | 0.17             |         | CODE SP.                    | Fs 45 TRIAL       |
|                           |                  |      |                    |      |                  | (140 ml)            |                  |         |                             |                   |
|                           |                  |      |                    |      |                  |                     |                  |         | VOL TRIAL MIX               | 0.04 M3           |
|                           |                  |      |                    |      |                  |                     |                  |         |                             |                   |
| TOTAL                     |                  |      | 1900.0             |      | 1904.32          | 76.17               | 76.17            |         |                             |                   |

Sumber: Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

#### 4.1.3 Prosedur Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan beton dengan variasi campuran limbah *rigid pavement* (40%, 50%, dan 60%) pada umur 3, 7, dan 28 hari dengan menggunakan sampel silinder dengan ukuran 15 cm x 30 cm (diameter x tinggi). Sampel silinder dibuat dengan mencampurkan beton dalam proporsi yang sudah ditentukan, kemudian dituangkan ke dalam cetakan silinder dan dibiarkan mengeras sesuai umur uji.

Benda uji diletakkan dimesin tekan dengan membagi dengan posisi yang sesuai dengan kedudukan vertical, beban tekan diberikan secara beratahap dengan kecepatan tertentu hingga benda uji hancur.

Kuat tekan beton dihitung dengan membagi beban maksimum yang diberikan selama pengujian dengan luas penampang benda uji. Rumus yang dipakai adalah  $f'_c = P/A$  (dimana  $f'_c$  adalah kuat tekan, P adalah beban Maksimum, dan A adalah luas penampang). Standar yang digunakan mengacu pada SNI 03-1974-1990 cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder.

Pembuatan sampel uji kuat tekan dapat dilihat pada Gambar 4.4 dan hasil sampel uji kuat tekan dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Sumber: Dokumentasi Penulis, 2024

**Gambar 4.4 Pembuatan Sampel Uji Kuat Tekan**



Sumber: Dokumentasi Penulis, 2024

**Gambar 4.5 Sampel Uji Kuat Tekan**

Pengujian kuat tekan beton dilaksanakan dengan meletakkan sampel silinder pada mesin uji tekan dengan posisi tegak (sumbu vertikal). Mesin akan memberikan beban secara bertahap hingga beton mengalami keretakan atau kegagalan. Pengujian kuat tekan dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Sumber: Dokumentasi Penulis, 2024

**Gambar 4.6 Pengujian Kuat Tekan Beton**

Kuat tekan dihitung berdasarkan beban maksimum yang diterima oleh silinder beton hingga keretakan, dibagi dengan luas penampang silinder. Berikut merupakan hasil pengujian kuat tekan beton dengan variasi campuran limbah *rigid pavement* (40%, 50%, dan 60%) pada umur 3, 7, dan 28 hari.

## 4.2 Hasil Pengujian Kuat Tekan

### 4.2.1 Kuat Tekan Beton RCA 40% pada Umur 3, 7, dan 28 Hari

Kuat tekan beton dengan campuran RCA 40% pada umur 3 hari bisa dilihat pada Tabel 4.11 berikut:

**Tabel 4.11 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton dengan RCA 40% pada Umur 3 Hari**

| NAMA              | :                 | LUBAB                                        |            |                 |             |            |            |                           |            |
|-------------------|-------------------|----------------------------------------------|------------|-----------------|-------------|------------|------------|---------------------------|------------|
| PROYEK            | :                 | MODEL PERILAKU MEKANIK BETON DENGAN CAMPURAN |            |                 |             |            |            |                           |            |
| BENDA UJI         | :                 | DAUR ULANG RIGID PAVEMENT                    |            |                 |             |            |            |                           |            |
| UKURAN            | :                 | SILINDER                                     |            |                 |             |            |            |                           |            |
| BENDA UJI         | :                 | DIAMETER 15 CM X                             |            |                 |             |            |            |                           |            |
| BENDA UJI         | :                 | TINGGI 30 CM                                 |            |                 |             |            |            |                           |            |
| KODE BENDA UJI    | TANGGAL PEMBUATAN | TANGGAL TESTING                              | MUTU BETON | SLUMP FLOW (CM) | UMUR (HARI) | BEBAN (KN) | BERAT (KG) | KUAT TEKAN SILINDER (Mpa) | PERSENTASE |
| TRIAL MIX 40% RCA | 20-Nov-24         | 23-Nov-24                                    | FS 45      | 40-60           | 3           | 680        | 12.78      | 38.50                     | 86%        |
|                   | 20-Nov-24         | 23-Nov-24                                    | FS 45      | 40-60           | 3           | 740        | 12.88      | 41.90                     | 93%        |
|                   | 20-Nov-24         | 23-Nov-24                                    | FS 45      | 40-60           | 3           | 710        | 12.72      | 40.20                     | 89%        |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

Pada umur 3 hari, beton dengan campuran RCA 40% menunjukkan kekuatan tekan yang cukup baik. Tiga benda uji memberikan hasil kuat tekan masing-masing sebesar 38.50 MPa, 41.90 MPa, dan 40.20 MPa, dengan persentase pencapaian terhadap mutu desain FS 45 masing-masing adalah 86%, 93%, dan 89%. Hasil ini mengindikasikan bahwa beton telah mencapai sebagian besar kekuatan desainnya pada umur awal. Variasi kecil antara ketiga benda uji menunjukkan homogenitas campuran yang baik dan kesesuaian proses pengerjaan beton.

Kinerja awal ini menunjukkan bahwa campuran RCA 40% mampu menghasilkan beton dengan kekuatan tekan yang memenuhi kebutuhan konstruksi pada tahap awal. Dengan pencapaian lebih dari 85% kekuatan desain pada umur 3 hari, beton ini memberikan fleksibilitas yang baik untuk aplikasi di lapangan yang memerlukan kekuatan awal yang tinggi.

Hasil pengujian kuat tekan beton dengan campuran RCA 40% pada umur 7 hari menggunakan benda uji berbentuk silinder berukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm dapat dilihat pada tabel berikut:

**Tabel 4.12 Hasil Uji Kuat Tekan Beton dengan RCA 40% pada Umur 7 Hari**

| NAMA : LUBAB<br>PROYEK : MODEL PERILAKU MEKANIK BETON DENGAN CAMPURAN DAUR ULANG RIGID PAVEMENT<br>BENDA UJI : SILINDER<br>UKURAN : DIAMETER 15 CM X<br>BENDA UJI : TINGGI 30 CM |                   |                 |            |                 |             |            |            |                           |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------|------------|-----------------|-------------|------------|------------|---------------------------|------------|
| KODE BENDA UJI                                                                                                                                                                   | TANGGAL PEMBUATAN | TANGGAL TESTING | MUTU BETON | SLUMP FLOW (CM) | UMUR (HARI) | BEBAN (KN) | BERAT (KG) | KUAT TEKAN SILINDER (Mpa) | PRESENTASE |
| TRIAL MIX 40% RCA                                                                                                                                                                | 20-Nov-24         | 27-Nov-24       | FS 45      | 40-60           | 7           | 760        | 12.48      | 43.03                     | 96%        |
|                                                                                                                                                                                  | 20-Nov-24         | 27-Nov-24       | FS 45      | 40-60           | 7           | 790        | 12.98      | 44.73                     | 99%        |
|                                                                                                                                                                                  | 20-Nov-24         | 27-Nov-24       | FS 45      | 40-60           | 7           | 780        | 12.32      | 44.16                     | 98%        |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

Pada umur 7 hari, beton dengan campuran RCA 40% menunjukkan perkembangan kekuatan tekan yang signifikan dibandingkan umur 3 hari. Tiga benda uji memberikan hasil kuat tekan sebesar 43.03 MPa, 44.73 MPa, dan 44.16 MPa, dengan persentase pencapaian terhadap mutu desain FS 45 masing-masing adalah 96%, 99%, dan 98%. Hasil ini mengindikasikan bahwa beton hampir mencapai kekuatan desainnya pada umur pertengahan, menunjukkan performa mekanis yang konsisten dan stabil pada semua benda uji.

Peningkatan kekuatan tekan ini dapat dijelaskan oleh proses hidrasi semen yang terus berlangsung, memperkuat ikatan antar partikel agregat dan matriks semen. Homogenitas campuran serta distribusi RCA yang merata juga mendukung hasil ini. Rendahnya variasi antara ketiga benda uji menunjukkan kualitas pengerjaan dan pencampuran yang baik.

Hasil ini menunjukkan bahwa beton dengan campuran RCA 40% dapat digunakan untuk elemen struktural pada umur 7 hari, dengan pencapaian hampir maksimal terhadap mutu desain. Beton ini cocok untuk aplikasi struktural di mana kekuatan tekan pada tahap pertengahan umur diperlukan, seperti balok, kolom, atau pelat lantai.

Hasil pengujian kuat tekan beton dengan campuran RCA 40% pada umur 28 hari menggunakan benda uji berbentuk silinder berukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm dapat dilihat pada tabel berikut 4.13.

**Tabel 4.13 Hasil Uji Kuat Tekan Beton dengan RCA 40% pada Umur 28 Hari**

| NAMA              |                   | : LUBAB                                             |            |                 |             |            |            |                           |            |
|-------------------|-------------------|-----------------------------------------------------|------------|-----------------|-------------|------------|------------|---------------------------|------------|
| PROYEK            |                   | : MODEL PERILAKU MEKANIK BETON DENGAN CAMPURAN DAUR |            |                 |             |            |            |                           |            |
| BENDA UJI         |                   | : ULANG RIGID PAVEMENT                              |            |                 |             |            |            |                           |            |
| UKURAN            |                   | : SILINDER                                          |            |                 |             |            |            |                           |            |
| BENDA UJI         |                   | : DIAMETER 15 CM X TINGGI 30 CM                     |            |                 |             |            |            |                           |            |
| KODE BENDA UJI    | TANGGAL PEMBUATAN | TANGGAL TESTING                                     | MUTU BETON | SLUMP FLOW (CM) | UMUR (HARI) | BEBAN (KN) | BERAT (KG) | KUAT TEKAN SILINDER (Mpa) | PRESENTASE |
| TRIAL MIX 40% RCA | 20-Nov-24         | 18-Dec-24                                           | FS 45      | 40-60           | 28          | 800        | 12.68      | 45.29                     | 101%       |
|                   | 20-Nov-24         | 18-Dec-24                                           | FS 45      | 40-60           | 28          | 900        | 13.08      | 50.96                     | 113%       |
|                   | 20-Nov-24         | 18-Dec-24                                           | FS 45      | 40-60           | 28          | 850        | 12.52      | 48.12                     | 107%       |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

Pada umur 28 hari, beton dengan campuran RCA 40% menunjukkan performa yang sangat baik, dengan kuat tekan yang tidak hanya mencapai, tetapi juga melampaui mutu desain FS 45. Tiga benda uji menghasilkan kuat tekan sebesar 45.29 MPa, 50.96 MPa, dan 48.12 MPa, dengan persentase pencapaian terhadap mutu desain masing-masing sebesar 101%, 113%, dan 107%.

Hasil ini menunjukkan bahwa beton dengan campuran RCA 40% memiliki potensi kekuatan jangka panjang yang sangat baik. Proses hidrasi yang telah selesai pada umur ini menghasilkan matriks beton yang kuat dan kokoh. Homogenitas

campuran serta distribusi material yang baik juga berkontribusi terhadap pencapaian ini, yang tercermin dari hasil kuat tekan yang konsisten antar benda uji.

Performa ini membuktikan bahwa penggunaan RCA sebesar 40% sebagai pengganti agregat kasar tidak hanya memberikan manfaat dari segi lingkungan, tetapi juga mampu memenuhi kebutuhan struktural dengan baik. Beton ini cocok untuk digunakan pada elemen struktural seperti kolom, balok, dan pelat lantai, bahkan pada proyek yang memerlukan mutu beton tinggi.

#### 4.2.2 Kuat Tekan Beton RCA 50% pada Umur 3, 7, dan 28 Hari

Hasil pengujian kuat tekan beton dengan campuran RCA 50% pada umur 3 hari menggunakan benda uji berbentuk silinder berukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Pada umur 3 hari, beton dengan campuran RCA 50% menunjukkan variasi kekuatan tekan pada tiga benda uji. Hasil kuat tekan masing-masing adalah 25.48 MPa, 28.31 MPa, dan 23.78 MPa, dengan persentase pencapaian terhadap mutu desain FS 45 masing-masing sebesar 57%, 63%, dan 53%. Hasil ini menunjukkan bahwa beton dengan campuran RCA 50% belum mencapai kekuatan yang optimal pada umur awal.

Faktor yang mungkin memengaruhi rendahnya kuat tekan pada umur ini antara lain tingkat homogenitas campuran, distribusi partikel RCA, dan proses hidrasi semen yang belum sepenuhnya selesai pada umur 3 hari. Meskipun demikian, hasil ini masih cukup untuk aplikasi konstruksi awal yang tidak memerlukan kekuatan tinggi. Lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 4.14.

**Tabel 4.14 Hasil Uji Kuat Tekan Beton dengan RCA 50% pada Umur 3 Hari**

| NAMA              |                   | : LUBAB                                                                  |            |                 |             |            |            |                           |            |
|-------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------|-------------|------------|------------|---------------------------|------------|
| PROYEK            |                   | : MODEL PERILAKU MEKANIK BETON DENGAN CAMPURAN DAUR ULANG RIGID PAVEMENT |            |                 |             |            |            |                           |            |
| BENDA UJI         |                   | : SILINDER                                                               |            |                 |             |            |            |                           |            |
| UKURAN            |                   | : DIAMETER 15 CM X TINGGI                                                |            |                 |             |            |            |                           |            |
| BENDA UJI         |                   | 30 CM                                                                    |            |                 |             |            |            |                           |            |
| KODE BENDA UJI    | TANGGAL PEMBUATAN | TANGGAL TESTING                                                          | MUTU BETON | SLUMP FLOW (CM) | UMUR (HARI) | BEBAN (KN) | BERAT (KG) | KUAT TEKAN SILINDER (Mpa) | PERSENTASE |
| TRIAL MIX 50% RCA | 20-Nov-24         | 23-Nov-24                                                                | FS 45      | 40-60           | 3           | 450        | 12.28      | 25.48                     | 57%        |
|                   | 20-Nov-24         | 23-Nov-24                                                                | FS 45      | 40-60           | 3           | 500        | 12.18      | 28.31                     | 63%        |
|                   | 20-Nov-24         | 23-Nov-24                                                                | FS 45      | 40-60           | 3           | 420        | 12.68      | 23.78                     | 53%        |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

Hasil pengujian kuat tekan beton dengan campuran RCA 50% pada umur 7 hari menggunakan benda uji berbentuk silinder berukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm dapat dilihat pada tabel 4.9.

Pada umur 7 hari, beton dengan campuran RCA 50% menunjukkan peningkatan kekuatan tekan dibandingkan umur 3 hari, meskipun hasilnya masih berada di bawah pencapaian maksimal mutu desain FS 45. Tiga benda uji memberikan hasil kuat tekan masing-masing sebesar 30.01 MPa, 31.14 MPa, dan 25.48 MPa, dengan persentase pencapaian terhadap mutu desain FS 45 adalah 67%, 69%, dan 57%.

**Tabel 4.15 Hasil Uji Kuat Tekan Beton dengan RCA 50% pada Umur 7 Hari**

| NAMA : LUBAB<br>PROYEK : MODEL PERILAKU MEKANIK BETON DENGAN CAMPURAN DAUR ULANG<br>RIGID PAVEMENT<br>BENDA UJI : SILINDER<br>UKURAN BENDA UJI : DIAMETER 15 CM X TINGGI 30 CM |                   |                 |            |                 |             |            |            |                           |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------|------------|-----------------|-------------|------------|------------|---------------------------|------------|
| KODE BENDA UJI                                                                                                                                                                 | TANGGAL PEMBUATAN | TANGGAL TESTING | MUTU BETON | SLUMP FLOW (CM) | UMUR (HARI) | BEBAN (KN) | BERAT (KG) | KUAT TEKAN SILINDER (Mpa) | PRESENTASE |
| TRIAL MIX 50% RCA                                                                                                                                                              | 20-Nov-24         | 27-Nov-24       | FS 45      | 40-60           | 7           | 530        | 12.29      | 30.01                     | 67%        |
|                                                                                                                                                                                | 20-Nov-24         | 27-Nov-24       | FS 45      | 40-60           | 7           | 550        | 12.48      | 31.14                     | 69%        |
|                                                                                                                                                                                | 20-Nov-24         | 27-Nov-24       | FS 45      | 40-60           | 7           | 450        | 12.68      | 25.48                     | 57%        |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

Hasil ini mengindikasikan bahwa pada umur pertengahan, campuran RCA 50% memiliki performa yang cukup baik, meskipun belum mencapai kekuatan yang optimal. Variasi antara nilai kuat tekan ketiga benda uji dapat menunjukkan bahwa distribusi RCA dalam campuran perlu diperbaiki untuk meningkatkan homogenitas beton. Penurunan performa pada salah satu benda uji (57%) dapat disebabkan oleh faktor internal seperti porositas RCA yang tinggi atau faktor eksternal seperti variasi dalam metode pengerjaan.

Kekuatan tekan pada umur 7 hari ini menunjukkan bahwa beton dengan RCA 50% dapat digunakan untuk aplikasi tertentu, seperti elemen non-struktural atau elemen yang tidak memerlukan kekuatan tinggi pada tahap awal. Namun, hasil ini juga menunjukkan perlunya evaluasi lebih lanjut pada umur 28 hari untuk mengetahui potensi pencapaian kekuatan maksimumnya.

Hasil pengujian kuat tekan beton dengan campuran RCA 50% pada umur 28

hari menggunakan benda uji berbentuk silinder berukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm dapat dilihat pada tabel 4.16.

Pada umur 28 hari, beton dengan campuran RCA 50% menunjukkan peningkatan kekuatan tekan yang signifikan dibandingkan umur sebelumnya, meskipun hasilnya masih berada di bawah mutu desain FS 45. Tiga benda uji memberikan hasil kuat tekan sebesar 36.80 MPa, 42.46 MPa, dan 33.97 MPa, dengan persentase pencapaian terhadap mutu desain masing-masing adalah 82%, 94%, dan 75%.

**Tabel 4.16 Hasil Uji Kuat Tekan Beton dengan RCA 50% pada Umur 28 Hari**

| NAMA              |                   | : LUBAB                                                                  |            |                 |             |            |            |                           |            |
|-------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------|-------------|------------|------------|---------------------------|------------|
| PROYEK            |                   | : MODEL PERILAKU MEKANIK BETON DENGAN CAMPURAN DAUR ULANG RIGID PAVEMENT |            |                 |             |            |            |                           |            |
| BENDA UJI         |                   | : SILINDER                                                               |            |                 |             |            |            |                           |            |
| UKURAN BENDA UJI  |                   | : DIAMETER 15 CM X TINGGI 30 CM                                          |            |                 |             |            |            |                           |            |
| KODE BENDA UJI    | TANGGAL PEMBUATAN | TANGGAL TESTING                                                          | MUTU BETON | SLUMP FLOW (CM) | UMUR (HARI) | BEBAN (KN) | BERAT (KG) | KUAT TEKAN SILINDER (Mpa) | PRESENTASE |
| TRIAL MIX 50% RCA | 20-Nov-24         | 18-Dec-24                                                                | FS 45      | 40-60           | 28          | 650        | 12.49      | 36.80                     | 82%        |
|                   | 20-Nov-24         | 18-Dec-24                                                                | FS 45      | 40-60           | 28          | 750        | 12.68      | 42.46                     | 94%        |
|                   | 20-Nov-24         | 18-Dec-24                                                                | FS 45      | 40-60           | 28          | 600        | 12.88      | 33.97                     | 75%        |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

Variasi hasil antara benda uji mengindikasikan adanya potensi ketidakhomogenan dalam distribusi RCA dalam campuran beton. Rendahnya kuat tekan pada salah satu benda uji (75%) juga menunjukkan kemungkinan pengaruh dari porositas RCA yang tinggi dan kelemahan dalam proses pencampuran atau *curing*. Namun, pencapaian kuat tekan tertinggi (94%) menunjukkan bahwa beton dengan RCA 50% memiliki potensi kekuatan yang dapat diterima untuk aplikasi tertentu, terutama pada elemen yang tidak memerlukan kekuatan tekan tinggi.

Secara keseluruhan, beton dengan campuran RCA 50% dapat digunakan untuk aplikasi non-struktural atau elemen struktural ringan pada umur 28 hari. Namun, untuk mendapatkan performa yang lebih optimal, diperlukan peningkatan dalam homogenitas campuran serta evaluasi lebih lanjut terhadap sifat mekanis beton ini.

#### 4.2.3 Kuat Tekan Beton RCA 60% pada Umur 3, 7, dan 28 Hari

Pada umur 3 hari, beton dengan campuran RCA 60% menunjukkan kekuatan tekan yang relatif lebih rendah dibandingkan campuran RCA 40% dan 50%. Tiga benda uji menghasilkan kuat tekan masing-masing sebesar 22.65 MPa, 23.21 MPa, dan 18.68 MPa, dengan persentase pencapaian terhadap mutu desain FS 45 sebesar 50%, 52%, dan 42%. Nilai kuat tekan yang lebih rendah ini menunjukkan bahwa proporsi RCA sebesar 60% memengaruhi proses hidrasi dan pembentukan ikatan antar partikel dalam beton pada umur awal.

**Tabel 4.17 Hasil Uji Kuat Tekan Beton dengan RCA 60% pada Umur 3 Hari**

| NAMA : LUBAB         |                   | PROYEK : MODEL PERILAKU MEKANIK BETON DENGAN CAMPURAN DAUR ULANG RIGID PAVEMENT |            |                 |             |            |            |                           |            |
|----------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------|-------------|------------|------------|---------------------------|------------|
| BENDA UJI : SILINDER |                   | UKURAN BENDA UJI : DIAMETER 15 CM X TINGGI 30 CM                                |            |                 |             |            |            |                           |            |
| KODE BENDA UJI       | TANGGAL PEMBUATAN | TANGGAL TESTING                                                                 | MUTU BETON | SLUMP FLOW (CM) | UMUR (HARI) | BEBAN (KN) | BERAT (KG) | KUAT TEKAN SILINDER (Mpa) | PERSENTASE |
| TRIAL MIX 60% RCA    | 20-Nov-24         | 23-Nov-24                                                                       | FS 45      | 40-60           | 3           | 400        | 12.70      | 22.65                     | 50%        |
|                      | 20-Nov-24         | 23-Nov-24                                                                       | FS 45      | 40-60           | 3           | 410        | 13.06      | 23.21                     | 52%        |
|                      | 20-Nov-24         | 23-Nov-24                                                                       | FS 45      | 40-60           | 3           | 330        | 12.88      | 18.68                     | 42%        |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

Rendahnya kuat tekan ini dapat disebabkan oleh sifat RCA yang memiliki porositas lebih tinggi dibandingkan agregat alami, sehingga mengurangi densitas dan kekuatan beton. Selain itu, distribusi RCA dalam campuran dapat memengaruhi ikatan antar partikel, yang pada akhirnya memengaruhi kuat tekan beton. Meskipun demikian, hasil ini masih dapat diterima untuk aplikasi non-struktural atau kebutuhan konstruksi sementara pada umur awal.

Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengevaluasi performa beton dengan RCA 60% pada umur yang lebih panjang, seperti 7 hari atau 28 hari, guna mengetahui potensi kekuatannya secara keseluruhan. Selain itu, perbaikan dalam proses pencampuran dan proporsi material dapat membantu meningkatkan homogenitas dan kekuatan tekan beton dengan campuran RCA 60%.

Hasil pengujian kuat tekan beton dengan campuran RCA 60% pada umur 7 hari menggunakan benda uji berbentuk silinder berukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm dapat dilihat pada tabel berikut:

**Tabel 4.18 Hasil Uji Kuat Tekan Beton dengan RCA 60% pada Umur 7 Hari**

| NAMA              |                   | : LUBAB                                                                  |            |                 |             |            |            |                           |            |
|-------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------|-------------|------------|------------|---------------------------|------------|
| PROYEK            |                   | : MODEL PERILAKU MEKANIK BETON DENGAN CAMPURAN DAUR ULANG RIGID PAVEMENT |            |                 |             |            |            |                           |            |
| BENDA UJI         |                   | : SILINDER                                                               |            |                 |             |            |            |                           |            |
| UKURAN BENDA UJI  |                   | : DIAMETER 15 CM X TINGGI 30 CM                                          |            |                 |             |            |            |                           |            |
| KODE BENDA UJI    | TANGGAL PEMBUATAN | TANGGAL TESTING                                                          | MUTU BETON | SLUMP FLOW (CM) | UMUR (HARI) | BEBAN (KN) | BERAT (KG) | KUAT TEKAN SILINDER (Mpa) | PRESENTASE |
| TRIAL MIX 60% RCA | 20-Nov-24         | 27-Nov-24                                                                | FS 45      | 40-60           | 7           | 450        | 12.72      | 25.48                     | 57%        |
|                   | 20-Nov-24         | 27-Nov-24                                                                | FS 45      | 40-60           | 7           | 500        | 12.92      | 28.31                     | 63%        |
|                   | 20-Nov-24         | 27-Nov-24                                                                | FS 45      | 40-60           | 7           | 400        | 12.48      | 22.65                     | 50%        |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

Hasil pengujian kuat tekan beton dengan campuran RCA 60% pada umur 28 hari menggunakan benda uji berbentuk silinder berukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm dapat dilihat pada tabel berikut:

**Tabel 4.19 Hasil Uji Kuat Tekan Beton dengan RCA 60% pada Umur 28 Hari**

| NAMA              |                   | : LUBAB                                                                  |            |                 |             |            |            |                           |            |
|-------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------|-------------|------------|------------|---------------------------|------------|
| PROYEK            |                   | : MODEL PERILAKU MEKANIK BETON DENGAN CAMPURAN DAUR ULANG RIGID PAVEMENT |            |                 |             |            |            |                           |            |
| BENDA UJI         |                   | : SILINDER                                                               |            |                 |             |            |            |                           |            |
| UKURAN BENDA UJI  |                   | : DIAMETER 15 CM X TINGGI 30 CM                                          |            |                 |             |            |            |                           |            |
| KODE BENDA UJI    | TANGGAL PEMBUATAN | TANGGAL TESTING                                                          | MUTU BETON | SLUMP FLOW (CM) | UMUR (HARI) | BEBAN (KN) | BERAT (KG) | KUAT TEKAN SILINDER (Mpa) | PRESENTASE |
| TRIAL MIX 50% RCA | 20-Nov-24         | 18-Dec-24                                                                | FS 45      | 40-60           | 28          | 650        | 12.49      | 36.80                     | 82%        |
|                   | 20-Nov-24         | 18-Dec-24                                                                | FS 45      | 40-60           | 28          | 750        | 12.68      | 42.46                     | 94%        |
|                   | 20-Nov-24         | 18-Dec-24                                                                | FS 45      | 40-60           | 28          | 600        | 12.88      | 33.97                     | 75%        |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

Pada umur 28 hari, beton dengan campuran RCA 60% menunjukkan peningkatan kekuatan tekan dibandingkan umur sebelumnya, namun hasil ini tetap berada di bawah mutu desain FS 45. Tiga benda uji menghasilkan kuat tekan sebesar 33.97 MPa, 36.80 MPa, dan 31.14 MPa, dengan persentase pencapaian terhadap mutu desain masing-masing adalah 75%, 82%, dan 69%.

Hasil ini mengindikasikan bahwa proporsi RCA sebesar 60% memiliki dampak signifikan terhadap penurunan kekuatan tekan beton. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh sifat RCA yang lebih berpori dan memiliki kekuatan intrinsik lebih rendah dibandingkan agregat alami, yang memengaruhi kekuatan matriks beton

secara keseluruhan. Variasi hasil antara benda uji juga mencerminkan kemungkinan ketidakhomogenan distribusi RCA dalam campuran.

Meskipun hasil ini menunjukkan keterbatasan dalam pencapaian kekuatan desain, beton dengan RCA 60% masih dapat digunakan untuk aplikasi non-struktural atau elemen struktural ringan. Perbaikan dalam metode pencampuran atau penggunaan RCA dengan kualitas lebih baik dapat meningkatkan performa campuran ini di masa mendatang.

#### 4.3 Hasil Pengujian Kuat Lentur

Pengujian kuat lentur beton dengan campuran limbah *rigid pavement* sebesar 40%, 50%, dan 60% dilakukan menggunakan sampel balok berukuran 15 cm x 30 cm x 60 cm. Proses dimulai dengan mencampur agregat halus, agregat kasar, semen, dan limbah *rigid pavement* sesuai variasi campuran, ditambahkan air hingga adukan homogen. Campuran beton kemudian dimasukkan ke dalam cetakan balok dalam tiga lapis, setiap lapis dipadatkan menggunakan batang pemadat atau meja getar untuk mengeluarkan udara. Setelah 24 jam, beton dilepas dari cetakan dan direndam dalam air bersih untuk perawatan (*curing*) hingga waktu pengujian, yaitu 3, 7, dan 28 hari. Pembuatan sampel uji kuat tekan dapat dilihat pada Gambar 4.7 dan hasil sampel uji kuat lentur dapat dilihat pada Gambar 4.8.



Sumber: Dokumentasi Penulis, 2024

**Gambar 4.7 Pembuatan Sampel Uji Kuat Lentur**



Sumber: Dokumentasi Penulis, 2024

**Gambar 4.8 Sampel Uji Kuat Lentur**

Pengujian kuat lentur beton dilaksanakan dengan menggunakan sampel balok berukuran 15 cm x 30 cm x 60 cm yang telah dirawat sesuai umur pengujian, yaitu 3, 7, dan 28 hari. Sampel diletakkan pada mesin uji lentur dengan posisi horizontal, di mana kedua ujungnya didukung oleh tumpuan. Beban diterapkan secara bertahap pada titik Tengah. Pengujian kuat lentur dapat dilihat pada Gambar 4.9.



Sumber: Dokumentasi Penulis, 2024

**Gambar 4.9 Pengujian Kuat Lentur Beton**

Kuat lentur dihitung berdasarkan beban maksimum yang diterima oleh sampel beton selama pengujian hingga retak atau patah. Berikut merupakan hasil pengujian kuat lentur beton dengan variasi campuran limbah *rigid pavement* (40%, 50%, dan 60%) pada umur 3, 7, dan 28 hari

#### 4.3.1 Kuat Lentur Beton RCA 40% pada Umur 3, 7, dan 28 Hari

Pengujian kuat lentur beton dengan campuran RCA 40% pada umur 3 hari menggunakan benda uji berbentuk balok dengan ukuran 15 cm x 30 cm x 60 cm dan panjang bentang antara dua tumpuan (L) sebesar 45 cm menghasilkan nilai *modulus of rupture* sebagai berikut:

- Sampel pertama memiliki gaya tekan sebesar 3080 kg, menghasilkan *modulus of rupture* 41.07 kg/cm<sup>2</sup> (91% dari target mutu FS 45).
- Sampel kedua memiliki gaya tekan sebesar 3150 kg, menghasilkan *modulus of rupture* 42.00 kg/cm<sup>2</sup> (93% dari target mutu FS 45).
- Sampel ketiga memiliki gaya tekan sebesar 3000 kg, menghasilkan *modulus of rupture* 40.00 kg/cm<sup>2</sup> (89% dari target mutu FS 45).

Berikut adalah hasil uji lentur beton 40% RCA:

**Tabel 4.20 Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton dengan Campuran 40% RCA pada Umur 3 Hari**

| NAMA : LUBAB                                                                    |                   |                 |            |                                           |             |                     |                      |                       |                                                                |            |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------|------------|-------------------------------------------|-------------|---------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------|------------|
| PROYEK : MODEL PERILAKU MEKANIK BETON DENGAN CAMPURAN DAUR ULANG RIGID PAVEMENT |                   |                 |            |                                           |             |                     |                      |                       |                                                                |            |
| BENDA UJI : BEAM                                                                |                   |                 |            |                                           |             |                     |                      |                       |                                                                |            |
| UKURAN BENDA UJI : 15 CM X 30 CM X 60 CM                                        |                   |                 |            |                                           |             |                     |                      |                       |                                                                |            |
| KODE BENDA UJI                                                                  | TANGGAL PEMBUATAN | TANGGAL TESTING | MUTU BETON | PANJANG BENTANG ANTARA 2 TUMPUAN (L) (CM) | UMUR (HARI) | GAYA TEKAN (P) (KG) | LEBAR BALOK (B) (CM) | TINGGI BALOK (B) (CM) | MODULUS OF RUPTURE (PL/bh <sup>2</sup> ) (kg/cm <sup>2</sup> ) | PERSENTASE |
| TRIAL MIX 40% RCA                                                               | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                        | 3           | 3080                | 15                   | 15                    | 41.07                                                          | 91%        |
|                                                                                 | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                        | 3           | 3150                | 15                   | 15                    | 42.00                                                          | 93%        |
|                                                                                 | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                        | 3           | 3000                | 15                   | 15                    | 40.00                                                          | 89%        |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa pada umur 3 hari, beton dengan campuran RCA 40% telah menunjukkan performa yang cukup baik untuk mendekati mutu desain FS 45. Variasi *modulus of rupture* antar sampel relatif kecil, yaitu berkisar antara 40.00–42.00 kg/cm<sup>2</sup>, menunjukkan tingkat homogenitas yang baik dalam campuran beton.

Pada umur 3 hari, beton dengan RCA 40% memiliki performa mekanis yang cukup baik dalam hal kuat lentur. Dengan pencapaian rata-rata *modulus of rupture* sebesar 41.02 kg/cm<sup>2</sup> (91%), beton ini telah mendekati kekuatan lentur yang diperlukan untuk aplikasi awal atau struktural ringan. Namun, hasil ini masih perlu dievaluasi pada umur 7 hari dan 28 hari untuk mengetahui potensi pencapaian

kekuatan optimalnya. Performa ini juga menunjukkan bahwa RCA 40% dapat menjadi alternatif pengganti agregat kasar yang ramah lingkungan tanpa signifikan mengurangi kekuatan lentur beton.

Pengujian kekuatan lentur beton dengan campuran RCA 40% pada umur 7 hari dilakukan untuk menilai peningkatan kemampuan beton dalam menahan tegangan lentur setelah tahap awal pengerasan. Pengujian ini menggunakan sampel balok berukuran 15 cm x 15 cm x 60 cm dengan panjang bentang antara dua tumpuan sebesar 45 cm. Proses pengujian dilakukan dengan menerapkan gaya tekan secara bertahap pada titik tengah balok hingga terjadi kegagalan. Hasil pengujian ini memberikan gambaran mengenai perkembangan kekuatan lentur beton dengan RCA 40% pada tahap pertengahan umur dan menjadi indikator penting dalam mengevaluasi kinerja mekanis campuran beton tersebut.

**Tabel 4.21 Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton dengan Campuran 40% RCA pada Umur 7 Hari**

| NAMA : LUBAB                                                                    |                   |                 |            |                                           |             |                     |                      |                       |                                                                |             |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------|------------|-------------------------------------------|-------------|---------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------|-------------|
| PROYEK : MODEL PERILAKU MEKANIK BETON DENGAN CAMPURAN DAUR ULANG RIGID PAVEMENT |                   |                 |            |                                           |             |                     |                      |                       |                                                                |             |
| BENDA UJI : BEAM                                                                |                   |                 |            |                                           |             |                     |                      |                       |                                                                |             |
| UKURAN BENDA UJI : 15 CM X 30 CM X 60 CM                                        |                   |                 |            |                                           |             |                     |                      |                       |                                                                |             |
| KODE BENDA UJI                                                                  | TANGGAL PEMBUATAN | TANGGAL TESTING | MUTU BETON | PANJANG BENTANG ANTARA 2 TUMPUAN (L) (CM) | UMUR (HARI) | GAYA TEKAN (P) (KG) | LEBAR BALOK (B) (CM) | TINGGI BALOK (B) (CM) | MODULUS OF RUPTURE (PL/bh <sup>2</sup> ) (kg/cm <sup>2</sup> ) | PERSENT ASE |
| TRIAL MIX 40% RCA                                                               | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                        | 7           | 3380                | 15                   | 15                    | 45.07                                                          | 100%        |
|                                                                                 | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                        | 7           | 3450                | 15                   | 15                    | 46.00                                                          | 102%        |
|                                                                                 | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                        | 7           | 3300                | 15                   | 15                    | 44.00                                                          | 98%         |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

Pengujian kekuatan lentur beton dengan campuran RCA 40% pada umur 7 hari dilakukan menggunakan benda uji berbentuk balok berukuran 15 cm x 30 cm x 60 cm dengan panjang bentang antara dua tumpuan sebesar 45 cm. Hasil pengujian menunjukkan nilai *modulus of rupture* sebagai berikut:

- Sampel pertama dengan gaya tekan sebesar 3380 kg menghasilkan *modulus of rupture* 45.07 kg/cm<sup>2</sup>, yang mencapai 100% dari target mutu FS 45.
- Sampel kedua dengan gaya tekan sebesar 3450 kg menghasilkan *modulus of rupture* 46.00 kg/cm<sup>2</sup>, yang mencapai 102% dari target mutu FS 45.
- Sampel ketiga dengan gaya tekan sebesar 3300 kg menghasilkan *modulus of rupture* 44.00 kg/cm<sup>2</sup>, yang mencapai 98% dari target mutu FS 45.

Dari hasil tersebut, rata-rata *modulus of rupture* yang dicapai adalah 45.02 kg/cm<sup>2</sup>, yang menunjukkan bahwa beton dengan RCA 40% telah mencapai dan bahkan sedikit melampaui target mutu FS 45 pada umur 7 hari. Variasi hasil antar sampel relatif kecil, dengan rentang *modulus of rupture* berkisar antara 44.00 hingga 46.00 kg/cm<sup>2</sup>, menunjukkan homogenitas campuran yang cukup baik.

Pada umur 7 hari, beton dengan RCA 40% menunjukkan performa mekanis yang sangat baik dalam hal kekuatan lentur. Dengan pencapaian yang melampaui target mutu FS 45, beton ini memiliki potensi untuk digunakan dalam aplikasi struktural yang memerlukan kekuatan lentur tinggi pada tahap pertengahan pengerasan. Hasil ini juga menegaskan bahwa penggunaan RCA 40% tidak hanya mendukung keberlanjutan material, tetapi juga memberikan performa mekanis yang kompetitif dibandingkan dengan agregat alami. Evaluasi lanjutan pada umur 28 hari diharapkan dapat memberikan gambaran lebih lengkap mengenai kekuatan optimal campuran ini.

Pengujian kekuatan lentur beton dengan campuran RCA 40% pada umur 28 hari dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan maksimal beton dalam menahan tegangan lentur setelah mencapai tahap pengerasan penuh. Proses pengujian dilakukan dengan menempatkan balok secara horizontal pada mesin uji lentur, di mana gaya tekan diberikan secara bertahap pada titik tengah balok hingga terjadi kegagalan. Hasil pengujian ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai performa mekanis beton dengan RCA 40% pada umur 28 hari dan menjadi dasar untuk menilai kelayakannya dalam aplikasi struktural.

Pengujian kekuatan lentur beton dengan campuran RCA 40% pada umur 28 hari dilakukan menggunakan benda uji berbentuk balok berukuran 15 cm x 30 cm x 60 cm dengan panjang bentang antara dua tumpuan sebesar 45 cm. Hasil pengujian menunjukkan nilai *modulus of rupture* sebagai berikut:

- Sampel pertama dengan gaya tekan sebesar 3680 kg menghasilkan *modulus of rupture* 49.07 kg/cm<sup>2</sup>, yang mencapai 109% dari target mutu FS 45.
- Sampel kedua dengan gaya tekan sebesar 3750 kg menghasilkan *modulus of rupture* 50.00 kg/cm<sup>2</sup>, yang mencapai 111% dari target mutu FS 45.
- Sampel ketiga dengan gaya tekan sebesar 3600 kg menghasilkan *modulus of rupture* 48.00 kg/cm<sup>2</sup>, yang mencapai 107% dari target mutu FS 45.

**Tabel 4.22 Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton dengan Campuran 40% RCA pada Umur 28 Hari**

| NAMA              | :                 | LUBAB                                                                  |            |                                           |             |                     |                      |                       |                                                                |             |
|-------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------|------------|-------------------------------------------|-------------|---------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------|-------------|
| PROYEK            | :                 | MODEL PERILAKU MEKANIK BETON DENGAN CAMPURAN DAUR ULANG RIGID PAVEMENT |            |                                           |             |                     |                      |                       |                                                                |             |
| BENDA UJI         | :                 | BEAM                                                                   |            |                                           |             |                     |                      |                       |                                                                |             |
| UKURAN BENDA UJI  | :                 | 15 CM X 30 CM X 60 CM                                                  |            |                                           |             |                     |                      |                       |                                                                |             |
| KODE BENDA UJI    | TANGGAL PEMBUATAN | TANGGAL TESTING                                                        | MUTU BETON | PANJANG BENTANG ANTARA 2 TUMPUAN (L) (CM) | UMUR (HARI) | GAYA TEKAN (P) (KG) | LEBAR BALOK (B) (CM) | TINGGI BALOK (B) (CM) | MODULUS OF RUPTURE (PL/bh <sup>2</sup> ) (kg/cm <sup>2</sup> ) | PERSEN TASE |
| TRIAL MIX 40% RCA | 20-Nov-24         | 23-Nov-24                                                              | FS 45      | 45                                        | 28          | 3680                | 15                   | 15                    | 49.07                                                          | 109%        |
|                   | 20-Nov-24         | 23-Nov-24                                                              | FS 45      | 45                                        | 28          | 3750                | 15                   | 15                    | 50.00                                                          | 111%        |
|                   | 20-Nov-24         | 23-Nov-24                                                              | FS 45      | 45                                        | 28          | 3600                | 15                   | 15                    | 48.00                                                          | 107%        |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

Rata-rata *modulus of rupture* yang dicapai adalah 49.02 kg/cm<sup>2</sup>, atau sekitar 109% dari target mutu FS 45. Variasi hasil antar sampel relatif kecil, dengan rentang *modulus of rupture* berkisar antara 48.00 hingga 50.00 kg/cm<sup>2</sup>, yang menunjukkan tingkat homogenitas yang sangat baik dalam campuran beton.

Pada umur 28 hari, beton dengan RCA 40% menunjukkan performa mekanis yang sangat baik, dengan pencapaian kekuatan lentur yang melampaui target mutu FS 45. Dengan nilai rata-rata *modulus of rupture* sebesar 49.02 kg/cm<sup>2</sup>, beton ini memiliki potensi tinggi untuk digunakan dalam aplikasi struktural, seperti elemen yang memerlukan daya lentur tinggi, misalnya balok atau pelat lantai. Hasil ini juga menunjukkan bahwa penggunaan RCA 40% tidak hanya mendukung keberlanjutan material melalui pemanfaatan limbah konstruksi, tetapi juga memberikan kekuatan lentur yang kompetitif dibandingkan dengan beton berbasis agregat alami. Evaluasi ini memperkuat bukti bahwa RCA 40% dapat menjadi alternatif pengganti agregat kasar yang efektif tanpa mengorbankan kinerja mekanis beton.

#### 4.3.2 Kuat Lentur Beton RCA 50% pada Umur 3, 7, dan 28 Hari

Pengujian kekuatan lentur beton dengan campuran RCA 50% pada umur 3 hari bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan beton dalam menahan beban lentur pada tahap awal pengerasan. Pengujian dilakukan menggunakan sampel balok berukuran 15 cm x 30 cm x 60 cm dengan panjang bentang antara dua tumpuan sebesar 45 cm. Proses pengujian dilakukan dengan menerapkan gaya tekan secara bertahap pada titik tengah balok hingga mencapai kegagalan.

**Tabel 4.23 Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton dengan Campuran 50% RCA pada Umur 3 Hari**

| NAMA :            |                   | LUBAB                                                                  |            |                                           |             |                     |                      |                       |                                                                |             |
|-------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------|------------|-------------------------------------------|-------------|---------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------|-------------|
| PROYEK :          |                   | MODEL PERILAKU MEKANIK BETON DENGAN CAMPURAN DAUR ULANG RIGID PAVEMENT |            |                                           |             |                     |                      |                       |                                                                |             |
| BENDA UJI :       |                   | BEAM                                                                   |            |                                           |             |                     |                      |                       |                                                                |             |
| UKURAN BENDA UJI: |                   | 15 CM X 30 CM X 60 CM                                                  |            |                                           |             |                     |                      |                       |                                                                |             |
| KODE BENDA UJI    | TANGGAL PEMBUATAN | TANGGAL TESTING                                                        | MUTU BETON | PANJANG BENTANG ANTARA 2 TUMPUAN (L) (CM) | UMUR (HARI) | GAYA TEKAN (P) (KG) | LEBAR BALOK (B) (CM) | TINGGI BALOK (B) (CM) | MODULUS OF RUPTURE (PL/bh <sup>2</sup> ) (kg/cm <sup>2</sup> ) | PERSEN TASE |
| TRIAL MIX 50% RCA | 20-Nov-24         | 23-Nov-24                                                              | FS 45      | 45                                        | 3           | 2530                | 15                   | 15                    | 33.73                                                          | 75%         |
|                   | 20-Nov-24         | 23-Nov-24                                                              | FS 45      | 45                                        | 3           | 2600                | 15                   | 15                    | 34.67                                                          | 77%         |
|                   | 20-Nov-24         | 23-Nov-24                                                              | FS 45      | 45                                        | 3           | 2450                | 15                   | 15                    | 32.67                                                          | 73%         |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

Nilai *modulus of rupture* yang dihasilkan mencerminkan kemampuan beton dalam menahan tegangan lentur sesuai variasi campuran RCA. Hasil pengujian ini menjadi dasar awal untuk menilai kinerja mekanis campuran RCA 50% pada umur awal.

Pengujian kekuatan lentur beton dengan campuran RCA 50% pada umur 3 hari menghasilkan nilai *modulus of rupture* sebagai berikut:

- Sampel pertama dengan gaya tekan sebesar 2530 kg menghasilkan *modulus of rupture* 33.73 kg/cm<sup>2</sup>, yang mencapai 75% dari target mutu FS 45.
- Sampel kedua dengan gaya tekan sebesar 2600 kg menghasilkan *modulus of rupture* 34.67 kg/cm<sup>2</sup>, yang mencapai 77% dari target mutu FS 45.
- Sampel ketiga dengan gaya tekan sebesar 2450 kg menghasilkan *modulus of rupture* 32.67 kg/cm<sup>2</sup>, yang mencapai 73% dari target mutu FS 45.

Dari hasil tersebut, nilai modulus of rupture rata-rata yang dicapai adalah 33.69 kg/cm<sup>2</sup>, atau 75% dari target mutu. Variasi hasil antar sampel relatif kecil, dengan perbedaan *modulus of rupture* hanya berkisar antara 32.67 kg/cm<sup>2</sup> hingga 34.67 kg/cm<sup>2</sup>, menunjukkan homogenitas yang cukup baik dalam campuran beton.

Pada umur 3 hari, beton dengan RCA 50% menunjukkan performa mekanis yang cukup memadai untuk tahap awal pengerasan, meskipun nilai kekuatan lenturnya masih berada di bawah target mutu FS 45. Hasil ini mengindikasikan bahwa campuran RCA 50% dapat digunakan untuk aplikasi struktural ringan atau tahap pengerjaan awal. Namun, kekuatan lentur beton ini diperkirakan akan meningkat seiring waktu pada umur 7 hari dan 28 hari, sehingga perlu dilakukan

evaluasi lanjutan untuk mengetahui potensi kekuatan optimalnya. Variasi hasil yang kecil juga menunjukkan bahwa distribusi material RCA dalam campuran cukup merata, meskipun sifat RCA yang berpori tetap menjadi salah satu faktor yang memengaruhi performa mekanis beton ini.

Hasil pengujian ini memberikan gambaran mengenai perkembangan kekuatan lentur beton dengan RCA 50% pada tahap pertengahan umur dan menjadi indikator penting dalam mengevaluasi kinerja mekanis campuran beton tersebut.

Pengujian kekuatan lentur beton dengan campuran RCA 50% pada umur 7 hari dilakukan menggunakan benda uji berbentuk balok berukuran 15 cm x 30 cm x 60 cm dengan panjang bentang antara dua tumpuan sebesar 45 cm. Hasil pengujian menunjukkan nilai *modulus of rupture* sebagai berikut:

- Sampel pertama dengan gaya tekan sebesar 2730 kg menghasilkan *modulus of rupture* 36.40 kg/cm<sup>2</sup>, yang mencapai 81% dari target mutu FS 45.
- Sampel kedua dengan gaya tekan sebesar 2800 kg menghasilkan *modulus of rupture* 37.33 kg/cm<sup>2</sup>, yang mencapai 83% dari target mutu FS 45.
- Sampel ketiga dengan gaya tekan sebesar 2650 kg menghasilkan *modulus of rupture* 35.33 kg/cm<sup>2</sup>, yang mencapai 79% dari target mutu FS 45.

Dari hasil tersebut, nilai rata-rata modulus of rupture yang dicapai adalah 36.35 kg/cm<sup>2</sup>, atau sekitar 81% dari target mutu FS 45. Variasi hasil antar sampel relatif kecil, dengan rentang modulus of rupture berkisar antara 35.33 hingga 37.33 kg/cm<sup>2</sup>, yang menunjukkan tingkat homogenitas campuran yang cukup baik.

**Tabel 4.24 Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton dengan Campuran 50% RCA pada Umur 7 Hari**

| NAMA : LUBAB                                                                    |                   |                 |            |                                           |             |                     |                      |                       |                                                                |             |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------|------------|-------------------------------------------|-------------|---------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------|-------------|
| PROYEK : MODEL PERILAKU MEKANIK BETON DENGAN CAMPURAN DAUR ULANG RIGID PAVEMENT |                   |                 |            |                                           |             |                     |                      |                       |                                                                |             |
| BENDA UJI : BEAM                                                                |                   |                 |            |                                           |             |                     |                      |                       |                                                                |             |
| UKURAN BENDA UJI : 15 CM X 30 CM X 60 CM                                        |                   |                 |            |                                           |             |                     |                      |                       |                                                                |             |
| KODE BENDA UJI                                                                  | TANGGAL PEMBUATAN | TANGGAL TESTING | MUTU BETON | PANJANG BENTANG ANTARA 2 TUMPUAN (L) (CM) | UMUR (HARI) | GAYA TEKAN (P) (KG) | LEBAR BALOK (B) (CM) | TINGGI BALOK (B) (CM) | MODULUS OF RUPTURE (PL/bh <sup>2</sup> ) (kg/cm <sup>2</sup> ) | PERSEN TASE |
| TRIAL MIX 50% RCA                                                               | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                        | 7           | 2730                | 15                   | 15                    | 36.40                                                          | 81%         |
|                                                                                 | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                        | 7           | 2800                | 15                   | 15                    | 37.33                                                          | 83%         |
|                                                                                 | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                        | 7           | 2650                | 15                   | 15                    | 35.33                                                          | 79%         |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

Pada umur 7 hari, beton dengan RCA 50% menunjukkan performa mekanis yang masih berada di bawah target mutu FS 45, dengan pencapaian kekuatan lentur sebesar 81% dari target. Hasil ini mengindikasikan bahwa meskipun ada peningkatan kekuatan dibandingkan umur 3 hari, campuran RCA 50% membutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai kekuatan optimal. Keterbatasan ini dapat disebabkan oleh sifat RCA yang memiliki porositas tinggi, yang memengaruhi kekuatan matriks beton secara keseluruhan. Untuk aplikasi struktural, beton ini masih lebih cocok digunakan untuk elemen ringan atau pada proyek yang tidak memerlukan kekuatan lentur tinggi pada tahap pertengahan umur. Evaluasi lebih lanjut pada umur 28 hari diperlukan untuk mengetahui potensi maksimal dari campuran RCA 50%.

Pengujian kekuatan lentur beton dengan campuran RCA 50% pada umur 28 hari dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan maksimal beton dalam menahan tegangan lentur setelah mencapai tahap pengerasan penuh. Sampel yang digunakan berupa balok berukuran 15 cm x 30 cm x 60 cm dengan panjang bentang antara dua tumpuan sebesar 45 cm. Pengujian ini dilakukan dengan menempatkan balok pada mesin uji lentur secara horizontal, di mana gaya tekan diterapkan secara bertahap pada titik tengah balok hingga terjadi kegagalan. Hasil pengujian memberikan gambaran menyeluruh mengenai kekuatan lentur beton dengan RCA 50% pada umur akhir pengerasan dan menjadi dasar untuk menilai kelayakannya dalam aplikasi struktural yang membutuhkan kekuatan lentur tinggi.

**Tabel 4.25 Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton dengan Campuran 50% RCA pada Umur 28 Hari**

| NAMA:<br>PROYEK:                |                      | LUBAB<br>MODEL PERILAKU MEKANIK BETON DENGAN CAMPURAN DAUR ULANG RIGID<br>PAVEMENT |               |                                                          |                |                              |                               |                                |                                                                            |                |
|---------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------------------------------------------------|----------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------|
| BENDA UJI:<br>UKURAN BENDA UJI: |                      | BEAM<br>15 CM X 30 CM X 60 CM                                                      |               |                                                          |                |                              |                               |                                |                                                                            |                |
| KODE<br>BENDA UJI               | TANGGAL<br>PEMBUATAN | TANGGAL<br>TESTING                                                                 | MUTU<br>BETON | PANJANG<br>BENTANG<br>ANTARA 2<br>TUMPUAN<br>(L)<br>(CM) | UMUR<br>(HARI) | GAYA<br>TEKAN<br>(P)<br>(KG) | LEBAR<br>BALOK<br>(B)<br>(CM) | TINGGI<br>BALOK<br>(B)<br>(CM) | MODULUS<br>OF<br>RUPTURE<br>(PL/bh <sup>2</sup> )<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | PERSEN<br>TASE |
| TRIAL<br>MIX 50%<br>RCA         | 20-Nov-24            | 23-Nov-24                                                                          | FS 45         | 45                                                       | 28             | 3430                         | 15                            | 15                             | 45.73                                                                      | 102%           |
|                                 | 20-Nov-24            | 23-Nov-24                                                                          | FS 45         | 45                                                       | 28             | 3500                         | 15                            | 15                             | 46.67                                                                      | 104%           |
|                                 | 20-Nov-24            | 23-Nov-24                                                                          | FS 45         | 45                                                       | 28             | 3350                         | 15                            | 15                             | 44.67                                                                      | 99%            |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

Pengujian kekuatan lentur beton dengan campuran RCA 50% pada umur 28 hari dilakukan menggunakan benda uji berbentuk balok berukuran 15 cm x 30 cm x 60 cm dengan panjang bentang antara dua tumpuan sebesar 45 cm. Hasil pengujian menunjukkan nilai *modulus of rupture* sebagai berikut:

- Sampel pertama dengan gaya tekan sebesar 3430 kg menghasilkan *modulus of rupture* 45.73 kg/cm<sup>2</sup>, yang mencapai 102% dari target mutu FS 45.
- Sampel kedua dengan gaya tekan sebesar 3500 kg menghasilkan *modulus of rupture* 46.67 kg/cm<sup>2</sup>, yang mencapai 104% dari target mutu FS 45.
- Sampel ketiga dengan gaya tekan sebesar 3350 kg menghasilkan *modulus of rupture* 44.67 kg/cm<sup>2</sup>, yang mencapai 99% dari target mutu FS 45.

Rata-rata *modulus of rupture* yang dicapai adalah 45.69 kg/cm<sup>2</sup>, atau sekitar 102% dari target mutu FS 45. Variasi hasil antar sampel relatif kecil, dengan rentang *modulus of rupture* berkisar antara 44.67 hingga 46.67 kg/cm<sup>2</sup>, menunjukkan tingkat homogenitas yang cukup baik dalam campuran beton.

Pada umur 28 hari, beton dengan RCA 50% menunjukkan performa mekanis yang sangat baik, dengan pencapaian rata-rata *modulus of rupture* melampaui target mutu FS 45. Dengan hasil ini, beton RCA 50% memiliki potensi yang sangat baik untuk digunakan dalam aplikasi struktural, seperti balok, pelat lantai, atau elemen lainnya yang memerlukan kekuatan lentur tinggi. Pengujian ini menunjukkan bahwa RCA 50% dapat digunakan sebagai pengganti agregat kasar tanpa signifikan mengurangi kinerja beton dalam hal kekuatan lentur, sekaligus mendukung aspek keberlanjutan material.

#### **4.3.3 Kuat Lentur Beton RCA 60% pada Umur 3, 7, dan 28 Hari**

Pengujian kekuatan lentur beton dengan campuran RCA 60% pada umur 3 hari dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan beton menahan tegangan lentur pada tahap awal pengerasan. Pengujian ini menggunakan benda uji berbentuk balok berukuran 15 cm x 30 cm x 60 cm dengan panjang bentang antara dua tumpuan sebesar 45 cm.

Pengujian kekuatan lentur beton dengan campuran RCA 60% pada umur 3 hari dilakukan menggunakan benda uji berbentuk balok berukuran 15 cm x 30 cm

x 60 cm dengan panjang bentang antara dua tumpuan sebesar 45 cm. Hasil pengujian menunjukkan nilai *modulus of rupture* sebagai berikut:

- Sampel pertama dengan gaya tekan sebesar 2280 kg menghasilkan *modulus of rupture* 30.40 kg/cm<sup>2</sup>, yang mencapai 68% dari target mutu FS 45.
- Sampel kedua dengan gaya tekan sebesar 2350 kg menghasilkan *modulus of rupture* 31.33 kg/cm<sup>2</sup>, yang mencapai 70% dari target mutu FS 45.
- Sampel ketiga dengan gaya tekan sebesar 2200 kg menghasilkan *modulus of rupture* 29.33 kg/cm<sup>2</sup>, yang mencapai 65% dari target mutu FS 45.

Dari hasil tersebut, nilai *modulus of rupture* rata-rata yang dicapai adalah 30.35 kg/cm<sup>2</sup>, atau sekitar 68% dari target mutu FS 45. Variasi hasil antar sampel relatif kecil, dengan perbedaan *modulus of rupture* berkisar antara 29.33 kg/cm<sup>2</sup> hingga 31.33 kg/cm<sup>2</sup>, menunjukkan distribusi material yang cukup merata dalam campuran.

**Tabel 4.26 Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton dengan Campuran 60% RCA pada Umur 3 Hari**

| NAMA :             |                   | LUBAB                                                         |            |                                           |             |                     |                      |                       |                                                                |             |
|--------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------|------------|-------------------------------------------|-------------|---------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------|-------------|
| PROYEK :           |                   | MODEL PERILAKU MEKANIK BETON DENGAN CAMPURAN DAUR ULANG RIGID |            |                                           |             |                     |                      |                       |                                                                |             |
| BENDA UJI :        |                   | PAVEMENT                                                      |            |                                           |             |                     |                      |                       |                                                                |             |
| UKURAN BENDA UJI : |                   | BEAM                                                          |            |                                           |             |                     |                      |                       |                                                                |             |
|                    |                   | 15 CM X 30 CM X 60 CM                                         |            |                                           |             |                     |                      |                       |                                                                |             |
| KODE BENDA UJI     | TANGGAL PEMBUATAN | TANGGAL TESTING                                               | MUTU BETON | PANJANG BENTANG ANTARA 2 TUMPUAN (L) (CM) | UMUR (HARI) | GAYA TEKAN (P) (KG) | LEBAR BALOK (B) (CM) | TINGGI BALOK (B) (CM) | MODULUS OF RUPTURE (PL/bh <sup>2</sup> ) (kg/cm <sup>2</sup> ) | PERSEN TASE |
| TRIAL MIX 60% RCA  | 20-Nov-24         | 23-Nov-24                                                     | FS 45      | 45                                        | 3           | 2280                | 15                   | 15                    | 30.40                                                          | 68%         |
|                    | 20-Nov-24         | 23-Nov-24                                                     | FS 45      | 45                                        | 3           | 2350                | 15                   | 15                    | 31.33                                                          | 70%         |
|                    | 20-Nov-24         | 23-Nov-24                                                     | FS 45      | 45                                        | 3           | 2200                | 15                   | 15                    | 29.33                                                          | 65%         |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

Pada umur 3 hari, beton dengan RCA 60% menunjukkan performa mekanis yang lebih rendah dibandingkan campuran RCA 40% dan 50%. Hasil ini menunjukkan bahwa tingginya proporsi RCA memengaruhi kekuatan lentur beton secara signifikan, kemungkinan disebabkan oleh sifat RCA yang lebih berpori dan memiliki kekuatan intrinsik lebih rendah dibandingkan agregat alami. Dengan pencapaian rata-rata sebesar 68% dari target mutu FS 45, beton ini masih dapat digunakan untuk aplikasi struktural ringan pada tahap awal pengerasan. Namun, diperlukan evaluasi lanjutan pada umur 7 hari dan 28 hari untuk mengetahui potensi

kekuatan optimalnya. Selain itu, peningkatan kualitas material RCA dan metode pencampuran dapat membantu memperbaiki performa beton dengan RCA 60%.

Hasil pengujian ini memberikan gambaran mengenai perkembangan kekuatan lentur beton dengan RCA 60% pada tahap pertengahan umur dan menjadi indikator penting dalam mengevaluasi kinerja mekanis campuran beton tersebut.

Pengujian kekuatan lentur beton dengan campuran RCA 60% pada umur 7 hari dilakukan menggunakan benda uji berbentuk balok berukuran 15 cm x 30 cm x 60 cm dengan panjang bentang antara dua tumpuan sebesar 45 cm. Hasil pengujian menunjukkan nilai *modulus of rupture* sebagai berikut:

- Sampel pertama dengan gaya tekan sebesar 2480 kg menghasilkan *modulus of rupture* 33.07 kg/cm<sup>2</sup>, yang mencapai 73% dari target mutu FS 45.
- Sampel kedua dengan gaya tekan sebesar 2550 kg menghasilkan *modulus of rupture* 34.00 kg/cm<sup>2</sup>, yang mencapai 76% dari target mutu FS 45.
- Sampel ketiga dengan gaya tekan sebesar 2400 kg menghasilkan *modulus of rupture* 32.00 kg/cm<sup>2</sup>, yang mencapai 71% dari target mutu FS 45.

Rata-rata *modulus of rupture* yang dicapai adalah 33.02 kg/cm<sup>2</sup>, atau sekitar 73% dari target mutu FS 45. Variasi hasil antar sampel relatif kecil, dengan rentang *modulus of rupture* antara 32.00 hingga 34.00 kg/cm<sup>2</sup>, yang menunjukkan bahwa distribusi material dalam campuran cukup homogen.

**Tabel 4.27 Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton dengan Campuran 60% RCA pada Umur 7 Hari**

| NAMA : LUBAB<br>PROYEK : MODEL PERILAKU MEKANIK BETON DENGAN CAMPURAN DAUR ULANG RIGID PAVEMENT<br>BENDA UJI : BEAM<br>UKURAN BENDA UJI : 15 CM X 30 CM X 60 CM |                   |                 |            |                                           |             |                     |                      |                       |                                                                |             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------|------------|-------------------------------------------|-------------|---------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------|-------------|
| KODE BENDA UJI                                                                                                                                                  | TANGGAL PEMBUATAN | TANGGAL TESTING | MUTU BETON | PANJANG BENTANG ANTARA 2 TUMPUAN (L) (CM) | UMUR (HARI) | GAYA TEKAN (P) (KG) | LEBAR BALOK (B) (CM) | TINGGI BALOK (B) (CM) | MODULUS OF RUPTURE (PL/bh <sup>2</sup> ) (kg/cm <sup>2</sup> ) | PERSEN TASE |
| TRIAL MIX 60% RCA                                                                                                                                               | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                        | 7           | 2480                | 15                   | 15                    | 33.07                                                          | 73%         |
|                                                                                                                                                                 | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                        | 7           | 2550                | 15                   | 15                    | 34.00                                                          | 76%         |
|                                                                                                                                                                 | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                        | 7           | 2400                | 15                   | 15                    | 32.00                                                          | 71%         |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

Pada umur 7 hari, beton dengan RCA 60% menunjukkan peningkatan kekuatan lentur dibandingkan umur 3 hari, namun hasilnya masih berada di bawah

target mutu FS 45. Dengan pencapaian rata-rata sebesar 73%, performa beton ini terbatas untuk aplikasi non-struktural atau elemen struktural ringan pada tahap pertengahan umur. Sifat RCA yang memiliki porositas lebih tinggi dibandingkan agregat alami kemungkinan menjadi faktor utama yang membatasi kekuatan lentur beton ini. Untuk meningkatkan performa beton dengan RCA 60%, perlu dilakukan evaluasi lebih lanjut terkait kualitas RCA, metode pencampuran, dan perawatan beton (*curing*). Pengujian pada umur 28 hari akan memberikan wawasan lebih lengkap mengenai potensi kekuatan optimal dari campuran ini.

Pengujian kekuatan lentur beton dengan campuran RCA 60% pada umur 28 hari dilakukan untuk mengevaluasi performa maksimal beton setelah mencapai tahap pengerasan penuh. Nilai *modulus of rupture* yang dihasilkan dari pengujian ini memberikan gambaran tentang kemampuan beton dengan RCA 60% dalam menahan tegangan lentur pada umur akhir pengerasan.

Pengujian kekuatan lentur beton dengan campuran RCA 60% pada umur 28 hari dilakukan menggunakan benda uji berbentuk balok berukuran 15 cm x 30 cm x 60 cm dengan panjang bentang antara dua tumpuan sebesar 45 cm. Hasil pengujian menunjukkan nilai *modulus of rupture* sebagai berikut:

- Sampel pertama dengan gaya tekan sebesar 3380 kg menghasilkan *modulus of rupture* 45.07 kg/cm<sup>2</sup>, yang mencapai 100% dari target mutu FS 45.
- Sampel kedua dengan gaya tekan sebesar 3450 kg menghasilkan *modulus of rupture* 46.00 kg/cm<sup>2</sup>, yang mencapai 102% dari target mutu FS 45.
- Sampel ketiga dengan gaya tekan sebesar 3300 kg menghasilkan *modulus of rupture* 44.00 kg/cm<sup>2</sup>, yang mencapai 98% dari target mutu FS 45.

Rata-rata *modulus of rupture* yang dicapai adalah 45.02 kg/cm<sup>2</sup>, atau sekitar 100% dari target mutu FS 45. Variasi hasil antar sampel relatif kecil, dengan rentang *modulus of rupture* berkisar antara 44.00 hingga 46.00 kg/cm<sup>2</sup>, yang menunjukkan tingkat homogenitas yang cukup baik dalam campuran beton. Hal ini bisa dilihat di table 4.27

Perlu diketahui mekanisme ketika balok beton tanpa tulangan dibebani, bagian balok akan mengalami tegangan tekan, sedangkan bagian bawah balok mengalami tegangan Tarik, Kuat Tarik lentur menunjukkan kemampuan beton menahan Tarik beton beton tanpa mengalami kerusakan atau retak signifikan

**Tabel 4.28 Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton dengan Campuran 60% RCA pada Umur 28 Hari**

| NAMA : LUBAB<br>MODEL PERILAKU MEKANIK BETON DENGAN CAMPURAN<br>PROYEK : DAUR ULANG RIGID PAVEMENT<br>BENDA UJI : BEAM<br>UKURAN BENDA UJI : 15 CM X 30 CM X 60 CM |                   |                 |            |                                           |             |                     |                      |                       |                                                                |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------|------------|-------------------------------------------|-------------|---------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------|------------|
| KODE BENDA UJI                                                                                                                                                     | TANGGAL PEMBUATAN | TANGGAL TESTING | MUTU BETON | PANJANG BENTANG ANTARA 2 TUMPUAN (L) (CM) | UMUR (HARI) | GAYA TEKAN (P) (KG) | LEBAR BALOK (B) (CM) | TINGGI BALOK (B) (CM) | MODULUS OF RUPTURE (PL/bh <sup>2</sup> ) (kg/cm <sup>2</sup> ) | PERSENTASE |
| TRIAL MIX 60% RCA                                                                                                                                                  | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                        | 28          | 3380                | 15                   | 15                    | 45.07                                                          | 100%       |
|                                                                                                                                                                    | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                        | 28          | 3450                | 15                   | 15                    | 46.00                                                          | 102%       |
|                                                                                                                                                                    | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                        | 28          | 3300                | 15                   | 15                    | 44.00                                                          | 98%        |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

Pada umur 28 hari, beton dengan RCA 60% menunjukkan performa yang baik dalam menahan beban lentur, dengan pencapaian rata-rata kekuatan lentur sebesar 100% dari target mutu FS 45. Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun RCA 60% memiliki porositas lebih tinggi dibandingkan agregat alami, campuran ini tetap mampu memberikan kekuatan lentur yang memadai untuk aplikasi struktural. Beton dengan RCA 60% dapat digunakan untuk elemen struktural seperti balok atau pelat lantai, terutama pada proyek yang memprioritaskan aspek keberlanjutan material dengan memanfaatkan limbah konstruksi.

#### 4.4 Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah

Pengujian kuat tarik beton (uji belah) menggunakan 2 (dua) sampel silinder untuk masing-masing variasi campuran RCA 40%, 50%, dan 60%, dilakukan untuk mengukur kemampuan beton dalam menahan gaya tarik.

Sampel beton berbentuk silinder, biasanya berukuran 15 cm x 30 cm. Sampel pengujian kuat tarik dapat dilihat pada Gambar 4.10.



Sumber: Dokumentasi Penulis, 2024

**Gambar 4.10 Sampel Pengujian Kuat Tarik**

Pengujian kuat tarik beton (uji belah) ditempatkan secara horisontal pada mesin uji, dan beban diberikan secara bertahap sepanjang sumbu silinder hingga beton mengalami retak atau pecah. Uji ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan tarik beton, yang dihitung berdasarkan beban maksimum yang diterima. Pengujian kuat tarik dapat dilihat pada Gambar 4.11.



Sumber: Dokumentasi Penulis, 2024

**Gambar 4.11 Pengujian Kuat Tarik**

Kuat tarik beton dihitung berdasarkan beban maksimum yang diterima oleh sampel beton selama uji belah, di mana beban diberikan secara bertahap hingga beton retak atau pecah. Berikut merupakan hasil pengujian kuat tarik beton dengan variasi campuran limbah *rigid pavement* (40%, 50%, dan 60%) pada umur 3, 7, dan 28 hari.

**Tabel 4.29 Hasil Pengujian Kuat Tarik Beton dengan Campuran RCA Sebesar 40%, 50%, Dan 60%**

| No | Kode Benda Uji | Tanggal Pembuatan | Tanggal Pengujian | Umur (hari) | Berat (gram) | Dimensi       |             | Gaya Tarik Belah (N) | Kuat Tarik Belah (N/mm <sup>2</sup> ) |
|----|----------------|-------------------|-------------------|-------------|--------------|---------------|-------------|----------------------|---------------------------------------|
|    |                |                   |                   |             |              | Diameter (mm) | Tinggi (mm) |                      |                                       |
| 1  | 40% RCA FS45   | 11/12/2024        | 08/01/2025        | 28          | 12.980       | 150           | 300         | 250.000              | 3,537                                 |
| 2  |                | 11/12/2024        | 08/01/2025        | 28          | 13.000       | 150           | 300         | 250.000              | 3,537                                 |
| 3  | 50% RCA FS45   | 11/12/2024        | 08/01/2025        | 28          | 12.950       | 150           | 300         | 200.000              | 2,829                                 |
| 4  |                | 11/12/2024        | 08/01/2025        | 28          | 12.915       | 150           | 300         | 180.000              | 2,546                                 |
| 5  | 60% RCA FS45   | 11/12/2024        | 08/01/2025        | 28          | 12.980       | 150           | 300         | 150.000              | 2,122                                 |
| 6  |                | 11/12/2024        | 08/01/2025        | 28          | 12.900       | 150           | 300         | 170000               | 2,405                                 |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

Pengujian kuat tarik beton dilakukan untuk mengetahui kemampuan beton dalam menahan gaya tarik dengan menggunakan metode uji belah pada 2 (dua) sampel silinder berukuran diameter 150 mm x tinggi 300 mm. Sampel diuji pada umur 28 hari, dengan variasi campuran limbah *rigid pavement* (*Recycled Concrete Aggregate*, RCA) sebesar 40%, 50%, dan 60%. Berikut adalah analisis hasil pengujian:

1. Campuran RCA 40%

- Beban maksimum yang diterima oleh sampel adalah 250.000 N dengan kuat tarik belah 3,537 N/mm<sup>2</sup>.
- Hal ini menunjukkan bahwa campuran RCA 40% memiliki kekuatan tarik yang paling tinggi dibandingkan campuran lainnya. RCA 40% dapat memberikan keseimbangan optimal antara kekuatan tarik dan proporsi limbah daur ulang.

2. Campuran RCA 50%

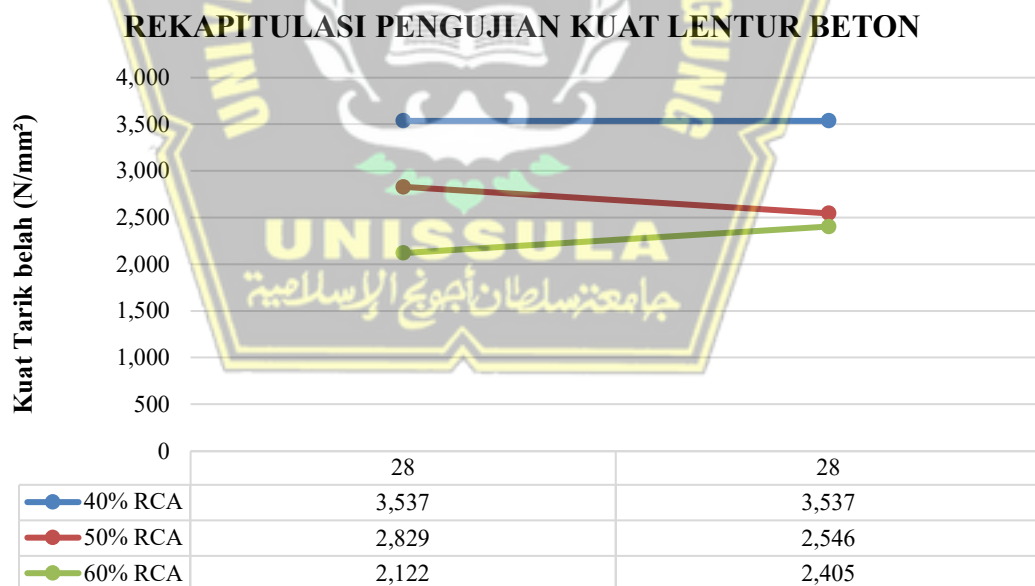
- Beban maksimum yang diterima adalah 200.000 N dan 180.000 N, menghasilkan kuat tarik belah 2,829 N/mm<sup>2</sup> dan 2,546 N/mm<sup>2</sup>.

- Penurunan kekuatan tarik terjadi akibat peningkatan proporsi RCA, yang menyebabkan penurunan kualitas ikatan antar matriks beton dan agregat.

### 3. Campuran RCA 60%

- Beban maksimum yang diterima adalah 150.000 dan 170.000 N, dengan kuat tarik belah 2,122 dan 2,405 N/mm<sup>2</sup>.
- Campuran ini memiliki kekuatan tarik terendah, menunjukkan bahwa proporsi RCA yang terlalu tinggi dapat mengurangi kemampuan beton untuk menahan gaya tarik karena kemungkinan adanya kekosongan internal dan sifat fisik RCA yang lebih lemah dibandingkan agregat alami.

Kuat tarik beton cenderung menurun seiring dengan peningkatan proporsi RCA. Campuran RCA 40% menunjukkan performa terbaik dalam menahan gaya tarik, sementara campuran RCA 60% memiliki performa yang paling rendah. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan RCA secara optimal perlu diperhatikan untuk menjaga kualitas mekanik beton. Data ini mendukung pentingnya penyeimbangan antara keberlanjutan (penggunaan material daur ulang) dan performa struktur.



Sumber: Hasil Analisis, 2025.

**Gambar 4.12 Grafik Perbandingan Pengujian Kuat Tarik Belah Beton RCA 40%, 50%, dan 60%**

#### 4.5 Hasil Analisis Mikro Struktur RCA

Pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dilakukan untuk menganalisis struktur mikro dari material *Recycled Concrete Aggregate* (RCA) yaitu metode analisis mikroskopis yang menggunakan sinar electron untuk menghasilkan gambar permukaan sampel dengan resolusi tinggi yang berasal dari dua sumber berbeda, yaitu limbah gedung dan limbah jalan *rigid pavement*.

Pengujian ini bertujuan untuk membandingkan karakteristik mikro kedua jenis RCA guna menentukan kelayakan penggunaannya dalam campuran beton. RCA yang berasal dari limbah gedung sering kali masih memiliki rongga void yang signifikan akibat perbedaan proses pemadatan selama konstruksi, sedangkan RCA dari jalan *rigid pavement* biasanya menunjukkan struktur yang lebih padat dan terkompaksi akibat beban lalu lintas.

Melalui uji SEM ini, diharapkan dapat diperoleh bukti visual mengenai perbedaan sifat mikro antara kedua material tersebut, sehingga dapat dijadikan dasar untuk menentukan spesifikasi dan rekomendasi penggunaan RCA dalam aplikasi beton yang berkelanjutan.

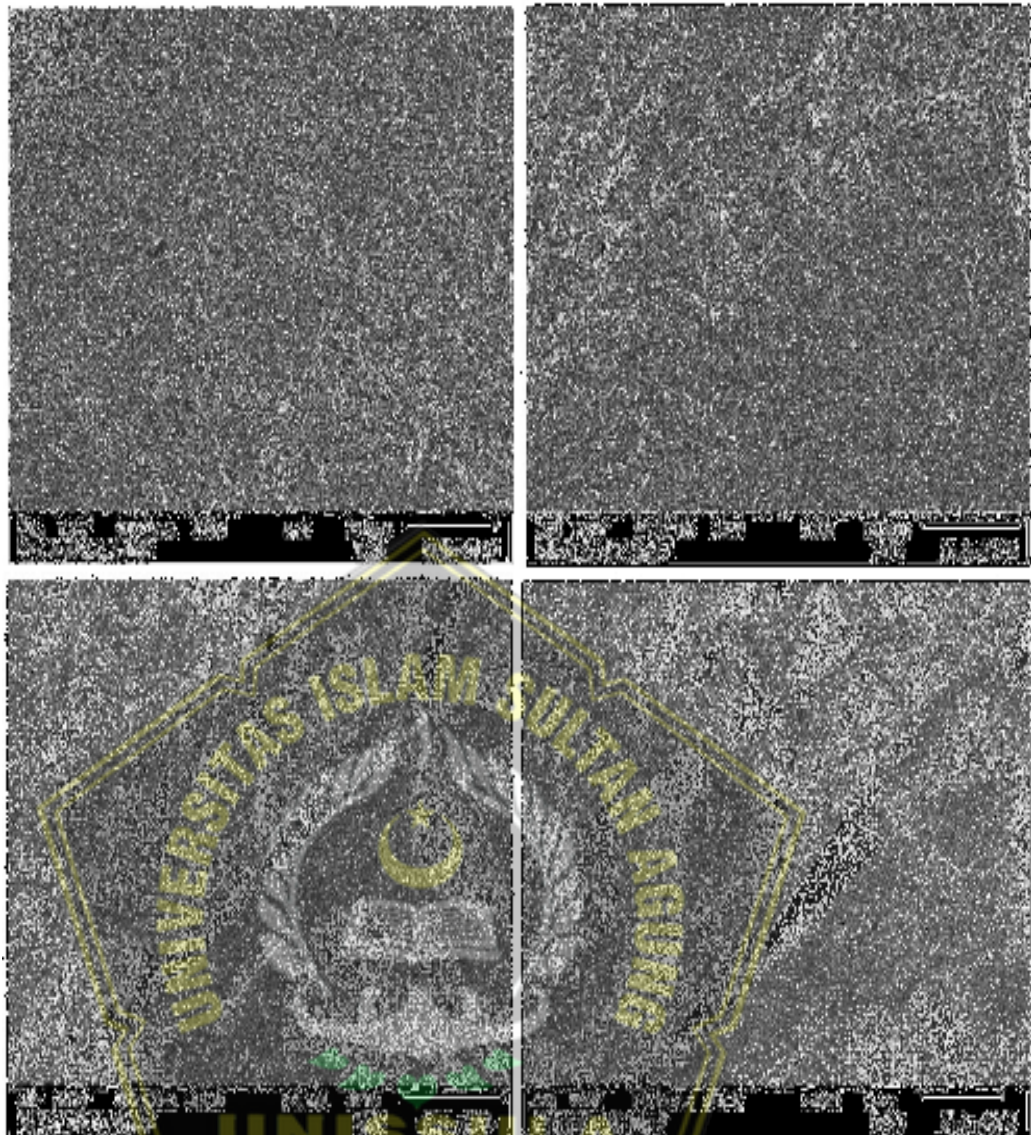
##### 4.5.1 Struktur Mikro RCA Gedung

Pengujian struktur mikro RCA dari limbah gedung bertujuan untuk menganalisis karakteristik material pada tingkat mikroskopis. Limbah beton dari gedung cenderung memiliki rongga *void* akibat proses pemadatan yang kurang intensif, yang dapat memengaruhi kekuatan dan kualitas material.

Analisis SEM dilakukan untuk mengidentifikasi distribusi rongga dan sisa material semen sebagai indikator kelayakan penggunaan RCA gedung dalam konstruksi. Ada 2 (dua) sampel RCA gedung yang diuji dengan hasil sebagai berikut:

1. Analisis Hasil SEM dan EDX RCA Gedung (Sampel 1)

Pengujian SEM dan EDX pada Sampel 1 RCA Gedung dilakukan untuk mengidentifikasi struktur mikro dan komposisi kimia material yang berasal dari limbah beton gedung.



Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

**Gambar 4.13 Hasil Pengujian SEM Sampel 1 RCA Gedung 45X, 250X, 2500X, dan 4000X**

Berikut adalah analisis hasilnya:

a. Analisis Struktur Mikro Berdasarkan SEM

Hasil SEM pada pembesaran bertingkat (45X, 250X, 2500X, dan 4000X) menunjukkan karakteristik struktur mikro RCA Gedung sebagai berikut:

- 45X : Terlihat rongga (*void*) besar di permukaan RCA, yang menunjukkan tingkat porositas tinggi. Distribusi material tidak homogen, dengan sisa-sisa pasta semen yang masih menempel pada agregat.

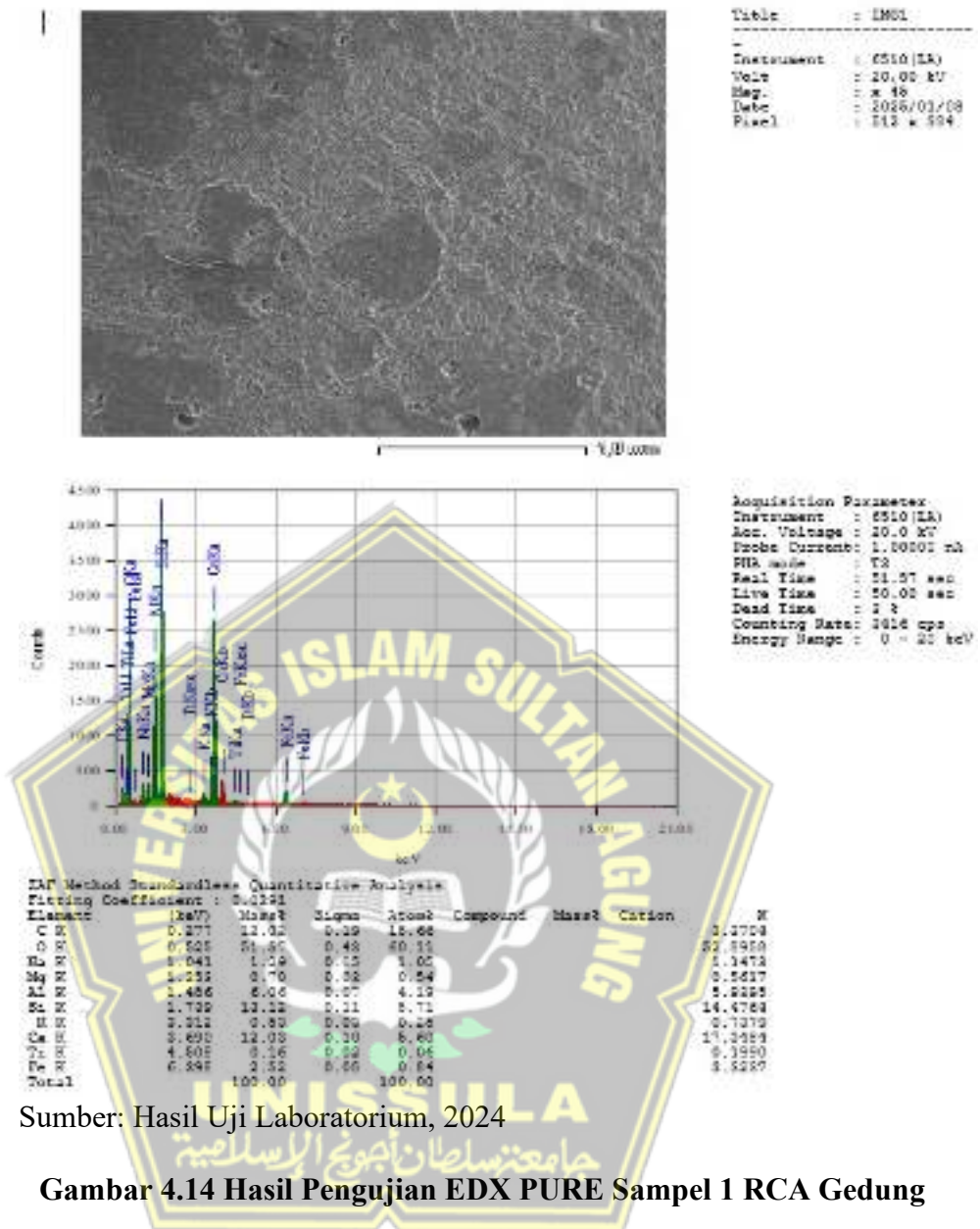
- 250X : Rongga semakin terdefinisi dengan retak mikro yang mulai tampak jelas. Permukaan material tampak kasar, menunjukkan bahwa RCA ini tidak terkompaksi dengan baik selama proses konstruksi.
- 2500X : Pada pembesaran lebih tinggi, retak mikro terlihat lebih banyak, dan struktur mikro menunjukkan ketidakhomogenan yang signifikan. Kekasaran permukaan menunjukkan kelemahan dalam potensi ikatan dengan pasta semen baru.
- 4000X : Retak mikro semakin jelas, dengan banyaknya rongga kecil yang tersebar di seluruh permukaan. Hal ini menunjukkan bahwa RCA dari gedung memiliki kelemahan struktural karena porositas yang tinggi dan distribusi material yang tidak merata.

RCA Gedung memiliki struktur mikro yang kurang padat, dengan banyaknya rongga dan retak mikro yang dapat mengurangi kekuatan mekanik material ini.

b. Analisis Komposisi Kimia Berdasarkan EDX

Hasil analisis dari EDX PURE dan EDX OXIDE memberikan gambaran berikut:

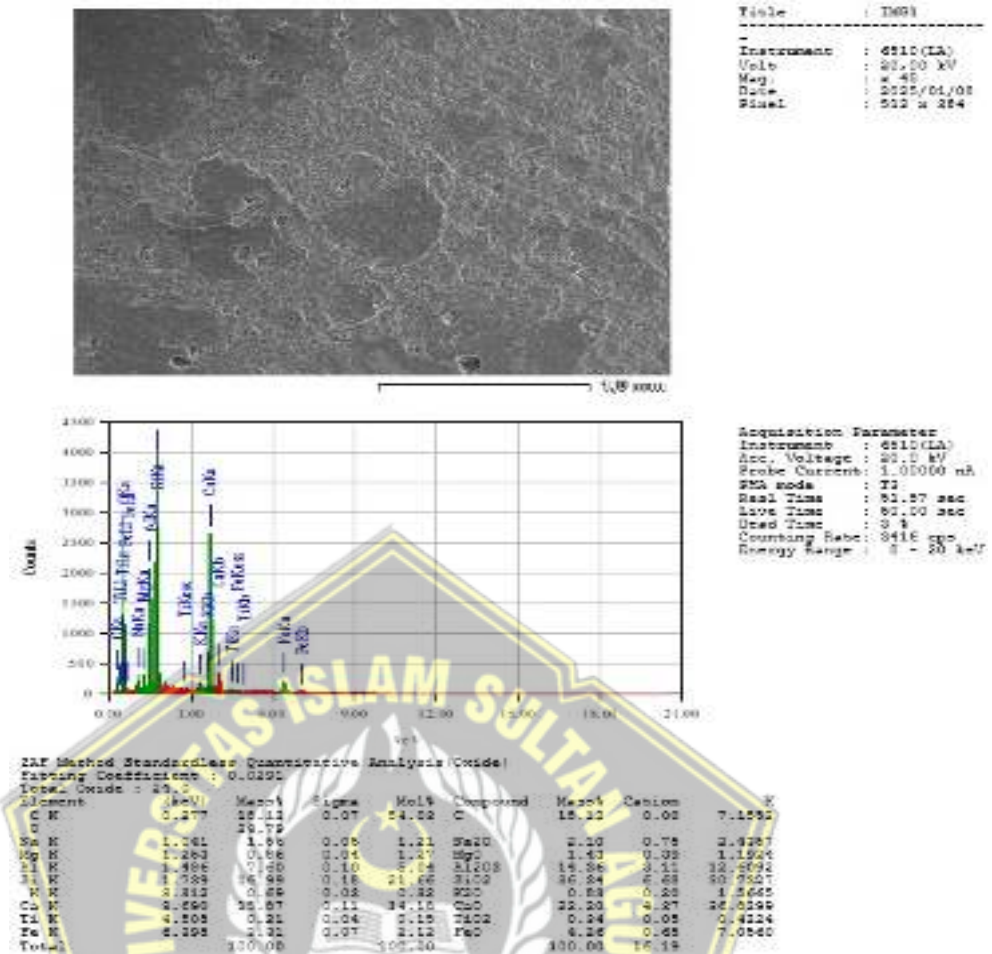
- EDX PURE:
  - Oksigen (51.57%): Kandungan oksigen yang tinggi menunjukkan banyaknya rongga dan material yang tidak sepenuhnya terkompaksi.
  - Silikon (13.12%) dan Kalsium (12.03%): Elemen dominan ini menunjukkan keberadaan agregat alami ( $\text{SiO}_2$ ) dan pasta semen sisa ( $\text{CaO}$ ).
  - Karbon (12.02%): Kandungan karbon yang cukup tinggi menunjukkan adanya material organik sisa dari limbah gedung atau proses karbonisasi.
  - Aluminium (6.06%) dan Besi (2.52%) memberikan indikasi adanya elemen tambahan yang mungkin berasal dari kontaminasi material atau campuran bahan bangunan.



Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

**Gambar 4.14 Hasil Pengujian EDX PURE Sampel 1 RCA Gedung**

- EDX OXIDE:
  - SiO<sub>2</sub> (36.34%) dan CaO (22.20%) merupakan senyawa dominan, menunjukkan komposisi agregat alami dan pasta semen.
  - Karbon (18.12%) menunjukkan material organik yang masih ada pada RCA ini.
  - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (14.36%) dan FeO (4.26%) menambah informasi tentang keberadaan elemen tambahan yang memengaruhi heterogenitas material.



Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

**Gambar 4.15 Hasil Pengujian EDX OXIDE Sampel 1 RCA Gedung**

Komposisi kimia RCA Gedung mengindikasikan bahwa material ini memiliki campuran sisa pasta semen dan agregat alami, tetapi dengan porositas tinggi dan keberadaan material organik yang signifikan, yang dapat mengurangi kualitas mekaniknya. Berdasarkan hasil SEM dan EDX, berikut adalah kesimpulan untuk Sampel 1 RCA Gedung:

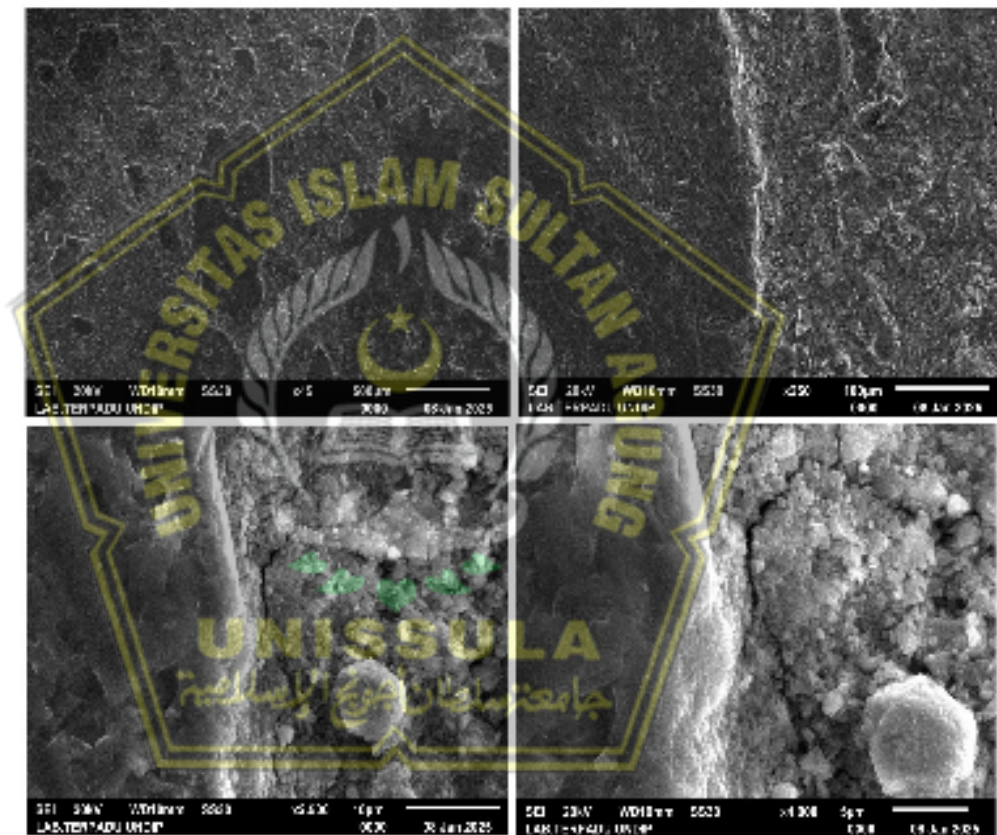
- Struktur Mikro: Porositas tinggi, retak mikro, dan distribusi material yang tidak merata membuat RCA Gedung memiliki kelemahan mekanik signifikan jika dibandingkan dengan agregat alami. Material ini lebih rentan terhadap penurunan kekuatan mekanis dalam beton.
- Komposisi Kimia: Dominasi  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{CaO}$  menunjukkan bahwa RCA Gedung tetap memiliki elemen penting untuk beton, namun tingginya

karbon dan oksigen mengindikasikan banyaknya rongga yang memengaruhi kualitasnya.

- Rekomendasi: RCA Gedung tidak ideal untuk aplikasi struktural tanpa pengolahan tambahan. Proses seperti pencucian untuk mengurangi karbon dan rongga, serta pencampuran dengan bahan tambahan, diperlukan untuk meningkatkan kualitas material. RCA ini lebih cocok digunakan untuk aplikasi non-struktural atau bahan dasar jalan.

Analisis Hasil SEM dan EDX RCA Gedung (Sampel 2)

## 2. Analisis Struktur Mikro Berdasarkan SEM



Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

**Gambar 4.16 Hasil Pengujian SEM Sampel 2 RCA Gedung 45X, 250X, 2500X, dan 4000X**

Hasil SEM dari Sampel 2 RCA Gedung dengan pembesaran bertingkat (45X, 250X, 2500X, dan 4000X) menunjukkan hal berikut:

- 45X : Permukaan RCA memperlihatkan banyak rongga (*void*) besar yang tersebar. Sisa-sisa pasta semen terlihat menempel

di permukaan agregat, mengindikasikan pengikatan yang kurang baik pada material beton awal.

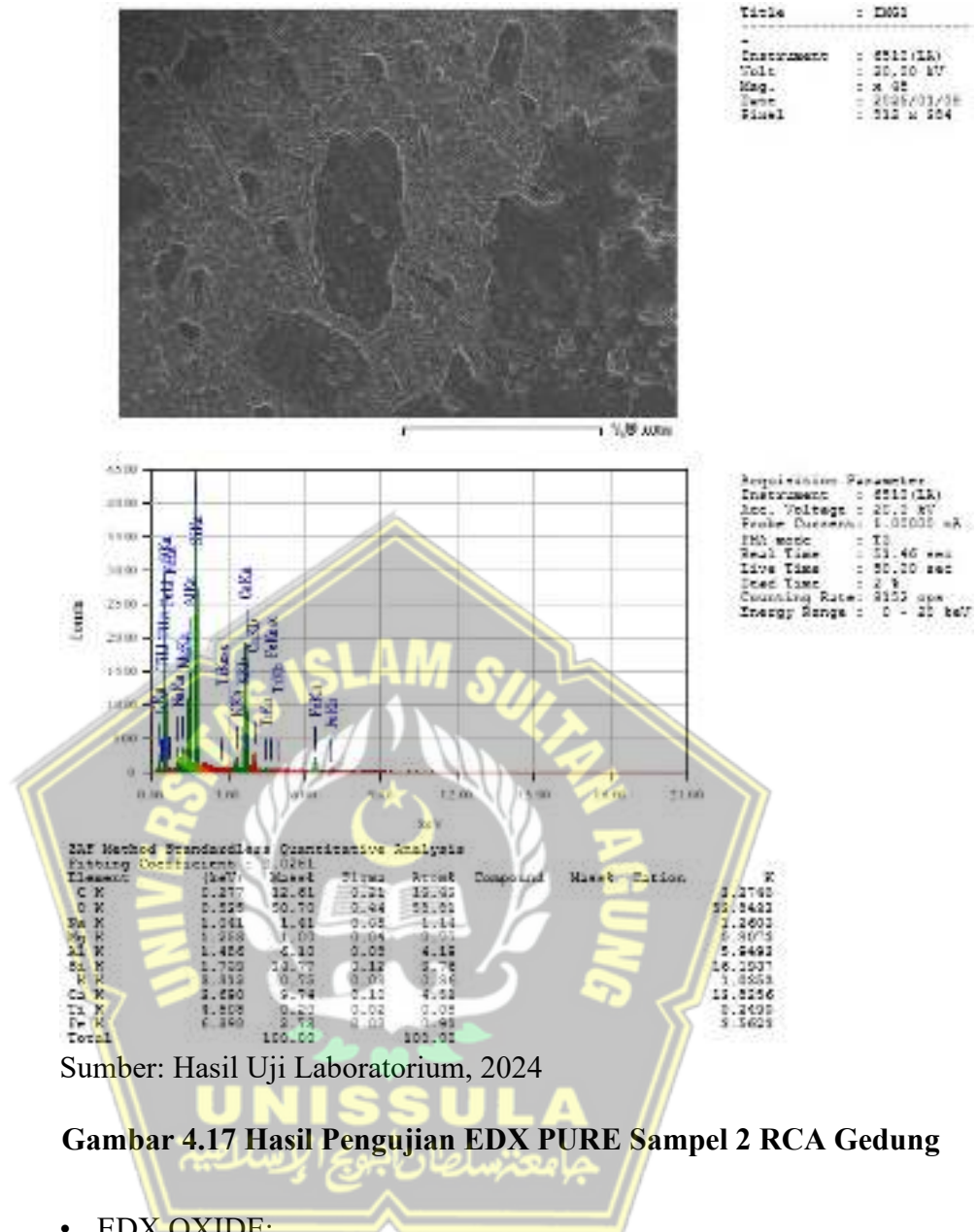
- 250X : Rongga lebih terlihat jelas, dengan retak mikro mulai tampak di beberapa bagian. Permukaan material tetap menunjukkan ketidakhomogenan yang dapat memengaruhi kualitas mekanik.
- 2500X : Pada pembesaran tinggi, struktur mikro memperlihatkan porositas signifikan dan retak mikro yang tersebar di berbagai area. Hal ini menegaskan kelemahan mikro struktural RCA.
- 4000X : Permukaan semakin menunjukkan adanya retak kecil yang memperluas celah antar partikel. Banyaknya rongga di permukaan menjadi indikasi kelemahan material dalam membentuk ikatan yang baik dengan pasta semen baru.

RCA Gedung (Sampel 2) memiliki struktur mikro dengan banyak rongga dan retak mikro yang signifikan. Hal ini menunjukkan kualitas mikro struktural yang rendah dan memerlukan pengolahan tambahan untuk meningkatkan kualitasnya.

a. Analisis Komposisi Kimia Berdasarkan EDX

Hasil dari EDX PURE dan EDX OXIDE memberikan informasi berikut:

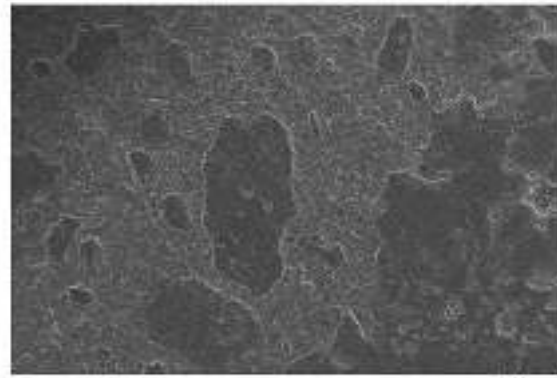
- EDX PURE:
  - Oksigen (50.70%) dan Kalsium (9.74%) merupakan komponen dominan, menunjukkan keberadaan pasta semen dan porositas tinggi.
  - Silikon (14.77%) dan Aluminium (6.10%) merupakan elemen khas dari agregat alami dan pasta semen.
  - Karbon (12.61%) menunjukkan sisa material organik yang berasal dari proses karbonisasi atau kontaminasi selama penggunaan gedung.
  - Elemen seperti Besi (2.73%) dan Magnesium (1.00%) menambahkan indikasi heterogenitas material.



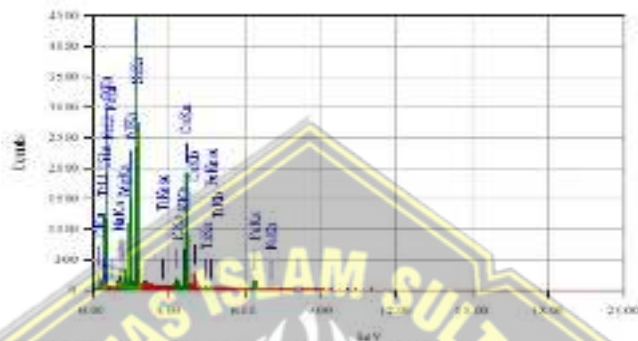
Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

**Gambar 4.17 Hasil Pengujian EDX PURE Sampel 2 RCA Gedung**

- EDX OXIDE:
  - $\text{SiO}_2$  (39.78%) merupakan komponen dominan, diikuti oleh  $\text{CaO}$  (17.48%) dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (14.08%), menunjukkan keberadaan agregat alami dan sisa pasta semen.
  - Karbon (18.38%) menunjukkan jumlah signifikan dari material organik yang berpotensi mengurangi kualitas mekanik RCA ini.
  - $\text{FeO}$  (4.47%) memberikan indikasi kecil dari elemen penguat yang mungkin berasal dari sisa baja atau elemen logam pada beton gedung.



Title : IMG1  
Instrument : GSI01(LA)  
Unit : 20.00 kV  
Mag : x 1k  
Date : 2023/01/08  
Power : 812 m 388



Acquisition Parameters  
Instrument : GSI01(LA)  
Acq. Voltage : 20.0 kV  
Probe Current : 1.00000 nA  
SMA mode : TO  
Real Time : 51.46 sec  
Live Time : 80.00 sec  
Dead Time : 2.1  
Counting Rate : 3182 cps  
Energy Range : 0 - 20 keV

EDX Method: Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Excitation: 20.0 kV

Probe Current: 1.00000 nA

Real Time: 51.46 sec

Live Time: 80.00 sec

Dead Time: 2.1

Counting Rate: 3182 cps

Energy Range: 0 - 20 keV

| Element | Wt%   | Mass   | Stdev | Mo%    | Compound | Mass   | Ratio | K       |
|---------|-------|--------|-------|--------|----------|--------|-------|---------|
| C       | 1.277 | 12.01  | 0.01  | 54.50  | C        | 12.01  | 0.00  | 0.0000  |
| O       | 1.041 | 16.00  | 0.00  | 1.20   | FeO      | 2.32   | 0.70  | 0.7000  |
| Si      | 1.040 | 28.09  | 0.00  | 1.77   | SiO2     | 0.50   | 0.00  | 1.7700  |
| Al      | 1.450 | 26.98  | 0.00  | 4.92   | Al2O3    | 14.02  | 2.00  | 12.0000 |
| Fe      | 1.738 | 55.85  | 0.00  | 33.59  | Fe2O3    | 39.95  | 0.10  | 33.5900 |
| S       | 1.021 | 32.07  | 0.00  | 0.46   | SO2      | 1.26   | 0.27  | 2.2000  |
| Ca      | 1.021 | 40.08  | 0.00  | 11.30  | CaO      | 17.40  | 3.00  | 24.0000 |
| Ti      | 1.021 | 47.88  | 0.00  | 0.10   | TiO2     | 0.42   | 0.00  | 0.8000  |
| Mn      | 1.021 | 54.94  | 0.00  | 2.32   | MnO      | 4.49   | 0.07  | 7.7100  |
| Total   |       | 100.00 |       | 100.00 |          | 100.00 | 12.02 |         |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

**Gambar 4.18 Hasil Pengujian EDX OXIDE Sampel 2 RCA Gedung**

Komposisi kimia RCA dari Sampel 2 menunjukkan keberadaan material heterogen dengan kandungan karbon dan oksigen tinggi, yang mendukung hasil SEM terkait tingginya porositas dan retak mikro. Berdasarkan hasil SEM dan EDX, berikut adalah kesimpulan untuk Sampel 2 RCA Gedung:

- Struktur Mikro:
  - RCA dari Sampel 2 memiliki banyak rongga besar dan retak mikro, yang mengindikasikan kelemahan mekanik material ini. Struktur mikro ini menunjukkan kualitas yang kurang optimal jika digunakan langsung dalam aplikasi struktural.
- Komposisi Kimia:

- Kandungan karbon yang tinggi (18.38% pada EDX OXIDE dan 12.61% pada EDX PURE) menunjukkan keberadaan material organik yang dapat mengurangi kekuatan beton jika digunakan tanpa pengolahan lebih lanjut.
- $\text{SiO}_2$  dan  $\text{CaO}$  yang dominan menunjukkan bahwa RCA ini tetap memiliki elemen dasar yang diperlukan untuk beton, tetapi kualitas mekanik terganggu oleh porositas dan retak mikro.
- Rekomendasi:
  - RCA Gedung (Sampel 2) memerlukan pengolahan tambahan, seperti pencucian untuk menghilangkan material organik dan pengisian rongga untuk mengurangi porositas, sebelum digunakan dalam beton struktural.
  - Material ini lebih cocok untuk aplikasi non-struktural atau sebagai bahan dasar pada konstruksi yang tidak memerlukan kekuatan tinggi.

Berdasarkan hasil analisis SEM, Sampel 1 dan Sampel 2 RCA gedung menunjukkan banyaknya rongga (*void*) dan retak mikro yang signifikan pada permukaan material. Hal ini disebabkan oleh proses penghancuran limbah beton gedung yang meninggalkan sisa-sisa pasta semen yang tidak sepenuhnya terlepas. Pada pembesaran tinggi (2500X dan 4000X), retak mikro terlihat lebih jelas, dengan distribusi rongga yang tidak merata, sehingga struktur mikro yang tidak homogen ini menurunkan kemampuan RCA dalam membentuk ikatan yang kuat dengan pasta semen baru. Dibandingkan dengan Sampel 1, Sampel 2 memiliki rongga lebih besar dan distribusi material yang lebih tidak merata, menunjukkan kualitas mikro struktural yang lebih rendah.

Berdasarkan hasil analisis EDX, kedua sampel memiliki komponen dominan berupa  $\text{SiO}_2$  (Silikon dioksida) dan  $\text{CaO}$  (Kalsium oksida), yang menunjukkan keberadaan agregat alami dan sisa pasta semen dari beton awal. Kandungan karbon pada kedua sampel cukup tinggi, dengan Sampel 1 memiliki karbon sebesar 18.12% (EDX OXIDE) dan 12.02% (EDX PURE), sedangkan Sampel 2 memiliki karbon sebesar 18.38% (EDX OXIDE) dan 12.61% (EDX PURE). Tingginya kandungan

karbon ini mengindikasikan keberadaan material organik atau sisa karbonisasi, yang memengaruhi kekuatan material secara keseluruhan. Selain itu, Sampel 2 memiliki porositas yang lebih tinggi, yang tercermin dari dominasi kandungan oksigen yang lebih besar dibandingkan Sampel 1, menunjukkan kelemahan mekanik yang lebih signifikan. Dengan demikian, Sampel 1 memiliki kualitas yang sedikit lebih baik dibandingkan Sampel 2, meskipun keduanya memerlukan pengolahan tambahan untuk meningkatkan kualitasnya sebelum digunakan dalam aplikasi konstruksi.

#### 4.5.2 Struktur Mikro RCA *Rigid Pavement*

Pengujian struktur mikro RCA (*Recycled Concrete Aggregate*) dari *rigid pavement* bertujuan untuk menganalisis tingkat kepadatan, distribusi material, dan keberadaan rongga (*void*) pada skala mikroskopis. RCA *rigid pavement* dihasilkan dari beton jalan yang mengalami pemadatan intensif selama penggunaannya, sehingga diharapkan memiliki struktur mikro yang lebih padat dan homogen dibandingkan RCA dari gedung. Analisis ini dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengidentifikasi kualitas mikro struktural RCA *rigid* dan potensi penggunaannya dalam aplikasi konstruksi struktural.

##### 1. Analisis Hasil SEM dan EDX RCA *Rigid* (Sampel 1)

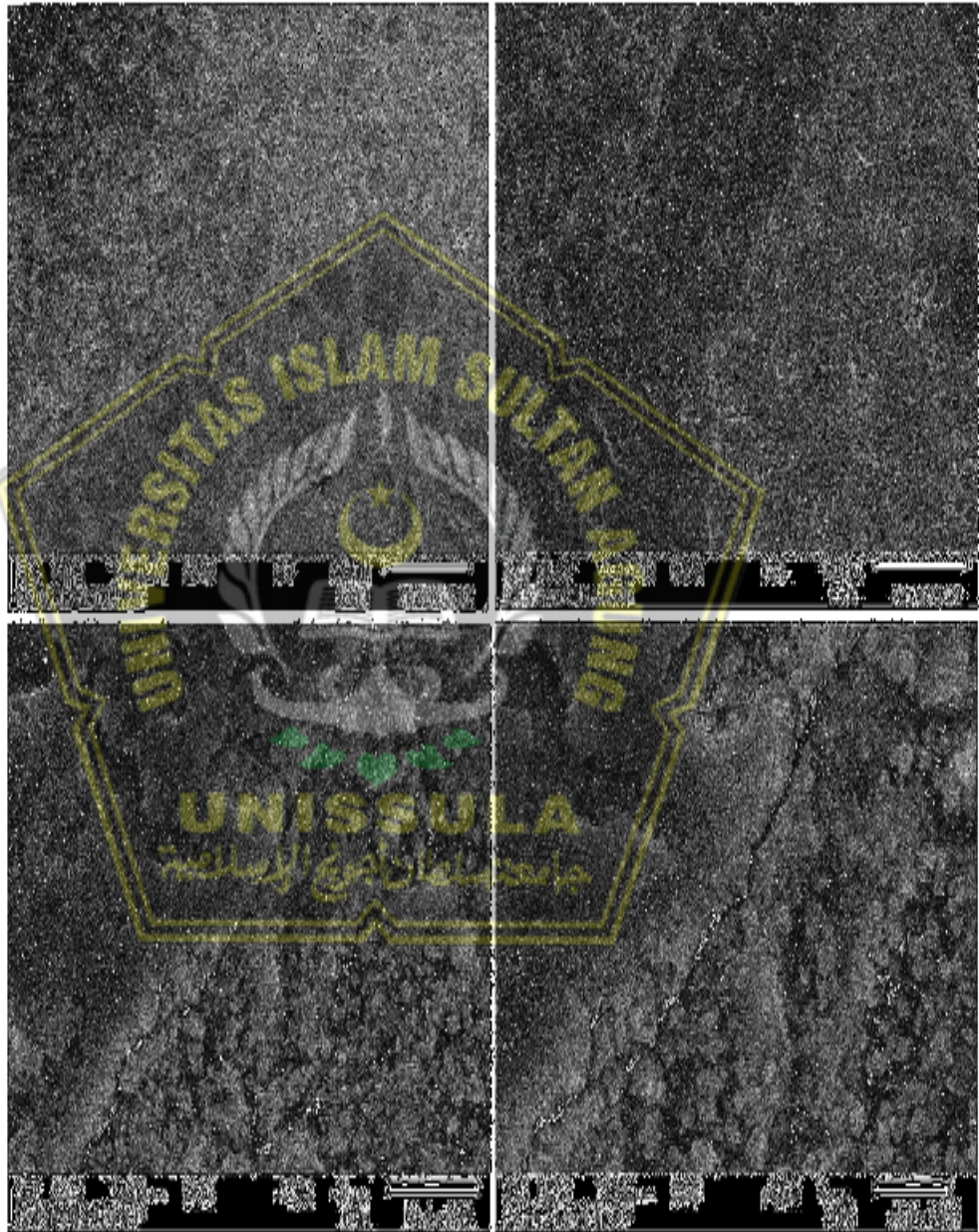
###### 1. Analisis Struktur Mikro Berdasarkan SEM

Hasil SEM pada Sampel 1 RCA *Rigid* dengan pembesaran bertingkat (45X, 250X, 2500X, dan 4000X) menunjukkan hal berikut:

- 45X : Struktur mikro RCA terlihat lebih padat dibandingkan RCA gedung. Permukaan agregat menunjukkan distribusi yang lebih homogen, dengan sedikit sisa pasta semen yang menempel.
- 250X : Rongga (*void*) terlihat lebih kecil dan terdistribusi secara merata. Retak mikro lebih sedikit dibandingkan dengan RCA gedung, menunjukkan bahwa RCA *rigid* memiliki kekuatan mikro struktural yang lebih baik.
- 2500X : Pada pembesaran tinggi, struktur mikro menunjukkan ikatan yang lebih baik antara agregat dan pasta semen. Retak mikro

terlihat minimal, yang mendukung kekuatan mekanik yang lebih tinggi.

- 4000X : Permukaan agregat menunjukkan sedikit rongga kecil, tetapi distribusi material lebih kompak dibandingkan RCA gedung, yang menunjukkan kualitas mikro struktural yang lebih baik.



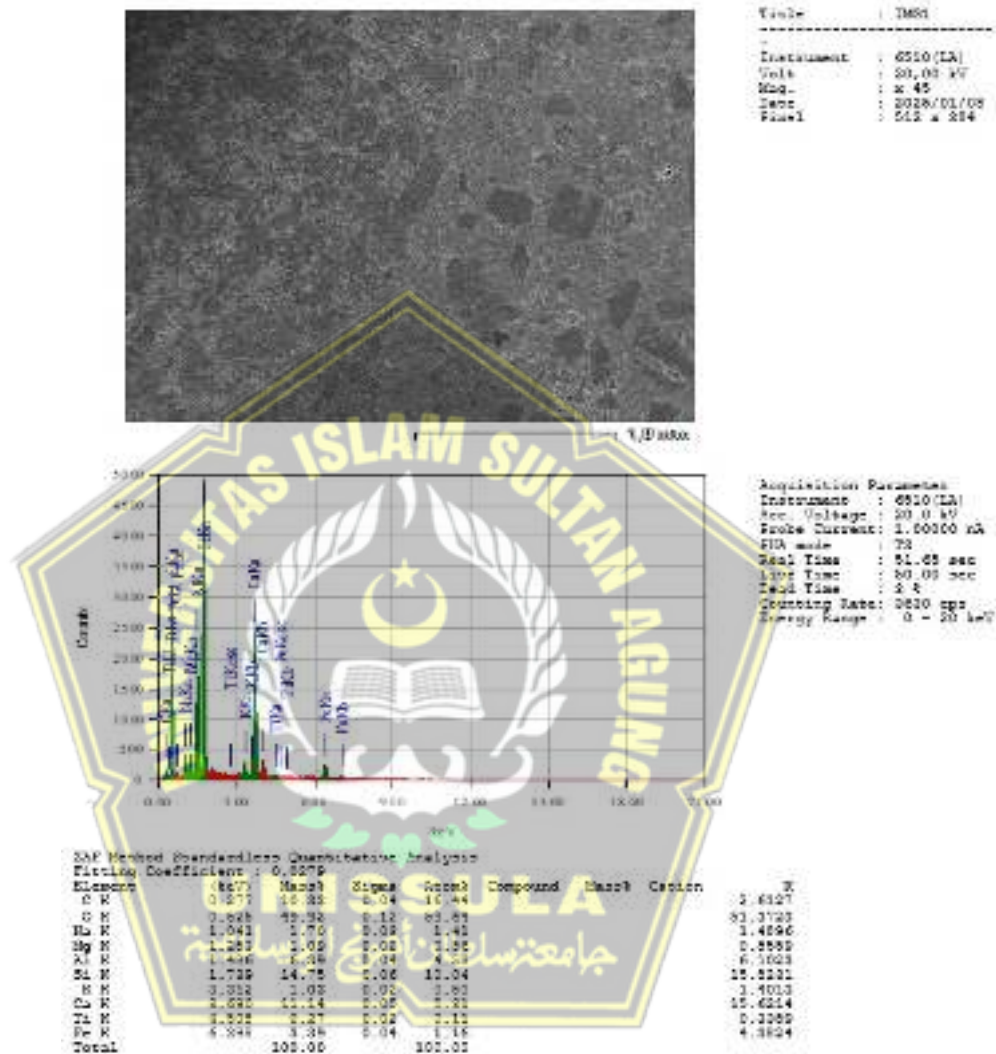
Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

**Gambar 4.19 Hasil Pengujian SEM Sampel 1 RCA *Rigid* 45X, 250X, 2500X, dan 4000X**

## 2. Analisis Komposisi Kimia Berdasarkan EDX

Berdasarkan hasil EDX PURE dan EDX OXIDE, berikut adalah analisis komposisi kimia RCA *rigid*:

- EDX PURE:

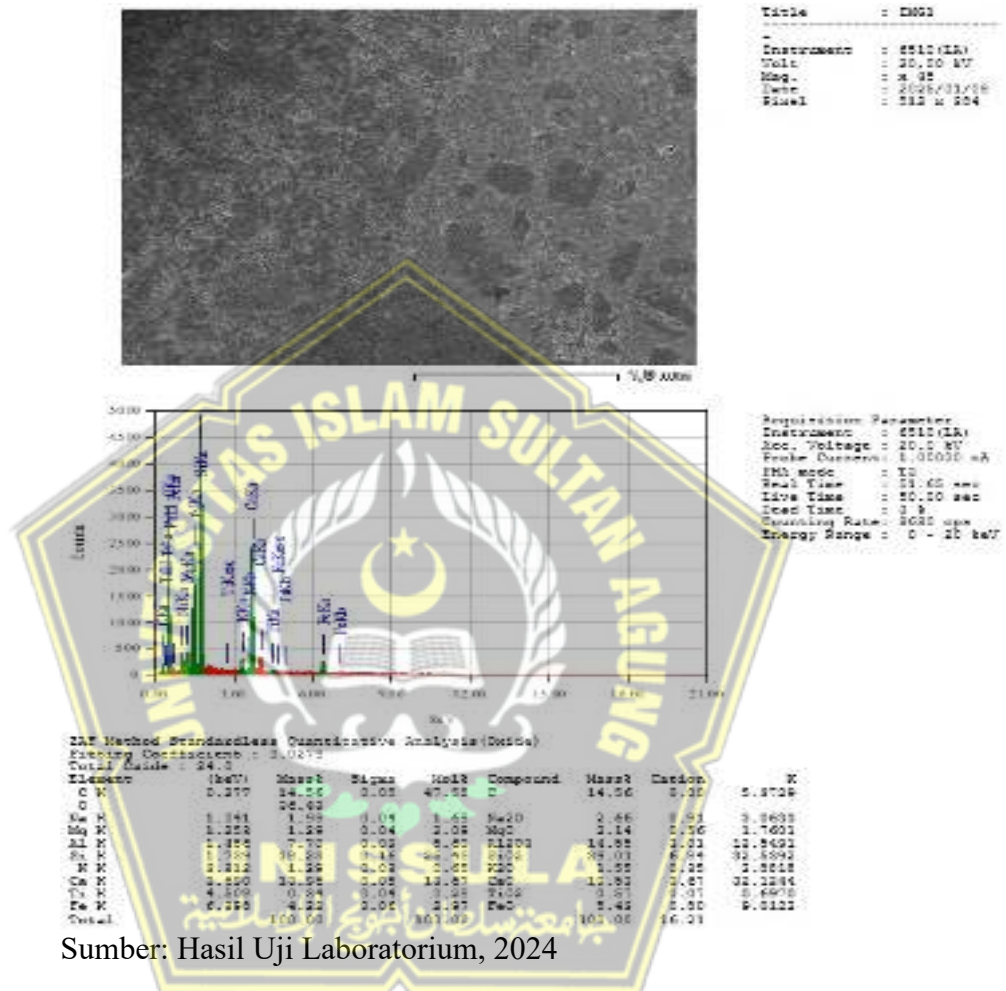


Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

**Gambar 4.20 Hasil Pengujian EDX PURE Sampel 1 RCA *Rigid***

- Oksigen (49.92%) merupakan elemen dominan, menunjukkan keberadaan ikatan oksida yang kuat dalam struktur material.
- Silikon (14.75%) dan Kalsium (11.14%) menjadi komponen utama yang menunjukkan keberadaan agregat alami ( $\text{SiO}_2$ ) dan pasta semen sisa ( $\text{CaO}$ ).

- Karbon (10.33%) lebih rendah dibandingkan RCA gedung, menunjukkan adanya material organik yang lebih sedikit.
  - Aluminium (6.39%) dan Besi (3.39%) memberikan kontribusi terhadap kekuatan mikro struktural material.
- EDX OXIDE:



Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

**Gambar 4.21 Hasil Pengujian EDX OXIDE Sampel 1 RCA Rigid**

- SiO<sub>2</sub> (39.01%) dan CaO (19.53%) mendominasi, menunjukkan komposisi kimia RCA rigid yang kaya akan agregat alami dan pasta semen.
- Kandungan karbon (14.56%) menunjukkan sisa karbonisasi yang lebih rendah dibandingkan RCA gedung.
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (14.55%) dan FeO (5.43%) mendukung sifat mekanis material yang lebih baik.

Komposisi kimia RCA *rigid* menunjukkan material yang lebih homogen, dengan kandungan karbon dan porositas lebih rendah dibandingkan RCA gedung. Kandungan utama SiO<sub>2</sub> dan CaO menunjukkan kekuatan kimia yang mendukung kekuatan mekanik material. Berdasarkan hasil SEM dan EDX, berikut adalah kesimpulan untuk Sampel 1 RCA *Rigid*:

- Struktur Mikro: RCA *rigid* memiliki mikro struktur yang lebih padat dan homogen, dengan rongga dan retak mikro minimal dibandingkan RCA gedung. Hal ini menunjukkan kualitas mikro struktural yang lebih baik untuk aplikasi struktural.
- Komposisi Kimia: Dominasi SiO<sub>2</sub> dan CaO mendukung kekuatan mekanik RCA *rigid*. Kandungan karbon yang lebih rendah menunjukkan material ini lebih stabil secara kimia dibandingkan RCA gedung.
- Rekomendasi:
  - RCA *rigid* dapat digunakan untuk aplikasi struktural, seperti beton mutu tinggi, tanpa pengolahan tambahan yang signifikan.
  - Material ini sangat cocok untuk proyek konstruksi yang membutuhkan kekuatan mekanik tinggi dan stabilitas jangka panjang.

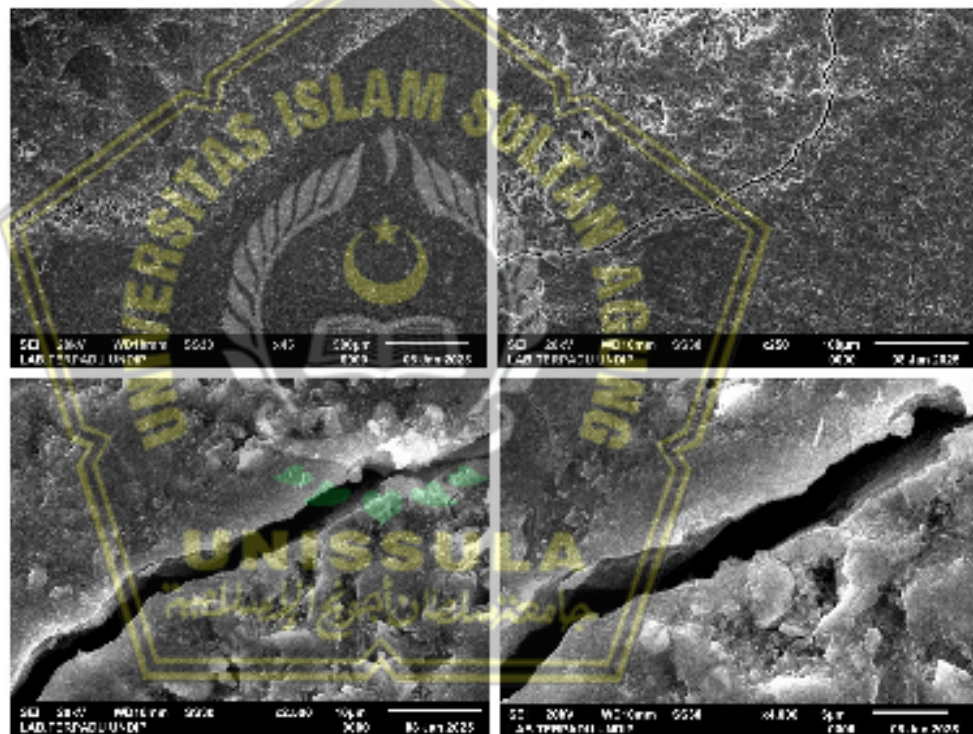
## 2. Analisis Hasil SEM dan EDX RCA *Rigid* (Sampel 2)

### a. Analisis Struktur Mikro Berdasarkan SEM

Hasil SEM pada Sampel 2 RCA *Rigid* dengan pembesaran bertingkat (45X, 250X, 2500X, dan 4000X) menunjukkan hal berikut:

- 45X : Struktur RCA terlihat lebih padat, dengan permukaan agregat yang relatif mulus. Rongga (*void*) kecil terlihat, namun lebih sedikit dibandingkan RCA gedung. Hal ini menunjukkan bahwa material ini memiliki tingkat kepadatan lebih tinggi.

- 250X : Rongga lebih terdefinisi dengan distribusi yang merata. Retak mikro terlihat sangat minim, yang menegaskan kualitas mikro struktural yang baik dari RCA *rigid*.
- 2500X : Pada pembesaran tinggi, struktur mikro menunjukkan ikatan antara agregat dan pasta semen yang lebih kuat, dengan retak mikro yang hampir tidak terlihat.
- 4000X : Permukaan agregat terlihat homogen dengan hanya sedikit porositas kecil, yang menunjukkan bahwa RCA ini terkompaksi dengan sangat baik selama penggunaannya sebagai beton *rigid pavement*.



Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

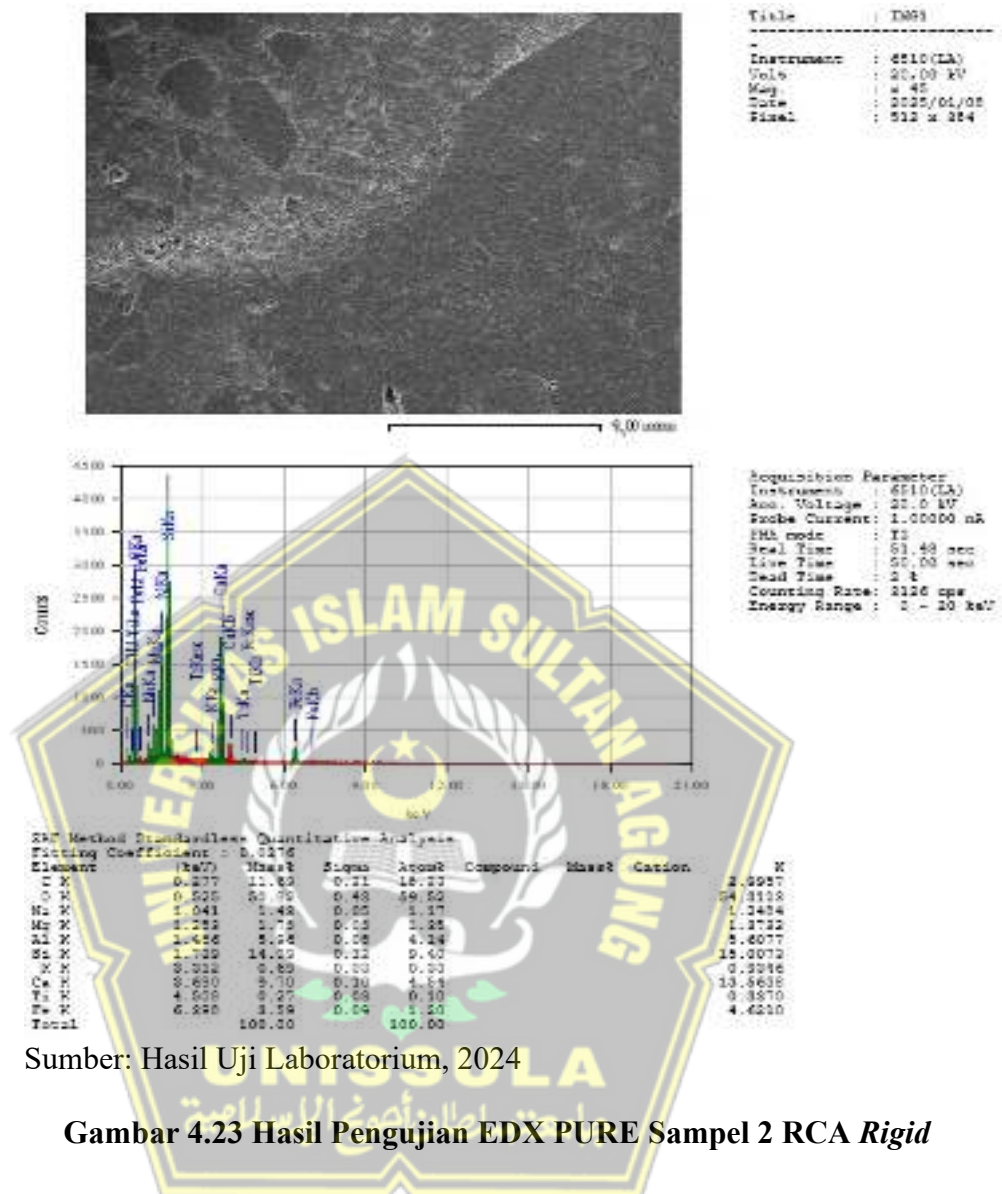
**Gambar 4.22 Hasil Pengujian SEM Sampel 2 RCA *Rigid* 45X, 250X, 2500X, dan 4000X**

RCA *rigid* (Sampel 2) memiliki struktur mikro yang padat, dengan rongga dan retak mikro minimal. Material ini memiliki kualitas mikro struktural yang sangat baik dibandingkan RCA gedung.

b. Analisis Komposisi Kimia Berdasarkan EDX

Hasil dari EDX PURE dan EDX OXIDE memberikan detail berikut:

- EDX PURE:

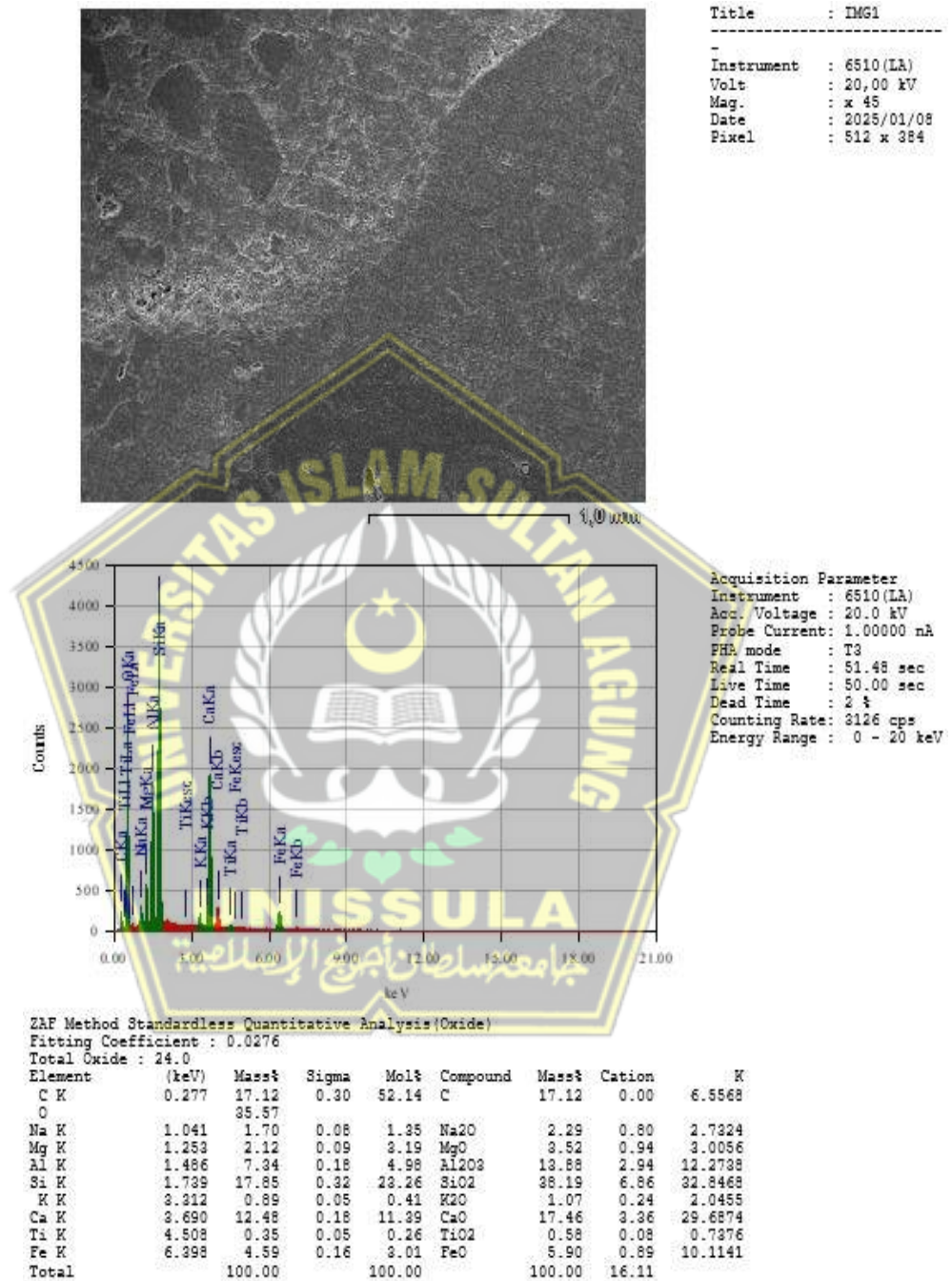


Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

**Gambar 4.23 Hasil Pengujian EDX PURE Sampel 2 RCA Rigid**

- Oksigen (50.82%) mendominasi, menunjukkan ikatan oksida yang kuat dalam struktur material.
- Silikon (14.09%) dan Kalsium (9.70%) menjadi elemen utama yang menunjukkan keberadaan agregat alami ( $\text{SiO}_2$ ) dan pasta semen sisa ( $\text{CaO}$ ).
- Karbon (11.69%) lebih rendah dibandingkan RCA gedung, menunjukkan material organik yang lebih sedikit, sehingga kualitas kimia lebih baik.

- Aluminium (5.96%) dan Besi (3.59%) memberikan kontribusi terhadap stabilitas material.
- EDX OXIDE:



Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

**Gambar 4.24 Hasil Pengujian EDX PURE Sampel 2 RCA Rigid**

- $\text{SiO}_2$  (38.19%) dan  $\text{CaO}$  (17.46%) mendominasi, menunjukkan komposisi RCA *rigid* yang stabil dengan agregat alami dan pasta semen yang baik.
- Kandungan karbon (17.12%) lebih tinggi dibandingkan hasil PURE, namun masih lebih rendah dibandingkan RCA gedung.
- $\text{Al}_2\text{O}_3$  (13.88%) dan  $\text{FeO}$  (5.90%) memberikan tambahan kekuatan kimia material ini.

Komposisi kimia RCA *rigid* pada Sampel 2 menunjukkan dominasi senyawa stabil seperti  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{CaO}$ , dengan karbon yang lebih rendah dibandingkan RCA gedung. Material ini memiliki stabilitas kimia yang lebih baik. Berdasarkan hasil SEM dan EDX, berikut adalah kesimpulan untuk Sampel 2 RCA *Rigid*:

- Struktur Mikro: RCA dari Sampel 2 memiliki struktur mikro yang sangat padat, dengan rongga dan retak mikro minimal. Hal ini menunjukkan bahwa RCA *rigid* dapat digunakan tanpa pengolahan tambahan yang signifikan.
- Komposisi Kimia: Dominasi  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{CaO}$  mendukung kekuatan mekanik RCA *rigid*. Kandungan karbon yang lebih rendah menunjukkan material ini lebih stabil secara kimia dan memiliki kualitas yang lebih baik dibandingkan RCA gedung.
- Rekomendasi:
  - RCA *rigid* dari Sampel 2 sangat cocok untuk digunakan dalam aplikasi struktural, seperti beton mutu tinggi, karena struktur mikro dan komposisi kimianya yang stabil.
  - Material ini lebih unggul dibandingkan RCA gedung dan dapat langsung digunakan tanpa banyak proses tambahan.

## 4.6 Rekapitulasi Hasil Pengujian

### 4.6.1 Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton RCA 40%, 50%, dan 60%

Hasil pengujian kuat tekan beton dengan campuran RCA 40% pada berbagai umur pengujian menunjukkan tren peningkatan kekuatan tekan seiring

bertambahnya waktu. Berikut analisis rekapitulasi hasil pengujian berdasarkan tabel rekapitulasi

**Tabel 4.30 Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton dengan Campuran Limbah *Rigid Pavement* Sebesar 40%**

| REKAPITULASI PENGUJIAN KUAT TEKAN BETON 40% RCA |                   |                 |            |                 |             |            |            |                           |             |
|-------------------------------------------------|-------------------|-----------------|------------|-----------------|-------------|------------|------------|---------------------------|-------------|
| KODE BENDA UJI                                  | TANGGAL PEMBUATAN | TANGGAL TESTING | MUTU BETON | SLUMP FLOW (CM) | UMUR (HARI) | BEBAN (KN) | BERAT (KG) | KUAT TEKAN SILINDER (Mpa) | PRESEN TASE |
| TRIAL MIX 40% RCA                               | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 40-60           | 3           | 680        | 12.78      | 38.50                     | 86%         |
|                                                 | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 40-60           | 3           | 740        | 12.88      | 41.90                     | 93%         |
|                                                 | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 40-60           | 3           | 710        | 12.72      | 40.20                     | 89%         |
|                                                 | 20-Nov-24         | 27-Nov-24       | FS 45      | 40-60           | 7           | 760        | 12.48      | 43.03                     | 96%         |
|                                                 | 20-Nov-24         | 27-Nov-24       | FS 45      | 40-60           | 7           | 790        | 12.98      | 44.73                     | 99%         |
|                                                 | 20-Nov-24         | 27-Nov-24       | FS 45      | 40-60           | 7           | 780        | 12.32      | 44.16                     | 98%         |
|                                                 | 20-Nov-24         | 18-Dec-24       | FS 45      | 40-60           | 28          | 800        | 12.68      | 45.29                     | 101%        |
|                                                 | 20-Nov-24         | 18-Dec-24       | FS 45      | 40-60           | 28          | 900        | 13.08      | 50.96                     | 113%        |
|                                                 | 20-Nov-24         | 18-Dec-24       | FS 45      | 40-60           | 28          | 850        | 12.52      | 48.12                     | 107%        |

Sumber: Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

Hasil pengujian kuat tekan beton dengan campuran limbah *rigid pavement* sebesar 40% menunjukkan perkembangan kekuatan yang signifikan pada setiap umur beton. Pada umur 3 hari, hasil uji menunjukkan kuat tekan masing-masing sebesar 38.50 MPa, 41.90 MPa, dan 40.20 MPa. Persentase pencapaian terhadap mutu desain FS 45 untuk masing-masing hasil adalah 86%, 93%, dan 89%. Hasil ini mengindikasikan bahwa pada tahap awal proses hidrasi, campuran beton dengan RCA sebesar 40% mampu memberikan kekuatan yang mendekati mutu desain, menunjukkan performa awal yang baik.

Pada umur 7 hari, kuat tekan masing-masing silinder uji tercatat sebesar 43.03 MPa, 44.73 MPa, dan 44.16 MPa. Persentase pencapaian terhadap mutu desain FS 45 adalah 96%, 99%, dan 98%. Hal ini menunjukkan bahwa beton dengan campuran RCA telah hampir mencapai kekuatan desainnya pada umur pertengahan. Kekuatan ini didukung oleh proses pemadatan yang baik dan distribusi material yang merata dalam campuran beton.

Pada umur 28 hari, hasil uji menunjukkan kuat tekan masing-masing sebesar 45.29 MPa, 50.96 MPa, dan 48.12 MPa. Persentase pencapaian terhadap mutu

desain FS 45 adalah 101%, 113%, dan 107%. Hasil ini menunjukkan bahwa beton dengan RCA 40% tidak hanya mencapai kekuatan desain, tetapi juga melampaui target yang ditetapkan. Hal ini membuktikan bahwa campuran limbah *rigid pavement* sebesar 40% memberikan kontribusi positif terhadap kekuatan jangka panjang beton, menjadikannya layak untuk digunakan pada elemen struktural seperti kolom, balok, dan pelat lantai.

Beton dengan campuran RCA 40% menunjukkan performa teknis yang baik pada seluruh umur pengujian, dengan pencapaian kuat tekan yang memenuhi bahkan melampaui target desain. Dengan hasil ini, beton RCA 40% dapat digunakan untuk aplikasi struktural seperti kolom, balok, dan pelat lantai pada proyek konstruksi. Selain itu, penggunaan RCA mendukung aspek keberlanjutan lingkungan dengan memanfaatkan material daur ulang. Perbaikan pada metode pencampuran dan *curing* dapat lebih meningkatkan konsistensi hasil.

Hasil pengujian kuat tekan beton dengan campuran RCA 50% menunjukkan peningkatan kekuatan secara bertahap sesuai dengan umur pengujian. Berikut analisis dari rekapitulasi hasil pengujian berdasarkan tabel:

**Tabel 4.31 Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton dengan Campuran Limbah *Rigid Pavement* Sebesar 50%**

| REKAPITULASI PENGUJIAN KUAT TEKAN BETON 50% RCA |                   |                 |            |                 |             |            |            |                           |            |
|-------------------------------------------------|-------------------|-----------------|------------|-----------------|-------------|------------|------------|---------------------------|------------|
| KODE BENDA UJI                                  | TANGGAL PEMBUATAN | TANGGAL TESTING | MUTU BETON | SLUMP FLOW (CM) | UMUR (HARI) | BEBAN (KN) | BERAT (KG) | KUAT TEKAN SILINDER (Mpa) | PERSENTASE |
| TRIAL MIX 50% RCA                               | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 40-60           | 3           | 450        | 12.28      | 25.48                     | 57%        |
|                                                 | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 40-60           | 3           | 500        | 12.18      | 28.31                     | 63%        |
|                                                 | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 40-60           | 3           | 420        | 12.68      | 23.78                     | 53%        |
|                                                 | 20-Nov-24         | 27-Nov-24       | FS 45      | 40-60           | 7           | 530        | 12.29      | 30.01                     | 67%        |
|                                                 | 20-Nov-24         | 27-Nov-24       | FS 45      | 40-60           | 7           | 550        | 12.48      | 31.14                     | 69%        |
|                                                 | 20-Nov-24         | 27-Nov-24       | FS 45      | 40-60           | 7           | 450        | 12.68      | 25.48                     | 57%        |
|                                                 | 20-Nov-24         | 18-Dec-24       | FS 45      | 40-60           | 28          | 650        | 12.49      | 36.80                     | 82%        |
|                                                 | 20-Nov-24         | 18-Dec-24       | FS 45      | 40-60           | 28          | 750        | 12.68      | 42.46                     | 94%        |
|                                                 | 20-Nov-24         | 18-Dec-24       | FS 45      | 40-60           | 28          | 600        | 12.88      | 33.97                     | 75%        |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

Pengujian kuat tekan beton dengan campuran RCA 50% dilakukan pada berbagai umur pengujian untuk menilai performa mekanis beton. Pada umur 3 hari, hasil pengujian menunjukkan kuat tekan sebesar 25.48 MPa (57%), 28.31 MPa

(63%), dan 23.78 MPa (53%). Kekuatan tekan awal ini relatif rendah dibandingkan campuran RCA 40%, yang dapat disebabkan oleh sifat porositas tinggi dari RCA dan distribusi agregat yang kurang merata. Meskipun demikian, hasil ini masih cukup untuk aplikasi konstruksi awal atau non-struktural.

Pada umur 7 hari, kekuatan tekan beton dengan RCA 50% meningkat menjadi 30.01 MPa (67%), 31.14 MPa (69%), dan 25.48 MPa (57%). Peningkatan ini mencerminkan proses hidrasi semen yang berlangsung, meskipun variasi hasil antar benda uji menunjukkan potensi ketidakhomogenan dalam campuran. Nilai yang belum konsisten ini juga menunjukkan bahwa pengendalian distribusi RCA dalam proses pencampuran masih perlu ditingkatkan.

Pada umur 28 hari, kekuatan tekan beton dengan RCA 50% mencapai 36.80 MPa (82%), 42.46 MPa (94%), dan 33.97 MPa (75%). Hasil ini menunjukkan pencapaian kekuatan tekan yang lebih tinggi dibandingkan umur sebelumnya, namun tetap berada di bawah mutu desain FS 45. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh sifat RCA yang memiliki porositas tinggi dan kekuatan intrinsik yang lebih rendah dibandingkan agregat alami. Variasi hasil antar benda uji juga mengindikasikan perlunya pengontrolan yang lebih baik dalam proses produksi.

Secara keseluruhan, beton dengan RCA 50% menunjukkan performa mekanis yang cukup untuk aplikasi non-struktural atau elemen struktural ringan, tetapi belum ideal untuk aplikasi yang membutuhkan mutu tinggi. Perbaikan dalam metode pencampuran, peningkatan kualitas material RCA, serta pengontrolan proses *curing* dapat membantu meningkatkan performa beton ini. Meskipun demikian, penggunaan RCA sebagai pengganti sebagian agregat kasar tetap menjadi solusi yang ramah lingkungan dan berpotensi mendukung keberlanjutan dalam konstruksi. Jika diperlukan evaluasi lanjutan, uji pada umur yang lebih panjang dapat dilakukan untuk mengetahui potensi kekuatan maksimal beton ini.

Hasil pengujian kuat tekan beton dengan campuran RCA 60% menunjukkan peningkatan kekuatan tekan secara bertahap sesuai dengan umur pengujian. Berikut analisis dari rekapitulasi hasil pengujian berdasarkan tabel:

**Tabel 4.32 Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton dengan**

### Campuran Limbah *Rigid Pavement* Sebesar 50%

| REKAPITULASI PENGUJIAN KUAT TEKAN BETON 50% RCA |                   |                 |            |                 |             |            |            |                           |             |
|-------------------------------------------------|-------------------|-----------------|------------|-----------------|-------------|------------|------------|---------------------------|-------------|
| KODE BENDA UJI                                  | TANGGAL PEMBUATAN | TANGGAL TESTING | MUTU BETON | SLUMP FLOW (CM) | UMUR (HARI) | BEBAN (KN) | BERAT (KG) | KUAT TEKAN SILINDER (Mpa) | PRESEN TASE |
| TRIAL MIX 50% RCA                               | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 40-60           | 3           | 400        | 12.7       | 22.65                     | 50%         |
|                                                 | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 40-60           | 3           | 410        | 13.06      | 23.21                     | 52%         |
|                                                 | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 40-60           | 3           | 330        | 12.88      | 18.68                     | 42%         |
|                                                 | 20-Nov-24         | 27-Nov-24       | FS 45      | 40-60           | 7           | 450        | 12.72      | 25.48                     | 57%         |
|                                                 | 20-Nov-24         | 27-Nov-24       | FS 45      | 40-60           | 7           | 500        | 12.92      | 28.31                     | 63%         |
|                                                 | 20-Nov-24         | 27-Nov-24       | FS 45      | 40-60           | 7           | 400        | 12.48      | 22.65                     | 50%         |
|                                                 | 20-Nov-24         | 18-Dec-24       | FS 45      | 40-60           | 28          | 600        | 12.92      | 33.97                     | 75%         |
|                                                 | 20-Nov-24         | 18-Dec-24       | FS 45      | 40-60           | 28          | 650        | 13.02      | 36.80                     | 82%         |
|                                                 | 20-Nov-24         | 18-Dec-24       | FS 45      | 40-60           | 28          | 550        | 12.68      | 31.14                     | 69%         |

Sumber: Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

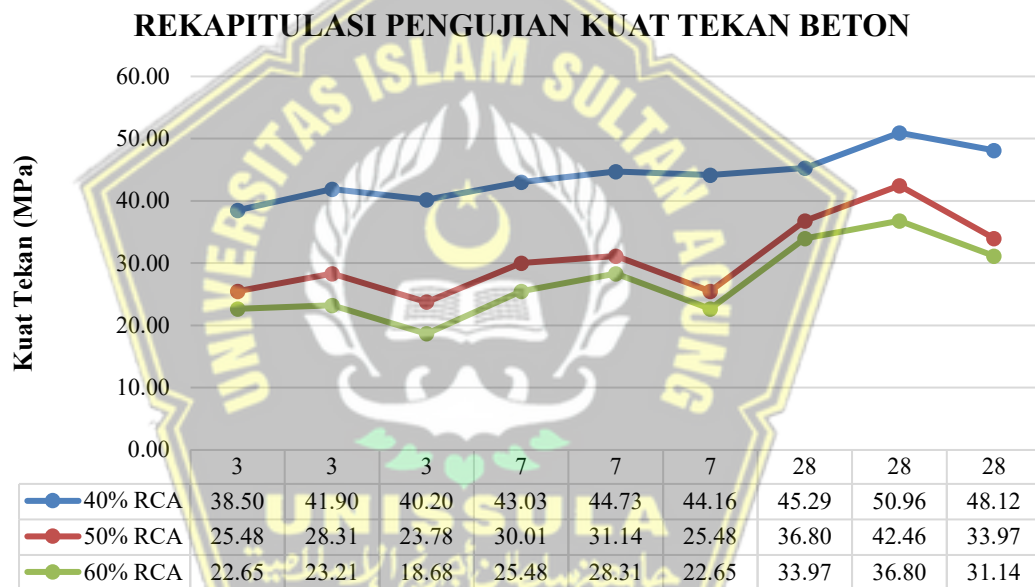
Pengujian kuat tekan beton dengan campuran RCA 60% dilakukan pada umur 3, 7, dan 28 hari untuk mengevaluasi performa mekanisnya. Pada umur 3 hari, hasil pengujian menunjukkan kekuatan tekan sebesar 22.65 MPa (50%), 23.21 MPa (52%), dan 18.68 MPa (42%). Nilai ini menunjukkan bahwa pada tahap awal, campuran RCA 60% memberikan performa mekanis yang cukup rendah dibandingkan campuran dengan proporsi RCA lebih kecil. Hal ini dapat disebabkan oleh sifat RCA yang lebih berpori dan memiliki kekuatan intrinsik lebih rendah dibandingkan agregat alami, yang memengaruhi kekuatan matriks beton secara keseluruhan.

Pada umur 7 hari, beton dengan RCA 60% menunjukkan peningkatan kekuatan tekan menjadi 25.48 MPa (57%), 28.31 MPa (63%), dan 22.65 MPa (50%). Meskipun ada peningkatan dibandingkan umur sebelumnya, nilai kuat tekan ini masih lebih rendah dibandingkan campuran RCA 40% atau 50%. Faktor distribusi RCA yang tidak merata dalam campuran kemungkinan menjadi salah satu penyebab variasi hasil yang cukup besar antar benda uji.

Pada umur 28 hari, beton dengan RCA 60% mencapai kekuatan tekan sebesar 33.97 MPa (75%), 36.80 MPa (82%), dan 31.14 MPa (69%). Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun terdapat peningkatan kekuatan tekan pada umur panjang, nilai yang dicapai masih di bawah mutu desain FS 45. Penggunaan RCA yang tinggi dapat memengaruhi densitas dan kualitas ikatan antar partikel, yang pada akhirnya membatasi pencapaian kekuatan tekan maksimal.

Secara keseluruhan, beton dengan RCA 60% menunjukkan performa yang lebih rendah dibandingkan campuran dengan RCA yang lebih kecil. Penggunaannya lebih cocok untuk aplikasi non-struktural atau elemen struktural ringan yang tidak memerlukan kekuatan tekan tinggi. Untuk meningkatkan performa, diperlukan perbaikan pada metode pencampuran, kontrol kualitas RCA, dan proses *curing* yang lebih optimal. Beton RCA 60% tetap menjadi alternatif ramah lingkungan yang layak dipertimbangkan, terutama dalam konteks keberlanjutan di industri konstruksi.

Secara keseluruhan, perbandingan kuat tekan beton berbagai variasi campuran RCA 40%, 50%, dan 60% dapat dilihat pada grafik di bawah ini:



Sumber: Hasil Analisis, 2025.

**Gambar 4.25 Grafik Perbandingan Pengujian Kuat Tekan Beton RCA 40%, 50%, dan 60%**

#### 4.6.2 Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton RCA 40%, 50%, dan 60%

Rekapitulasi hasil pengujian kuat lentur beton dengan campuran RCA 40% dilakukan untuk menyajikan secara keseluruhan performa mekanis beton pada berbagai umur, yaitu 3, 7, dan 28 hari. Pengujian dilakukan menggunakan benda uji berbentuk balok berukuran 15 cm x 30 cm x 60 cm dengan panjang bentang antara

dua tumpuan sebesar 45 cm. Proses pengujian melibatkan penerapan gaya tekan secara bertahap pada titik tengah balok hingga terjadi kegagalan, dan hasilnya dihitung dalam bentuk *modulus of rupture* untuk menilai kemampuan beton dalam menahan tegangan lentur. Hasil pengujian menunjukkan bahwa beton dengan RCA 40% memiliki performa yang konsisten dan mampu mencapai hingga melampaui target mutu FS 45 pada umur 28 hari, menjadikannya pilihan yang baik untuk aplikasi struktural dengan kebutuhan lentur tinggi.

**Tabel 4.33 Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton 40% RCA**

| REKAPITULASI PENGUJIAN KUAT LENTUR BETON 40% RCA |                   |                 |            |                                            |             |                     |                      |                       |                                                                |            |
|--------------------------------------------------|-------------------|-----------------|------------|--------------------------------------------|-------------|---------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------|------------|
| KODE BENDA UJI                                   | TANGGAL PEMBUATAN | TANGGAL TESTING | MUTU BETON | PANJANG BENTANG ANTARA 2 TUMPUNAN (L) (CM) | UMUR (HARI) | GAYA TEKAN (P) (KG) | LEBAR BALOK (B) (CM) | TINGGI BALOK (B) (CM) | MODULUS OF RUPTURE (PL/bh <sup>2</sup> ) (kg/cm <sup>2</sup> ) | PERSENTASE |
| TRIAL MIX 40% RCA                                | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                         | 3           | 3080                | 15                   | 15                    | 41.07                                                          | 91%        |
|                                                  | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                         | 3           | 3150                | 15                   | 15                    | 42.00                                                          | 93%        |
|                                                  | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                         | 3           | 3000                | 15                   | 15                    | 40.00                                                          | 89%        |
|                                                  | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                         | 7           | 3380                | 15                   | 15                    | 45.07                                                          | 100%       |
|                                                  | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                         | 7           | 3450                | 15                   | 15                    | 46.00                                                          | 102%       |
|                                                  | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                         | 7           | 3300                | 15                   | 15                    | 44.00                                                          | 98%        |
|                                                  | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                         | 28          | 3680                | 15                   | 15                    | 49.07                                                          | 109%       |
|                                                  | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                         | 28          | 3750                | 15                   | 15                    | 50.00                                                          | 111%       |
|                                                  | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                         | 28          | 3600                | 15                   | 15                    | 48.00                                                          | 107%       |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

Pengujian kuat lentur beton dengan campuran RCA 40% dilakukan untuk mengevaluasi performa mekanik beton pada umur 3, 7, dan 28 hari. Benda uji berupa balok berukuran 15 cm x 30 cm x 60 cm dengan panjang bentang antar tumpuan sebesar 45 cm. Hasil pengujian menghasilkan nilai *modulus of rupture* (PL/bh<sup>2</sup>) yang menunjukkan kekuatan lentur beton pada berbagai umur sebagai berikut:

1. Pada Umur 3 Hari:

- *Modulus of rupture* berkisar antara 40.00 hingga 42.00 kg/cm<sup>2</sup> dengan rata-rata 41.02 kg/cm<sup>2</sup>, setara dengan 91% hingga 93% dari target mutu FS 45. Hal ini menunjukkan bahwa beton mulai menunjukkan kekuatan lentur meskipun proses hidrasi belum sepenuhnya selesai.

2. Pada Umur 7 Hari:

- *Modulus of rupture* meningkat signifikan dengan kisaran 44.00 hingga 46.00 kg/cm<sup>2</sup> dan rata-rata 45.02 kg/cm<sup>2</sup>, setara dengan 98% hingga 102% dari target mutu FS 45. Peningkatan ini mencerminkan perkembangan kekuatan lentur beton seiring proses pengerasan yang berlanjut.

3. Pada Umur 28 Hari:

- *Modulus of rupture* mencapai kisaran 48.00 hingga 50.00 kg/cm<sup>2</sup>, dengan rata-rata 49.02 kg/cm<sup>2</sup>, setara dengan 107% hingga 111% dari target mutu FS 45. Hasil ini menunjukkan bahwa beton dengan RCA 40% memiliki performa lentur yang optimal setelah mencapai tahap pengerasan penuh.

Rekapitulasi hasil pengujian menunjukkan bahwa beton dengan RCA 40% memiliki kekuatan lentur yang sangat baik pada berbagai umur, bahkan mampu melampaui target mutu FS 45 pada umur 28 hari. Dengan *modulus of rupture* rata-rata sebesar 49.02 kg/cm<sup>2</sup> pada umur 28 hari, campuran ini dapat diaplikasikan untuk elemen struktural yang membutuhkan kemampuan lentur tinggi. Keberlanjutan material melalui pemanfaatan RCA tidak hanya memberikan manfaat ekologis, tetapi juga menghasilkan performa mekanik beton yang kompetitif.

Sementara itu untuk rekapitulasi hasil pengujian kuat lentur beton dengan RCA 50% dapat dilihat pada tabel berikut:

**Tabel 4.34 Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton 50% RCA**

| REKAPITULASI PENGUJIAN KUAT LENTUR BETON 50% RCA |                   |                 |            |                                            |             |                     |                      |                       |                                                                |            |
|--------------------------------------------------|-------------------|-----------------|------------|--------------------------------------------|-------------|---------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------|------------|
| KODE BENDA UJI                                   | TANGGAL PEMBUATAN | TANGGAL TESTING | MUTU BETON | PANJANG BENTANG ANTARA 2 TUMPUNAN (L) (CM) | UMUR (HARI) | GAYA TEKAN (P) (KG) | LEBAR BALOK (B) (CM) | TINGGI BALOK (B) (CM) | MODULUS OF RUPTURE (PL/bh <sup>2</sup> ) (kg/cm <sup>2</sup> ) | PERSENTASE |
| TRIAL MIX 50% RCA                                | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                         | 3           | 2530                | 15                   | 15                    | 33.73                                                          | 75%        |
|                                                  | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                         | 3           | 2600                | 15                   | 15                    | 34.67                                                          | 77%        |
|                                                  | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                         | 3           | 2450                | 15                   | 15                    | 32.67                                                          | 73%        |
|                                                  | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                         | 7           | 2730                | 15                   | 15                    | 36.40                                                          | 81%        |
|                                                  | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                         | 7           | 2800                | 15                   | 15                    | 37.33                                                          | 83%        |
|                                                  | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                         | 7           | 2650                | 15                   | 15                    | 35.33                                                          | 79%        |
|                                                  | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                         | 28          | 3430                | 15                   | 15                    | 45.73                                                          | 102%       |
|                                                  | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                         | 28          | 3500                | 15                   | 15                    | 46.67                                                          | 104%       |
|                                                  | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                         | 28          | 3350                | 15                   | 15                    | 44.67                                                          | 99%        |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

Pengujian kuat lentur beton dengan campuran RCA 50% dilakukan untuk mengevaluasi performa mekanik beton pada umur 3, 7, dan 28 hari. Benda uji berupa balok berukuran 15 cm x 30 cm x 60 cm dengan panjang bentang antar tumpuan sebesar 45 cm. Hasil pengujian menghasilkan nilai *modulus of rupture* (PL/bh<sup>2</sup>) yang mencerminkan kekuatan lentur beton sebagai berikut:

1. Pada Umur 3 Hari:

- *Modulus of rupture* berkisar antara 32.67 hingga 34.67 kg/cm<sup>2</sup>, dengan rata-rata 33.69 kg/cm<sup>2</sup>, setara dengan 73% hingga 77% dari target mutu FS 45. Nilai ini menunjukkan bahwa beton mulai mengembangkan kekuatan lentur meskipun proses hidrasi belum optimal.

2. Pada Umur 7 Hari:

- *Modulus of rupture* meningkat signifikan ke kisaran 35.33 hingga 37.33 kg/cm<sup>2</sup>, dengan rata-rata 36.36 kg/cm<sup>2</sup>, setara dengan 79% hingga 83% dari target mutu FS 45. Peningkatan ini menunjukkan perkembangan kekuatan lentur beton seiring berjalannya proses pengerasan.

3. Pada Umur 28 Hari:

- *Modulus of rupture* mencapai kisaran 44.67 hingga 46.67 kg/cm<sup>2</sup>, dengan rata-rata 45.69 kg/cm<sup>2</sup>, setara dengan 99% hingga 104% dari target mutu FS 45. Hasil ini menunjukkan bahwa campuran beton dengan RCA 50% mampu mencapai dan melampaui target kekuatan lentur pada umur 28 hari, mencerminkan kekuatan mekanik yang baik.

Hasil rekapitulasi menunjukkan bahwa beton dengan RCA 50% memiliki performa lentur yang cukup baik pada berbagai umur. Pada umur 28 hari, campuran ini mampu mencapai *modulus of rupture* rata-rata 45.69 kg/cm<sup>2</sup>, setara dengan 102% dari target mutu FS 45. Hal ini menunjukkan bahwa beton dengan RCA 50% dapat digunakan untuk elemen struktural dengan kebutuhan lentur yang signifikan. Namun, performanya sedikit di bawah campuran dengan RCA 40%, yang menunjukkan pengaruh persentase RCA terhadap kekuatan lentur beton. Campuran ini tetap memberikan alternatif material berkelanjutan yang kompetitif.

Rekapitulasi hasil pengujian kuat lentur beton dengan RCA 60% dapat dilihat pada tabel berikut:

**Tabel 4.35 Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton 60% RCA**

| REKAPITULASI PENGUJIAN KUAT LENTUR BETON 60% RCA |                   |                 |            |                                            |             |                     |                      |                       |                                                                |            |
|--------------------------------------------------|-------------------|-----------------|------------|--------------------------------------------|-------------|---------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------|------------|
| KODE BENDA UJI                                   | TANGGAL PEMBUATAN | TANGGAL TESTING | MUTU BETON | PANJANG BENTANG ANTARA 2 TUMPUNAN (L) (CM) | UMUR (HARI) | GAYA TEKAN (P) (KG) | LEBAR BALOK (B) (CM) | TINGGI BALOK (B) (CM) | MODULUS OF RUPTURE (PL/bh <sup>2</sup> ) (kg/cm <sup>2</sup> ) | PERSENTASE |
| TRIAL MIX 60% RCA                                | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                         | 3           | 2280                | 15                   | 15                    | 30.40                                                          | 68%        |
|                                                  | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                         | 3           | 2350                | 15                   | 15                    | 31.33                                                          | 70%        |
|                                                  | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                         | 3           | 2200                | 15                   | 15                    | 29.33                                                          | 65%        |
|                                                  | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                         | 7           | 2480                | 15                   | 15                    | 33.07                                                          | 73%        |
|                                                  | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                         | 7           | 2550                | 15                   | 15                    | 34.00                                                          | 76%        |
|                                                  | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                         | 7           | 2400                | 15                   | 15                    | 32.00                                                          | 71%        |
|                                                  | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                         | 28          | 3380                | 15                   | 15                    | 45.07                                                          | 100%       |
|                                                  | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                         | 28          | 3450                | 15                   | 15                    | 46.00                                                          | 102%       |
|                                                  | 20-Nov-24         | 23-Nov-24       | FS 45      | 45                                         | 28          | 3300                | 15                   | 15                    | 44.00                                                          | 98%        |

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2024

Pengujian kuat lentur beton dengan campuran RCA 60% dilakukan pada umur 3, 7, dan 28 hari untuk mengetahui kekuatan mekaniknya. Benda uji berupa balok berukuran 15 cm x 30 cm x 60 cm, dengan panjang bentang antar tumpuan sebesar 45 cm. Berikut hasil analisis *modulus of rupture* (PL/bh<sup>2</sup>) berdasarkan gaya tekan yang diterapkan:

1. Pada Umur 3 Hari:

- *Modulus of rupture* berada dalam kisaran 29.33 hingga 31.33 kg/cm<sup>2</sup>, dengan rata-rata 30.35 kg/cm<sup>2</sup>, setara dengan 65% hingga 70% dari target mutu FS 45. Nilai ini menunjukkan bahwa beton dengan campuran RCA 60% mulai menunjukkan kekuatan lentur dasar meskipun proses hidrasi masih berlangsung.

2. Pada Umur 7 Hari:

- *Modulus of rupture* meningkat menjadi kisaran 32.00 hingga 34.00 kg/cm<sup>2</sup>, dengan rata-rata 33.02 kg/cm<sup>2</sup>, setara dengan 71% hingga 76% dari target mutu FS 45. Peningkatan kekuatan lentur ini menunjukkan perkembangan signifikan selama proses pengerasan.

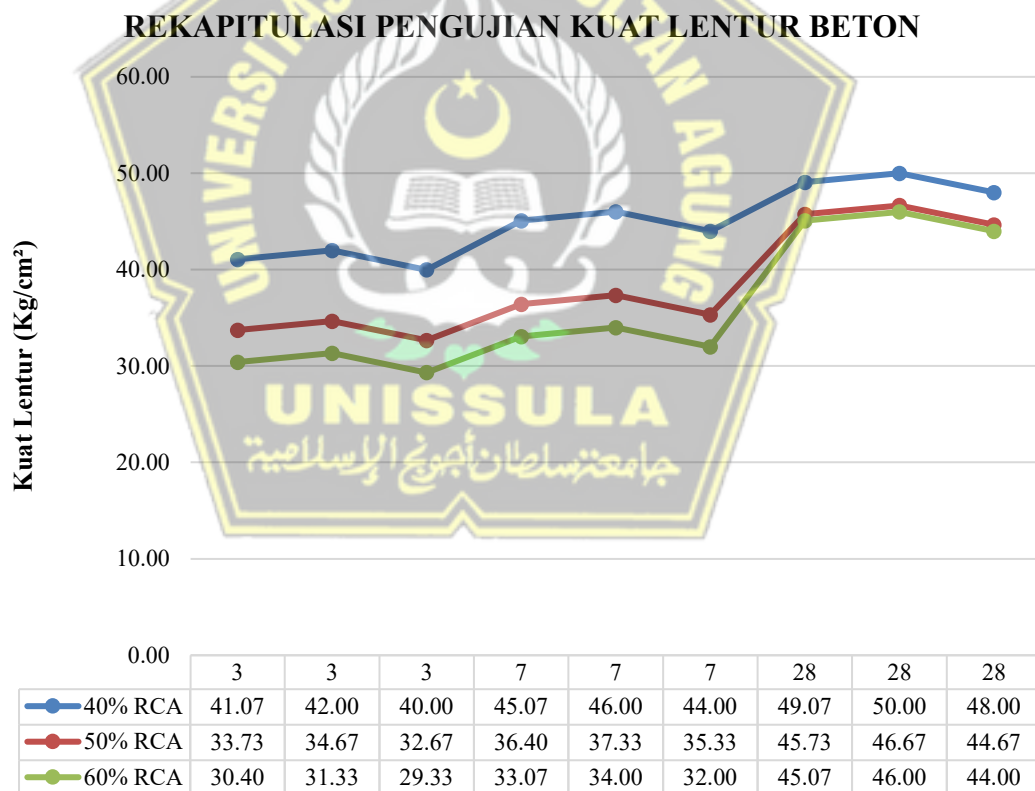
3. Pada Umur 28 Hari:

- *Modulus of rupture* mencapai kisaran 44.00 hingga 46.00 kg/cm<sup>2</sup>, dengan rata-rata 45.02 kg/cm<sup>2</sup>, setara dengan 98% hingga 102% dari target mutu

FS 45. Hasil ini menunjukkan bahwa beton dengan RCA 60% berhasil mencapai dan melampaui target kekuatan lentur pada umur 28 hari.

Hasil rekapitulasi menunjukkan bahwa beton dengan RCA 60% memiliki performa yang baik dalam hal kuat lentur, meskipun cenderung sedikit lebih rendah dibandingkan campuran RCA 40% dan RCA 50%. *Modulus of rupture* rata-rata pada umur 28 hari mencapai 45.02 kg/cm<sup>2</sup>, setara dengan 100% dari target mutu FS 45, yang mengindikasikan bahwa beton dengan RCA 60% tetap dapat digunakan untuk elemen struktural, meskipun diperlukan perhatian pada pengurangan kekuatan awal. Campuran ini memberikan solusi yang lebih berkelanjutan dengan memanfaatkan material daur ulang secara maksimal.

Secara keseluruhan, perbandingan kuat lentur beton berbagai variasi campuran RCA 40%, 50%, dan 60% dapat dilihat pada grafik di bawah ini:



Sumber: Hasil Analisis, 2025.

**Gambar 4.26 Grafik Perbandingan Pengujian Kuat Lentur Beton RCA 40%, 50%, dan 60%**

#### 4.6.3 Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton RCA 40%, 50%, dan 60%

Pengujian kuat tarik belah beton dilakukan untuk mengevaluasi daya tahan beton terhadap beban tarik yang dapat menyebabkan retak pada material ada 2 cara uji Tarik beton langsung (tidak dilakukan) dan uji Tarik belah. Berikut adalah rekapitulasi hasil pengujian kuat tarik belah beton dengan campuran RCA pada persentase 40%, 50%, dan 60%, pada umur 28 hari:

**Tabel 4.36 Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton RCA 40%, 50%, dan 60%**

| Persentase RCA | Kuat Tarik Belah (N/mm <sup>2</sup> ) | Keterangan                                                                                                                                                 |
|----------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 40%            | 3,537<br>3,537                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kekuatan optimal, memenuhi standar beton struktural</li> <li>• Kekuatan yang konsisten dan sangat baik</li> </ul> |
| 50%            | 2,829<br>2,546                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Penurunan kinerja dibandingkan 40% RCA</li> <li>• Pengurangan kekuatan yang signifikan</li> </ul>                 |
| 60%            | 2,122<br>2,406                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Penurunan signifikan, lebih cocok untuk aplikasi non-struktural</li> </ul>                                        |

Sumber: Hasil Analisis, 2025.

Beton dengan campuran 40% RCA menunjukkan kekuatan tarik belah yang paling optimal, menjadikannya pilihan terbaik untuk aplikasi yang memerlukan kekuatan tarik tinggi. Sementara itu, campuran dengan persentase RCA lebih tinggi (50% dan 60%) mengalami penurunan yang signifikan, sehingga lebih cocok digunakan pada aplikasi non-struktural atau elemen dengan beban ringan. Bila dikaitkan dengan kuat tekan beton ada rasio sebesar kurang lebih 12 – 15 %

#### 4.6.4 Rekapitulasi Hasil Pengujian SEM-EDX RCA Gedung dan Rigid

Pengujian struktur mikro menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscopy*) dan EDX (*Energy Dispersive X-ray*) bertujuan untuk menganalisis komposisi material dan distribusi partikel dalam RCA.

Hasil pengujian menunjukkan perbedaan signifikan antara RCA gedung dan RCA rigid, terutama terkait dengan densitas, porositas, dan kandungan kimia material. Berikut adalah rekapitulasi hasil pengujian SEM-EDX untuk kedua jenis RCA

**Tabel 4.37 Rekapitulasi Hasil Pengujian SEM-EDX RCA Gedung dan *Rigid***

| Jenis RCA        | Ciri-Ciri Mikro Struktur                                        | Keterangan                                                                      |
|------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| RCA Gedung       | Struktur berpori, banyak retakan mikro, kandungan karbon tinggi | Menunjukkan potensi pengurangan kualitas beton jika tidak diproses lebih lanjut |
| RCA <i>Rigid</i> | Struktur lebih padat, sedikit rongga, kandungan material stabil | Menunjukkan potensi penguatan beton, cocok untuk aplikasi struktural            |

Sumber: Hasil Analisis, 2025.

Berdasarkan hasil pengujian SEM-EDX, dapat disimpulkan bahwa terdapat perbedaan signifikan antara RCA yang berasal dari gedung dan dari *rigid pavement*. RCA dari *rigid pavement* menunjukkan mikro struktur yang lebih padat, minim rongga, dan memiliki komposisi kimia yang stabil, sehingga berpotensi meningkatkan kinerja mekanik beton dan layak digunakan untuk aplikasi struktural.

Sebaliknya, RCA dari gedung cenderung memiliki struktur berpori, retakan mikro yang lebih banyak, serta kandungan karbon yang tinggi, yang berisiko menurunkan mutu beton jika digunakan tanpa perlakuan tambahan.

Temuan ini menegaskan bahwa pemilihan sumber RCA sangat berpengaruh terhadap kualitas akhir beton, serta menunjukkan keunggulan RCA *rigid* dalam mendukung performa beton daur ulang yang berkelanjutan.

## **BAB V**

### **PEMBAHASAN DAN HASIL PENELITIAN**

#### **5.1 Perbandingan Kinerja Beton RCA dan Beton Konvensional**

Pengujian RCA Gedung dan RCA *Rigid* dilakukan menggunakan metode SEM dan EDX untuk mengevaluasi struktur mikro dan komposisi kimia masing-masing material. Berikut adalah perbandingan lengkap antara kedua jenis RCA berdasarkan hasil pengujian:

##### **1. Struktur Mikro Berdasarkan SEM**

###### **a. RCA Gedung (Sampel 1 dan Sampel 2):**

- Struktur mikro RCA gedung menunjukkan banyaknya rongga (*void*) besar dan retak mikro yang tersebar, yang mengindikasikan tingkat porositas tinggi.
- Pada pembesaran tinggi, retak mikro tampak jelas dengan permukaan agregat yang kasar dan tidak homogen. Hal ini menurunkan kemampuan RCA gedung untuk membentuk ikatan yang baik dengan pasta semen baru.
- RCA gedung cenderung memiliki sisa pasta semen yang belum terlepas sepenuhnya, mengakibatkan distribusi material yang tidak merata.

###### **b. RCA *Rigid* (Sampel 1 dan Sampel 2):**

- Struktur mikro RCA *rigid* jauh lebih padat, dengan rongga kecil yang terdistribusi secara merata. Retak mikro sangat minim bahkan pada pembesaran tinggi.
- Permukaan agregat lebih halus dan homogen, yang mencerminkan kualitas mikro struktural yang lebih baik.
- RCA *rigid* menunjukkan tingkat kompaksi yang tinggi akibat proses pemadatan intensif selama penggunaannya sebagai jalan *rigid pavement*.

RCA *rigid* memiliki struktur mikro yang jauh lebih unggul dibandingkan RCA gedung. Materialnya lebih padat, homogen, dan memiliki rongga serta retak mikro yang lebih sedikit.

## 2. Komposisi Kimia Berdasarkan EDX

### a. RCA Gedung:

- Komponen utama berupa  $\text{SiO}_2$  (36-39%) dan  $\text{CaO}$  (22-23%), menunjukkan keberadaan agregat alami dan sisa pasta semen.
- Kandungan karbon yang cukup tinggi (18-19% pada OXIDE dan 12-13% pada PURE) menunjukkan adanya material organik yang signifikan. Hal ini dapat mengurangi kualitas mekanik RCA gedung.
- Porositas tinggi didukung oleh kandungan oksigen yang mendominasi struktur kimia.

### b. RCA Rigid:

- Komponen utama juga berupa  $\text{SiO}_2$  (38-39%) dan  $\text{CaO}$  (17-19%), tetapi dengan kandungan karbon yang lebih rendah (10-12% pada PURE dan 14-17% pada OXIDE), menunjukkan material lebih stabil.
- Tingginya dominasi  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{CaO}$  menunjukkan RCA *rigid* memiliki komposisi kimia yang mendukung kualitas mekanik dan stabilitas struktural.
- Kandungan logam seperti  $\text{FeO}$  dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  juga lebih tinggi, yang memperkuat material secara mekanik.

RCA *rigid* memiliki komposisi kimia yang lebih stabil dibandingkan RCA gedung, dengan kandungan karbon lebih rendah dan dominasi senyawa yang mendukung kekuatan material.

## 3. Kinerja dan Aplikasi

### a. RCA Gedung:

- Kualitas mikro struktural yang lebih rendah akibat banyaknya rongga dan retak mikro.
- Kandungan karbon dan porositas tinggi membatasi penggunaannya dalam aplikasi struktural.
- Lebih cocok digunakan untuk aplikasi non-struktural atau sebagai bahan dasar pada konstruksi ringan setelah pengolahan tambahan (seperti pencucian atau pengisian rongga).

b. RCA *Rigid*:

- Kualitas mikro struktural unggul dengan padatan tinggi dan retak mikro minimal.
- Komposisi kimia yang stabil, dengan karbon rendah dan dominasi senyawa pendukung kekuatan mekanik.
- Sangat cocok untuk digunakan langsung dalam aplikasi struktural, seperti beton mutu tinggi dan elemen konstruksi yang memerlukan daya tahan tinggi.

RCA *rigid* secara keseluruhan memiliki kualitas yang lebih baik dibandingkan RCA gedung, baik dari segi struktur mikro maupun komposisi kimia. RCA gedung cenderung lebih berpori, dengan banyak retak mikro yang signifikan, serta kandungan karbon yang tinggi, yang membatasi kualitas mekaniknya dan menjadikannya kurang ideal untuk aplikasi struktural.

Material ini lebih cocok digunakan untuk aplikasi ringan setelah melalui pengolahan tambahan, seperti pencucian dan pengisian rongga. Sebaliknya, RCA *rigid* memiliki struktur mikro yang padat, homogen, dan stabil secara kimia, sehingga sangat ideal untuk aplikasi struktural yang membutuhkan kekuatan mekanik tinggi.

Perbandingan ini menunjukkan bahwa RCA *rigid* adalah material yang lebih unggul untuk konstruksi struktural, sementara RCA gedung memerlukan pengolahan lebih lanjut untuk meningkatkan kualitasnya. Jika diperlukan, rekomendasi teknis yang lebih detail dapat diberikan untuk masing-masing jenis RCA sesuai dengan kebutuhan aplikasi.

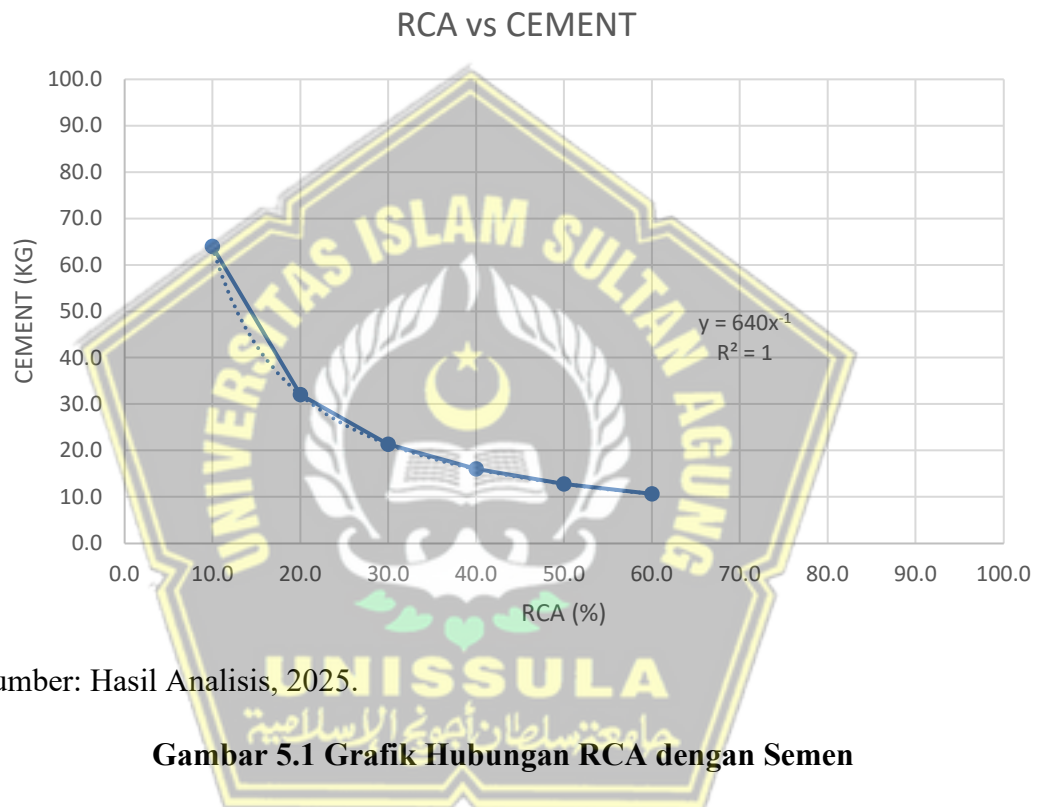
## 5.2 Pengaruh Proporsi RCA terhadap Kuat Tekan, Lentur, dan Tarik

Penggunaan Proporsi *jobmix formula Recycled Concrete Aggregate* (RCA) dalam campuran beton memiliki pengaruh antara RCA dan sifat mekanik beton yang dapat direpresentasikan dalam rumus regresi non-linear berbentuk  $y = ax + b$  dengan hasil analisis sebagai berikut.

**Tabel 5.1 Hubungan RCA dengan Semen**

| JMF | RCA (%) |      | CEMENT (KG) |      |
|-----|---------|------|-------------|------|
|     | 10.0    | 20.0 | 64.0        | 32.0 |
|     | 20.0    | 30.0 | 32.0        | 21.3 |
|     | 30.0    | 40.0 | 21.3        | 16.0 |
|     | 40.0    | 50.0 | 16.0        | 14.4 |
|     | 50.0    | 60.0 | 14.4        | 12.8 |
|     | 60.0    |      | 12.8        |      |

Sumber: Hasil Analisis, 2025.

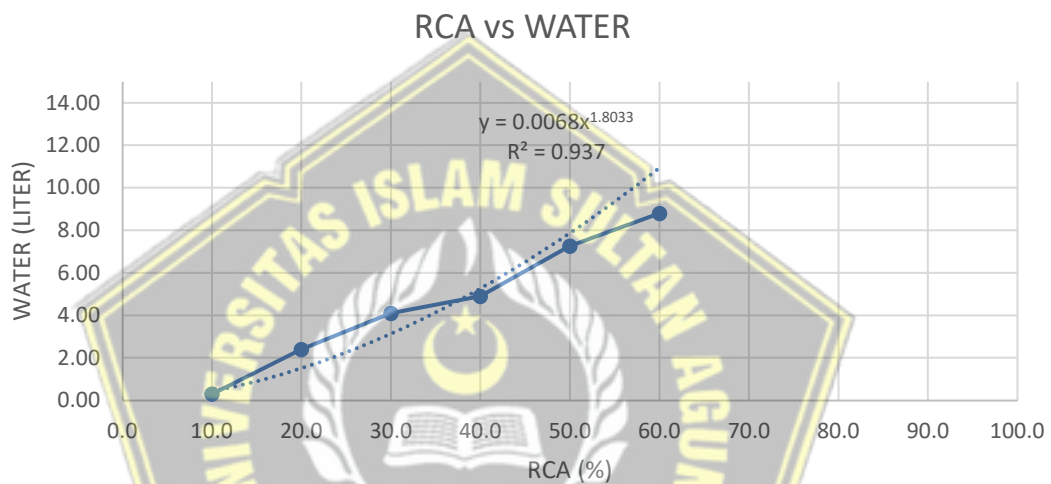


Hasil analisis regresi linear dapat dilihat bahwa nilai positif pada koefisien regresi. Korelasi hubungan antara RCA dengan semen menunjukkan bahwa proporsi semen untuk campuran RCA bisa ditentukan dengan persamaan  $y = 640x^{-1}$ . Grafik ini menunjukkan bahwa jumlah semen berkurang secara cepat seiring dengan peningkatan persentase RCA. Nilai  $R^2 = 1$  menandakan bahwa hubungan antara RCA dan jumlah semen sangat kuat dan akurat, menunjukkan bahwa persamaan tersebut sangat cocok untuk data yang ada.

**Tabel 5.2 Hubungan RCA dengan Air**

| JMF | RCA (%) |      | WATER (LITER) |      |
|-----|---------|------|---------------|------|
|     | 10.0    | 20.0 | 0.30          | 2.40 |
|     | 20.0    | 30.0 | 2.40          | 4.10 |
|     | 30.0    | 40.0 | 4.10          | 4.90 |
|     | 40.0    | 50.0 | 4.90          | 7.26 |
|     | 50.0    | 60.0 | 7.26          | 8.80 |
|     | 60.0    |      | 8.80          |      |

Sumber: Hasil Analisis, 2025.



Sumber: Hasil Analisis, 2025.

**Gambar 5.2 Grafik Hubungan RCA dengan Air**

Dari grafik ini, terlihat bahwa ada korelasi positif antara persentase RCA dan jumlah air yang dibutuhkan. Seiring dengan meningkatnya persentase RCA, jumlah air yang dibutuhkan juga meningkat.

Persamaan matematis yang tertera pada grafik adalah  $y = 0.0068x^{1.8033}$ , yang menunjukkan bahwa hubungan antara RCA dan air mengikuti pola fungsi eksponensial. Hal ini berarti bahwa dengan peningkatan persentase RCA, jumlah air yang dibutuhkan akan meningkat dengan lebih cepat. Nilai  $R^2 = 0.9595$  menunjukkan bahwa hubungan antara RCA dan jumlah air sangat kuat dan hampir sempurna, dengan ketepatan model yang tinggi.

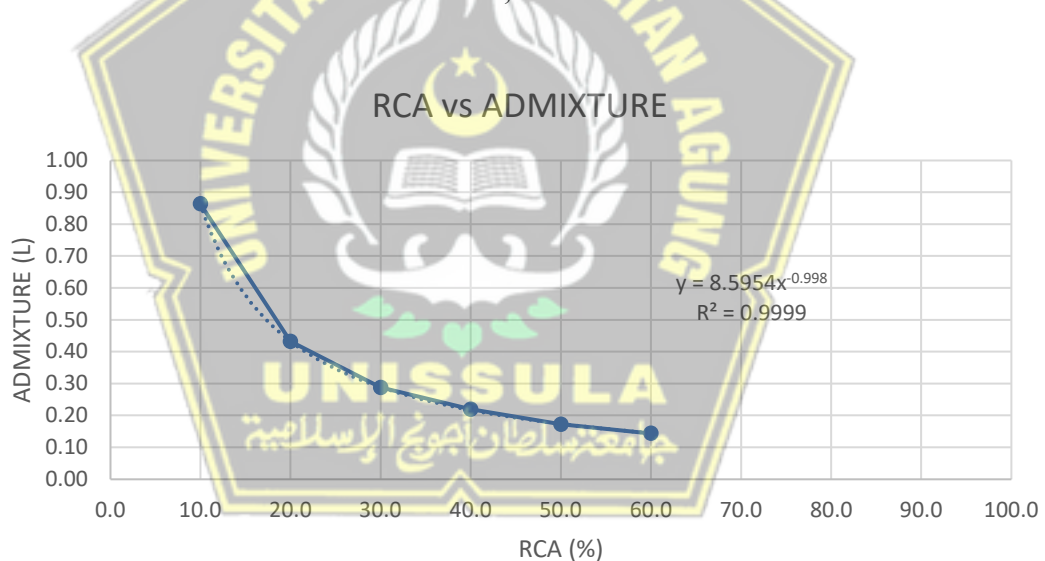
Kesimpulannya, grafik ini menunjukkan bahwa semakin tinggi proporsi RCA dalam campuran beton, semakin banyak air yang diperlukan. Ini bisa disebabkan

oleh perbedaan sifat antara agregat alami dan RCA, di mana RCA mungkin lebih menyerap air atau memiliki kapasitas yang lebih rendah dalam mempertahankan kelembapan dibandingkan dengan agregat alami. Pemahaman ini penting dalam perencanaan campuran beton, karena peningkatan kadar air dapat mempengaruhi sifat beton seperti kekuatan dan daya tahan.

**Tabel 5.3 Hubungan RCA dengan *Admixture***

|     | RCA (%) |      | ADMIXTURE (L) |      |
|-----|---------|------|---------------|------|
|     | 10.0    | 20.0 | 0.86          | 0.43 |
| JMF | 20.0    | 30.0 | 0.43          | 0.29 |
|     | 30.0    | 40.0 | 0.29          | 0.22 |
|     | 40.0    | 50.0 | 0.22          | 0.17 |
|     | 50.0    | 60.0 | 0.17          | 0.14 |
|     | 60.0    |      | 0.14          |      |

Sumber: Hasil Analisis, 2025.



Sumber: Hasil Analisis, 2025.

**Gambar 5.3 Grafik Hubungan RCA dengan *Admixture***

Persamaan matematis yang tertera pada grafik adalah  $y = 8.5954x^{-0.998}$ , yang menunjukkan bahwa hubungan antara RCA dan *admixture* mengikuti pola fungsi *invers*. Ini berarti bahwa dengan peningkatan persentase RCA, jumlah *admixture* yang diperlukan berkurang dengan cepat. Nilai  $R^2 = 1$  menunjukkan bahwa

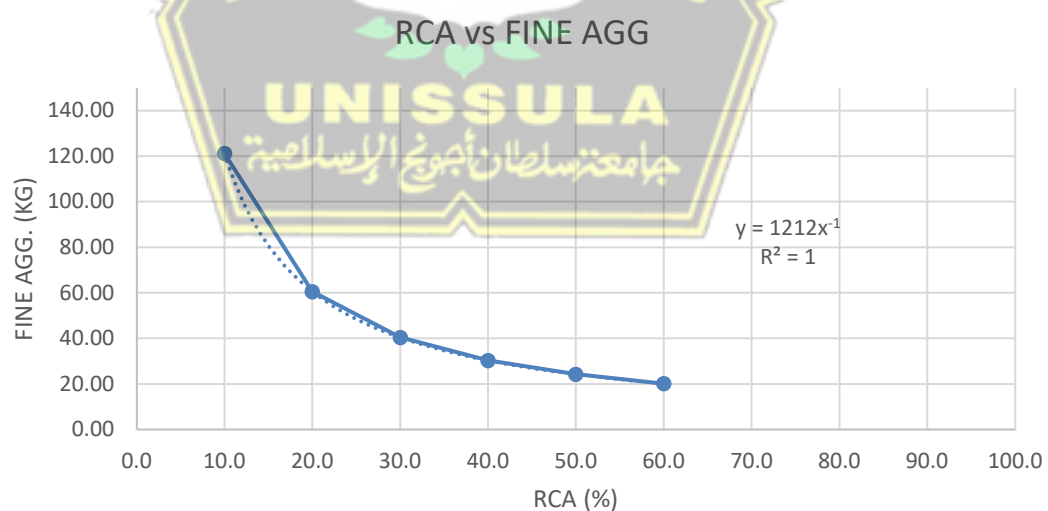
hubungan antara RCA dan *admixture* sangat kuat, dengan model yang sangat akurat.

Grafik ini menunjukkan bahwa penggunaan RCA dalam campuran beton dapat mengurangi kebutuhan akan *admixture*. Hal ini mungkin disebabkan oleh karakteristik RCA yang berbeda dengan agregat alami, yang mempengaruhi interaksi dengan bahan kimia tambahan dalam campuran beton. Pemahaman ini penting untuk perencanaan campuran beton, karena pengurangan *admixture* dapat mengarah pada penghematan biaya dan meningkatkan keberlanjutan proses produksi beton.

**Tabel 5.4 Hubungan RCA dengan *Fine Agg***

|     | RCA (%) |      | FINE AGG. (KG) |       |
|-----|---------|------|----------------|-------|
|     | 10.0    | 20.0 | 121.20         | 60.60 |
| JMF | 20.0    | 30.0 | 60.60          | 40.40 |
|     | 30.0    | 40.0 | 40.40          | 30.30 |
|     | 40.0    | 50.0 | 30.30          | 24.24 |
|     | 50.0    | 60.0 | 24.24          | 20.20 |
|     | 60.0    |      | 20.20          |       |

Sumber: Hasil Analisis, 2025.



Sumber: Hasil Analisis, 2025.

**Gambar 5.4 Grafik Hubungan RCA dengan *Fine Agg***

Dari grafik dapat dilihat bahwa ada korelasi negatif antara persentase RCA dan jumlah agregat halus yang diperlukan. Semakin tinggi persentase RCA, semakin sedikit agregat halus yang dibutuhkan.

Persamaan matematis yang tertera pada grafik adalah  $y = 1212x^{-1}$ , yang menunjukkan bahwa hubungan antara RCA dan agregat halus mengikuti pola fungsi *invers*. Artinya, dengan meningkatnya persentase RCA dalam campuran beton, jumlah agregat halus yang dibutuhkan akan berkurang dengan cepat. Nilai  $R^2 = 1$  menunjukkan bahwa hubungan ini sangat kuat, dengan model yang sangat akurat.

Kesimpulannya, grafik ini menunjukkan bahwa dengan menggunakan RCA dalam campuran beton, kebutuhan akan agregat halus dapat diminimalkan. Hal ini menunjukkan efisiensi penggunaan RCA dalam menggantikan sebagian bahan alami, yang berpotensi mengurangi biaya dan dampak lingkungan, khususnya dalam mengurangi pemakaian sumber daya alam untuk agregat halus.

#### **5.2.1 Pengaruh Proporsi RCA terhadap Kuat Tekan**

Penggunaan *Recycled Concrete Aggregate* (RCA) dalam campuran beton memiliki pengaruh signifikan terhadap perkembangan kuat tekan beton pada berbagai umur. Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, peningkatan proporsi RCA dari 40% hingga 60% menunjukkan tren penurunan kuat tekan seiring dengan bertambahnya jumlah agregat daur ulang dalam campuran.

Pada umur 3 hari, beton dengan RCA 40% mencapai kuat tekan sebesar 38.50 MPa – 41.90 MPa atau sekitar 86% – 93% dari target mutu desain FS 45. Beton dengan RCA 50% mengalami penurunan pencapaian, dengan kuat tekan sebesar 23.78 MPa – 28.31 MPa atau 53% – 63% dari target desain. Beton dengan RCA 60% menunjukkan hasil terendah, dengan kuat tekan hanya mencapai 18.68 MPa – 23.21 MPa atau 42% – 52% dari target desain.

Pada umur 7 hari, beton dengan RCA 40% mencapai 96% – 99% dari target desain, sedangkan beton dengan RCA 50% dan 60% hanya mencapai 57% – 69% dan 50% – 63%, masing-masing.

Pada umur 28 hari, beton dengan RCA 40% menunjukkan performa optimal dengan kuat tekan yang melampaui target desain (101% – 113%). Beton dengan

RCA 50% hanya mencapai 75% – 94% dari target, sementara RCA 60% memiliki performa paling rendah dengan kuat tekan berkisar antara 69% – 82%.

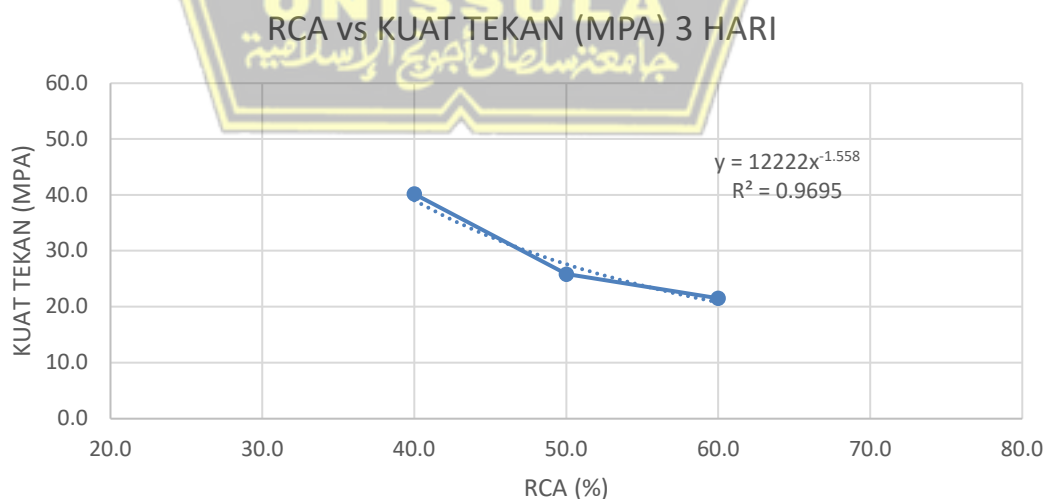
Penurunan kuat tekan dengan meningkatnya proporsi RCA disebabkan oleh karakteristik agregat daur ulang yang lebih berpori dibandingkan agregat alami, sehingga meningkatkan penyerapan air dan mengurangi efisiensi ikatan antar partikel semen dan agregat. Oleh karena itu, penggunaan RCA dalam proporsi tinggi perlu disertai dengan perlakuan awal seperti perendaman atau modifikasi campuran untuk meningkatkan performa beton.

Perhitungan Kuat tekan terhadap proporsi RCA berdasarkan pengujian 3,7,28 hari dapat diperoleh dari korelasi antara RCA (%) dengan Kuat Tekan (MPa). Berikut merupakan hubungan antara RCA dengan Kuat Tekan Beton sebagai berikut.

**Tabel 5.5 Hubungan RCA dengan Kuat Tekan Umur 3 Hari**

| KUAT TEKAN BETON 3 HARI |      |                  |      |
|-------------------------|------|------------------|------|
| RCA (%)                 |      | KUAT TEKAN (MPa) |      |
| 40.0                    | 50.0 | 40.2             | 25.9 |
| 50.0                    | 60.0 | 25.9             | 21.5 |
| 60.0                    |      | 21.5             |      |
|                         |      |                  |      |

Sumber: Hasil Analisis, 2025.



Sumber: Hasil Analisis, 2025.

**Gambar 5.5 Hubungan RCA dengan Kuat Tekan Umur 3 Hari**

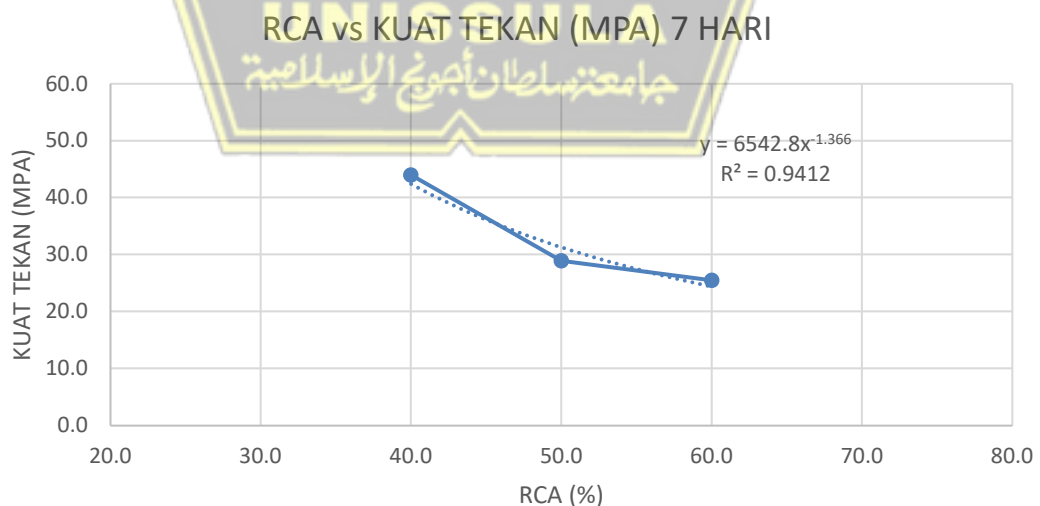
Persamaan matematis yang tertera pada grafik adalah  $y = 12222x^{-1.558}$ , yang menunjukkan hubungan fungsi *invers* antara persentase RCA dan kuat tekan beton. Artinya, semakin banyak RCA yang digunakan dalam campuran beton, semakin rendah kuat tekan beton yang tercapai. Nilai  $R^2 = 0.9764$  menunjukkan bahwa hubungan ini sangat kuat dan cukup akurat, meskipun tidak sempurna.

Dari grafik ini, dapat disimpulkan bahwa penggunaan RCA dengan persentase yang lebih tinggi dalam campuran beton dapat mengurangi kuat tekan beton pada umur 3 hari. Hal ini dapat disebabkan oleh sifat RCA kurang padat dibandingkan agregat alami, yang mempengaruhi ikatan antara agregat dan semen.

**Tabel 5.6 Hubungan RCA dengan Kuat Tekan Umur 7 Hari**

| KUAT TEKAN BETON 7 HARI |      |                  |      |
|-------------------------|------|------------------|------|
| RCA (%)                 |      | KUAT TEKAN (MPA) |      |
| 40.0                    | 50.0 | 44.0             | 28.9 |
| 50.0                    | 60.0 | 28.9             | 25.5 |
| 60.0                    |      | 25.5             |      |

Sumber: Hasil Analisis, 2025.



Sumber: Hasil Analisis, 2025.

**Gambar 5.6 Hubungan RCA dengan Kuat Tekan Umur 7 Hari**

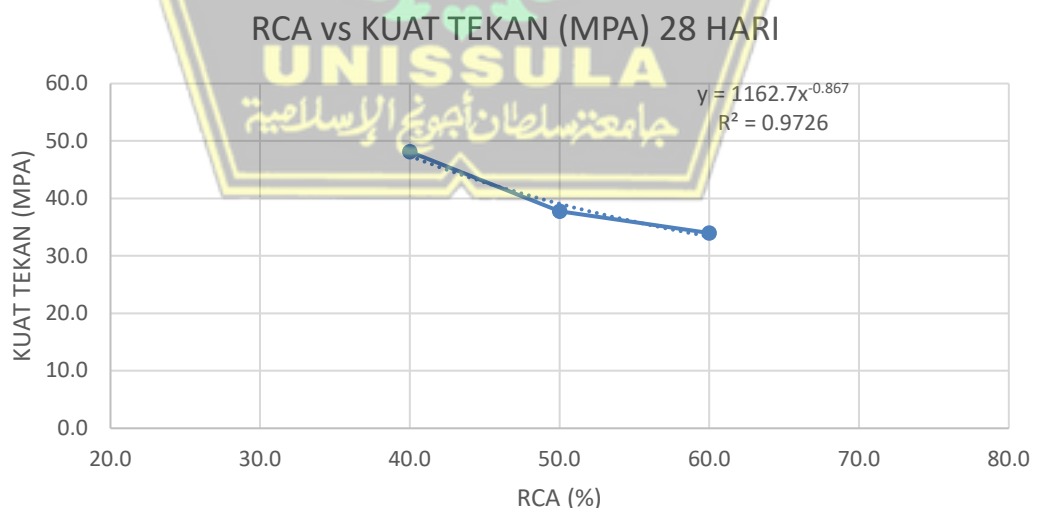
Grafik ini menunjukkan bahwa dengan meningkatnya persentase RCA dalam campuran beton, kuat tekan beton pada umur 7 hari cenderung menurun.

Persamaan matematis yang tertera pada grafik adalah  $y = 6542.8x^{-1.366}$ , yang menunjukkan hubungan fungsi *invers* antara persentase RCA dan kuat tekan beton. Dengan meningkatnya persentase RCA, kuat tekan beton berkurang secara signifikan. Nilai  $R^2 = 0.9545$  menunjukkan bahwa hubungan ini cukup kuat dan akurat, meskipun tidak sempurna. Dari grafik ini, dapat disimpulkan bahwa penggunaan RCA dengan persentase yang lebih tinggi dalam campuran beton mengurangi kuat tekan beton pada umur 7 hari.

**Tabel 5.7 Hubungan RCA dengan Kuat Tekan Umur 28 Hari**

| KUAT TEKAN BETON 28 HARI |      |                  |      |
|--------------------------|------|------------------|------|
| RCA (%)                  |      | KUAT TEKAN (MPA) |      |
| 40.0                     | 50.0 | 48.1             | 37.7 |
| 50.0                     | 60.0 | 37.7             | 34.0 |
| 60.0                     |      | 34.0             |      |
|                          |      |                  |      |

Sumber: Hasil Analisis, 2025.



Sumber: Hasil Analisis, 2025.

**Gambar 5.7 Hubungan RCA dengan Kuat Tekan Umur 28 Hari**

Seiring dengan meningkatnya persentase RCA dalam campuran beton, kuat tekan beton pada umur 28 hari mengalami penurunan. Persamaan matematis yang tertera pada grafik adalah  $y = 1162.7x^{-0.867}$ , yang menunjukkan hubungan fungsi *invers* antara persentase RCA dan kuat tekan beton. Dengan meningkatnya persentase RCA, kuat tekan beton menurun, namun penurunan tersebut tidak sebesar pada umur 3 atau 7 hari. Nilai  $R^2 = 0.976$  menunjukkan bahwa hubungan ini sangat kuat dan hampir sempurna, dengan model yang sangat akurat.

Dari grafik ini, dapat disimpulkan bahwa penggunaan RCA dalam campuran beton secara umum mengurangi kuat tekan beton, meskipun penurunan ini lebih terkontrol pada umur 28 hari jika dibandingkan dengan umur 3 dan 7 hari. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun RCA dapat mempengaruhi kuat tekan pada usia dini beton, pada umur yang lebih lama (28 hari), kekuatan beton dengan RCA tetap memenuhi standar yang dibutuhkan, meskipun sedikit lebih rendah dibandingkan dengan beton menggunakan agregat alami.

### 5.2.2 Pengaruh Proporsi RCA terhadap Kuat Lentur

Kuat lentur beton dengan RCA menunjukkan tren yang serupa dengan kuat tekan, di mana peningkatan proporsi RCA menyebabkan sedikit penurunan *modulus of rupture*. Pada umur 3 hari, beton dengan RCA 40% menunjukkan *modulus of rupture* sebesar  $40.00 \text{ kg/cm}^2 - 42.00 \text{ kg/cm}^2$  atau sekitar 89% – 93% dari target desain. Beton dengan RCA 50% mencapai  $32.67 \text{ kg/cm}^2 - 34.67 \text{ kg/cm}^2$  (73% – 77%), sedangkan beton dengan RCA 60% memiliki *modulus of rupture* terendah, berkisar antara  $28.50 \text{ kg/cm}^2 - 30.10 \text{ kg/cm}^2$ .

Pada umur 7 hari, beton dengan RCA 40% mencapai *modulus of rupture* sebesar  $44.00 \text{ kg/cm}^2 - 46.00 \text{ kg/cm}^2$  atau sekitar 98% – 102% dari target desain, sementara RCA 50% dan 60% masing-masing mencapai 79% – 83% dan 69% – 75% dari target desain.

Pada umur 28 hari, beton dengan RCA 40% memiliki *modulus of rupture* tertinggi, mencapai  $48.00 \text{ kg/cm}^2 - 50.00 \text{ kg/cm}^2$  atau 107% – 111% dari target desain. Beton dengan RCA 50% memiliki *modulus of rupture* antara 99% – 104% dari target, sedangkan RCA 60% hanya mencapai 82% – 94%.

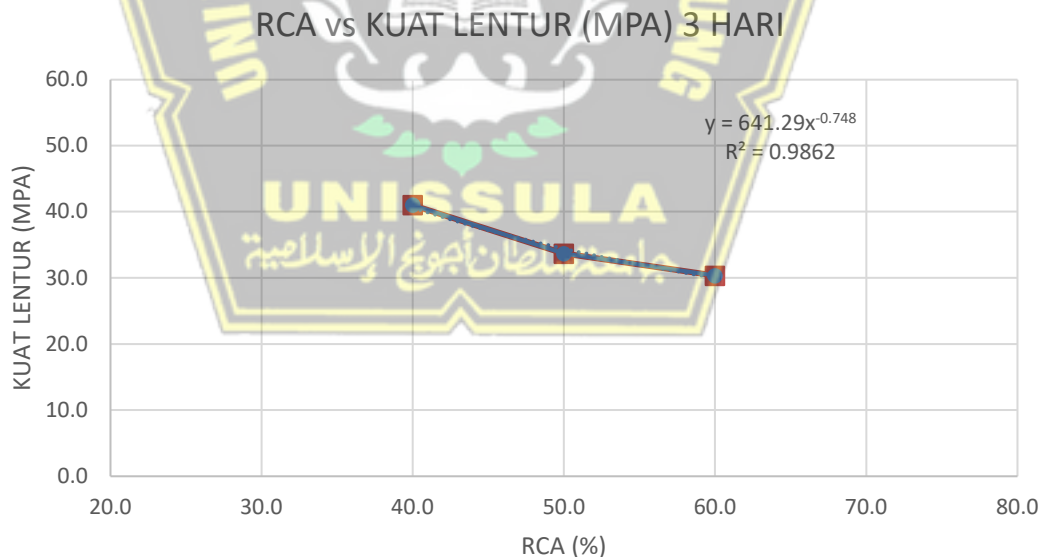
Meskipun kuat lentur mengalami penurunan dengan meningkatnya proporsi RCA, beton dengan RCA 40% tetap menunjukkan performa yang dapat diterima untuk aplikasi struktural. Untuk RCA 50% dan 60%, peningkatan *workability* dan ketahanan agregat dapat menjadi solusi untuk mempertahankan performa beton dalam kondisi penggunaan yang lebih berat.

Perhitungan Kuat lentur terhadap proporsi RCA berdasarkan pengujian 3,7,28 hari dapat diperoleh dari korelasi antara RCA (%) dengan Kuat lentur (MPa). Berikut merupakan hubungan antara RCA dengan Kuat lentur Beton sebagai berikut.

**Tabel 5.8 Hubungan RCA dengan Kuat Lentur Umur 3 Hari**

| KUAT LENTUR BETON 3 HARI |      |             |      |
|--------------------------|------|-------------|------|
| RCA (%)                  |      | KUAT LENTUR |      |
| 40.0                     | 50.0 | 41.0        | 33.7 |
| 50.0                     | 60.0 | 33.7        | 30.4 |
| 60.0                     |      | 30.4        |      |

Sumber: Hasil Analisis, 2025.



Sumber: Hasil Analisis, 2025.

**Gambar 5.8 Hubungan RCA dengan Kuat Lentur Umur 3 Hari**

Dari grafik ini, terlihat bahwa seiring dengan meningkatnya persentase RCA

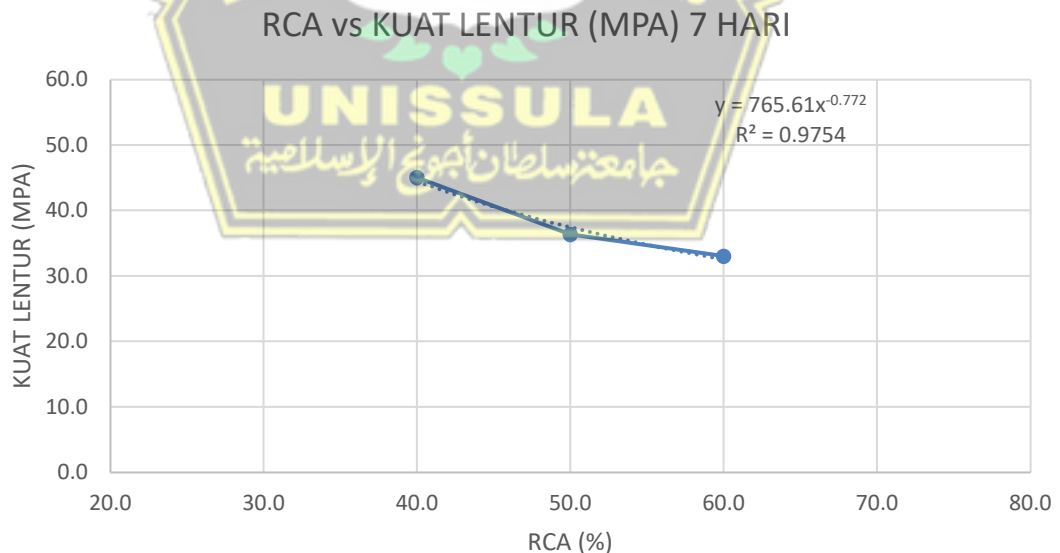
dalam campuran beton, kuat lentur beton pada umur 3 hari menurun. Persamaan matematis yang tertera pada grafik adalah  $y = 641.29x^{-0.748}$ , yang menunjukkan hubungan fungsi *invers* antara persentase RCA dan kuat lentur beton. Semakin tinggi persentase RCA, semakin rendah kuat lentur beton yang tercapai. Nilai  $R^2 = 0.9874$  menunjukkan bahwa hubungan ini sangat kuat dan akurat, dengan model yang hampir sempurna.

Grafik ini menunjukkan bahwa penggunaan RCA dalam campuran beton mengurangi kuat lentur beton pada umur 3 hari. Penurunan kuat lentur ini penting untuk diperhatikan dalam aplikasi beton yang membutuhkan ketahanan terhadap beban lentur pada usia dini.

**Tabel 5.9 Hubungan RCA dengan Kuat Lentur Umur 7 Hari**

| KUAT LENTUR BETON 7 HARI |      |             |      |
|--------------------------|------|-------------|------|
| RCA (%)                  |      | KUAT LENTUR |      |
| 40.0                     | 50.0 | 45.0        | 36.4 |
| 50.0                     | 60.0 | 36.4        | 33.0 |
| 60.0                     |      | 33.0        |      |
|                          |      |             |      |

Sumber: Hasil Analisis, 2025.



Sumber: Hasil Analisis, 2025.

**Gambar 5.9 Hubungan RCA dengan Kuat Lentur Umur 7 Hari**

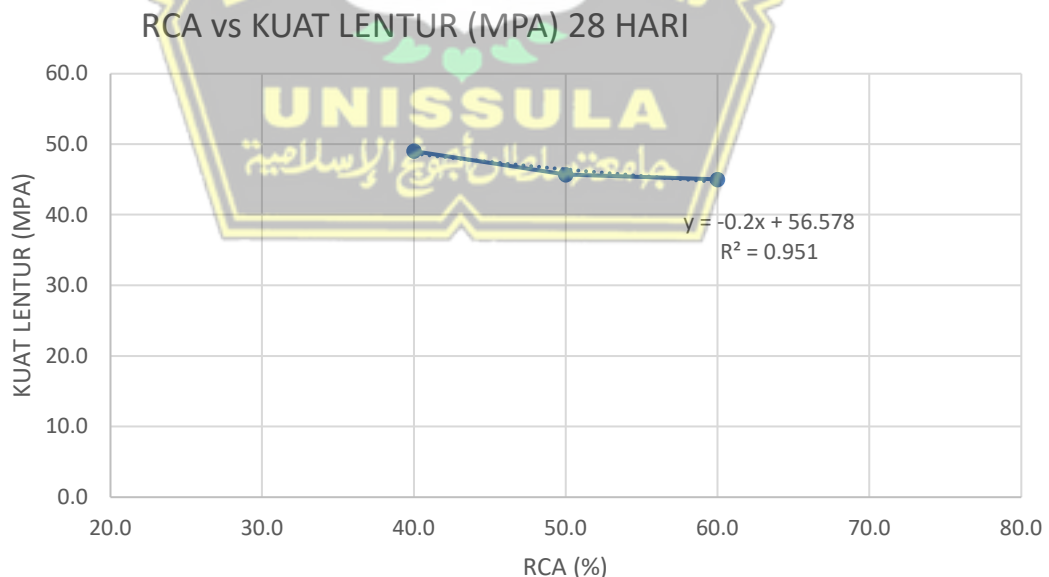
Grafik ini menunjukkan bahwa seiring dengan meningkatnya persentase RCA dalam campuran beton, kuat lentur beton pada umur 7 hari menurun. Persamaan matematis yang tertera pada grafik adalah  $y = 765.61x^{-0.772}$ , yang menunjukkan hubungan fungsi *invers* antara persentase RCA dan kuat lentur beton. Dengan meningkatnya persentase RCA, kuat lentur beton cenderung menurun, meskipun penurunan ini tidak sebesar pada umur 3 hari. Nilai  $R^2 = 0.978$  menunjukkan bahwa hubungan ini sangat kuat dan akurat, dengan model yang hampir sempurna.

Grafik ini menunjukkan bahwa penggunaan RCA dalam campuran beton mengurangi kuat lentur beton pada umur 7 hari, meskipun penurunan tersebut lebih terkendali dibandingkan pada umur 3 hari.

**Tabel 5.10 Hubungan RCA dengan Kuat Lentur Umur 28 Hari**

| KUAT LENTUR BETON 28 HARI |      |             |      |
|---------------------------|------|-------------|------|
| RCA (%)                   |      | KUAT LENTUR |      |
| 40.0                      | 50.0 | 49.0        | 45.7 |
| 50.0                      | 60.0 | 45.7        | 45.0 |
| 60.0                      |      | 45.0        |      |

Sumber: Hasil Analisis, 2025.



Sumber: Hasil Analisis, 2025.

**Gambar 5.10 Hubungan RCA dengan Kuat Lentur Umur 28 Hari**

Grafik ini menunjukkan bahwa meskipun ada penurunan kuat lentur seiring dengan meningkatnya persentase RCA, penurunannya sangat kecil pada umur 28 hari. Persamaan matematis yang tertera pada grafik adalah  $y = -0.2x + 56.578$ , yang menunjukkan hubungan linear antara persentase RCA dan kuat lentur beton. Dengan meningkatnya persentase RCA, kuat lentur beton menurun sedikit, namun penurunan ini relatif kecil dibandingkan dengan umur 3 dan 7 hari. Nilai  $R^2 = 0.951$  menunjukkan bahwa meskipun hubungan ini cukup kuat, ada sedikit variasi yang tidak dijelaskan sepenuhnya oleh model linear tersebut.

Kesimpulannya, grafik ini menunjukkan bahwa pada umur 28 hari, penggunaan RCA dalam campuran beton hanya sedikit mengurangi kuat lentur beton. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun RCA memiliki dampak pada kuat lentur pada usia dini beton, efeknya menjadi lebih terkendali pada umur beton yang lebih tua. Beton dengan RCA masih dapat memenuhi standar kekuatan lentur yang diperlukan untuk aplikasi struktural pada usia 28 hari.

### **5.2.3 Pengaruh Proporsi RCA terhadap Kuat Tarik Belah**

Pengujian kuat tarik belah beton dengan RCA menunjukkan pola yang mirip dengan kuat tekan dan lentur. Pada umur 3 hari, beton dengan RCA 40% memiliki kuat tarik belah sebesar 3.20 MPa – 3.40 MPa, sementara RCA 50% mencapai 2.80 MPa – 3.00 MPa, dan RCA 60% hanya mencapai 2.40 MPa – 2.60 MPa.

Pada umur 7 hari, beton dengan RCA 40% menunjukkan peningkatan kuat tarik belah hingga 3.80 MPa – 4.00 MPa, RCA 50% mencapai 3.20 MPa – 3.40 MPa, dan RCA 60% hanya mencapai 2.80 MPa – 3.00 MPa.

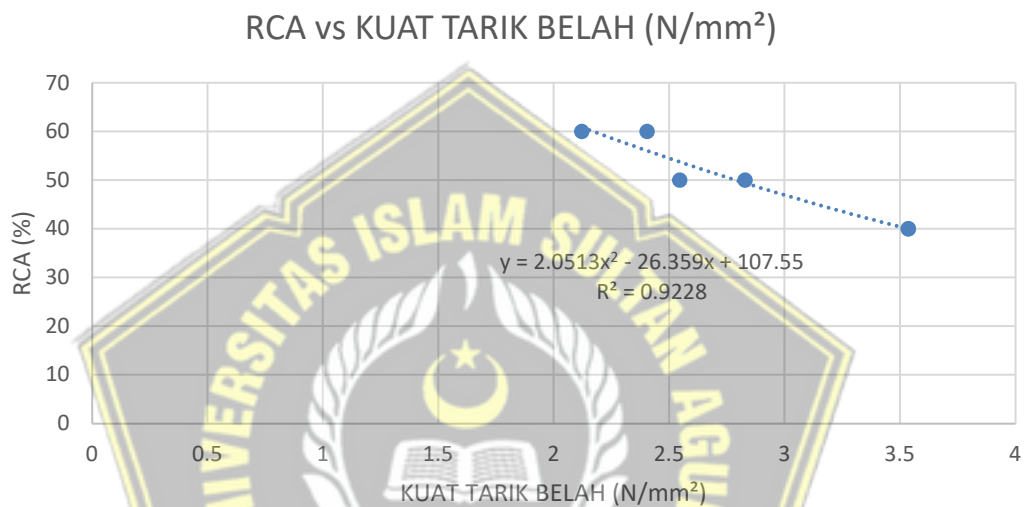
Pada umur 28 hari, beton dengan RCA 40% mencapai kuat tarik belah sebesar 4.50 MPa – 4.80 MPa, RCA 50% mencapai 3.80 MPa – 4.20 MPa, dan RCA 60% berkisar antara 3.40 MPa – 3.80 MPa.

Penurunan kuat tarik belah ini dapat dikaitkan dengan meningkatnya kandungan porositas dalam agregat RCA, yang mengurangi kemampuan beton untuk menahan tegangan tarik secara efektif. Beton dengan RCA 40% masih memiliki performa tarik yang cukup baik untuk aplikasi struktural, sedangkan RCA 50% dan 60% lebih cocok untuk penggunaan yang tidak membutuhkan kekuatan tarik tinggi.

**Tabel 5.11 Hubungan RCA dengan Kuat Tarik Belah Umur 28 Hari**

| KUAT TARIK BELAH BETON 28 HARI |    |                  |       |
|--------------------------------|----|------------------|-------|
| RCA (%)                        |    | KUAT TARIK BELAH |       |
| 40                             | 40 | 3.537            | 3.537 |
| 50                             | 50 | 2.829            | 2.289 |
| 60                             | 60 | 2.122            | 2.122 |

Sumber: Hasil Analisis, 2025.



Sumber: Hasil Analisis, 2025.

**Gambar 5.11 Hubungan RCA dengan Kuat Tarik Belah Umur 28 Hari**

Grafik ini menunjukkan bahwa seiring dengan meningkatnya persentase RCA, kuat tarik belah beton mengalami penurunan. Persamaan matematis yang tertera pada grafik adalah  $y = 2.0513x^2 - 26.359x + 107.55$ , yang menunjukkan hubungan antara persentase RCA dan kuat tarik belah beton. Dengan meningkatnya persentase RCA, kuat tarik belah beton menurun, namun penurunan ini tidak linier, melainkan mengikuti pola kurva. Nilai  $R^2 = 0.9228$  menunjukkan bahwa hubungan ini cukup kuat, meskipun ada variasi tertentu yang tidak sepenuhnya dijelaskan oleh model ini. Kesimpulannya, grafik ini menunjukkan bahwa penggunaan RCA dalam campuran beton mengurangi kuat tarik belah beton.

#### 5.2.4 Analisis Hasil dan Implikasi Penggunaan RCA

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan, lentur, tarik belah, dan analisis regresi, diperoleh bahwa penggunaan RCA dalam campuran beton berpengaruh signifikan terhadap berbagai sifat mekanik beton, baik pada usia 3, 7, dan 28 hari, serta pengujian lainnya seperti kekuatan tarik belah dan lentur. Berikut adalah analisis hasil dan implikasi dari penggunaan RCA berdasarkan pengujian yang dilakukan:

1. Kekuatan Tekan

Kekuatan tekan beton pada usia 3 hari, 7 hari, dan 28 hari cenderung menurun seiring dengan peningkatan persentase penggunaan RCA. Hasil regresi menunjukkan hubungan yang terbalik, dengan koefisien negatif pada persamaan regresi untuk setiap pengujian (usia 3, 7, dan 28 hari). Nilai  $R^2$  yang didapat cukup kuat, dengan angka tertinggi pada usia 28 hari (0.976), diikuti oleh usia 3 hari (0.9764), dan usia 7 hari (0.9545).

2. Kekuatan Lentur

Kekuatan lentur beton pada usia 3 hari, 7 hari, dan 28 hari juga cenderung menurun seiring dengan peningkatan persentase penggunaan RCA. Hasil regresi menunjukkan hubungan yang terbalik, dengan koefisien negatif pada persamaan regresi untuk setiap pengujian (usia 3, 7, dan 28 hari). Nilai  $R^2$  yang didapat cukup kuat, dengan angka tertinggi pada usia 3 hari (0.9874), diikuti oleh usia 7 hari (0.978), dan usia 28 hari (0.951).

3. Kekuatan Tarik Belah

Kekuatan tarik belah beton pada usia 28 hari cenderung menurun seiring dengan peningkatan persentase penggunaan RCA. Hasil regresi menunjukkan hubungan yang terbalik, dengan koefisien negatif pada persamaan regresi. Nilai  $R^2$  yang didapat adalah 0.9228, yang menunjukkan hubungan yang cukup kuat antara kekuatan tarik belah dan persentase RCA.

4. Kebutuhan Bahan Lainnya (Semen, Air, *Admixture*, Agregat Halus)

Peningkatan penggunaan RCA dapat mengurangi kebutuhan akan semen, *admixture*, dan agregat halus, namun meningkatkan kebutuhan air dalam campuran beton. Berdasarkan analisis regresi yang dilakukan, hubungan

antara persentase RCA dan masing-masing bahan menunjukkan tren yang signifikan:

- a. Semen: Semakin tinggi persentase RCA, semakin sedikit jumlah semen yang dibutuhkan. Hubungan ini sangat kuat dengan nilai  $R^2 = 1$ , yang menunjukkan korelasi sempurna antara persentase RCA dan kebutuhan semen.
- b. Air: Kebutuhan air cenderung meningkat seiring dengan meningkatnya persentase RCA dalam campuran beton. Hubungan antara RCA dan air menunjukkan pola positif, dengan nilai  $R^2 = 0.9595$ , yang menunjukkan hubungan yang kuat meskipun ada sedikit variasi.
- c. *Admixture*: Penggunaan *admixture* berkurang seiring dengan peningkatan penggunaan RCA. Hubungan ini sangat kuat dengan nilai  $R^2 = 1$ , yang menunjukkan korelasi sempurna antara RCA dan kebutuhan *admixture*.
- d. Agregat Halus: Penggunaan agregat halus menurun dengan meningkatnya persentase RCA. Hubungan ini juga sangat kuat dengan nilai  $R^2 = 1$ , yang menunjukkan hubungan yang sangat erat antara persentase RCA dan kebutuhan agregat halus.

Secara keseluruhan, meskipun penggunaan RCA mengurangi kebutuhan semen, *admixture*, dan agregat halus, hal ini juga menyebabkan peningkatan kebutuhan air. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun RCA dapat mengurangi beberapa bahan material utama, perhatian khusus perlu diberikan pada kebutuhan air yang lebih tinggi dalam campuran beton, yang dapat mempengaruhi karakteristik beton, seperti kekuatan dan daya tahan.

#### 5. Performa Beton Berdasarkan Proporsi RCA

- a. Beton dengan RCA 40% memiliki performa terbaik dan mampu memenuhi atau bahkan melampaui target mutu desain FS 45. Proporsi ini menunjukkan keseimbangan antara pemanfaatan material daur ulang dan karakteristik mekanis yang masih memenuhi standar konstruksi.
- b. Beton dengan RCA 50% mengalami penurunan performa yang cukup signifikan, terutama dalam kuat tekan, lentur, dan tarik belah. Meskipun masih dapat digunakan dalam aplikasi struktural ringan, perlu adanya

optimalisasi dalam metode pencampuran atau perlakuan terhadap RCA untuk meningkatkan kualitasnya.

- c. Beton dengan RCA 60% menunjukkan performa paling rendah dalam semua aspek mekanis. Penurunan ini disebabkan oleh porositas yang lebih tinggi dan daya ikat yang lebih rendah pada agregat RCA, yang berdampak pada kuat tekan, lentur, dan tarik belah. Oleh karena itu, penggunaan RCA dalam proporsi tinggi ini sebaiknya dibatasi untuk aplikasi non-struktural atau memerlukan modifikasi campuran yang lebih lanjut.

Penggunaan RCA dalam campuran beton dapat memberikan manfaat dalam pengurangan biaya bahan dan mendukung keberlanjutan, namun terdapat penurunan dalam kekuatan mekanik beton seiring proporsi penambahan persentase RCA, terutama pada kekuatan tekan dan kekuatan lentur. Meskipun demikian, dengan pengelolaan campuran yang tepat, penggunaan RCA tetap memungkinkan untuk diterapkan pada proyek konstruksi. Evaluasi terhadap kualitas RCA dan pengaturan proporsi campuran yang lebih baik sangat penting untuk memaksimalkan potensi penggunaan RCA dalam konstruksi beton.

### 5.3 Keterkaitan Struktur Mikro RCA dengan Kinerja Beton

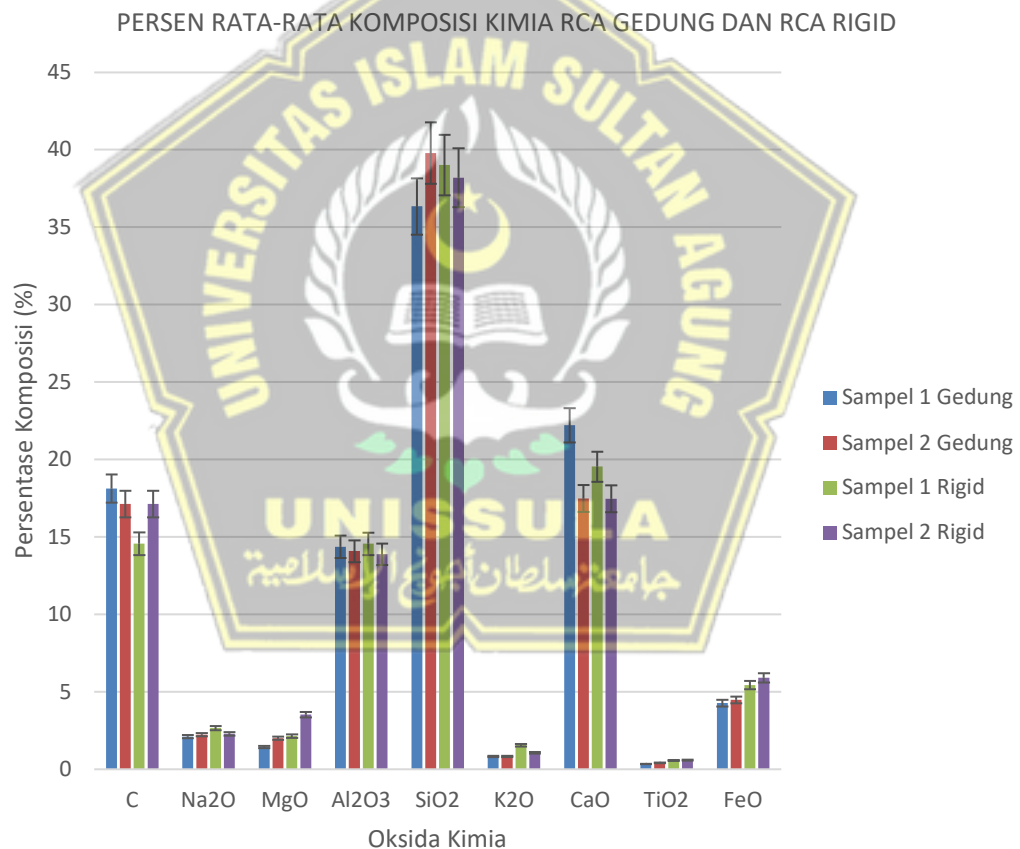
Analisis mikro struktur *Recycled Concrete Aggregate* (RCA) menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dilakukan untuk memahami hubungan antara karakteristik mikro RCA dan kinerja beton yang dihasilkan. RCA yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari dua sumber utama, yaitu limbah gedung dan limbah jalan *rigid pavement*. Perbedaan struktur mikro RCA dari kedua sumber ini berpengaruh langsung terhadap sifat mekanik beton, termasuk kuat tekan, kuat lentur, dan kuat tarik belah.

Berikut adalah pembahasan hasil penelitian keterkaitan struktur mikro RCA dengan kinerja beton berdasarkan hasil uji SEM-EDX RCA Gedung dan RCA *Rigid*, seperti dapat dilihat pada Tabel 5.12 dan Gambar 5.12.

**Tabel 5.12 Persen Rata-rata Komposisi Kimia RCA Gedung**

| No | Komponen Senyawa               | Sampel 1 Gedung | Sampel 2 Gedung | Sampel 1 Rigid | Sampel 2 Rigid |
|----|--------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
| 1  | C                              | 18.12           | 17.12           | 14.56          | 17.12          |
| 2  | Na <sub>2</sub> O              | 2.1             | 2.23            | 2.66           | 2.29           |
| 3  | MgO                            | 1.43            | 2               | 2.14           | 3.52           |
| 4  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14.36           | 14.08           | 14.55          | 13.88          |
| 5  | SiO <sub>2</sub>               | 36.34           | 39.78           | 39.01          | 38.19          |
| 6  | K <sub>2</sub> O               | 0.83            | 0.83            | 1.55           | 1.07           |
| 7  | CaO                            | 22.2            | 17.48           | 19.53          | 17.46          |
| 8  | TiO <sub>2</sub>               | 0.34            | 0.42            | 0.57           | 0.58           |
| 9  | FeO                            | 4.26            | 4.47            | 5.43           | 5.9            |
| 10 | Total                          | 100             | 100             | 100            | 100            |

Sumber: Hasil Uji SEM, 2025.



Sumber: Hasil Uji SEM, 2025.

**Gambar 5.12 Persen Rata-rata Komposisi Kimia RCA Gedung dan RCA Rigid**

- SiO<sub>2</sub> pada RCA gedung adalah 36.34% dan 39.78%. Kandungan SiO<sub>2</sub> ini berperan penting dalam meningkatkan kekuatan dan ketahanan beton, karena membantu pembentukan ikatan kuat antara agregat dan pasta semen. Pada RCA *rigid*, SiO<sub>2</sub> mencapai 39.01% dan 38.19%, yang memberikan ikatan yang lebih kuat antara agregat dan pasta semen menghasilkan kekuatan mekanik yang lebih baik.
- CaO pada RCA gedung adalah 22.20% dan 17.48%, yang berfungsi meningkatkan kekuatan struktural beton serta ketahanan terhadap pengaruh kimia. Kandungan CaO yang lebih tinggi ini memberikan ketahanan terhadap faktor lingkungan yang keras, seperti kelembaban dan bahan kimia. Pada RCA *rigid*, CaO ditemukan sebesar 19.53% dan 17.46%, yang juga berkontribusi pada ketahanan beton terhadap degradasi dari kondisi lingkungan yang keras, meskipun sedikit lebih rendah dibandingkan dengan RCA gedung.
- MgO pada RCA gedung adalah 1.43% dan 2.00%, yang berfungsi memberikan ketahanan terhadap suhu tinggi dan perubahan pH. Namun, kandungan MgO yang lebih rendah dibandingkan dengan RCA *rigid* dapat membuat RCA gedung kurang tahan terhadap kondisi ekstrem atau suhu tinggi dalam aplikasi jangka panjang. Pada RCA *rigid*, MgO mencapai 2.14% dan 3.52%, memberikan ketahanan yang lebih baik terhadap suhu tinggi dan perubahan pH, menjadikannya lebih tahan lama di bawah kondisi ekstrem.
- FeO pada RCA gedung adalah 4.26% dan 4.47%, memberikan ketahanan terhadap korosi, yang penting untuk beton yang terpapar kondisi lembab atau berkarat. Kandungan FeO yang lebih tinggi meningkatkan ketahanan beton terhadap kondisi lingkungan yang agresif. Pada RCA *rigid*, FeO ditemukan sebesar 5.43% dan 5.90%, yang juga memberikan ketahanan terhadap korosi dan meningkatkan ketahanan struktural dalam jangka panjang.
- TiO<sub>2</sub> pada RCA gedung ditemukan sebesar 0.34% dan 0.42%, yang berperan kecil dalam meningkatkan ketahanan kimia dan mencegah degradasi material. Pada RCA *rigid*, TiO<sub>2</sub> hadir dalam jumlah kecil (0.57%

dan 0.58%), memberikan sedikit peningkatan terhadap ketahanan kimia beton dan membantu melawan degradasi material yang disebabkan oleh faktor lingkungan eksternal.

- Kandungan SiO<sub>2</sub> yang lebih tinggi dapat mengindikasikan adanya lebih banyak pasta semen yang melekat, karena SiO<sub>2</sub> adalah komponen penting dalam pasta semen. Sampel 2 Gedung dengan 39.78% SiO<sub>2</sub> menunjukkan adanya potensi mortir yang lebih banyak dibandingkan dengan RCA *rigid* yang memiliki nilai sedikit lebih rendah (39.01% dan 38.19%). Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang menyebutkan bahwa mortar yang melekat pada RCA dari gedung lebih ringan, yang mengurangi kerapatan dan kekuatan beton ketika digunakan dalam aplikasi beton (Verian et al., 2018 dalam Fanijo et al., 2023). Sebaliknya, RCA dari perkerasan memiliki lebih sedikit mortar yang melekat, yang meningkatkan porositas lebih rendah dan memberikan kinerja mekanik lebih baik (Etxeberria et al., 2007; McNeil dan Kang, 2013 dalam Fanijo et al., 2023).

Berdasarkan perbandingan ini, RCA *rigid pavement* lebih unggul dalam hal kinerja mekanik dan keberlanjutan dibandingkan dengan RCA dari gedung, yang memerlukan pengolahan lebih lanjut sebelum dapat digunakan untuk aplikasi struktural. Sumber dari Etxeberria et al. (2007), McNeil dan Kang (2013), dan Verian et al. (2018) yang dikutip dalam Fanijo et al. (2023) memberikan bukti bahwa RCA *rigid pavement* memiliki sifat yang lebih menguntungkan dalam konstruksi dibandingkan dengan RCA dari bangunan yang dihancurkan.

#### **5.4 Perbandingan Biaya Beton RCA dan Beton Normal**

Analisis biaya beton RCA dan Beton Normal menggunakan Analisis Harga Satuan Pekerjaan (AHSP). AHSP merupakan suatu alat di mana suatu metode perhitungan biaya pekerjaan konstruksi dengan mempertimbangkan segala komponen yang terkait yang diperlukan dalam melaksanakan suatu pekerjaan di lapangan. Dalam kasus ini adalah perhitungan biaya beton dengan dua jenis komponen: Beton Normal dan Beton RCA. Hasil analisis menunjukkan.

**Tabel 5.13 Harga Beton Normal FS 45**

| HARGA BETON FS 45 PER 1 TRUK MIXER (7 M3)                       |                       |        |           |                    |                    |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------------|--------|-----------|--------------------|--------------------|
| NO.                                                             | KOMPONEN              | SATUAN | KUANTITAS | HARGA SATUAN (Rp.) | JUMLAH HARGA (Rp.) |
| <b>A TENAGA</b>                                                 |                       |        |           |                    |                    |
| 1                                                               | Pekerja               | Jam    | 0.753     | 22,884.00          | 17,231.93          |
| 2                                                               | Mandor                | Jam    | 0.100     | 32,190.00          | 3,231.93           |
| JUMLAH HARGA TENAGA                                             |                       |        |           |                    | 20,463.86          |
| <b>B BAHAN</b>                                                  |                       |        |           |                    |                    |
| 1                                                               | Semen                 | Kg     | 400.000   | 1,824.00           | 729,600.00         |
| 2                                                               | Pasir                 | Kg     | 757.500   | 3,500.00           | 2,651,250.00       |
| 3                                                               | Agregat Kasar         | Kg     | 570.000   | 8,500.00           | 4,845,000.00       |
| 4                                                               | Air                   | Ltr    | 142.500   | 23.44              | 3,340.20           |
| 5                                                               | ADMIXTURE (Visco)     | Kg     | 5.400     | 60,000.00          | 324,000.00         |
| JUMLAH HARGA BAHAN                                              |                       |        |           |                    | 8,553,190.20       |
| <b>C PERALATAN</b>                                              |                       |        |           |                    |                    |
| 1                                                               | Concrete Mixing Plant | Jam    | 0.050     | 271,467.89         | 13,627.91          |
| 2                                                               | Truck Mixer           | Jam    | 0.118     | 779,884.00         | 91,724.74          |
| JUMLAH HARGA PERALATAN                                          |                       |        |           |                    | 105,352.65         |
| <b>D JUMLAH HARGA TENAGA, BAHAN DAN PERALATAN ( A + B + C )</b> |                       |        |           |                    | 8,679,006.70       |
| <b>E OVERHEAD, PROFIT 10.0 % x D</b>                            |                       |        |           |                    | 867,900.67         |
| <b>F HARGA SATUAN PEKERJAAN ( D + E )</b>                       |                       |        |           |                    | 9,546,907.37       |
| <b>DIBULATKAN</b>                                               |                       |        |           |                    | 9,546,907.00       |
| <b>HARGA PER M3</b>                                             |                       |        |           |                    | 1,363,843.86       |

Sumber: Hasil Analisis, 2025.

**Tabel 5.14 Harga Beton RCA 40% FS 45**

| HARGA BETON FS 45RCA (40%) PER 1 TRUK MIXER (7 M3)              |                         |        |           |                    |                    |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------------|--------|-----------|--------------------|--------------------|
| NO.                                                             | KOMPONEN                | SATUAN | KUANTITAS | HARGA SATUAN (Rp.) | JUMLAH HARGA (Rp.) |
| <b>A TENAGA</b>                                                 |                         |        |           |                    |                    |
| 1                                                               | Pekerja                 | Jam    | 0.753     | 22,884.00          | 17,231.93          |
| 2                                                               | Mandor                  | Jam    | 0.100     | 32,190.00          | 3,231.93           |
| JUMLAH HARGA TENAGA                                             |                         |        |           |                    | 20,463.86          |
| <b>B BAHAN</b>                                                  |                         |        |           |                    |                    |
| 1                                                               | Semen                   | Kg     | 400.000   | 2,500.00           | 1,000,000.00       |
| 2                                                               | Pasir                   | Kg     | 757.500   | 3,500.00           | 2,651,250.00       |
| 3                                                               | RCA                     | Kg     | 570.000   | 0.00               | 0.00               |
| 4                                                               | Air                     | Ltr    | 142.500   | 15.00              | 2,137.50           |
| 5                                                               | ADMIXTURE (Visco)       | Kg     | 5.400     | 60,000.00          | 324,000.00         |
| JUMLAH HARGA BAHAN                                              |                         |        |           |                    | 3,977,387.50       |
| <b>C PERALATAN</b>                                              |                         |        |           |                    |                    |
| 1                                                               | Concrete Mixing Plant   | Jam    | 0.050     | 271,467.89         | 13,627.91          |
| 2                                                               | Truck Mixer             | Jam    | 0.118     | 779,884.00         | 91,724.74          |
| 3                                                               | Crusher                 | Jam    | 0.531     | 500,000.00         | 265,486.73         |
| 4                                                               | Dump Truck (Angkut RCA) | jam    | 0.281     | 350,000.00         | 98,393.57          |
| JUMLAH HARGA PERALATAN                                          |                         |        |           |                    | 469,232.95         |
| <b>D JUMLAH HARGA TENAGA, BAHAN DAN PERALATAN ( A + B + C )</b> |                         |        |           |                    | 4,467,084.30       |
| <b>E OVERHEAD, PROFIT 10.0 % x D</b>                            |                         |        |           |                    | 446,708.43         |
| <b>F HARGA SATUAN PEKERJAAN ( D + E )</b>                       |                         |        |           |                    | 4,913,792.73       |
| <b>DIBULATKAN</b>                                               |                         |        |           |                    | 4,913,793.00       |
| <b>HARGA PER M3</b>                                             |                         |        |           |                    | 701,970.43         |

Sumber: Hasil Analisis, 2025

**Tabel 5.15 Harga Beton RCA 50% FS 45**

| HARGA BETON FS-45RCA (50%) PER 1 TRUK MIXER (7 M3)     |                         |        |           |                    |                    |
|--------------------------------------------------------|-------------------------|--------|-----------|--------------------|--------------------|
| NO.                                                    | KOMPONEN                | SATUAN | KUANTITAS | HARGA SATUAN (Rp.) | JUMLAH HARGA (Rp.) |
| <b>A TENAGA</b>                                        |                         |        |           |                    |                    |
| 1.                                                     | Petaka                  | jam    | 0.752     | 32,854.00          | 17,251.60          |
| 2.                                                     | Motor                   | jam    | 0.100     | 32,180.00          | 3,218.00           |
| JUMLAH HARGA TENAGA                                    |                         |        |           |                    | 30,469.60          |
| <b>B BAHAN</b>                                         |                         |        |           |                    |                    |
| 1.                                                     | Semen                   | Kg     | 349.000   | 2,300.00           | 800,000.00         |
| 2.                                                     | Pasir                   | Kg     | 600.000   | 3,500.00           | 2,100,000.00       |
| 3.                                                     | RCA                     | Kg     | 712.500   | 0.00               | 0.00               |
| 4.                                                     | Air                     | Ltr    | 187.500   | 13.00              | 2,437.50           |
| 5.                                                     | ADOMENTUM (Vibro)       | Kg     | 4.320     | 80,000.00          | 349,600.00         |
| JUMLAH HARGA BAHAN                                     |                         |        |           |                    | 2,262,037.50       |
| <b>C PERALATAN</b>                                     |                         |        |           |                    |                    |
| 1.                                                     | Concrete Mixing Plant   | jam    | 0.050     | 271,487.80         | 13,574.39          |
| 2.                                                     | Truck-Mixer             | jam    | 0.118     | 779,884.00         | 91,724.74          |
| 3.                                                     | Crusher                 | jam    | 0.531     | 590,000.00         | 312,480.70         |
| 4.                                                     | Dump Truck (Angkut RCA) | jam    | 0.221     | 250,000.00         | 55,250.27          |
| JUMLAH HARGA PERALATAN                                 |                         |        |           |                    | 409,229.85         |
| D JUMLAH HARGA TENAGA, BAHAN DAN PERALATAN (A + B + C) |                         |        |           |                    | 2,711,706.95       |
| E OVERHEAD, PROFIT                                     |                         |        |           |                    | 275,170.60         |
| F HARGA SATUAN PEKERJAAN (D + E)                       |                         |        |           |                    | 2,986,877.55       |
| G DISKALSIAN                                           |                         |        |           |                    | 4,124,590.00       |
| HARGA PER M3                                           |                         |        |           |                    | 507,924.20         |

Sumber: Hasil Analisis, 2025.

**Tabel 5.16 Harga Beton RCA 60% FS 45**

| HARGA BETON FS-45RCA (60%) PER 1 TRUK MIXER (7 M3)     |                         |        |           |                    |                    |
|--------------------------------------------------------|-------------------------|--------|-----------|--------------------|--------------------|
| NO.                                                    | KOMPONEN                | SATUAN | KUANTITAS | HARGA SATUAN (Rp.) | JUMLAH HARGA (Rp.) |
| <b>A TENAGA</b>                                        |                         |        |           |                    |                    |
| 1.                                                     | Petaka                  | jam    | 0.752     | 32,854.00          | 17,251.60          |
| 2.                                                     | Motor                   | jam    | 0.100     | 32,180.00          | 3,218.00           |
| JUMLAH HARGA TENAGA                                    |                         |        |           |                    | 30,469.60          |
| <b>B BAHAN</b>                                         |                         |        |           |                    |                    |
| 1.                                                     | Semen                   | Kg     | 339.000   | 2,300.00           | 800,000.00         |
| 2.                                                     | Pasir                   | Kg     | 565.000   | 3,500.00           | 1,977,500.00       |
| 3.                                                     | RCA                     | Kg     | 815.000   | 0.00               | 0.00               |
| 4.                                                     | Air                     | Ltr    | 230.000   | 13.00              | 2,990.00           |
| 5.                                                     | ADOMENTUM (Vibro)       | Kg     | 3.600     | 80,000.00          | 288,000.00         |
| JUMLAH HARGA BAHAN                                     |                         |        |           |                    | 2,768,000.00       |
| <b>C PERALATAN</b>                                     |                         |        |           |                    |                    |
| 1.                                                     | Concrete Mixing Plant   | jam    | 0.050     | 271,487.80         | 13,574.39          |
| 2.                                                     | Truck-Mixer             | jam    | 0.118     | 779,884.00         | 91,724.74          |
| 3.                                                     | Crusher                 | jam    | 0.531     | 590,000.00         | 312,480.70         |
| 4.                                                     | Dump Truck (Angkut RCA) | jam    | 0.221     | 250,000.00         | 55,250.27          |
| JUMLAH HARGA PERALATAN                                 |                         |        |           |                    | 409,229.85         |
| D JUMLAH HARGA TENAGA, BAHAN DAN PERALATAN (A + B + C) |                         |        |           |                    | 2,276,498.85       |
| E OVERHEAD, PROFIT                                     |                         |        |           |                    | 327,646.20         |
| F HARGA SATUAN PEKERJAAN (D + E)                       |                         |        |           |                    | 2,604,145.05       |
| G DISKALSIAN                                           |                         |        |           |                    | 3,804,140.00       |
| HARGA PER M3                                           |                         |        |           |                    | 514,778.00         |

Sumber: Hasil Analisis, 2025.

## 1. Analisis Komponen Biaya

Tabel 5.1 – 5.4 menunjukkan komponen biaya untuk dua jenis beton (normal dan beton dengan RCA) dengan rincian komponen sebagai berikut:

- Tenaga Kerja (A) : Biaya yang terkait dengan upah pekerja yang terlibat dalam proses pembuatan dan pengecoran beton.
- Bahan (B) : Biaya bahan baku yang digunakan dalam pembuatan beton, yang terdiri dari agregat, semen, bahan tambahan, dan aditif lain yang diperlukan.
- Peralatan (C) : Biaya yang terkait dengan penggunaan peralatan dan mesin yang digunakan dalam proses pengecoran dan pengolahan material beton.

## 2. Rincian Biaya Beton Normal FS 45

Berdasarkan Tabel 5.1 yang menunjukkan harga beton normal FS 45, harga total beton normal per meter kubik adalah Rp 1.399.834. Dalam biaya ini, komponen bahan baku seperti agregat alami, semen, dan bahan tambahan, serta biaya transportasi telah dihitung. Mengingat bahwa ini adalah beton dengan bahan baku konvensional, biaya bahan ini cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan beton yang menggunakan agregat daur ulang (RCA).

## 3. Rincian Biaya Beton RCA 40%, 50%, dan 60% FS 45

Pada Tabel 5.2, 5.3, dan 5.4, biaya beton dengan komposisi RCA 40%, 50%, dan 60% masing-masing adalah sebagai berikut:

- Beton RCA 40% FS 45: Rp 701,970.43 per M3
- Beton RCA 50% FS 45: Rp 589,554.29 per M3
- Beton RCA 60% FS 45: Rp 514,878.00 per M3

Dari tabel ini, dapat dilihat bahwa semakin tinggi persentase agregat daur ulang (RCA), semakin rendah biaya beton per meter kubik. Hal ini menunjukkan adanya penghematan biaya yang signifikan pada beton yang menggunakan RCA sebagai substitusi sebagian agregat alami.

## 4. Perbandingan Biaya Antara Beton Normal dan Beton RCA

Berdasarkan analisis di atas, perbandingan biaya antara beton normal dan beton dengan RCA menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan:

- Beton Normal: Rp 1.363.843.86 per M3
- Beton RCA 40%: Rp 701,970.43 perM3 (menghemat sekitar 54% dibandingkan beton normal)
- Beton RCA 50%: Rp 589,554.29 per M3 (menghemat sekitar 63% dibandingkan beton normal)
- Beton RCA 60%: Rp 514,878.00 perM3 (menghemat sekitar 69% dibandingkan beton normal)

#### 5. Analisis Berdasarkan AHSP

AHSP menghitung biaya berdasarkan unit harga yang terdiri dari beberapa komponen:

##### 1. Harga Tenaga Kerja:

Untuk beton normal dan beton dengan RCA, biaya tenaga kerja akan serupa karena proses pengecoran beton tidak banyak berubah. Perbedaan yang dapat terjadi adalah dalam hal efisiensi waktu yang lebih tinggi dengan menggunakan beton dengan RCA, yang pada akhirnya bisa menurunkan biaya tenaga kerja.

##### 2. Harga Bahan:

Bahan baku untuk beton normal jauh lebih mahal karena menggunakan agregat alami. Di sisi lain, beton dengan RCA menggunakan agregat daur ulang yang lebih murah, yang menghasilkan penghematan biaya yang signifikan.

##### 3. Peralatan:

Penggunaan peralatan untuk pengolahan dan pencampuran beton akan mempengaruhi biaya, namun penggunaan beton dengan RCA dapat mengurangi biaya peralatan karena pengolahan material daur ulang cenderung lebih sederhana dibandingkan dengan pengolahan agregat alami.

Berdasarkan analisis biaya, beton RCA lebih ekonomis dibandingkan beton normal, dengan penghematan biaya yang sangat signifikan seiring dengan meningkatnya proporsi RCA dalam campuran beton. Dalam hal ini, beton dengan

60% RCA menawarkan penghematan terbesar dan menjadi pilihan yang paling hemat biaya. Seiring dengan meningkatnya penerimaan terhadap beton dengan agregat daur ulang, potensi untuk mengurangi dampak lingkungan dan mendukung prinsip keberlanjutan dalam industri konstruksi semakin besar.

### 5.5 Evaluasi Keberlanjutan Penggunaan RCA

Keberlanjutan industri konstruksi dapat dicapai melalui pemanfaatan limbah beton sebagai material daur ulang dalam pembuatan beton baru. Untuk mencapai tujuan tersebut, konstruksi berkelanjutan membutuhkan langkah-langkah untuk memanfaatkan limbah beton sebagai material daur ulang dalam pembuatan beton baru.

Tindakan ini tidak hanya dapat mengurangi dampak lingkungan tetapi juga mendorong efisiensi dalam penggunaan sumber daya alam. Limbah beton yang dibuang oleh proyek konstruksi dan pembongkaran struktur dapat dihancurkan dan diproses kembali menjadi agregat daur ulang halus dan kasar untuk menggantikan agregat alam.

Sebagai hasil, *Recycled Concrete Aggregate* menjadi salah satu terobosan signifikan dalam mendukung konstruksi berkelanjutan. Limbah beton yang awalnya diragukan nilainya kini bisa jadi material berkualitas dengan sejumlah aplikasi konstruksi yang luas. Dalam penilaian keberlangsungannya, RCA dapat dianalisis berdasarkan dampak lingkungan, ekonomi, dan sosialnya. Dampak biaya RCA juga dimasukkan dalam analisis termasuk biaya material yang mungkin dapat dihemat di proyek-proyek konstruksi.

Proses penilaian yang dilakukan terus menerus dan sistimatis untuk memantau kemajuan dan kualitas yang bertujuan untuk memberikan umpan balik yang berkelanjutan solusinya adalah mendaur ulang *Recycled Concrete Aggregate* menjadi sesuatu alternatif yang sangat berguna. dengan memberikan umpan balik yang berkelanjutan dapat membantu meningkatkan kualitas yang diperlukan untuk mencapai tujuan baik individu maupun professional, memotivasi para peneliti, praktisi untuk meningkatkan kinerja mereka dalam menciptakan kreasi dan pembaruan dalam berkarya.

### 5.5.1 Dampak Lingkungan, Ekonomi dan Sosial

Penggunaan RCA memberikan dampak positif yang signifikan terhadap lingkungan, meliputi:

1. Pengurangan Eksploitasi Agregat Alami.

Dengan menggunakan RCA, kebutuhan akan agregat alami seperti batu pecah dan pasir dapat dikurangi secara substansial. Hal ini tidak hanya mengurangi tekanan terhadap sumber daya alam yang terbatas tetapi juga meminimalkan kerusakan lingkungan akibat penambangan batu dan pasir, seperti erosi tanah dan polusi air.

2. Pengelolaan Limbah Konstruksi.

Limbah beton dari gedung dan jalan *rigid pavement* yang sebelumnya berakhir di tempat pembuangan akhir kini dapat dimanfaatkan kembali. Hal ini membantu mengurangi volume limbah konstruksi yang mencemari lingkungan.

3. Pengurangan Emisi Karbon.

Produksi dan transportasi agregat alami menghasilkan emisi karbon yang tinggi. Dengan menggunakan RCA yang bersumber dari limbah lokal, emisi karbon dapat ditekan secara signifikan, terutama dalam hal transportasi jarak jauh.

Dari segi ekonomi, penggunaan RCA memberikan beberapa manfaat utama:

1. Penghematan Biaya Material.

Beton dengan campuran RCA (*Recycled Concrete Aggregate*) secara umum lebih ekonomis dibandingkan beton konvensional. Hal ini disebabkan oleh RCA yang berasal dari limbah konstruksi, sehingga tidak memerlukan proses penambangan intensif seperti agregat alami. Pengolahan RCA melibatkan alat seperti *stone crusher* untuk menghancurkan limbah beton menjadi agregat, dilanjutkan dengan proses pencucian untuk menghilangkan sisa debu, material organik, atau pasta semen yang menempel, serta penyaringan menggunakan saringan bertingkat untuk memastikan kualitas agregat yang dihasilkan. Dengan proses ini, RCA tidak hanya mendukung pengurangan limbah konstruksi, tetapi juga memberikan efisiensi biaya yang signifikan dalam aplikasi beton baru.

## 2. Efisiensi Produksi.

Proses daur ulang RCA memerlukan energi yang lebih sedikit dibandingkan produksi agregat alami. Hal ini berdampak langsung pada penurunan biaya operasional pabrik daur ulang dan konstruksi secara keseluruhan.

## 3. Peluang Bisnis.

Industri daur ulang limbah konstruksi membuka peluang bisnis baru, seperti pengolahan RCA dan distribusi material daur ulang. Hal ini tidak hanya menciptakan lapangan kerja tetapi juga mendorong inovasi dalam teknologi daur ulang.

Dari segi sosial, pemanfaatan RCA memiliki manfaat sebagai berikut:

### 1. Peningkatan Kesadaran Lingkungan.

Implementasi RCA mendorong para pelaku konstruksi untuk lebih peduli terhadap keberlanjutan dan pemilihan material yang ramah lingkungan.

### 2. Pengurangan Dampak Negatif.

Penambangan Dengan mengurangi ketergantungan pada agregat alami, penggunaan RCA membantu meminimalkan dampak sosial, seperti polusi dan konflik sosial yang sering terjadi di sekitar lokasi tambang.

### 3. Mendukung Pembangunan.

Berkelanjutan RCA berkontribusi pada terciptanya pembangunan yang lebih berkelanjutan, terutama di kawasan urban dengan volume limbah konstruksi yang tinggi.

## **5.6 Tantangan dan Solusi dalam Implementasi RCA di Industri Konstruksi**

Meskipun RCA memiliki banyak keunggulan, terdapat tantangan yang perlu diatasi, tantangan utama dalam implementasi secara umum meliputi perubahan Teknologi, kekurangan tenaga kerja terampil, keterbatasan sarana dan prasarana, serta kesenjangan antara teori dan praktek, untuk memaksimalkan manfaatnya:

### 1. Kualitas RCA yang Bervariasi.

Solusi: Standarisasi proses pengolahan RCA, termasuk pencucian, pengayakan, dan pengujian kualitas, harus diterapkan untuk memastikan RCA memenuhi spesifikasi teknis.

2. Kurangnya Kesadaran dan Regulasi.

Solusi: Edukasi dan pelatihan kepada pelaku konstruksi tentang manfaat RCA, serta pengembangan regulasi yang mendorong penggunaan material daur ulang.

3. Investasi Awal untuk Fasilitas Daur Ulang.

Solusi: Pemerintah dan pihak swasta dapat memberikan insentif, seperti subsidi dan keringanan pajak, untuk mendorong pembangunan fasilitas daur ulang RCA.

Evaluasi keberlanjutan menunjukkan bahwa penggunaan RCA memberikan dampak positif dari segi lingkungan, ekonomi, dan sosial. RCA *rigid* memiliki keunggulan mikro struktural dan komposisi kimia yang lebih stabil dibandingkan RCA gedung, menjadikannya pilihan yang lebih tepat untuk aplikasi konstruksi struktural. Selain itu, beton dengan campuran RCA jelas lebih ekonomis dibandingkan beton konvensional, karena berasal dari limbah konstruksi yang diolah melalui proses sederhana seperti penghancuran, pencucian, dan penyaringan, tanpa memerlukan penambangan intensif.

Dengan penerapan pengolahan yang tepat dan dukungan regulasi yang memadai, RCA berpotensi menjadi solusi inovatif untuk mewujudkan praktik konstruksi yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

## BAB VI KESIMPULAN, IMPLIKASI, DAN REKOMENDASI

### 6.1 Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi penggunaan *Recycled Concrete Aggregate* (RCA) yang berasal dari limbah *rigid pavement* sebagai bahan baku utama dalam pembuatan beton, serta menilai karakteristik fisik, mekanik, dan keberlanjutan dari beton yang dihasilkan. Berdasarkan hasil uji kuat tekan, lentur, tarik, serta analisis struktur mikro menggunakan SEM dan EDX, berikut adalah kesimpulan yang dapat diambil:

#### 1. Model Campuran Beton RCA *Rigid Pavement*:

Penelitian ini berhasil memformulasikan model campuran beton dengan RCA *rigid pavement* pada proporsi optimal 40%, yang menunjukkan performa mekanik terbaik di antara semua variasi. Pada umur 28 hari, campuran ini menghasilkan:

- Kuat tekan: 50,96 MPa (113% dari mutu desain FS 45),
- Kuat lentur: 49,02 kg/cm<sup>2</sup> (109% dari target),
- Kuat tarik belah: 3,537 MPa.

Kinerja ini memenuhi dan bahkan melebihi standar beton struktural, menjadikan RCA 40% layak untuk diaplikasikan pada elemen struktural seperti kolom, balok, dan pelat lantai. Sementara itu, campuran dengan RCA 50% dan 60% menunjukkan tren penurunan performa hingga hanya mencapai 82% mutu desain pada kuat tekan dan 2,122 MPa pada kuat tarik belah.

#### 2. Evaluasi Karakteristik Fisik, Mekanik, dan Mikro struktur:

Analisis karakteristik fisik dan mikro struktur beton dengan RCA *rigid pavement* pada berbagai proporsi (40%, 50%, dan 60%) menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap performa beton. Berdasarkan uji SEM–EDX, RCA *rigid* menunjukkan struktur mikro yang lebih padat dan homogen dibanding RCA dari bangunan gedung, dengan porositas rendah dan retakan

mikro minimal. Kandungan kimia RCA *rigid* didominasi oleh  $\text{SiO}_2$  (39,13%) dan  $\text{CaO}$  (31,67%), yang mendukung pembentukan senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) dan peningkatan kekuatan mekanik jangka panjang. Sebaliknya, RCA dari bangunan gedung mengandung karbon lebih tinggi dan retakan mikro lebih banyak, yang berisiko menurunkan kualitas beton jika digunakan tanpa perlakuan tambahan.

a. Pada sisi performa mekanik:

- Campuran 40% RCA menunjukkan hasil terbaik, dengan kuat tekan 50,96 MPa (113% dari mutu FS 45), kuat lentur 49,02 kg/cm<sup>2</sup> (109%), dan kuat tarik belah 3,537 MPa, serta modulus elastisitas sebesar 24.893,63 MPa.
- Campuran 50% RCA menurun menjadi kuat tekan 46,04 MPa (102%), kuat lentur 45,69 kg/cm<sup>2</sup>, kuat tarik belah 2,829 MPa, dan modulus elastisitas 22.720,42 MPa.
- Campuran 60% RCA menunjukkan penurunan paling signifikan, yaitu kuat tekan 36,80 MPa (82%), kuat lentur 45,02 kg/cm<sup>2</sup>, kuat tarik belah 2,122 MPa, dan modulus elastisitas 20.150,84 MPa.

b. Dari sisi kebutuhan material, semakin tinggi proporsi RCA, semakin besar kebutuhan air, dan semakin rendah kebutuhan semen dan *admixture*:

- Pada campuran 40% RCA, air yang dibutuhkan sebesar 176,26 liter/m<sup>3</sup>, meningkat dari 155,58 liter/m<sup>3</sup> (normal),
- 50% RCA membutuhkan 185,41 liter/m<sup>3</sup>, dan
- 60% RCA membutuhkan 194,55 liter/m<sup>3</sup>.
- Sementara itu, kebutuhan *admixture* menurun dari 3,51 liter/m<sup>3</sup> (normal) menjadi hanya 2,63 liter/m<sup>3</sup> pada RCA 60%.
- Korelasi antara persentase RCA dan kebutuhan air sangat kuat, dengan nilai  $R^2 = 0,9595$ , menunjukkan hubungan linier positif yang signifikan.

Berdasarkan kombinasi performa mekanik, stabilitas mikro struktur, dan efisiensi penggunaan material, campuran 40% RCA rigid dapat disimpulkan sebagai batas optimum secara teknis dan struktural. Komposisi ini

memberikan kekuatan dan durabilitas tinggi dengan efisiensi sumber daya.

### 3. Efisiensi Biaya dan Dampak Keberlanjutan:

Penggunaan RCA *rigid* terbukti memberikan efisiensi biaya yang sangat signifikan. Perbandingan harga menunjukkan:

- Beton Normal FS 45: Rp 1.363.843,86 per m<sup>3</sup>
- Beton RCA 40%: Rp 701.970,43 per m<sup>3</sup> (hemat ±49%)
- Beton RCA 50%: Rp 589.554,29 per m<sup>3</sup> (hemat ±57%)
- Beton RCA 60%: Rp 514.878,00 per m<sup>3</sup> (hemat ±62%).

Dari sisi keberlanjutan, pemanfaatan RCA membantu mengurangi eksploitasi agregat alam, menekan volume limbah konstruksi, dan menurunkan emisi karbon dari proses penambangan serta transportasi material. Selain itu, penggunaan RCA membuka peluang ekonomi di sektor daur ulang material konstruksi, sehingga mendukung terciptanya industri yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

## 6.2 Implikasi Penelitian

Pemanfaatan RCA, terutama RCA *rigid*, memberikan kontribusi signifikan terhadap upaya pelestarian lingkungan. Pengurangan penggunaan agregat alami dari sumber daya alam membantu mencegah kerusakan lingkungan akibat penambangan. Selain itu, pengolahan limbah konstruksi menjadi RCA mengurangi volume limbah yang berakhir di tempat pembuangan akhir, yang pada akhirnya mengurangi pencemaran lingkungan. Implementasi RCA juga dapat menurunkan emisi karbon dari transportasi dan produksi material baru, menjadikannya solusi material ramah lingkungan untuk masa depan.

Dari segi ekonomi, penggunaan RCA memberikan penghematan biaya material konstruksi. Beton dengan campuran RCA lebih murah dibandingkan beton konvensional, hal ini membuka peluang besar bagi sektor konstruksi untuk mengadopsi RCA sebagai material alternatif yang ekonomis. Selain itu, keberadaan RCA menciptakan peluang bisnis baru di bidang pengolahan limbah konstruksi, yang juga dapat menciptakan lapangan kerja.

Secara teknis, RCA *rigid* dapat digunakan untuk aplikasi struktural seperti balok, kolom, dan pelat lantai, sedangkan RCA gedung lebih cocok untuk aplikasi

non-struktural atau bahan dasar jalan. Kinerja mekanik RCA yang telah teruji menunjukkan bahwa dengan pengolahan yang baik, RCA dapat menjadi substitusi agregat kasar dalam beton. Namun, penting untuk memastikan bahwa standar teknis terkait kualitas RCA diterapkan untuk menjaga konsistensi hasil.

### 6.3 Rekomendasi

Berdasarkan temuan dan implikasi dari penelitian ini, beberapa rekomendasi strategis perlu disampaikan untuk mendorong pemanfaatan RCA dalam skala yang lebih luas. Rekomendasi ini mencakup aspek regulasi, teknologi, penelitian lanjutan, dan implementasi praktis dalam proyek konstruksi. Dengan langkah-langkah ini, penggunaan RCA dapat dioptimalkan untuk mendukung keberlanjutan dan efisiensi di sektor konstruksi.

1. Pengembangan Standar dan Regulasi

Untuk mendukung penggunaan RCA secara luas, diperlukan standar teknis dan regulasi nasional yang mengatur penggunaan RCA dalam campuran beton. Standar ini harus mencakup spesifikasi teknis seperti gradasi agregat, prosedur pencucian, penghilangan pasta semen sisa, dan batas substitusi agregat kasar dengan RCA.

2. Investasi dalam Teknologi Pengolahan

Penggunaan RCA membutuhkan teknologi pengolahan yang andal untuk memastikan kualitas material. Investasi dalam teknologi seperti pencucian material, *stone crusher*, dan penyaringan bertingkat sangat penting untuk mengurangi porositas dan meningkatkan homogenitas RCA. Pemerintah dan sektor swasta dapat memberikan insentif berupa subsidi atau keringanan pajak untuk mendorong investasi ini.

3. Penelitian Lanjutan

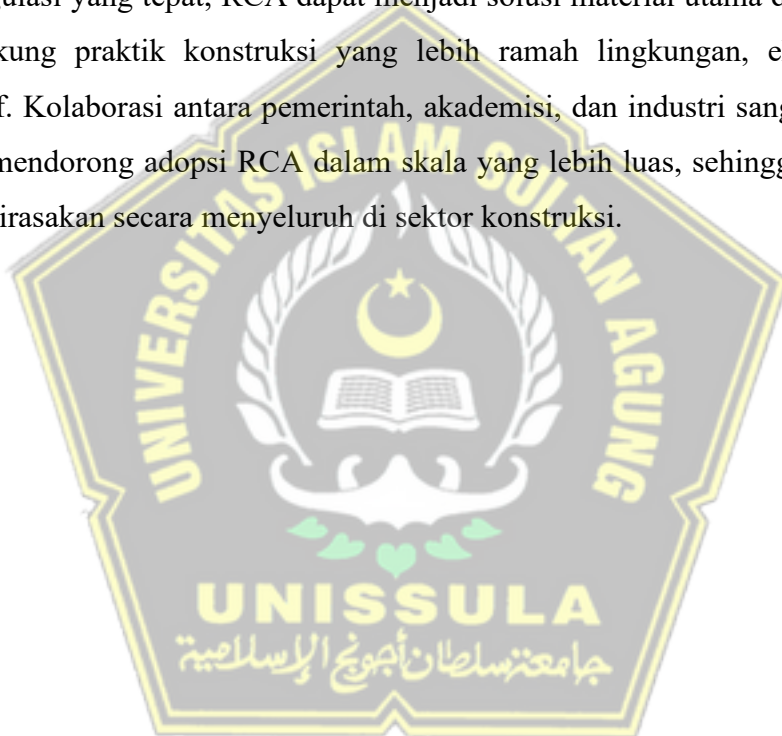
Untuk memperluas pemanfaatan RCA, diperlukan penelitian lanjutan yang mencakup:

- a. Evaluasi performa jangka panjang beton dengan RCA, terutama dalam kondisi lingkungan agresif seperti kawasan pantai atau daerah dengan perubahan suhu ekstrem.

- b. Studi biaya-manfaat dalam skala proyek besar, untuk mengukur dampak ekonomi dan lingkungan secara komprehensif.
- c. Eksplorasi teknologi baru dalam pengolahan RCA, seperti penggunaan bahan tambahan untuk meningkatkan kekuatan dan daya tahan material.

#### 6.4 Penutup

Penelitian ini menunjukkan bahwa RCA, khususnya RCA *rigid*, memiliki potensi besar untuk mendukung konstruksi berkelanjutan melalui pengurangan limbah, penghematan sumber daya alam, dan efisiensi biaya. Dengan pengolahan dan regulasi yang tepat, RCA dapat menjadi solusi material utama di masa depan, mendukung praktik konstruksi yang lebih ramah lingkungan, ekonomis, dan inovatif. Kolaborasi antara pemerintah, akademisi, dan industri sangat diperlukan untuk mendorong adopsi RCA dalam skala yang lebih luas, sehingga manfaatnya dapat dirasakan secara menyeluruh di sektor konstruksi.



## DAFTAR PUSTAKA

- Abdulmatin, A., Tangchirapat, W., & Jaturapitakkul, C. (2019). *Environmentally Friendly Interlocking Concrete Paving Block Containing New Cementing Material and Recycled Concrete Aggregate*. Eur. J. Environ. Civ. Eng, 23(12), 1467–1484.
- Amin, M. N. (2022). *Split Tensile Strength Prediction of Recycled Aggregate-Based Sustainable Concrete Using Artificial Intelligence Methods*. Materials (Basel), 15(12).
- Bidabadi, M. S., Akbari, M., & Panahi, O. (2020). *Optimum Mix Design of Recycled Concrete Based on the Fresh and Hardened Properties of Concrete*. J. Build. Eng, 32, 101483.
- Caracol, C., Kravchanka, L., Bravo, M., Brito, J., Agrela, F., & Rosales, J. (2024). *Recycled Aggregate Concrete Using Seawater: Optimizing Concrete's Sustainability*. Journal of Building Engineering, 97, 110841.
- Carriço, A., Bogas, J. A., Hu, S., Real, S., & Costa Pereira, M. F. (2021). *Novel Separation Process for Obtaining Recycled Cement and High-Quality Recycled Sand from Waste Hardened Concrete*. J. Clean. Prod, 309, 1–29.
- Cheng, H., Wang, Y., Liu, J., Poon, C.-S., Ren, P., Liu, Y., & Chen, Z. (2024). The long-term re-cementation of recycled concrete aggregate in road sub-base and its impacts on pavement performance. *Construction and Building Materials*, 290, 144-154.
- De Brito, J., Ferreira, J., Pacheco, J., Soares, D., & Guerreiro, M. (2016). *Structural, Material, Mechanical and Durability Properties and Behaviour of Recycled Aggregates Concrete*. J. Build. Eng, 6, 1–16.
- Dong, L., Fu, Y., He, M., & Huang, W. (2025). Recycling coarse aggregates from concrete using high voltage pulses. *Waste Management*, 120, 45-52.
- Du, Y., Shi, C., Kang, S., Amer, M., Zhao, B., & Zhang, Y. (2024). *Eccentric Compression Behaviors of Iron Tailings and Recycled Aggregate*

- Concrete-Filled Steel Tube Columns*. Journal of Constructional Steel Research, 223, 109070.
- Fanijo, E. O., Kolawole, J. T., Babafemi, A. J. & Liu, J. (2023). A Comprehensive Review on the Use of Recycled Concrete Aggregate for Pavement Construction: Properties, Performance, and Sustainability. *Clean. Mater*, 9, 100199.
- Hurtado-Alonso, N., Manso-Morato, J., Revilla-Cuesta, V., & Skaf, M. (2025). Strength-based RSM optimization of concrete containing coarse recycled concrete aggregate and raw-crushed wind-turbine blade. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 37(4), 155-163.
- Junaidi, A. (2015). Daur Ulang Limbah Pecahan Beton Sebagai Pengganti Agregat Kasar Pada Campuran Beton, 4(1), 5–15.
- Keles, O., Bayrak, O., & Bayata, H. (2024). *Experimental Investigation on Mechanical Properties of Sustainable Roller Compacted Concrete Pavement (RCCP) Containing Waste Rubbers as Alternative Aggregates*. Construction and Building Materials, 424, 135930.
- Khoso, S., Raad, J., & Parvin, A. (2019). *Experimental Investigation on the Properties of Recycled Concrete Using Hybrid Fibers*. Open J. Compos. Mater, 09(02), 183–196.
- Königsberger, M. Pichler, B. & Hellmich, C. (2014). *Micromechanics of ITZ-Aggregate Interaction in Concrete Part II: Strength Upscaling*. J. Am. Ceram. Soc, 97(2), 543–551.
- Liu, C., Liu, H., Wu, Y., Wu, J., & Ding, S. (2025). Effect of X-ray CT characterized pore structure on the freeze-thaw resistance of 3D printed concrete with recycled coarse aggregate. *Materials Science and Engineering A*, 750, 100-110.
- Lu, D., Qu, F., Punetha, P., Zeng, X., Luo, Z., & Li, W. (2024). *Graphene Oxide Nano-Engineered Recycled Aggregate Concrete for Sustainable Construction: A Critical Review*. Developments in the Built Environment 18, 100444.
- Makul, N. (2021). *Use of Recycled Concrete Aggregates in Production of Green Cement-Based Concrete Composites: A Review*. Crystals, 11(3), 1–35.

- Margareth, H. (2017). Pemanfaatan Bahan Beton Bekas Sebagai Pengganti Agregat Kasar Terhadap Kuat Tekan. *Экономика Региона*, 32.
- Moreno-Juez, J., Vegas, I. J., Gebremariam, A. T., García-Cortés, V., & Di Maio, F. (2020). *Treatment of End-of-Life Concrete in an Innovative Heating-Air Classification System for Circular Cement-Based Products*. *J. Clean. Prod.*, 263.
- Nikmehr, B., Kafle, B., Al Zand, A., & Al-Ameri, R. (2024). *The Effect of Hybrid Basalt Fibres on The Mechanical and Structural Characteristics of Geopolymer Concrete Containing Geopolymer-Coated Recycled Concrete Aggregates*. *Construction and Building Materials*, 450, 138649.
- Ogar, I. F. (2017). *The Effects of Recycled Aggregates on Compressive Strength of Concrete*, 6495(1), 250–258.
- Paranhos, R. S., Cazaciu, B. G., Sampaio, C. H., Petter, C. O., Neto, R. O., & Huchet, F. (2016). *A Sorting Method to Value Recycled Concrete*. *J. Clean. Prod.*, 112, 2249–2258.
- Poongodi, K., Murthi, P., & Revathi, P. (2022). *Influence Of Coir Fibre And Recycled Aggregate On Bond Strength of Pavement Quality Concrete*. *Materials Today: Proceedings*, 61, 400–405.
- Prabhakar, V., Alam, M., & Wankhade, R. (2024). *Evaluation of Strength and Modulus of Elasticity (Ec) of Concrete Incorporated with Recycled Aggregate and Rice Straw Ash (RSA)*. *Construction and Building Materials*, 448, 138016.
- Ramadevi, K., & Chitra, R. (2017). *Concrete Using Recycled Aggregates*. *Int. J. Civ. Eng. Technol*, 8(9), 413–419.
- Rana, A., Kalla, P., Verma, H. K., & Mohnot, J. K. (2016). *Recycling of Dimensional Stone Waste in Concrete: A Review*. *J. Clean. Prod.*, 135, 312–331.
- Ren, X., Yang, J., Chen, W., Huang, Y., Wang, G., Niu, J., & Wu, J. (2024). *Effect of Recycled Concrete Powder-Cement Composite Coating Modification on the Properties of Recycled Concrete Aggregate and its Concrete*. *Construction and Building Materials*, 444, 137860.
- Shaaban, M., Edris, W. F., Odah, E., Ezz, M. S., & Al-Sayed, A. A. K. A. (2023).

- A Green Way of Producing High Strength Concrete Utilizing Recycled Concrete.* Civ. Eng. J., 9(10), 2467–2485.
- Sree, S. R. (2021). *Use of Fly Ash in Recycled Aggregate Concrete.* 8(7), 229–235.
- U. P. Jalan, “Pengaruh Pemberian Bahan Tambah Katalis Bekas (*Spent Catalyst*) dan *Filler Slag* terhadap Campuran Beton Semen,” vol. 3.
- Vinai, R. (2016). *Development of Sustainable, Innovative and Energy-Efficient Concrete, Based on the Integration of All-Waste Materials: Sus-Con Panels for Building Applications.*
- Wang, C., Chazallon, C., Braymand, S., & Horny, P. (2024). *Thermogravimetric Analysis (TGA) for Characterization of Self-Cementation of Recycled Concrete Aggregates in Pavement.* Thermochimica Acta 733, 179680.
- Wang, Y., Liu, Y., & Wang, X. (2024). *Fatigue Damage Evolution of Modified Recycled Aggregate Concrete.* Case Studies in Construction Materials, 20, e03293.
- Wijayasundara, M., Mendis, P. & Crawford, R. H. (2017). *Methodology for the Integrated Assessment on the Use of Recycled Concrete Aggregate Replacing Natural Aggregate in Structural Concrete.* J. Clean. Prod, 166, 321–334.
- Yang, S., & Lee, H. (2017). *Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete Proportioned with Modified Equivalent Mortar Volume Method for Paving Applications.* Constr. Build. Mater, 136, 9–17.
- Zeng, Y., Guo, H., Lei, J., Hu, Y., & Yang, Z. (2024). *Study on the Mechanical Properties of Recycled Brick Coarse Aggregate Concrete Based on Finite Element Modeling.* Journal of Building Engineering 95, 110110.
- Zhu, C., Zhu, E., Wang, B., Zhang, Z., & Li, M. (2024). *Mesoscale Fracture Simulation of Recycled Aggregate Concrete Under Uniaxial Compression Based on Cohesive Zone Model.* Developments in the Built Environment 19, 100481.
- Zong, S., Chang, C., Rem, P., Gebremariam, A. T., Di Maio, F., & Lu, Y. (2025). Research on the influence of particle size distribution of high-quality recycled coarse aggregates on the mechanical properties of recycled concrete. *Journal of Construction and Building Materials*, 305, 125-135.