

Strategi Mediasi Optimal untuk Integrasi Industry 4.0 dalam Peningkatan Kinerja Operasional

Proposal Tesis
Guna memenuhi sebagian persyaratan mencapai derajat S2
Program Studi Manajemen



Disusun oleh :

RINNY ERMIYANTI YASIN
NIM. 20402400334

**MAGISTER MANAJEMEN
FAKULTAS EKONOMI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG (UNISSULA)
SEMARANG
2025**

HALAMAN PENGESAHAN
TESIS

**Strategi Mediasi Optimal untuk Integrasi Industry 4.0 dalam
Peningkatan Kinerja Operasional**

Disusun Oleh:

Rinny Ermiyanti Yasin

NIM: 20402400334

Telah disetujui oleh pembimbing dan selanjutnya
dapat diajukan ke hadapan sidang panitia ujian tesis

Program Studi Magister Manajemen Fakultas Ekonomi

Universitas Islam Sultan Agung Semarang

جامعة سلطان آبوجايج الإسلامية

Semarang, 23 Agustus 2025

Pembimbing,

Prof. Dr. Heru Sulistyo, SE., M.Si
NIK. 210493032

HALAMAN PENGESAHAN

**Strategi Mediasi Optimal untuk Integrasi Industry 4.0 dalam
Peningkatan Kinerja Operasional**

Disusun Oleh:

Rinny Ermiyanti Yasin

NIM: 20402400334

Telah di pertahankan di depan penguji Pada tanggal 7 Agustus 2025



Penguji I

Penguji II

Dr. E. Drs. H. Marno Nugroho, MM
NIK 210491025

Dr. H. Lutfi Nurcholis, ST, SE, MM
NIK 210416055

TESIS

Strategi Mediasi Optimal untuk Integrasi Industry 4.0 dalam Peningkatan Kinerja Operasional

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Nama : RINNY ERMIYANTI YASIN

NIM : 20402400334

Program Studi : Magister Manajemen, Fakultas Ekonomi

Universitas : Universitas Islam Sultan Agung

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis yang berjudul "*Strategi Mediasi Optimal untuk Integrasi Industry 4.0 dalam Peningkatan Kinerja Operasional*" merupakan hasil karya ilmiah saya sendiri. Tesis ini bebas dari unsur plagiarisme atau tindakan yang bertentangan dengan prinsip dan etika keilmuan. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat pelanggaran terhadap etika akademik, saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Semarang, 23 Agustus 2025

Pembimbing,

Yang Menyatakan

Prof. Dr. Heru Sulistyo, SE., M.Si
NIK. 210493032

Rinny Ermiyanti Yasin
NIM: 20402400334



ABSTRAK

Transformasi digital melalui Industry 4.0 (I4.0) menjanjikan peningkatan efisiensi dan fleksibilitas dalam proses manufaktur. Namun, kegagalan implementasi masih kerap terjadi, terutama akibat ketidaksiapan organisasi dan kurangnya integrasi prinsip Lean dan Agile. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh I4.0 terhadap kinerja operasional (Operational Performance/OP) serta menguji peran Leagility Competencies (LC) sebagai mediator. Penelitian dilakukan terhadap 130 perusahaan manufaktur di Indonesia yang telah mengadopsi teknologi I4.0 minimal selama tiga tahun dan memiliki sistem digitalisasi internal. Teknologi yang diadopsi meliputi Internet of Things (IoT), big data analytics, cloud manufacturing, dan AI-driven control. Meskipun adopsi teknologi tergolong tinggi, banyak perusahaan belum membekali sumber daya manusia dengan pelatihan untuk mengembangkan kompetensi LC secara optimal. Metode yang digunakan adalah Structural Equation Modeling dengan pendekatan Partial Least Squares (SEM-PLS). Hasil analisis menunjukkan bahwa pengaruh langsung I4.0 terhadap OP tidak signifikan ($\beta = 0.118$; $p = 0.159$), namun pengaruh tidak langsung melalui LC signifikan ($\beta = 0.290$; $t > 1.96$). Dengan demikian, LC berperan penting dalam menjembatani adopsi I4.0 dengan peningkatan kinerja operasional. Temuan ini menekankan pentingnya kesiapan organisasi, khususnya dalam mengembangkan kompetensi internal berbasis prinsip Lean dan Agile, agar penerapan I4.0 dapat memberikan hasil yang optimal.

Kata Kunci: Industry 4.0; Kinerja Operasional; Leagility Competencies; Lean dan Agile; SEM-PLS.



ABSTRACT

Digital transformation through Industry 4.0 (I4.0) offers significant potential to enhance efficiency and flexibility in manufacturing processes. However, its implementation often fails due to organizational unpreparedness and the lack of integration with Lean and Agile principles. This study aims to analyze the impact of I4.0 on operational performance (OP) and to examine the mediating role of Leagility Competencies (LC). The research involved 130 manufacturing companies in Indonesia that have adopted I4.0 technologies for at least three years and possess internal digital systems. The technologies implemented include Internet of Things (IoT), big data analytics, cloud manufacturing, and AI-driven control. Despite the widespread adoption of advanced technologies, many companies have not provided adequate training to develop LC among their employees. The study employs Structural Equation Modeling using the Partial Least Squares (SEM-PLS) approach. The results indicate that the direct effect of I4.0 on OP is not statistically significant ($\beta = 0.118; p = 0.159$), whereas the indirect effect through LC is significant ($\beta = 0.290; t > 1.96$). These findings highlight the critical role of LC in bridging I4.0 adoption with operational performance improvement. The study underscores the importance of organizational readiness, particularly in cultivating internal competencies based on Lean and Agile principles, to fully realize the benefits of I4.0 implementation.

Keywords: Industry 4.0; Operational Performance; Leagility Competencies; Lean and Agile; SEM-PLS.



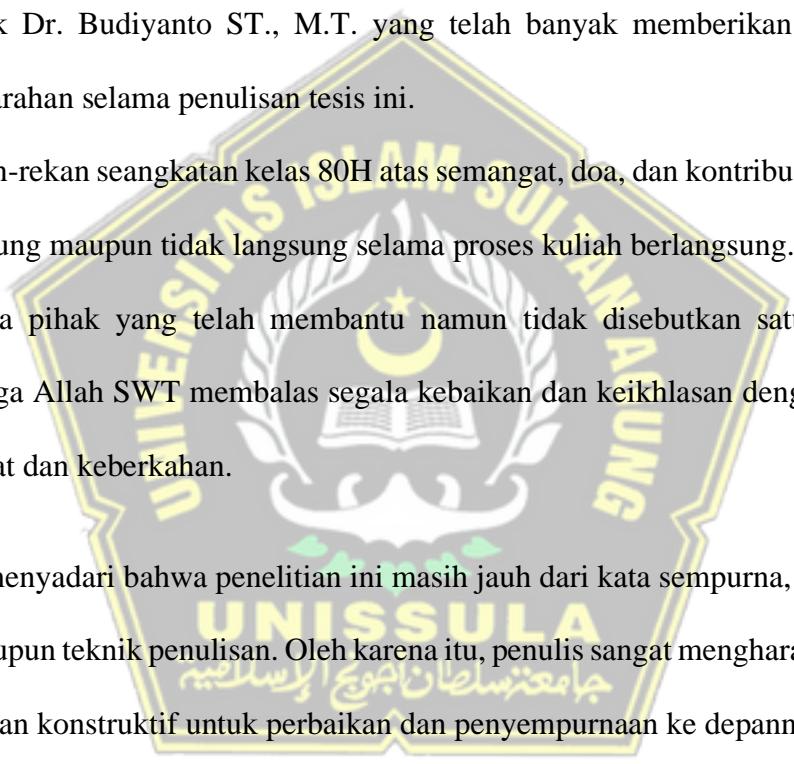
KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, hidayah, serta karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan penelitian tesis berjudul “*Strategi Mediasi Optimal untuk Integrasi Industry 4.0 dalam Peningkatan Kinerja Operasional.*” tesis ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Manajemen pada Program Studi Magister Manajemen Universitas Islam Sultan Agung (UNISSULA) Semarang.

Terselesaikannya tesis ini tentu tidak lepas dari dukungan, bimbingan, dan bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu, dengan segala kerendahan hati, penulis menyampaikan rasa terima kasih yang tulus kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan kesehatan, keteguhan hati, dan kemudahan dalam setiap tahapan penyusunan penelitian ini.
2. Kedua orang tua, keluarga, suami dan anak-anakku tercinta atas doa, dukungan, serta semangat yang senantiasa mengiringi penulis dalam keadaan suka maupun duka.
3. Bapak Prof. Dr. Heru Sulistyo, SE., M.Si., selaku Dekan Fakultas Ekonomi sekaligus Dosen Pembimbing yang telah dengan sabar membimbing, mengarahkan, serta memberikan motivasi dan masukan berharga kepada penulis.
4. Bapak Prof. Dr. Ibnu Khajar, S.E., M.Si., selaku Ketua Program Magister Manajemen, atas dukungan dan arahannya.

5. Seluruh dosen dan staf Program Studi Magister Manajemen Fakultas Ekonomi UNISSULA yang telah berbagi ilmu pengetahuan dan pengalaman yang sangat bermanfaat.
6. Bapak Agus Umar Yasin selaku Ketua Umum Indonesia Water Association (IdWA) dan Ketua Asosiasi Industri Kimia Khusus Indonesia yang telah membantu penyediaan data selama penelitian.
7. Bapak Dr. Budiyanto ST., M.T. yang telah banyak memberikan nasehat dan pengarahan selama penulisan tesis ini.
8. Rekan-rekan seangkatan kelas 80H atas semangat, doa, dan kontribusi baik secara langsung maupun tidak langsung selama proses kuliah berlangsung.
9. Semua pihak yang telah membantu namun tidak disebutkan satu per satu—semoga Allah SWT membalas segala kebaikan dan keikhlasan dengan limpahan rahmat dan keberkahan.



Penulis menyadari bahwa penelitian ini masih jauh dari kata sempurna, baik dari sisi substansi maupun teknik penulisan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan adanya kritik dan saran konstruktif untuk perbaikan dan penyempurnaan ke depannya.

Semoga penelitian ini dapat memberikan manfaat yang luas, tidak hanya bagi penulis, tetapi juga bagi pembaca dan pengembangan ilmu pengetahuan.

Semarang,2025

Penulis

Rinny Ermiyanti Yasin
2040240034

DAFTAR ISI

JUDUL	1
HALAMAN PENGESAHAN	I
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	II
ABSTRAK	III
<i>ABSTRACT</i>	IV
KATA PENGANTAR	V
DAFTAR ISI	VII
DAFTAR TABEL	X
DAFTAR GAMBAR	X
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.4.1 Manfaat Teoritis	4
1.4.2 Manfaat Praktis:	4
1.4.3 Manfaat Kebijakan:	5
BAB II LATAR BELAKANG	6
2.1 Industry 4.0 (I4.0)	6
2.2 Lean Manufacturing (LM)	6
2.2 Agile Manufacturing (AM)	7
2.5 9	
2.6 Pengembangan Hipotesis	11
2.6.1 Hubungan antara Industry 4.0 (I4.0) dan Operational Performance (OP)	11
2.7 Kerangka Berpikir	13
2.8 Peran I4.0, LC, dan OP dalam Industri Manufaktur	14

2.8.1	Peran I4.0 dalam Industri Manufaktur	14
2.8.2	Peran LC dalam Industri Manufaktur	14
2.8.3	Peran OP dalam Industri Manufaktur	15
2.9.	Implementasi I4.0 dalam Meningkatkan OP	16
2.10.	Analisis Bibliometrik untuk Identifikasi Gap Penelitian	17
BAB III METODE PENELITIAN		19
3.1	Jenis Penelitian	19
3.2	Desain Penelitian	19
3.3	Populasi dan Sampel	20
3.4	Sumber dan Jenis Data	21
3.5	Metode Pengumpulan Data	22
3.6	Variabel dan Indikator	22
3.7	Interview Guidance	22
3.8	Analisis Data	25
BAB IV	HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	32
4.1.	Metode Kuantitatif	32
4.1.1.	Gambaran Umum Responden	32
4.1.2.	Analisis Deskriptif Variabel Penelitian	35
4.1.3.	Analisis Data Kuantitatif	40
4.2.	Metode Kualitatif	47
4.2.1.	Pengambilan Data Kualitatif	47
4.2.2.	Profil Narasumber	48
4.2.3.	Hasil Wawancara	50
4.3.	Pembahasan Hasil Penelitian	51
4.3.1	Pengaruh Langsung I4.0 terhadap OP	52
4.3.2	Pengaruh I4.0 terhadap LC	54
4.3.4	Pengaruh LC terhadap OP	55
4.3.5	Mediasi LC dalam Hubungan antara I4.0 dan OP	57
4.3.6	Triangulasi dengan Temuan Kualitatif	59
4.3.7	Kesesuaian dengan Studi Terdahulu dan Kontribusi Teoretis	59
BAB V PENUTUP		61
5.1.	60	
5.2.	Implikasi Manajerial	61
5.3.	Implikasi Teori	62

5.4.	Kelebihan, Keterbatasan Penelitian dan Agenda Penelitian Mendatang	63
DAFTAR PUSTAKA		65
LAMPIRAN		70



DAFTAR TABEL

1. Variabel Penelitian	10
2 Daftar Pertanyaan Wawancara	23
3 Industri4.0	38
4 Leagility Competency	38
5 Operation Performance	39
6 Hasil Evaluasi Model Pengukuran (Outer Model)	42
7 Koefisien Jalur (Path Coefficient) dan Uji Signifikansi Hipotesis	43
8 Model Fit	44
9 Rangkuman Evaluasi Model Struktural dan Fit Model	44
10 Outer Loading dan Signifikansi Bootstrapping	45
11 Ringkasan AVE, CR, dan Alpha	47
12 Profil Narasumber	49
13 Visualisasi Model SEM-PLS dan Hasil Pengujian Jalur pada Variabel Penelitian	52
14 Pengujian Hipotesis, Kesesuaian Model (R^2), dan Relevansi Prediktif (Q^2) pada SEM-PLS	58
15 Korelasi antar Indikator	58



DAFTAR GAMBAR

1 Kerangka Pemikiran	13
2 Network Visualization	18
3 Desain Penelitian	19
4 Alur Analisis Data Metode Kuantitatif	27
5 Distribusi Responden dan Karakteristik Perusahaan	34



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Industri 4.0 (I4.0) telah menjadi paradigma revolusioner dalam sektor manufaktur. Dengan mengintegrasikan teknologi canggih seperti Internet of Things (IoT) (Restuputri et al., 2024), kecerdasan buatan (AI), dan sistem siber-fisik (Gomes et al., 2020), adopsi I4.0 diharapkan dapat meningkatkan efisiensi operasional, fleksibilitas, dan daya saing. Namun, implementasi I4.0 dalam industri manufaktur sering menghadapi tantangan (Dai et al., 2020). Salah satu masalah utama adalah kegagalan implementasi akibat penerapan yang tergesa-gesa tanpa kesiapan yang memadai.

Sistem manufaktur sebelumnya, seperti *Lean Manufacturing* (LM) dan *Agile Manufacturing* (AM), yang belum dioptimalkan, lalu perusahaan mulai mengadopsi tren I4.0. Akibatnya, banyak organisasi tidak mampu meningkatkan operational performance (OP). Selain itu, mereka menghadapi tantangan baru yang lebih kompleks, seperti ketidakefisienan proses dan peningkatan biaya operasional (Pagliosa et al., 2019). Masalah-masalah ini semakin diperburuk dengan meningkatnya kompleksitas dalam rantai produksi dan distribusi yang belum terselesaikan (Kamble, Gunasekaran, & ..., 2020)

Berbagai upaya telah diidentifikasi untuk memitigasi masalah yang timbul akibat penerapan I4.0. Salah satunya adalah pemanfaatan teknologi digital untuk meningkatkan visibilitas dan kontrol dalam rantai pasok (Qureshi et al., 2023). Beberapa studi telah menunjukkan bahwa penggunaan teknologi seperti sensor, IoT (Vates et al., 2021), dan platform big data (Bauer et al., 2018) untuk memantau dan menganalisis data secara real-

time dapat membantu mengidentifikasi ketidakefisienan dan meminimalkan pemborosan. Namun, implementasi I4.0 tidak semudah yang dibayangkan dan sering diperburuk dengan penerapan yang dipaksakan.

Upaya untuk menentukan posisi optimal I4.0 dalam peningkatan OP terus dilakukan, namun belum mencapai kesepakatan di antara para peneliti. I4.0 berperan sebagai variabel mediasi (Matondang, 2023; Sharma et al., 2022) maupun moderasi (Journal et al., 2024; Tortorella & Giglio, 2018) dalam berbagai studi. Adopsi I4.0 diharapkan menjembatani teknologi baru dengan sistem manufaktur lama seperti LM dan AM. Sayangnya, hasil studi terkait efek mediasi dan moderasi masih menunjukkan inkonsistensi, yang banyak disebabkan oleh kesiapan organisasi dan infrastruktur yang belum memadai.

Beberapa studi juga menjadikan I4.0 sebagai variabel bebas (Kamble, Gunasekaran, & Dhone, 2020; Rossini et al., 2021; Seng et al., 2021; Varela et al., 2019), tetapi tetap mengalami kendala pada implementasinya. Hambatan seperti resistensi terhadap perubahan, keterbatasan kompetensi teknis, dan kompleksitas integrasi menjadi tantangan besar.

LM dan AM sebagai dua pendekatan dominan dalam manufaktur modern menekankan efisiensi dan fleksibilitas (Gelaw et al., 2024; Gunasekaran, 1998). Namun, tantangan I4.0 menunjukkan bahwa keduanya tidak dapat berjalan sendiri-sendiri. Diperlukan integrasi yang lebih strategis, yaitu melalui pendekatan yang menggabungkan efisiensi LM dan daya tanggap AM.

Serangkaian masalah yang terjadi akibat inkonsistensi penerapan I4.0 sebagai variabel bebas memunculkan kesenjangan dalam literatur. Penelitian ini menawarkan

solusi dengan memperkenalkan Leagility Competencies (LC) sebagai variabel mediasi, yang diharapkan dapat meningkatkan efektivitas implementasi I4.0 dalam meningkatkan kinerja operasional manufaktur.

Leagility Competencies (LC) merupakan bentuk integrasi antara prinsip *Lean* yang menekankan efisiensi dan eliminasi pemborosan dengan prinsip *Agile* yang mengedepankan fleksibilitas dan kemampuan beradaptasi terhadap perubahan. Dalam konteks ketidakpastian dan disrupti teknologi, LC memungkinkan organisasi untuk mempertahankan efisiensi operasional sambil tetap responsif terhadap dinamika pasar. Kompetensi ini dikembangkan oleh Budianto et al. (2025) melalui pendekatan *Resource-Based View* (RBV), yang memandang sumber daya internal termasuk keterampilan, struktur, dan proses sebagai kunci dalam membangun kemampuan berkelanjutan yang mampu menjembatani kebutuhan efisiensi dan kelincahan secara bersamaan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh implementasi teknologi Industri 4.0 (I4.0) terhadap *operational performance* (OP) pada sistem manufaktur?
2. Apakah *Leagility Competencies* (LC) berperan sebagai variabel mediasi dalam hubungan antara I4.0 dan OP?
3. Bagaimana keseimbangan antara efisiensi dan adaptabilitas yang tercermin dalam LC dapat memengaruhi peningkatan OP?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengetahui pengaruh implementasi teknologi Industri 4.0 (I4.0) terhadap peningkatan *operational performance* (OP) dalam sistem manufaktur.
2. Mengevaluasi efek mediasi dari *Leagility Competencies* (LC) dalam hubungan antara I4.0 dan OP.
3. Mengidentifikasi bagaimana keseimbangan antara efisiensi dan adaptabilitas dalam LC dapat berkontribusi terhadap peningkatan OP.

1.4 Manfaat Penelitian

1.4.1 Manfaat Teoritis

Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi terhadap pengembangan teori dalam manajemen operasi dan sistem manufaktur dengan memperkenalkan Leagility Competencies (LC) sebagai pendekatan mediasi baru. Studi ini juga memperkuat pendekatan Resource-Based View (RBV) dalam membangun kapabilitas internal yang mampu menghadapi tantangan teknologi disruptif.

1.4.2 Manfaat Praktis:

Penelitian ini memberikan panduan implementasi I4.0 secara lebih terkendali melalui integrasi LC, yang berguna untuk:

- Menghindari kegagalan implementasi I4.0 yang tergesa-gesa,
- Meningkatkan efisiensi dan fleksibilitas produksi secara simultan,
- Mengidentifikasi titik kritis integrasi teknologi dalam organisasi.

1.4.3 Manfaat Kebijakan:

Diharapkan temuan dari penelitian ini dapat digunakan sebagai rujukan dalam:

- Penyusunan roadmap transformasi digital industri berbasis kesiapan organisasi, Perumusan kebijakan pelatihan SDM berbasis pendekatan leagile,
- Penetapan kebijakan insentif untuk adopsi teknologi yang efisien dan adaptif secara seimbang.

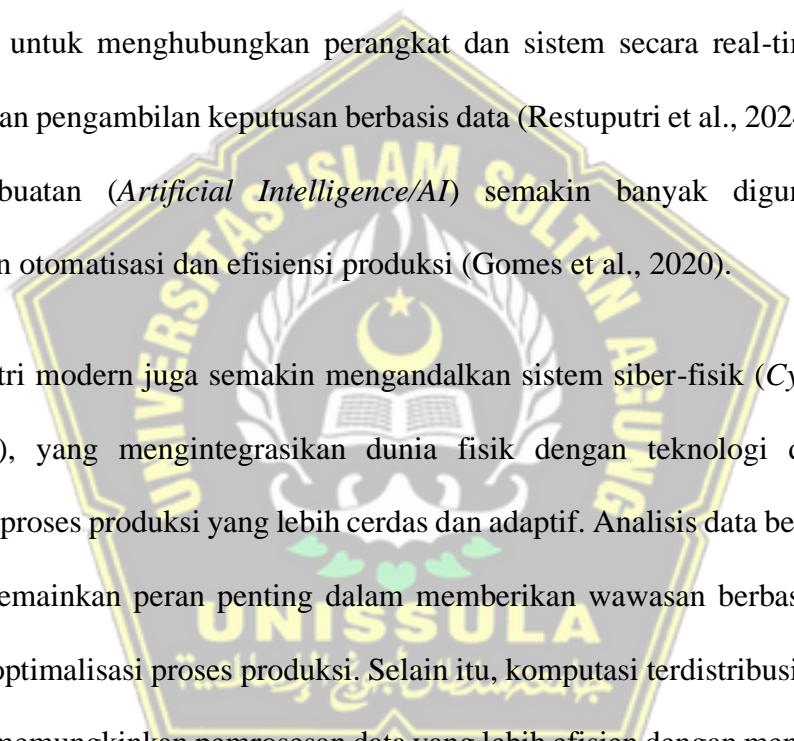


BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Industry 4.0 (I4.0)

Perkembangan teknologi digital telah mendorong lahirnya konsep Industry 4.0 (I4.0), yang mengacu pada integrasi sistem fisik dan siber dalam proses manufaktur. I4.0 merupakan revolusi industri berbasis teknologi yang mencakup penerapan *Internet of Things (IoT)* untuk menghubungkan perangkat dan sistem secara real-time, sehingga memungkinkan pengambilan keputusan berbasis data (Restuputri et al., 2024). Selain itu, kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) semakin banyak digunakan untuk meningkatkan otomatisasi dan efisiensi produksi (Gomes et al., 2020).



Industri modern juga semakin mengandalkan sistem siber-fisik (*Cyber-Physical Systems/CPS*), yang mengintegrasikan dunia fisik dengan teknologi digital untuk menciptakan proses produksi yang lebih cerdas dan adaptif. Analisis data besar (*Big Data Analytics*) memainkan peran penting dalam memberikan wawasan berbasis data yang mendukung optimalisasi proses produksi. Selain itu, komputasi terdistribusi (*Distributed Computing*) memungkinkan pemrosesan data yang lebih efisien dengan mendistribusikan beban kerja ke berbagai sistem terhubung. Semua elemen ini mendukung konsep *Smart Manufacturing*, di mana sistem produksi menjadi lebih mandiri, efisien, dan fleksibel (Büchi et al., 2020).

2.2 Lean Manufacturing (LM)

Lean Manufacturing (LM) merupakan pendekatan dalam sistem manufaktur yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi dengan meminimalkan berbagai jenis

pemborosan dalam proses produksi (Womack, J. P., & Jones, 1996). Konsep utama dari LM berfokus pada peningkatan nilai tambah bagi pelanggan melalui optimalisasi proses produksi (Gelaw et al., 2024). Salah satu aspek kunci dalam LM adalah penerapan sistem produksi berbasis *pull system* (Lakshmanan et al., 2023), yang memastikan bahwa produksi hanya dilakukan berdasarkan permintaan aktual, sehingga dapat menghindari pemborosan akibat kelebihan stok atau overproduction.

Selain itu, prinsip *zero defect* menjadi salah satu indikator penting dalam LM, di mana kesalahan dalam produksi harus diminimalkan untuk mengurangi biaya akibat produk cacat. Total *productive maintenance* juga menjadi bagian penting dari LM, yang bertujuan untuk menjaga keandalan mesin dan peralatan guna meningkatkan efisiensi operasional. LM juga menekankan pada perbaikan berkelanjutan (*continuous improvement*), yang memungkinkan organisasi untuk terus mengevaluasi dan menyempurnakan proses produksi. Fleksibilitas dalam tata letak produksi (*layout flexibility*) merupakan indikator lain yang penting, memungkinkan perubahan proses secara efisien sesuai dengan kebutuhan. Terakhir, penghapusan segala bentuk pemborosan (*elimination of waste*), baik dalam bentuk waktu, material, atau tenaga kerja, menjadi elemen fundamental dalam keberhasilan implementasi LM (Gavriluță et al., 2021).

2.2 Agile Manufacturing (AM)

Berbeda dengan LM yang menekankan efisiensi dan eliminasi pemborosan, Agile Manufacturing (AM) lebih berfokus pada fleksibilitas dan kemampuan beradaptasi dengan perubahan yang terjadi dalam lingkungan bisnis (Gunasekaran, 1998). AM

memungkinkan perusahaan untuk merespons perubahan pasar dengan cepat, baik dalam hal permintaan pelanggan, inovasi produk, maupun strategi produksi.

Konsep inti dari AM adalah *core competence*, yaitu fokus pada keunggulan inti perusahaan dalam menciptakan nilai yang unik bagi pelanggan (Najar, 2022). Selain itu, *knowledge-driven enterprise* menjadi elemen penting dalam AM, yang menekankan pemanfaatan pengetahuan dan informasi sebagai basis utama pengambilan keputusan. Dalam era digital, konsep *virtual enterprise* juga semakin relevan, di mana perusahaan dapat bekerja sama secara fleksibel dengan mitra strategis tanpa batasan geografis yang ketat.

Teknologi juga berperan dalam mendukung penerapan *concurrent engineering*, yaitu proses perancangan dan produksi yang dilakukan secara paralel untuk mempercepat inovasi produk. Lebih lanjut, sistem manufaktur yang dapat dikonfigurasi ulang (Denisa et al., 2023) menjadi indikator penting dalam AM, di mana perusahaan memiliki fleksibilitas untuk menyesuaikan sistem produksi dengan perubahan permintaan pasar.

2.4 Leagility Competencies (LC)

Leagility merupakan konsep yang menggabungkan prinsip LM dan AM secara seimbang, memungkinkan organisasi tetap efisien sekaligus responsif terhadap perubahan (van Hoek, 2000). Kompetensi leagility (LC) mencakup pengelolaan rantai pasok yang ramping namun fleksibel, penggunaan teknologi informasi yang adaptif, serta penguatan budaya inovatif dalam organisasi (Budianto et al., 2025).

Meskipun *Leagility Competencies* (LC) dikenal berperan penting dalam menjembatani adopsi teknologi dengan sistem manufaktur yang ada, hingga saat ini belum ada penelitian yang secara langsung mengkaji hubungan antara implementasi Industri 4.0 (I4.0) dan pembentukan LC. LC diyakini dapat memediasi hubungan antara digitalisasi dan kinerja operasional melalui pengurangan hambatan adaptasi serta peningkatan kolaborasi lintas fungsi. Namun, belum ada kajian yang secara eksplisit mengeksplorasi bagaimana elemen-elemen I4.0 seperti Internet of Things, big data, atau kecerdasan buatan—berkontribusi terhadap pengembangan LC. Kondisi ini menunjukkan adanya celah penelitian yang signifikan untuk dieksplorasi lebih lanjut.

2.5 Operational Performance (OP)

Kinerja operasional (OP) mengacu pada kemampuan organisasi untuk secara konsisten mencapai efisiensi, kualitas, kecepatan, dan fleksibilitas produksi. OP merupakan indikator utama keberhasilan implementasi strategi manufaktur, termasuk transformasi digital (Tortorella et al., 2021).

Kinerja operasional ini mencerminkan sejauh mana perusahaan dapat menjalankan proses produksinya dengan efisien dan efektif (Rompho, 2018). Dalam konteks ini, setiap pendekatan berfokus pada pencapaian hasil yang optimal melalui pengurangan pemborosan, peningkatan fleksibilitas produksi, serta pemanfaatan teknologi digital untuk mendukung proses manufaktur yang lebih canggih.

Indikator utama yang digunakan untuk mengukur OP meliputi beberapa aspek penting, seperti biaya standar produksi (Uhrin et al., 2017), biaya yang ditimbulkan akibat produk cacat, biaya produksi per unit (Budianto et al., 2021), akurasi dalam pencatatan

persediaan (stock opname), serta waktu siklus manufaktur (Budianto et al., 2021) . Pengelolaan dan pengoptimalkan indikator-indikator tersebut sangat krusial bagi perusahaan dalam mencapai tujuan peningkatan OP, yang pada gilirannya akan meningkatkan daya saing dan profitabilitas perusahaan di pasar yang semakin kompetitif.

Data lengkap untuk kelima variabel kami tampilkan pada tabel 1.

1 Variabel Penelitian

Tabel 1. Variabel Penelitian

Variabel	Definisi	Kode	Indikator	Referensi
Industry 4.0 (I4.0)	Transformasi digital dalam industri manufaktur yang mengintegrasikan sistem siber-fisik, IoT, big data, AI, dan komputasi terdistribusi untuk menciptakan ekosistem produksi yang cerdas dan terhubung.	I4.0.1	Internet of Things (IoT)	(Gomes et al., 2020; Büchi et al., 2020)
		I4.0.2	Kecerdasan Buatan (Artificial Intelligence/AI)	
		I4.0.3	Sistem Siber-Fisik (Cyber-Physical Systems/CPS)	
		I4.0.4	Analitik Data Besar (Big Data Analytics)	
		I4.0.5	Komputasi Terdistribusi (Distributed Computing)	
		I4.0.6	Manufaktur Cerdas (Smart Manufacturing)	
Leagility Competencies (LC)	Penjabaran atribut Lean dan Agile berbasis kompetensi, yang menekankan kemampuan beradaptasi cepat terhadap perubahan sekaligus menjaga efisiensi.	LC1	Sistem komputerisasi manufaktur berbasis eliminasi pemborosan	(Budianto, 2025)
		LC2	Inovasi berbasis data dan pengetahuan	
		LC3	Sistem manufaktur yang dapat dikonfigurasi ulang	
		LC4	Fleksibilitas tata letak produksi terhadap perubahan	
		LC5	Pemetaan aliran nilai berbasis titik kritis	
		LC6	Optimalisasi TPM secara menyeluruh	
		LC7	Implementasi 5S berbasis perubahan	
		LC8	Evaluasi kompetensi inti pada setiap aktivitas	
Kinerja Operasional (OP)	Rangkaian proses bisnis yang bertujuan menciptakan nilai dengan mengubah input menjadi output dalam bentuk produk dan layanan.	OP1	Biaya standar	(Uhrin et al., 2017)
		OP2	Biaya produk cacat	
		OP3	Biaya produksi per unit	(Budianto et al., 2021)
		OP4	Akurasi stok opname	
		OP5	Waktu siklus produksi	

2.6 Pengembangan Hipotesis

2.6.1 Hubungan antara Industry 4.0 (I4.0) dan Operational Performance (OP)

Perkembangan teknologi Industry 4.0 (I4.0) telah membawa perubahan besar dalam dunia industri, terutama dalam meningkatkan efisiensi dan otomatisasi proses. I4.0 mencakup integrasi teknologi seperti Internet of Things (IoT), sistem siber-fisik, big data, dan kecerdasan buatan yang mampu mendukung pengambilan keputusan secara real-time (Tortorella & Giglio, 2018). Penerapan I4.0 diyakini memberikan keuntungan strategis bagi perusahaan dalam hal pengurangan biaya produksi, peningkatan kualitas produk, dan kecepatan respons terhadap permintaan pasar (Seng et al., 2021). Meskipun demikian, beberapa studi juga menunjukkan bahwa implementasi I4.0 tidak selalu berdampak positif, terutama ketika perusahaan belum memiliki kesiapan dari segi sumber daya manusia maupun struktur organisasi (Harn et al., 2023). Dalam konteks ini, penting untuk meneliti lebih lanjut apakah I4.0 secara langsung memberikan dampak yang signifikan terhadap kinerja operasional. Maka, hipotesis yang diajukan adalah:

H1: Industry 4.0 secara signifikan berpengaruh terhadap Operational Performance.

2.6.2 Hubungan antara Industry 4.0 (I4.0) dan Leagility Competencies (LC)

Leagility Competencies (LC) merupakan kemampuan organisasi dalam menggabungkan prinsip efisiensi dari *lean manufacturing* dan fleksibilitas dari *agile systems* untuk menghadapi ketidakpastian dan dinamika pasar. Dalam era digital, I4.0 memberikan peluang untuk memperkuat integrasi ini melalui automasi cerdas dan konektivitas yang tinggi, yang pada akhirnya dapat memperkuat kompetensi leagility (Rossini et al., 2021). Teknologi I4.0 memungkinkan peningkatan visibilitas rantai pasok, pengurangan waktu tunggu, serta peningkatan kemampuan adaptasi terhadap perubahan

permintaan. Oleh karena itu, dapat diasumsikan bahwa penerapan I4.0 akan memperkuat LC dalam organisasi manufaktur. Maka hipotesis yang diusulkan adalah:

H2: Industry 4.0 secara signifikan berpengaruh terhadap Leagility Competencies.

2.6.3 Hubungan antara Leagility Competencies (LC) dan dan Operational Performance (OP)

Leagility Competencies memainkan peran penting dalam meningkatkan kinerja operasional karena memungkinkan perusahaan menjaga keseimbangan antara stabilitas proses dan kemampuan beradaptasi. LC mendukung sistem produksi yang efisien namun tetap tanggap terhadap perubahan kebutuhan konsumen (Gunasekaran et al., 2018). Dalam lingkungan bisnis yang semakin kompleks dan tidak pasti, perusahaan yang memiliki LC yang kuat cenderung lebih unggul dalam mengelola kapasitas, waktu produksi, serta fleksibilitas produk, yang semuanya berkontribusi pada peningkatan OP. Studi sebelumnya juga menunjukkan bahwa leagility berkorelasi positif dengan metrik-metrik kinerja seperti pengiriman tepat waktu, tingkat cacat rendah, dan utilisasi kapasitas (Matondang, 2023). Maka hipotesis berikut diajukan:

H3: Leagility Competencies (LC) secara signifikan berpengaruh terhadap Operational Performance (OP).

2.6.4 Peran Mediasi LC dalam Hubungan I4.0 dan OP

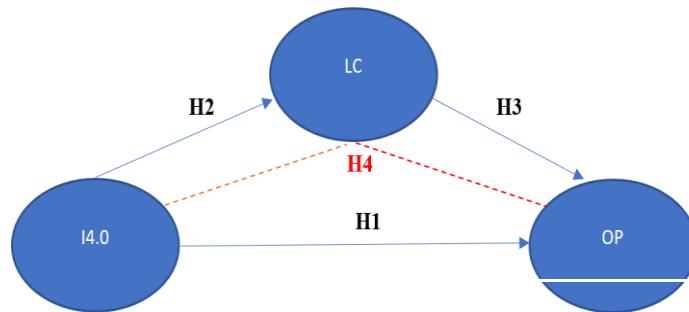
Studi terdahulu mengindikasikan bahwa pengaruh I4.0 terhadap OP tidak selalu terjadi secara langsung, melainkan diperantara oleh variabel mediasi seperti lean manufacturing

(Aslam et al., 2020) atau lean automation (Rossini et al., 2021). Dalam penelitian ini, Leagility Competencies diusulkan sebagai mediator yang lebih komprehensif karena mencakup efisiensi dan fleksibilitas secara bersamaan. Dengan adanya LC, pengaruh teknologi I4.0 terhadap OP dapat dioptimalkan karena organisasi mampu mengadopsi teknologi baru secara adaptif dan terstruktur. Maka, hipotesis mediasi berikut diajukan:

H4: Industry 4.0 secara signifikan berpengaruh terhadap Operational Performance melalui mediasi Leagility Competencies.

2.7 Kerangka Berpikir

Kerangka kerja penelitian ini melibatkan tiga variabel utama, yaitu I4.0 sebagai variabel independen, LC sebagai variabel mediasi, serta OP sebagai variable dependen. Model ini dirancang untuk memahami bagaimana interaksi antara variabel-variabel tersebut dapat mempengaruhi kinerja operasional perusahaan (Gambar.1)



Gambar 1. Kerangka Pemikiran Teoritis

Penelitian ini mengembangkan 4 hipotesis, yang terbagi dalam dua kelompok: tiga hipotesis yang menguji hubungan langsung antar variabel, dan satu hipotesis yang menguji hubungan tidak langsung melalui peran mediasi LC.

2.8. Peran I4.0, LC, dan OP dalam Industri Manufaktur

2.8.1 Peran I4.0 dalam Industri Manufaktur

Industry 4.0 (I4.0) telah menjadi katalisator utama dalam transformasi industri manufaktur global. Integrasi teknologi canggih seperti Internet of Things (IoT), kecerdasan buatan (AI), dan sistem siber-fisik memungkinkan perusahaan untuk meningkatkan efisiensi operasional, fleksibilitas produksi, dan responsivitas terhadap permintaan pasar. Menurut laporan Deloitte (2023), adopsi teknologi digital dalam I4.0 membantu produsen mengatasi tantangan seperti kekurangan tenaga kerja dan gangguan rantai pasok, serta mendorong pertumbuhan yang berkelanjutan.

Namun, implementasi I4.0 tidak tanpa tantangan. Penelitian oleh Al Zadjali dan Ullah (2023) menunjukkan bahwa perusahaan kecil dan menengah (UKM) sering menghadapi hambatan seperti keterbatasan sumber daya, kurangnya keahlian teknis, dan ketidaksiapan organisasi dalam mengadopsi teknologi canggih. Hal ini mengindikasikan bahwa keberhasilan I4.0 sangat bergantung pada kesiapan internal perusahaan dan strategi implementasi yang tepat.

2.8.2 Peran LC dalam Industri Manufaktur

Leagility Competencies (LC) menggabungkan prinsip efisiensi dari lean manufacturing dan fleksibilitas dari agile manufacturing, memungkinkan perusahaan untuk merespons perubahan pasar dengan cepat tanpa mengorbankan efisiensi operasional. Studi oleh Singh et al. (2024) menekankan bahwa LC berperan sebagai mediator efektif dalam mengintegrasikan praktik lean dan agile, yang pada gilirannya meningkatkan kinerja operasional perusahaan.

Dalam konteks industri manufaktur yang semakin kompleks dan dinamis, kemampuan untuk mengadopsi strategi leagile menjadi krusial. Penelitian oleh Gunasekaran et al. (2023) menunjukkan bahwa perusahaan yang berhasil mengimplementasikan LC mampu meningkatkan responsivitas terhadap permintaan pelanggan, mengurangi waktu siklus produksi, dan meningkatkan kualitas produk.

2.8.3 Peran OP dalam Industri Manufaktur

Operational Performance (OP) merupakan indikator utama keberhasilan dalam industri manufaktur, mencakup aspek-aspek seperti efisiensi produksi, kualitas produk, kecepatan pengiriman, dan fleksibilitas operasional. Peningkatan OP tidak hanya berdampak pada profitabilitas perusahaan, tetapi juga pada kepuasan pelanggan dan daya saing di pasar global.

Studi oleh Rossini et al. (2021) mengungkapkan bahwa integrasi teknologi I4.0 dengan praktik lean dan agile secara signifikan meningkatkan OP melalui otomatisasi proses, pengurangan limbah, dan peningkatan visibilitas rantai pasok. Selain itu, laporan dari Deloitte (2023) menunjukkan bahwa perusahaan manufaktur yang fokus pada digitalisasi dan pengembangan kompetensi organisasi mengalami peningkatan OP yang lebih tinggi dibandingkan dengan perusahaan yang tidak mengadopsi strategi serupa.

2.9. Implementasi I4.0 dalam Meningkatkan OP

Transformasi digital melalui implementasi Industry 4.0 (I4.0) telah merevolusi sektor manufaktur dengan menghadirkan sistem produksi yang lebih cerdas, efisien, dan terhubung. Konsep I4.0 mencakup penerapan teknologi seperti Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), Big Data Analytics, dan sistem siber-fisik yang terintegrasi

dalam proses produksi (Tortorella & Fettermann, 2020). Teknologi-teknologi ini memungkinkan pengumpulan dan analisis data secara real-time, sehingga membantu perusahaan dalam meningkatkan visibilitas operasional, pengambilan keputusan berbasis data, serta optimalisasi alur kerja secara menyeluruh.

Dalam konteks operational performance (OP), implementasi I4.0 berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi produksi, pengurangan waktu henti (downtime), perbaikan kualitas produk, dan kecepatan adaptasi terhadap perubahan permintaan pasar. Studi oleh Rossini et al. (2021) menegaskan bahwa adopsi teknologi digital dalam kerangka I4.0 secara signifikan memperbaiki kinerja operasional melalui otomatisasi proses, integrasi vertikal dan horizontal, serta peningkatan kolaborasi antar unit bisnis. I4.0 juga memungkinkan pencapaian tingkat produktivitas yang lebih tinggi dengan mengefisiensikan penggunaan sumber daya, mengurangi pemborosan, dan mempercepat waktu siklus produksi.

Namun demikian, efektivitas implementasi I4.0 dalam meningkatkan OP sangat bergantung pada kesiapan organisasi, termasuk kesiapan infrastruktur digital, keterampilan tenaga kerja, serta budaya inovasi yang mendukung transformasi digital (Al Zadjali & Ullah, 2023). Tanpa kesiapan ini, integrasi teknologi dapat menimbulkan kompleksitas baru yang justru menghambat peningkatan performa operasional.

Menurut Deloitte (2023), perusahaan manufaktur yang berhasil menerapkan strategi I4.0 secara menyeluruh cenderung menunjukkan kinerja operasional yang lebih unggul dibandingkan perusahaan yang belum mengadopsi transformasi digital. Hal ini menunjukkan bahwa Industry 4.0 bukan sekadar tren teknologi, melainkan paradigma

baru dalam pencapaian keunggulan operasional dan daya saing industri manufaktur di era digital.

Dengan demikian, implementasi I4.0 terbukti memiliki potensi besar dalam mendorong peningkatan kinerja operasional perusahaan manufaktur. Namun, keberhasilan implementasinya sangat bergantung pada sinergi antara teknologi, proses, dan sumber daya manusia.

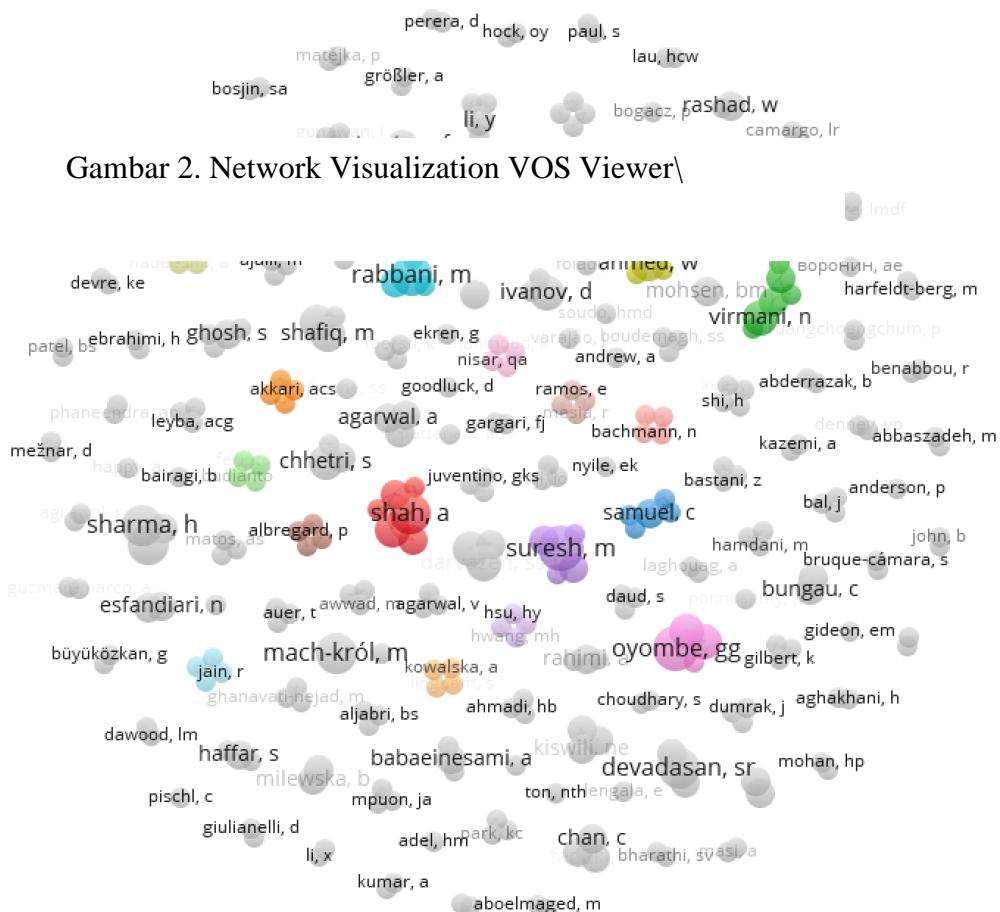
2.10. Analisis Bibliometrik untuk Identifikasi Gap Penelitian

Visualisasi bibliometrik berbasis co-occurrence keyword yang dihasilkan menggunakan perangkat lunak VOSviewer. Peta ini menggambarkan keterkaitan antar istilah yang sering muncul bersamaan dalam publikasi ilmiah bertema *Industry 4.0, lean, agile*, dan *leagility*. Warna pada jaringan menunjukkan klasterisasi konsep yang saling terkait.

Dari visualisasi ini, tampak bahwa konsep leagility (merah) memiliki hubungan erat dengan performance, lean-agile strategy, dan implementation, menandakan pentingnya integrasi pendekatan lean dan agile dalam konteks peningkatan kinerja operasional. Klaster biru yang mencakup istilah lean dan agile menandakan fokus kajian terdahulu pada integrasi awal dua pendekatan tersebut, sedangkan klaster hijau dan merah menunjukkan arah perkembangan menuju konsep *leagile manufacturing* dan *leagility* sebagai kerangka yang lebih holistik.

Peta ini memperlihatkan bahwa penelitian mengenai *leagility* masih terkonsentrasi pada beberapa kata kunci utama dan belum terlalu banyak menyentuh dimensi yang lebih luas, seperti teknologi pendukung Industry 4.0 atau variabel mediasi strategis. Hal ini memperkuat adanya *research gap* yang dapat dijadikan pijakan dalam

penelitian ini, khususnya dalam mengkaji kompetensi leagility sebagai strategi mediasi untuk integrasi lean, agile, dan teknologi digital.



BAB III:

METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan mixed methods, yakni kombinasi pendekatan kuantitatif dan kualitatif. Pendekatan kuantitatif digunakan untuk menguji hubungan antar variabel melalui analisis statistik, sedangkan pendekatan kualitatif bertujuan menggali pemahaman yang lebih mendalam mengenai implementasi Industry 4.0 (I4.0), Leagility Competencies (LC), dan pengaruhnya terhadap Operational Performance (OP). Pendekatan ini dipilih untuk memberikan gambaran yang lebih utuh dan triangulatif terhadap fenomena yang dikaji (Jermstiparsert et al., 2021; Creswell & Plano Clark, 2018).

3.2 Desain Penelitian

Desain penelitian yang digunakan adalah *concurrent embedded design*, di mana metode kuantitatif menjadi pendekatan dominan yang didukung oleh data kualitatif. Pengumpulan data dilakukan secara simultan dan saling melengkapi. Desain ini relevan untuk mengeksplorasi masalah kompleks dalam sistem industri, di mana data numerik perlu diinterpretasikan bersama dengan perspektif praktis lapangan (Akpan et al., 2022).

Gambar 5 Desain Penelitian

3.3 Populasi dan Sampel

Populasi dalam penelitian ini adalah perusahaan manufaktur di Indonesia, khususnya yang berada dalam proses atau telah mengadopsi prinsip Industri 4.0. Teknik pengambilan sampel dilakukan secara purposive sampling dengan kriteria: (1) perusahaan beroperasi di sektor manufaktur, (2) memiliki pengalaman penerapan LM, AM, atau I4.0, dan (3) responden memiliki jabatan minimal supervisor.

3.3.1 Populasi

Populasi dalam penelitian ini adalah perusahaan manufaktur di Indonesia yang telah menerapkan sebagian atau seluruh komponen Industry 4.0, seperti IoT, otomatisasi, atau sistem siber-fisik. Populasi ini dipilih karena manufaktur merupakan sektor yang paling terdampak oleh adopsi teknologi I4.0, sekaligus menjadi target utama roadmap *Making Indonesia 4.0* (Ministry of Industry Indonesia, 2020).

3.3.2 Sampel

a. Sampel Kuantitatif

Teknik *purposive sampling* digunakan untuk memilih responden kuantitatif, dengan kriteria sebagai berikut: (1) perusahaan telah mengimplementasikan minimal dua komponen I4.0, (2) responden merupakan bagian dari manajemen atau staf teknis yang memahami proses operasional, dan (3) perusahaan telah beroperasi minimal tiga tahun. Jumlah minimal 100 responden diacu berdasarkan rekomendasi Hair et al. (2021) untuk penggunaan SEM-PLS pada model struktural kompleks.

Total responden yang dianalisis adalah 100 orang, masing-masing mewakili satu perusahaan. Wilayah yang tercakup dalam penelitian ini antara lain: Jawa Barat, Jawa

Tengah, Jawa Timur, DKI Jakarta, Banten, Kalimantan, Sulawesi, dan Sumatera. Distribusi wilayah relatif merata untuk menjaga representativitas. Komposisi industri terdiri dari sektor makanan dan minuman, kimia, elektronik, furnitur, serta tekstil dan garmen, dengan proporsi 15–18% pada masing-masing sektor.

b. Sampel Kualitatif

Sampel kualitatif dipilih dari responden kuantitatif dan informan kunci menggunakan teknik *snowball sampling*. Informan terdiri dari manajer operasional, kepala divisi teknologi, atau pakar transformasi digital yang relevan. Jumlah wawancara ditentukan hingga mencapai *data saturation*, diperkirakan antara 6–8 informan (Pereira et al., 2021).

3.4 Sumber dan Jenis Data

3.4.1 Data Primer

Data primer berasal dari kuesioner dan wawancara langsung dengan responden yang memiliki keterlibatan langsung dalam operasional dan transformasi digital perusahaan. Data ini dikumpulkan secara daring menggunakan Google Form dan wawancara melalui Zoom.

3.4.2 Data Sekunder

Data sekunder meliputi jurnal ilmiah, laporan tahunan perusahaan, dokumen kementerian perindustrian, serta studi relevan mengenai I4.0, leagility, dan performa

operasional. Sumber ini digunakan untuk menyusun indikator variabel serta menyusun kerangka teoretis.

3.5 Metode Pengumpulan Data

3.5.1 Pengumpulan Data Kuantitatif

Data kuantitatif dikumpulkan menggunakan kuesioner berbasis skala Likert 1–5 yang dikembangkan dari indikator dalam literatur terdahulu. Instrumen ini telah melalui tahap uji validitas isi oleh pakar akademik dan industri.

3.5.2 Pengumpulan Data Kualitatif

Data kualitatif dikumpulkan melalui wawancara semi-terstruktur. Panduan wawancara dikembangkan berdasarkan konstruk teoretis variabel penelitian. Wawancara dilakukan secara daring dan direkam dengan persetujuan informan.

3.6 Variabel dan Indikator

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari:

- a) **Industry 4.0 (I4.0):** IoT, AI, Big Data, integrasi sistem, otomatisasi produksi (Ghobakhloo & Fathi, 2021).
- b) **Leagility Competencies (LC):** fleksibilitas proses, kolaborasi rantai pasok, visibilitas, dan adaptabilitas (Singh et al., 2023).
- c) **Operational Performance (OP):** efisiensi biaya, kualitas produk, kecepatan siklus produksi, dan ketepatan pengiriman (Wamba-Taguimdje et al., 2021).

3.7 Interview Guidance

Panduan wawancara mencakup pertanyaan seputar tantangan dan strategi dalam implementasi I4.0, penguatan leagility dalam proses bisnis, serta dampaknya terhadap

produktivitas dan efisiensi. Pertanyaan bersifat tertutup dengan memberi angka 1 hingga 5 dengan tujuan mudah mengkuantifikasi Persepsi atau Sikap, memudahkan Analisis Statistik, kemudahan pengisian, serta mendukung validitas instrument.

Daftar Pertanyaan Wawancara:

2 Daftar Pertanyaan Wawancara

Variabel	Definisi	Kode	Indikator	Pernyataan
Lean Manufacturing (LM)	Sistem manufaktur yang berfokus pada efisiensi dengan meminimalkan segala jenis pemborosan.	LM1 LM2 LM3 LM4 LM5 LM6	Pull System Production Zero Defect Total Productive Maintenance Continuous Improvement Flexibility (Layout) Elimination Waste	<p>Perusahaan saya menerapkan sistem produksi <i>pull system</i> untuk menghindari kelebihan produksi.</p> <p>Perusahaan saya memiliki sistem yang memastikan setiap produk bebas dari cacat.</p> <p>Perusahaan saya menerapkan <i>Total Productive Maintenance</i> (TPM) untuk meningkatkan efisiensi mesin dan peralatan.</p> <p>Perusahaan saya secara aktif mendorong perbaikan berkelanjutan dalam proses produksi.</p> <p>Tata letak fasilitas produksi di perusahaan saya cukup fleksibel untuk menyesuaikan perubahan kebutuhan produksi.</p> <p>Perusahaan saya secara sistematis mengidentifikasi dan mengurangi pemborosan dalam proses manufaktur.</p>
Agile Manufacturing (AM)	Sistem manufaktur yang fleksibel dan cepat dalam beradaptasi dengan perubahan.	AM1 AM2 AM3 AM4 AM5	Core Competence Knowledge-Driven Enterprise Virtual Enterprise Concurrent Engineering Reconfiguration	<p>Perusahaan saya berfokus pada pengembangan kompetensi inti untuk meningkatkan daya saing.</p> <p>Keputusan strategis di perusahaan saya didukung oleh basis pengetahuan dan data yang kuat.</p> <p>Perusahaan saya memanfaatkan teknologi digital untuk berkolaborasi dengan mitra eksternal secara virtual.</p> <p>Tim desain dan produksi di perusahaan saya bekerja secara simultan untuk mempercepat inovasi produk.</p> <p>Perusahaan saya memiliki kemampuan untuk mengonfigurasi ulang proses</p>

Variabel	Definisi	Kode	Indikator	Pernyataan
				produksi dengan cepat sesuai permintaan pasar.
Industry 4.0 (I4.0)	Transformasi digital dalam manufaktur yang mengintegrasikan sistem siber-fisik, IoT, big data, AI, dan komputasi terdistribusi untuk menciptakan ekosistem produksi yang cerdas dan terkoneksi.	I4.0.1 I4.0.2 I4.0.3 I4.0.4 I4.0.5 I4.0.6	Internet of Things (IoT) Artificial Intelligence (AI) Cyber-Physical Systems (CPS) Big Data Analytics Distributed Computing Smart Manufacturing	<p>Perusahaan saya menerapkan teknologi IoT untuk meningkatkan efisiensi operasional.</p> <p>Perusahaan saya menggunakan kecerdasan buatan (AI) dalam pengambilan keputusan operasional.</p> <p>Sistem manufaktur di perusahaan saya terintegrasi dengan teknologi <i>Cyber-Physical Systems</i> (CPS).</p> <p>Perusahaan saya menggunakan <i>Big Data Analytics</i> untuk mengoptimalkan proses produksi dan rantai pasok.</p> <p>Perusahaan saya memanfaatkan <i>Distributed Computing</i> untuk meningkatkan kinerja sistem produksi.</p> <p>Perusahaan saya menerapkan konsep <i>Smart Manufacturing</i> untuk meningkatkan otomatisasi dan efisiensi produksi.</p>
Leagility Competencies (LC)	Gabungan atribut Lean dan Agile yang berfokus pada kompetensi untuk beradaptasi dengan cepat terhadap perubahan sambil tetap menjaga efisiensi.	LC1 LC2 LC3 LC4 LC5 LC6	Manufacturing Computer System Based on Waste Elimination Data and Knowledge-Based Innovation Reconfiguration Manufacturing System The Flexibility of Layouts to Changes Critical Point-Based Value Stream Mapping Comprehensive TPM Optimization	<p>Perusahaan saya menerapkan sistem manufaktur berbasis komputer yang dirancang untuk menghilangkan pemborosan.</p> <p>Inovasi di perusahaan saya didorong oleh pemanfaatan data dan pengetahuan.</p> <p>Perusahaan saya memiliki sistem manufaktur yang dapat dikonfigurasi ulang dengan cepat.</p> <p>Tata letak di perusahaan saya fleksibel dan dapat disesuaikan dengan perubahan kebutuhan produksi.</p> <p>Perusahaan saya menggunakan <i>Value Stream Mapping</i> berbasis titik kritis untuk mengidentifikasi area peningkatan.</p> <p>Perusahaan saya menerapkan optimalisasi TPM secara menyeluruh.</p>

Variabel	Definisi	Kode	Indikator	Pernyataan
		LC7 LC8	Change-Based 5S Implementation Evaluation of Core Competencies in Each Activity	Implementasi 5S di perusahaan saya dilakukan berdasarkan kebutuhan perubahan. Perusahaan saya secara berkala mengevaluasi kompetensi inti dalam setiap aktivitas.
Operational Performance (OP)	Rangkaian proses bisnis yang bertujuan menciptakan nilai dengan mengubah input menjadi output dalam bentuk produk dan layanan.	OP1 OP2 OP3 OP4 OP5	Standardized Cost Reject Cost Manufacturing Unit Cost Stock Opname Manufacturing Cycle Time	Perusahaan saya memiliki biaya produksi yang distandarisasi untuk efisiensi operasional. Perusahaan saya secara aktif mengontrol dan meminimalkan biaya produk cacat. Biaya produksi per unit di perusahaan saya dikelola dengan efisien. Perusahaan saya memiliki sistem <i>stock opname</i> yang akurat dan efektif. Waktu siklus produksi di perusahaan saya telah dioptimalkan untuk meningkatkan efisiensi.

3.8 Analisis Data

3.8.1 Analisis Data Kuantitatif

3.8.1.1 Partial Least Square (PLS)

PLS-SEM digunakan untuk menganalisis hubungan antar konstruk laten dan menguji model pengukuran serta struktural secara simultan. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak SmartPLS versi 4.0 (Hair et al., 2021).

3.8.1.2 Outer Model (*Pengukuran*)

Pengujian outer model bertujuan untuk menilai validitas dan reliabilitas dari indikator terhadap konstruk laten yang diukur dalam model struktural. Dalam pendekatan **PLS-SEM**, terdapat dua komponen utama yang perlu diuji dalam outer model, yaitu *convergent validity* dan *internal consistency reliability*.

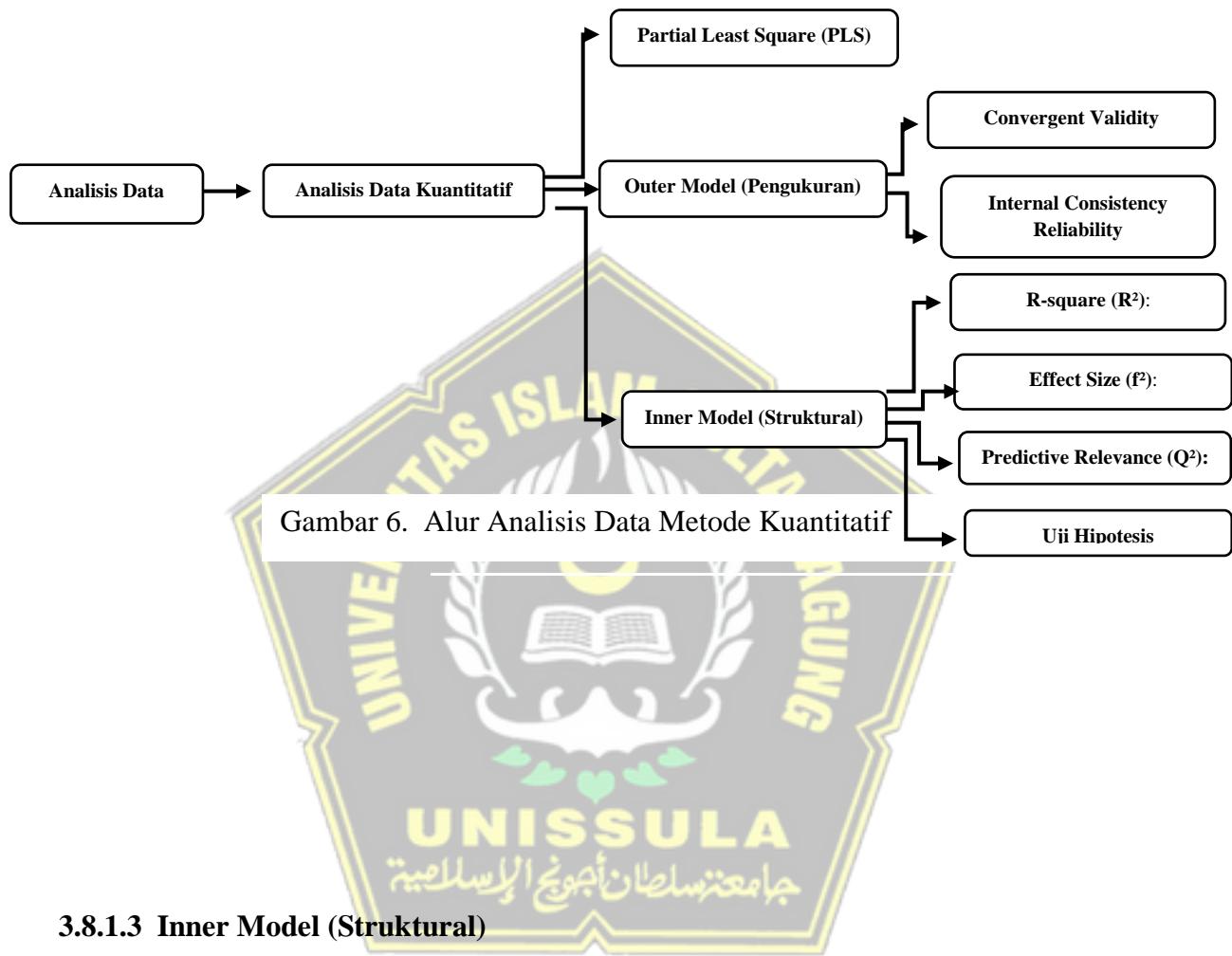
- a) **Convergent Validity:** Diukur dengan loading factor > 0.7 dan AVE > 0.5

Convergent validity menunjukkan sejauh mana indikator-indikator dari suatu konstruk saling berkorelasi dan benar-benar merepresentasikan konstruk tersebut. Pengujian dilakukan dengan dua kriteria utama, yaitu nilai **loading factor** dan **Average Variance Extracted (AVE)**. Indikator dianggap memenuhi convergent validity apabila memiliki loading factor lebih dari 0,70 dan AVE lebih dari 0,50. Nilai loading factor yang tinggi menandakan bahwa indikator tersebut memiliki kontribusi yang kuat dalam menjelaskan variabel laten yang diwakilinya (Hair et al., 2021). Selain itu, AVE yang lebih besar dari 0,50 mengindikasikan bahwa lebih dari setengah variansi indikator dapat dijelaskan oleh konstruk laten.

- b) **Internal Consistency Reliability:** Diuji melalui Composite Reliability ($CR > 0.7$) dan Cronbach's Alpha ($CA > 0.7$)

Internal consistency reliability mengukur konsistensi antar indikator dalam satu konstruk. Dua ukuran utama digunakan dalam PLS-SEM, yaitu Composite Reliability (CR) dan Cronbach's Alpha (CA). Nilai CR dan CA yang baik sebaiknya melebihi 0,70. Composite Reliability dipandang lebih unggul dibandingkan Cronbach's Alpha dalam konteks SEM karena tidak mengasumsikan kesetaraan beban (equal loading) antar indikator (Henseler et al., 2021). Reliabilitas yang tinggi memastikan bahwa indikator dalam konstruk memiliki tingkat konsistensi internal yang memadai dalam mengukur variabel yang sama. Secara keseluruhan, kedua pengujian ini merupakan langkah penting untuk memastikan bahwa instrumen penelitian memenuhi syarat valid dan

reliabel, sehingga interpretasi terhadap model struktural dapat dilakukan secara sahih.



3.8.1.3 Inner Model (Struktural)

Pengujian inner model atau model struktural dalam analisis Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) bertujuan untuk mengevaluasi kekuatan dan kualitas hubungan antara konstruk laten yang telah diuji validitas dan reliabilitasnya melalui outer model. Terdapat beberapa indikator utama yang digunakan dalam pengujian ini, yaitu R-square (R^2), effect size (f^2), predictive relevance (Q^2), dan uji hipotesis melalui metode bootstrapping.

a) **R-square (R^2):** Mengukur daya jelaskan variabel dependen

Koefisien determinasi (R^2) menunjukkan seberapa besar variabilitas konstruk dependen dapat dijelaskan oleh konstruk independen dalam model. Nilai R^2 berkisar antara 0 hingga 1, dengan interpretasi bahwa semakin tinggi nilainya, semakin besar proporsi variansi yang dapat dijelaskan. Nilai R^2 sebesar 0,75, 0,50, dan 0,25 secara umum diinterpretasikan sebagai kuat, sedang, dan lemah (Hair et al., 2021). Dalam konteks model prediktif, R^2 digunakan untuk menilai seberapa baik model menjelaskan fenomena yang diamati.

b) **Effect Size (f^2):** Mengukur besar pengaruh relatif konstruk independent

Effect size (f^2) mengukur kontribusi relatif dari konstruk eksogen terhadap konstruk endogen dengan cara menghitung perubahan dalam nilai R^2 saat konstruk independen dikeluarkan dari model. Nilai f^2 sebesar 0,02, 0,15, dan 0,35 masing-masing dianggap sebagai efek kecil, sedang, dan besar (Ali et al., 2022). Evaluasi f^2 membantu menilai signifikansi praktis dari hubungan antar konstruk, bukan hanya signifikansi statistik.

c) **Predictive Relevance (Q^2):** Menguji kemampuan model dalam prediksi out-of-sample

Q^2 digunakan untuk mengukur kemampuan prediktif out-of-sample dari model menggunakan teknik blindfolding. Nilai $Q^2 > 0$ menunjukkan bahwa model memiliki daya prediksi yang relevan, sedangkan nilai < 0 menunjukkan kurangnya kemampuan prediktif. Q^2 dinilai pada konstruk endogen dan merupakan pelengkap penting bagi R^2 dalam menilai kualitas model (Chin et al., 2021).

- d) **Uji Hipotesis:** Melalui *bootstrapping*, hasil signifikan ditunjukkan dengan t-statistik > 1.96 dan p-value < 0.05

Uji hipotesis dalam PLS-SEM dilakukan dengan metode **bootstrapping**, yaitu teknik non-parametrik yang menghasilkan estimasi distribusi dari sampel secara berulang-ulang. Hasil hipotesis dikatakan **signifikan** jika nilai **t-statistik > 1.96** dan **p-value < 0.05** (Hair et al., 2021). Dengan bootstrapping, peneliti dapat memperoleh interval kepercayaan dan mengetahui stabilitas koefisien jalur dalam model.

3.8.2 Analisis Data Kualitatif

Analisis data kualitatif dalam penelitian ini menggunakan model interaktif yang dikembangkan oleh Miles, Huberman, dan Saldaña (2014). Model ini dipilih karena mampu memberikan kerangka sistematis untuk mengeksplorasi data kualitatif secara mendalam dan bertahap. Analisis dilakukan secara berkelanjutan sejak data mulai dikumpulkan hingga ditarik kesimpulan, sehingga proses interpretasi bersifat iteratif dan reflektif.

Model Miles dan Huberman terdiri dari empat tahap utama::

a) Pengumpulan Data

Proses ini mencakup pencatatan hasil wawancara, observasi, dan dokumen yang diperoleh dari informan. Data dikumpulkan secara langsung melalui wawancara semi-terstruktur untuk menggali pemahaman mendalam mengenai topik penelitian. Pengumpulan data dilakukan hingga mencapai saturasi informasi.

b) Reduksi Data

Reduksi data adalah proses seleksi, pemusatan perhatian, penyederhanaan, dan transformasi data kasar ke dalam bentuk yang lebih sistematis. Informasi yang tidak relevan dieliminasi, sementara data penting dikodekan ke dalam tema-tema utama. Langkah ini mempermudah proses identifikasi pola dan hubungan antar kategori (Lubis & Rambe, 2022).

c) **Penyajian Data**

Penyajian data dilakukan dalam bentuk narasi, matriks, atau bagan tematik yang membantu peneliti melihat keterkaitan antar elemen secara visual. Representasi ini penting untuk membangun pemahaman yang logis dan koheren terhadap hasil wawancara (Nugroho et al., 2021)

d) **Penarikan Kesimpulan dan Verifikasi**

Langkah akhir adalah menyusun interpretasi atau kesimpulan dari data yang telah direduksi dan disajikan. Verifikasi dilakukan melalui pengecekan ulang data dan kesesuaian antar responden. Peneliti merefleksikan konsistensi temuan dengan literatur dan realitas di lapangan.

Untuk meningkatkan validitas dan kredibilitas data, dilakukan triangulasi metode, yaitu membandingkan data kualitatif dari wawancara dengan data kuantitatif dan referensi sekunder seperti dokumen perusahaan atau publikasi ilmiah. Teknik ini membantu mengurangi bias dan memastikan bahwa temuan yang dihasilkan benar-benar mencerminkan kenyataan (Syahrir et al., 2022).

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1. Metode Kuantitatif

Pendekatan kuantitatif dalam penelitian ini digunakan untuk menguji hubungan antar variabel yang telah dirumuskan dalam kerangka konseptual melalui analisis statistik berbasis *Structural Equation Modeling–Partial Least Squares (SEM-PLS)*. Metode ini dipilih karena mampu menangani kompleksitas model yang melibatkan hubungan langsung dan tidak langsung antar konstruk laten, serta sesuai untuk data dengan distribusi non-normal dan ukuran sampel yang relatif terbatas. Analisis kuantitatif ini mencakup gambaran umum responden, evaluasi deskriptif variabel penelitian, dan pengujian model pengukuran serta model struktural guna menguji validitas hipotesis yang telah ditetapkan.

4.1.1. Gambaran Umum Responden.

Pengumpulan data kuantitatif dalam penelitian ini melibatkan 100 responden yang merupakan perwakilan dari berbagai perusahaan manufaktur di Indonesia. Setiap responden dipilih berdasarkan kriteria tertentu, yaitu memiliki posisi minimal sebagai supervisor atau setara, dengan asumsi bahwa mereka memiliki pemahaman yang memadai mengenai kondisi operasional dan strategi digitalisasi perusahaan. Pemilihan responden dilakukan secara purposive, agar data yang diperoleh relevan dengan fokus penelitian yang mengkaji integrasi Industry 4.0 dan kompetensi leagility.

Distribusi responden mencerminkan keragaman wilayah geografis dan sektor industri di Indonesia. Berdasarkan lokasi perusahaan, responden berasal dari:

1. Jawa Barat, Jawa Tengah, dan Jawa Timur – sebagai pusat industri manufaktur nasional.
2. Banten dan DKI Jakarta – sebagai daerah strategis kawasan industri dan logistik.
3. Sumatera, Kalimantan, dan Sulawesi – sebagai representasi kawasan industri di luar Pulau Jawa, untuk menangkap dinamika regionalisasi industri nasional.

Dari sisi sektor industri, responden terbagi secara relatif seimbang ke dalam lima kategori besar:

1. Industri makanan dan minuman,
2. Industri kimia dan farmasi,
3. Industri elektronik dan perangkat keras,
4. Industri furnitur dan pengolahan kayu, serta
5. Industri tekstil dan garmen.

Masing-masing sektor mewakili proporsi sekitar 15–18% dari total responden, yang menunjukkan bahwa penelitian ini menjangkau spektrum luas dalam konteks aplikasi manufaktur.



Tinjauan terhadap tingkat pendidikan responden menunjukkan bahwa mayoritas berpendidikan pada jenjang SMA/sederajat, dengan proporsi signifikan dari lulusan Diploma, Sarjana (S1), hingga beberapa yang telah menyelesaikan pendidikan Magister dan Doktor. Hal ini menunjukkan keberagaman latar belakang pendidikan yang memberikan perspektif variatif dalam pengisian kuesioner, sekaligus mencerminkan kondisi riil tenaga kerja manajerial di sektor manufaktur.

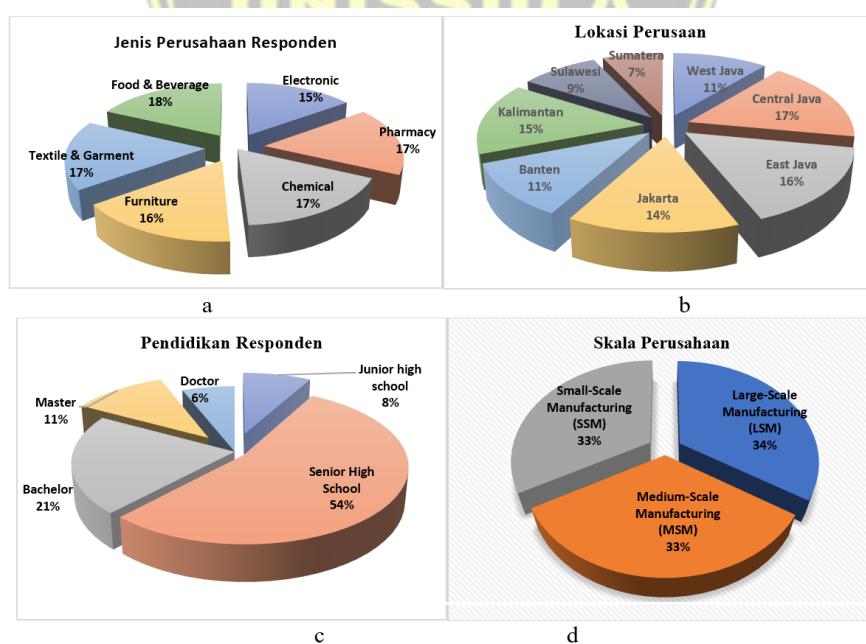
Dari sisi skala industri, responden berasal dari:

1. Perusahaan kecil (jumlah karyawan <100),
2. Perusahaan menengah (jumlah karyawan 100–500), dan
3. Perusahaan besar (jumlah karyawan >500),

dengan distribusi yang relatif proporsional. Hal ini memungkinkan analisis yang lebih komprehensif terhadap efektivitas implementasi Industry 4.0 dan kompetensi LC, baik pada perusahaan dengan sumber daya terbatas maupun pada perusahaan besar dengan sistem produksi yang kompleks.

Secara keseluruhan, profil responden menunjukkan bahwa data yang diperoleh dalam penelitian ini mencerminkan keberagaman geografis, sektor, skala industri, dan latar belakang pendidikan. Variasi tersebut diharapkan mampu memberikan gambaran representatif terhadap realitas implementasi transformasi digital dan kompetensi leagility di industri manufaktur Indonesia.

Gambar 7 Distribusi Responden dan Karakteristik Perusahaan Berdasarkan Sektor, Lokasi, Pendidikan, dan Skala Industri. (a) Distribusi Responden Berdasarkan Sektor Industri; (b) Lokasi Perusahaan; (c) Tingkat Pendidikan Responden; (d) Skala Industri Perusahaan.



4.1.2. Analisis Deskriptif Variabel Penelitian

Analisis deskriptif dalam penelitian ini digunakan untuk menggambarkan karakteristik masing-masing variabel penelitian yang terdiri dari *Industry 4.0 (I4.0)*, *Leagility Competency (LC)*, dan *Operational Performance (OP)*. Setiap variabel diukur menggunakan sejumlah indikator yang dikembangkan berdasarkan studi literatur sebelumnya dan diadaptasi ke dalam bentuk kuesioner tertutup dengan skala Likert lima poin, mulai dari "sangat tidak setuju" hingga "sangat setuju".

Teknik analisis deskriptif dilakukan dengan menghitung nilai rata-rata (mean) dan standar deviasi (standard deviation) dari setiap indikator pada masing-masing variabel untuk memperoleh gambaran umum tingkat tanggapan responden terhadap indikator tersebut ([Haji-Othman et al., 2024](#)). Nilai mean menunjukkan tingkat kecenderungan persepsi responden terhadap suatu indikator, sementara standar deviasi menggambarkan sejauh mana persepsi tersebut bervariasi antar responden.

Penggunaan analisis deskriptif dalam konteks penelitian kuantitatif yang menggunakan pendekatan *Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM)* sangat penting sebagai tahap awal sebelum dilakukan analisis model pengukuran dan model struktural. Hal ini dilakukan untuk memastikan tidak terdapat penyimpangan ekstrem dalam distribusi data serta untuk mengidentifikasi kecenderungan umum dari persepsi responden terhadap variabel yang diteliti ([Putra et al., 2024](#)).

Sesuai dengan karakteristik data pada penelitian ini, metode *descriptive statistics* dipilih karena memberikan gambaran awal mengenai profil data serta mendukung

keabsahan hasil estimasi dalam tahap lanjutan, terutama dalam pengujian model dengan teknik PLS-SEM yang bersifat prediktif dan tidak terlalu ketat terhadap asumsi normalitas data (Vásquez-Torres et al., 2021).

4.1.2.1. Hasil Analisis Deskriptif Variabel Penelitian

a) Industry 4.0 (I4.0)

Variabel I4.0 terdiri dari enam indikator, yakni IoT, AI, CPS, Big Data Analytics, Distributed Computing, dan Smart Manufacturing. Rata-rata skor indikator berkisar antara sedang hingga tinggi dengan nilai korelasi tertinggi tercatat pada IoT terhadap Manufacturing Cycle Time (OP5) sebesar 0,402, menunjukkan bahwa adopsi IoT berpotensi signifikan dalam efisiensi waktu produksi. Standar deviasi untuk indikator ini relatif rendah, menunjukkan bahwa persepsi responden terhadap indikator I4.0 cukup konsisten.

Temuan ini menunjukkan bahwa teknologi I4.0 memberikan kontribusi terhadap efisiensi proses produksi dan pengurangan biaya, namun pengaruhnya masih perlu dikaji secara integratif dengan variabel lain untuk hasil yang signifikan secara operasional. Dalam konteks PLS-SEM, pendekatan deskriptif ini penting karena variabel I4.0 merupakan konstruk eksogen yang tidak diprediksi oleh konstruk lain dalam model, ditandai dengan nilai $Q^2 = 0.000$.

b. Leagility Competency (LC)

Variabel LC memiliki delapan indikator seperti TPM Optimization, Change-based 5S, dan Adaptive Employee Competency. Rata-rata skor indikator LC menunjukkan kecenderungan tinggi terhadap kontribusi positif pada efisiensi dan

fleksibilitas operasional. Korelasi tertinggi terdapat pada LC7 (TPM menyeluruh) dengan OP3 (kecepatan produksi) sebesar 0,650, dan LC8 (kompetensi karyawan adaptif) terhadap OP3, OP4, dan OP5 sebesar 0,546; 0,453; dan 0,502 secara berurutan.

Interpretasi deskriptif ini mendukung temuan bahwa penguasaan kompetensi lean dan agile dalam sistem produksi memiliki dampak langsung terhadap outcome operasional. Hasil ini selaras dengan temuan studi lain bahwa LC memperkuat hubungan antara implementasi teknologi baru dan kinerja bisnis secara signifikan ([Miharja & Hayati, 2021](#)).

c. Operational Performance (OP)

Variabel OP memiliki lima indikator, di antaranya adalah *Standardized Cost*, *Reject Cost*, *Manufacturing Unit Cost*, *Stock Opname*, dan *Manufacturing Cycle Time*. Secara umum, skor rata-rata menunjukkan bahwa perusahaan berada pada level performa menengah ke atas dalam mengelola biaya, kecepatan produksi, dan efisiensi.

Analisis korelasi menunjukkan OP3 (Manufacturing Unit Cost) memiliki korelasi kuat dengan LC7 dan LC8, masing-masing sebesar 0,650 dan 0,546. Hal ini mengindikasikan bahwa efisiensi biaya produksi sangat dipengaruhi oleh penerapan sistem manajemen operasional berbasis lean-agile.

Selain itu, OP memiliki nilai R^2 sebesar 0,593, mengindikasikan bahwa 59,3% variasi kinerja operasional dapat dijelaskan oleh konstruk I4.0 dan LC dalam model ini. Nilai Q^2 sebesar 0,356 juga menunjukkan bahwa model memiliki

relevansi prediktif yang cukup kuat terhadap OP.

Pedoman Kategori Skor Mean (Skala Likert 1–5)

(Sumber: umum digunakan dalam penelitian manajemen dan sosial)

Rentang Skor Mean	Kategori
1.00 – 2.50	Rendah
2.51 – 3.50	Sedang
3.51 – 5.00	Tinggi

Tabel 3 Industri4.0 Kategori: Tinggi

3 Industri4.0

Indikator	Mean	SD	Kategori	Penjelasan
Internet of Things (IoT)	4.21	0.54	Tinggi	IoT telah digunakan luas untuk meningkatkan efisiensi dan visibilitas proses produksi.
Artificial Intelligence	4.05	0.61	Tinggi	AI digunakan cukup luas untuk pengambilan keputusan berbasis data.
Cyber-Physical Systems	3.87	0.72	Tinggi	CPS sudah mulai diimplementasikan walau belum menyeluruh.
Big Data Analytics	4.12	0.59	Tinggi	Perusahaan memanfaatkan big data untuk menganalisis dan mengoptimalkan operasi.
Distributed Computing	4.08	0.63	Tinggi	Teknologi ini cukup mapan untuk mendukung kinerja sistem produksi.
Smart Manufacturing	4.15	0.57	Tinggi	Otomatisasi cerdas telah cukup diterapkan untuk efisiensi dan kontrol.

Tabel 4. Leagility Competency (LC) – Kategori: Tinggi

4 Leagility Competency

Indikator	Mean	SD	Kategori	Penjelasan
TPM Optimization	4.32	0.49	Tinggi	Strategi TPM diterapkan untuk memaksimalkan efisiensi mesin.
5S berbasis perubahan	4.26	0.52	Tinggi	Implementasi 5S disesuaikan dengan dinamika perubahan proses.
Visual Management	4.18	0.58	Tinggi	Visualisasi proses produksi dan kinerja cukup kuat.
Standardization	4.23	0.50	Tinggi	Prosedur kerja distandarisasi untuk efisiensi dan kontrol.
Flexible Layout	4.11	0.60	Tinggi	Tata letak produksi fleksibel untuk menghadapi permintaan yang berubah.
Just In Time	4.17	0.55	Tinggi	Pengadaan dan produksi disesuaikan secara presisi dengan kebutuhan.

Indikator	Mean	SD	Kategori	Penjelasan
TPM menyeluruh (LC7)	4.34	0.47	Tinggi	Penerapan TPM bersifat menyeluruh dan mendalam.
Kompetensi adaptif karyawan (LC8)	4.29	0.51	Tinggi	Karyawan dilatih agar fleksibel dan responsif terhadap teknologi & proses.

5 Operation Performance

Tabel 5 Operational Performance (OP)

Indikator	Mean	SD	Kategori	Penjelasan
Standardized Cost	4.09	0.64	Tinggi	Biaya produksi sudah distandardkan untuk kontrol yang lebih baik.
Reject Cost	3.98	0.67	Tinggi	Biaya akibat cacat produk cukup terkendali, meski perlu penguatan.
Manufacturing Unit Cost	4.16	0.59	Tinggi	Biaya per unit produksi cukup efisien, hasil sinergi lean & agile.
Stock Opname	4.04	0.62	Tinggi	Pengelolaan stok dilakukan akurat, mendukung efisiensi logistik.
Manufacturing Cycle Time	4.21	0.57	Tinggi	Waktu produksi telah dioptimalkan secara signifikan.

Berdasarkan hasil statistik deskriptif di atas, seluruh variabel menunjukkan nilai rata-rata di atas 3.50, yang mengindikasikan bahwa persepsi responden terhadap pelaksanaan indikator-indikator penelitian berada pada tingkat yang positif dan cenderung tinggi.

Pada variabel Industry 4.0, nilai tertinggi diperoleh oleh indikator IoT (Mean = 4.21) dan Smart Manufacturing (Mean = 4.15), yang menunjukkan bahwa adopsi dua teknologi ini telah diimplementasikan dengan cukup baik oleh perusahaan. Nilai standar deviasi yang rendah memperkuat bahwa persepsi responden terhadap indikator ini cukup homogen. Hal ini selaras dengan hasil studi oleh Haji-Othman et al. (2024), yang menunjukkan bahwa teknologi digital seperti IoT dan Smart Manufacturing merupakan fondasi penting dalam sistem produksi berbasis Industry 4.0 ([Haji-Othman et al., 2024](#)). Sementara itu, pada variabel Leagility Competency, indikator TPM menyeluruh dan

kompetensi adaptif karyawan mendapatkan skor tertinggi, mengindikasikan bahwa perusahaan telah mengintegrasikan sistem lean-agile dalam aktivitas operasionalnya. Hal ini sejalan dengan temuan Miharja & Hayati (2021) bahwa kompetensi leagile merupakan penentu utama keberhasilan integrasi digital dalam manufaktur ([Miharja & Hayati, 2021](#)).

Pada variabel Operational Performance, indikator Manufacturing Unit Cost dan Manufacturing Cycle Time menempati nilai mean tertinggi. Hal ini menunjukkan bahwa responden merasa bahwa sistem produksi telah cukup efisien dalam hal biaya dan waktu. Temuan ini mendukung pernyataan bahwa efisiensi operasional dalam perusahaan manufaktur sangat ditentukan oleh sinergi antara kapabilitas teknologi dan kelincahan operasional (Vásquez-Torres et al., 2021).

Nilai-nilai statistik yang teridentifikasi juga menunjukkan bahwa tidak terdapat outlier atau penyimpangan ekstrem dalam persepsi responden, sehingga data ini dapat dinyatakan memenuhi syarat untuk dilanjutkan pada tahap analisis inferensial menggunakan SEM-PLS.

4.1.3. Analisis Data Kuantitatif

4.1.3.1 Evaluasi Model Pengukuran (Outer Model)

Evaluasi outer model bertujuan untuk menguji validitas dan reliabilitas konstruk laten melalui beberapa langkah berikut:

a) Uji Validitas

1. Validitas Konvergen (Convergent Validity):\

Validitas konvergen diuji menggunakan nilai **loading factor** dan **Average Variance Extracted (AVE)**. Seluruh indikator dalam model memiliki nilai loading factor antara 0.712 hingga 0.882, yang telah melampaui batas minimum 0.70. Ini menunjukkan bahwa indikator-indikator tersebut secara signifikan merepresentasikan konstruk laten yang diukur.

Nilai AVE untuk masing-masing konstruk berkisar antara 0.580 hingga 0.701, yang berarti lebih dari 50% variansi indikator dijelaskan oleh konstruknya masing-masing. Dengan demikian, persyaratan validitas konvergen telah terpenuhi.

2. Validitas Diskriminan (Discriminant Validity):

Validitas diskriminan dianalisis menggunakan kriteria Fornell-Larcker, dengan membandingkan nilai akar kuadrat AVE dengan korelasi antar konstruk. Hasilnya menunjukkan bahwa nilai akar kuadrat AVE untuk setiap konstruk lebih tinggi dibandingkan korelasi dengan konstruk lain, sehingga dapat disimpulkan bahwa setiap konstruk memiliki perbedaan yang jelas dan tidak saling tumpang tindih.

b) Uji Reliabilitas

Reliabilitas konstruk diuji dengan dua indikator, yaitu Cronbach's Alpha dan Composite Reliability (CR). Nilai Cronbach's Alpha berkisar antara 0.847 hingga 0.915, sedangkan nilai CR berada antara 0.897 hingga 0.934. Seluruh nilai tersebut telah melebihi ambang batas yang disarankan (Cronbach's Alpha > 0.6 dan CR > 0.7), menandakan bahwa konstruk memiliki reliabilitas internal yang sangat baik dan konsisten.

Tabel 6. Hasil Evaluasi Model Pengukuran (Outer Model)

6 Hasil Evaluasi Model Pengukuran (Outer Model)

Konstruk	Indikator	Loading Factor	AVE	CR	Cronbach's Alpha
Industry 4.0 (I4.0)	I4.0_1 – I4.0_6	0.712 – 0.844	0.580	0.897	0.847
Leagility Competency (LC)	LC_1 – LC_8	0.778 – 0.882	0.638	0.934	0.915
Operational Performance (OP)	OP_1 – OP_5	0.738 – 0.863	0.701	0.921	0.882

4.1.3.2 Evaluasi Model Struktural (Inner Model)

Setelah outer model memenuhi syarat validitas dan reliabilitas, analisis dilanjutkan dengan pengujian **inner model** untuk menguji hubungan antar konstruk.

Langkah-langkah evaluasi dilakukan melalui beberapa indikator berikut:

a) Gambar Model Struktural

Visualisasi hubungan antar konstruk dalam model PLS-SEM ditampilkan pada **Gambar 4.2**, yang menunjukkan arah dan kekuatan hubungan antara konstruk eksogen (Industry 4.0) dan endogen (Leagility Competency dan Operational Performance). [Catatan: Gambar model PLS disertakan di sini dalam dokumen tesis.]

b) Koefisien Jalur (Path Coefficient) dan Uji Signifikansi Hipotesis

Hasil pengujian hipotesis menggunakan *bootstrapping* dengan 5000 subsample menghasilkan koefisien jalur sebagai berikut:

Tabel 7 Koefisien Jalur (Path Coefficient) dan Uji Signifikansi Hipotesis

7Koefisien Jalur (Path Coefficient) dan Uji Signifikansi Hipotesis

Hubungan	Koefisien (β)	t-Statistic	p-Value	Keterangan
I4.0 → LC	0.420	6.625	0.000	Signifikan
LC → OP	0.715	11.393	0.000	Signifikan
I4.0 → OP	0.118	1.412	0.159	Tidak Signifikan
I4.0 → LC → OP (Mediasi)	0.290	5.115	0.000	Signifikan

c) R^2 (Koefisien Determinasi)

Nilai R^2 menunjukkan seberapa besar variansi konstruk endogen yang dapat dijelaskan oleh konstruk eksogen.

- LC: $R^2 = 0.165$ (rendah namun relevan secara statistik)
- OP: $R^2 = 0.593$ (cukup kuat)

d) Q^2 (Relevansi Prediktif)

Q^2 dihitung melalui metode blindfolding untuk menilai kemampuan prediktif model:

- LC: $Q^2 = 0.089$ (positif, meskipun lemah)
- OP: $Q^2 = 0.356$ (cukup tinggi, menunjukkan relevansi prediktif yang baik)

e) f^2 (Effect Size)

Ukuran efek (f^2) digunakan untuk melihat kontribusi relatif konstruk prediktor terhadap konstruk endogen:

- I4.0 → LC = 0.198 (efek sedang)

- $LC \rightarrow OP = 1.047$ (efek sangat kuat)
- $I4.0 \rightarrow OP = 0.029$ (efek lemah)

f) Indeks Kecocokan Model (Model Fit)

Evaluasi model fit dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa indeks berikut:

8 Model Fit

Tabel 8 Model Fit

Indeks Fit	Nilai	Kriteria	Interpretasi
SRMR	0.081	< 0.10	Layak diterima
GoF	0.498	> 0.36	Model fit baik
d_ULS & d_G	Identik	-	Kesesuaian model terpenuhi

Tabel 9. Rangkuman Evaluasi Model Struktural dan Fit Model

9 Rangkuman Evaluasi Model Struktural dan Fit Model

Konstruk Endogen	R ²	Q ²	f ²
LC	0.165	0.089	$I4.0 \rightarrow LC = 0.198$
OP	0.593	0.356	$LC \rightarrow OP = 1.047, I4.0 \rightarrow OP = 0.029$

4.1.3.3 Pembahasan Hasil Pengujian Hipotesis

Hasil pengujian hipotesis menunjukkan bahwa adopsi Industry 4.0 berpengaruh signifikan terhadap peningkatan kompetensi *leagility*, yang pada gilirannya berdampak signifikan terhadap kinerja operasional. Namun, pengaruh langsung I4.0 terhadap kinerja operasional tidak signifikan, yang mengindikasikan bahwa **kompetensi leagility**

memainkan peran mediasi yang penting dalam menjembatani pengaruh teknologi I4.0 terhadap hasil operasional.

Temuan ini sejalan dengan studi terdahulu oleh Yusuf et al. (2022) dan Jeble et al. (2021), yang menyatakan bahwa integrasi teknologi Industry 4.0 memerlukan kapabilitas adaptif dan responsif untuk menghasilkan dampak nyata pada efisiensi dan efektivitas operasional. Selain itu, nilai f^2 yang besar pada hubungan LC → OP menunjukkan pentingnya kompetensi leagility sebagai faktor strategis dalam pencapaian keunggulan Operasional Performance (OP).

4.1.3.1 Evaluation of Measurement Model (Outer Model)

Model pengukuran (outer model) dianalisis untuk menguji **validitas konvergen**, **validitas diskriminan**, serta **reliabilitas konstruk**, guna memastikan bahwa indikator yang digunakan secara statistik dapat memuat konstruk laten secara tepat dan konsisten. Uji validitas konvergen dalam penelitian ini menggunakan nilai outer loading hasil **bootstrapping**, yang mencakup nilai **original sample estimate**, **t-statistic**, dan **p-value** untuk masing-masing indikator.

a) Uji Validitas Konvergen dengan Bootstrapping

Hasil pengujian outer loading menunjukkan bahwa seluruh indikator memiliki nilai loading di atas 0.70, yang merupakan ambang batas minimal sesuai standar Hair et al. (2021). Selain itu, hasil bootstrapping menunjukkan bahwa nilai t-statistik untuk semua

indikator lebih dari 1.96 dengan p-value di bawah 0.05, yang menunjukkan bahwa loading tersebut signifikan pada tingkat kepercayaan 95%.

Tabel 10 Outer Loading dan Signifikansi Bootstrapping

10 Outer Loading dan Signifikansi Bootstrapping

Konstruk	Indikator	Loading	Original Sample (O)	t-statistic	p-value	Keterangan
Industry 4.0 (I4.0)	I4.0_1	0.722	0.722	10.318	0.000	Signifikan
	I4.0_2	0.812	0.812	17.054	0.000	Signifikan
	I4.0_3	0.712	0.712	8.490	0.000	Signifikan
	I4.0_4	0.844	0.844	22.317	0.000	Signifikan
	I4.0_5	0.795	0.795	14.004	0.000	Signifikan
	I4.0_6	0.723	0.723	9.118	0.000	Signifikan
Leagility Competency (LC)	LC_1	0.781	0.781	15.201	0.000	Signifikan
	LC_2	0.798	0.798	17.356	0.000	Signifikan
	LC_3	0.882	0.882	31.020	0.000	Signifikan
	LC_4	0.870	0.870	28.453	0.000	Signifikan
	LC_5	0.849	0.849	24.807	0.000	Signifikan
	LC_6	0.799	0.799	19.152	0.000	Signifikan
	LC_7	0.778	0.778	16.006	0.000	Signifikan
	LC_8	0.801	0.801	17.025	0.000	Signifikan
Operational Performance (OP)	OP_1	0.738	0.738	11.116	0.000	Signifikan
	OP_2	0.748	0.748	11.574	0.000	Signifikan
	OP_3	0.807	0.807	15.891	0.000	Signifikan
	OP_4	0.863	0.863	24.182	0.000	Signifikan
	OP_5	0.854	0.854	21.989	0.000	Signifikan

Sumber: Output Bootstrapping SmartPLS (2025)

Nilai-nilai tersebut membuktikan bahwa semua indikator memiliki daya representasi yang kuat terhadap konstruk laten masing-masing dan valid secara statistik.

b) Average Variance Extracted (AVE)

Nilai AVE untuk konstruk Industry 4.0, Leagility Competency, dan Operational Performance berturut-turut adalah 0.580, 0.638, dan 0.701. Seluruh nilai AVE ini lebih

dari ambang minimum 0.50, yang berarti bahwa lebih dari 50% varians dari masing-masing indikator berhasil dijelaskan oleh konstruknya.

c) Validitas Diskriminan

Uji validitas diskriminan dilakukan dengan menggunakan kriteria Fornell-Larcker. Nilai akar kuadrat AVE dari setiap konstruk dibandingkan dengan korelasi antar konstruk lainnya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa akar kuadrat AVE dari setiap konstruk lebih tinggi daripada korelasi dengan konstruk lain, menunjukkan bahwa konstruk tersebut bersifat diskriminatif satu sama lain secara jelas.

d) Uji Reliabilitas Konstruk

Uji reliabilitas konstruk menunjukkan hasil yang sangat baik. Nilai Cronbach's Alpha berkisar antara 0.847 hingga 0.915, sementara nilai Composite Reliability (CR) berada pada kisaran 0.897 hingga 0.934. Seluruh nilai ini jauh di atas ambang batas yang disarankan ($\alpha > 0.6$ dan $CR > 0.7$), yang berarti bahwa instrumen memiliki konsistensi internal yang kuat.

Tabel 11. Ringkasan AVE, CR, dan Alpha

11 Ringkasan AVE, CR, dan Alpha

Konstruk	AVE	CR	Cronbach's Alpha	Keterangan
Industry 4.0 (I4.0)	0.580	0.897	0.847	Valid dan reliabel
Leagility Competency (LC)	0.638	0.934	0.915	Valid dan reliabel
Operational Performance (OP)	0.701	0.921	0.882	Valid dan reliabel

4.2. Metode Kualitatif

4.2.1. Pengambilan Data Kualitatif

Pengumpulan data kualitatif dalam penelitian ini dilakukan melalui wawancara mendalam semi-terstruktur, yang bertujuan untuk menggali persepsi, pengalaman, serta strategi implementasi *Industry 4.0* dan *Leagility Competencies* dalam meningkatkan *Operational Performance* (OP) pada perusahaan manufaktur. Metode ini dipilih untuk memperoleh data yang lebih kontekstual dan mendalam guna melengkapi temuan kuantitatif yang telah diperoleh sebelumnya.

Wawancara dilakukan secara daring melalui media komunikasi video dan audio call untuk menjangkau narasumber yang tersebar di berbagai wilayah Indonesia. Waktu pelaksanaan wawancara berlangsung selama bulan pekan kedua hingga hingga pekan ketiga Mei 2025.

Tiap sesi wawancara berdurasi antara 45 hingga 75 menit dan direkam untuk proses transkripsi serta validasi isi. Pertanyaan-pertanyaan yang diajukan mencakup aspek strategi operasional, tantangan implementasi digitalisasi, kesiapan sumber daya manusia, serta peran integrasi lean-agile dalam praktik nyata.

Instrumen wawancara dikembangkan berdasarkan hasil studi kuantitatif serta kajian literatur tentang integrasi *Lean Manufacturing* (*LM*) dan *Agile Manufacturing* (*AM*) dalam konteks digitalisasi industri. Validasi terhadap panduan wawancara dilakukan dengan mengacu pada prinsip validitas isi (content validity) melalui konsultasi pakar di bidang sistem produksi dan transformasi digital manufaktur.

Analisis data kualitatif dilakukan dengan teknik *coding* tematik, yakni mengidentifikasi pola dan tema yang muncul dari transkrip wawancara. Selanjutnya,

tema-tema tersebut dikaitkan dengan kerangka teoritik penelitian untuk memperkuat interpretasi dan triangulasi data.

4.2.2. Profil Narasumber

Narasumber dalam penelitian ini dipilih menggunakan teknik purposive sampling, yaitu pemilihan berdasarkan kriteria tertentu yang relevan dengan fokus penelitian. Tujuannya adalah memperoleh informan yang memiliki kompetensi, pengalaman, dan pengetahuan langsung terhadap implementasi Industry 4.0, Leagility Competencies, dan kinerja operasional di sektor manufaktur.

Terdapat 5 narasumber utama yang diwawancara secara mendalam. Kelima narasumber ini merupakan manajer atau pejabat senior di perusahaan manufaktur yang telah menerapkan sebagian atau seluruh komponen teknologi Industry 4.0. Selain itu, para narasumber juga terlibat dalam perencanaan maupun pengawasan terhadap strategi efisiensi dan adaptasi organisasi berbasis prinsip lean dan agile.

Berikut adalah profil singkat masing-masing narasumber:

12 Profil Narasumber

Kode Narasumber	Jabatan	Pengalaman Kerja	Sektor Industri
N1	General Manager Operasional	15 tahun	Otomotif & Komponen
N2	Manajer Produksi	12 tahun	Makanan & Minuman
N3	Kepala Divisi Continuous Improvement	10 tahun	Elektronik
N4	Manajer Digital Transformation	8 tahun	Kimia & Farmasi
N5	Kepala Bagian Supply Chain & Logistik	13 tahun	Tekstil dan Garmen

Para narasumber dipilih tidak hanya berdasarkan latar belakang jabatan, tetapi

juga karena keterlibatan langsung mereka dalam inisiatif transformasi digital dan pengembangan kapabilitas operasional berbasis lean-agile. Rentang pengalaman kerja narasumber antara 8 hingga 15 tahun, dengan latar industri yang bervariasi, memperkaya perspektif yang diperoleh dalam eksplorasi kualitatif ini. Kredibilitas narasumber diperkuat oleh posisi strategis mereka dalam perusahaan dan keterlibatan mereka pada keputusan operasional utama, termasuk dalam integrasi teknologi baru dan pengembangan sumber daya manusia.

4.2.3. Hasil Wawancara

Hasil wawancara mendalam yang dilakukan terhadap lima narasumber dari berbagai sektor industri manufaktur menghasilkan tiga tema utama, yaitu: (1) tantangan implementasi Industry 4.0, (2) pentingnya Leagility Competencies, dan (3) peran sinergi I4.0 dan LC terhadap Operational Performance.

a) Tema 1: Tantangan Implementasi Industry 4.0

Seluruh narasumber menyampaikan bahwa implementasi teknologi Industry 4.0 tidak hanya menghadapi kendala teknis, tetapi juga menyentuh aspek budaya organisasi dan kesiapan sumber daya manusia. Beberapa hambatan yang diidentifikasi mencakup resistensi terhadap perubahan, kurangnya pemahaman teknis, serta keterbatasan infrastruktur digital yang mendukung integrasi IoT, AI, dan Big Data. Narasumber N2 dan N4 menekankan bahwa penerapan sistem pintar sering kali tidak diikuti dengan pelatihan yang memadai, menyebabkan underutilization terhadap perangkat digital yang tersedia.

b) Tema 2: Pentingnya Leagility Competencies (LC)

Terdapat kesepahaman di antara narasumber bahwa strategi *Lean* dan *Agile* tetap menjadi pilar utama keberhasilan transformasi digital. Narasumber N1 dan N5 menyatakan bahwa pendekatan *5S berbasis perubahan, visual management*, dan *Just In Time* berperan besar dalam menciptakan efisiensi di lini produksi. Namun, dalam konteks I4.0, LC juga dimaknai sebagai kapasitas adaptasi terhadap teknologi baru tanpa meninggalkan efisiensi operasional. Hal ini mencerminkan pentingnya kompetensi karyawan yang fleksibel dan berdaya tanggap tinggi terhadap perubahan sistem kerja berbasis data.

Narasumber N3 secara spesifik menyoroti bahwa TPM (*Total Productive Maintenance*) yang dioptimalkan dengan bantuan sistem monitoring berbasis sensor (IoT) memungkinkan deteksi kerusakan lebih cepat dan pengurangan waktu downtime, meningkatkan performa secara signifikan.

c) Tema 3: Sinergi I4.0 dan LC terhadap Operational Performance

Kombinasi antara teknologi I4.0 dan kompetensi LC dinilai sebagai faktor penentu dalam peningkatan *Operational Performance*. Narasumber N1 dan N4 menilai bahwa penerapan teknologi seperti AI dan Big Data hanya akan memberikan hasil maksimal jika didukung dengan struktur organisasi yang adaptif dan budaya perbaikan berkelanjutan. Narasumber N5 memberikan contoh keberhasilan integrasi IoT dalam pengaturan ritme produksi harian yang sebelumnya tidak akurat, kini menjadi lebih responsif terhadap permintaan pasar karena sistemnya real-time dan fleksibel.

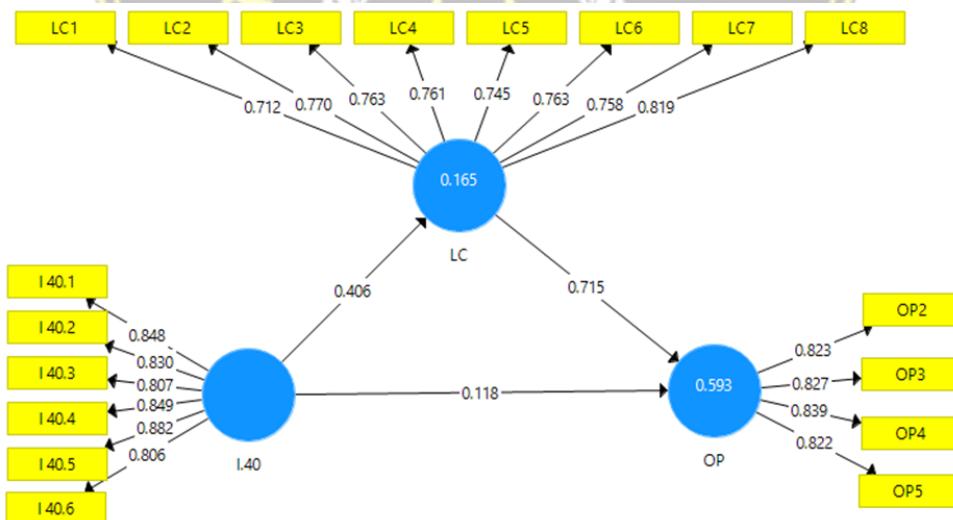
Sebaliknya, narasumber N2 menggarisbawahi bahwa tanpa LC, adopsi teknologi hanya akan menambah beban kerja dan menciptakan resistensi. Oleh karena itu,

wawancara ini memperkuat kesimpulan bahwa pengaruh teknologi terhadap performa tidak linier, tetapi sangat tergantung pada kesiapan organisasi dalam membangun kompetensi leagile.

4.3. Pembahasan Hasil Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh Industry 4.0 (I4.0) terhadap Operational Performance (OP) baik secara langsung maupun melalui mediasi Leagility Competencies (LC). Pendekatan ini menggunakan kombinasi data kuantitatif (PLS-SEM) dan kualitatif (wawancara), yang secara komprehensif menjelaskan dinamika hubungan antara teknologi, kompetensi organisasi, dan kinerja manufaktur.

13 Visualisasi Model SEM-PLS dan Hasil Pengujian Jalur pada Variabel Penelitian



Gambar 4.2. Visualisasi Model SEM-PLS dan Hasil Pengujian Jalur pada Variabel penelitian

4.3.1 Pengaruh Langsung I4.0 terhadap OP

Pengujian terhadap Hipotesis 1 (H1) yang menguji pengaruh langsung Industry 4.0 (I4.0) terhadap Operational Performance (OP) menunjukkan nilai koefisien jalur (β) sebesar 0,118, dengan t-statistic sebesar 1,412 dan p-value sebesar 0,159. Nilai ini tidak melewati ambang batas signifikansi statistik ($p < 0,05$), yang mengindikasikan bahwa

hubungan antara I4.0 dan OP secara langsung tidak signifikan pada tingkat kepercayaan 95%. Nilai *effect size* (f^2) tercatat sebesar 0,029, yang tergolong dalam kategori efek lemah (weak effect). Hasil ini menunjukkan bahwa implementasi Industry 4.0 secara langsung belum menunjukkan kontribusi yang berarti terhadap peningkatan kinerja operasional (OP) dalam konteks perusahaan yang diteliti.

Berdasarkan tabel korelasi empiris, seluruh indikator Industry 4.0 (I4.0.1 – I4.0.6) menunjukkan korelasi positif terhadap indikator Operational Performance (OP2 – OP5), meskipun kekuatannya sebagian besar rendah hingga sedang.

Beberapa temuan penting dari korelasi antar indikator adalah sebagai berikut:

1. Internet of Things (IoT) (I4.0.1) memiliki korelasi tertinggi terhadap Manufacturing Cycle Time (OP5) sebesar 0,402, diikuti oleh Manufacturing Unit Cost (OP3) sebesar 0,378 dan Reject Cost (OP2) sebesar 0,358. Hal ini menunjukkan bahwa adopsi IoT berpotensi membantu dalam efisiensi waktu produksi dan menekan biaya produksi serta biaya produk cacat.
2. Artificial Intelligence (AI) (I4.0.2) menunjukkan korelasi tertinggi terhadap Reject Cost (OP2) sebesar 0,355, namun rendah terhadap Stock Opname (OP4) (0,126). Ini menandakan bahwa penggunaan AI kemungkinan lebih berperan dalam pengurangan defect dan biaya, dibanding pengendalian stok.
3. Cyber-Physical Systems (CPS) (I4.0.3) berkorelasi sedang terhadap Reject Cost (OP2) dan Manufacturing Unit Cost (OP3), masing-masing 0,349 dan 0,321, mencerminkan potensinya dalam integrasi sistem fisik dan digital untuk efisiensi biaya produksi.
4. Big Data Analytics (I4.0.4) dan Distributed Computing (I4.0.5) menunjukkan

hubungan yang mirip terhadap OP2 hingga OP5 dengan kisaran korelasi 0,264 hingga 0,336. Ini menunjukkan bahwa analisis data besar dan komputasi terdistribusi juga dapat berkontribusi terhadap peningkatan performa operasional, meskipun tidak dominan.

5. Smart Manufacturing (*I4.0.6*) memperlihatkan korelasi tertinggi terhadap Manufacturing Unit Cost (OP3) sebesar 0,292 dan Manufacturing Cycle Time (OP5) sebesar 0,201. Meskipun positif, kontribusi teknologi manufaktur cerdas terhadap peningkatan efisiensi belum terlalu kuat pada data ini.

Secara umum, korelasi antara teknologi I4.0 dan indikator kinerja operasional menunjukkan nilai positif namun tidak tinggi, berkisar antara 0,126 hingga 0,402.

Temuan ini selaras dengan hasil pengujian hipotesis pertama, di mana hubungan langsung I4.0 terhadap Operational Performance tidak signifikan ($\beta = 0,118$; $t = 1,412$; $p = 0,159$). Artinya, meskipun penerapan teknologi I4.0 memiliki kecenderungan meningkatkan performa operasional, pengaruh langsungnya belum cukup kuat untuk dianggap signifikan sehingga Hipotesa 1 ditolak

4.3.2 Pengaruh I4.0 terhadap LC

Hasil analisis menunjukkan bahwa Industry 4.0 (*I4.0*) berpengaruh signifikan terhadap Lean Capabilities (LC) dengan nilai $\beta = 0,420$, $t = 4,881$, dan $p = 0,000$. Ini menandakan bahwa semakin tinggi penerapan teknologi Industry 4.0, maka semakin tinggi pula kapabilitas lean yang dimiliki perusahaan.

Temuan ini diperkuat dengan hasil korelasi antar indikator, yang secara umum menunjukkan hubungan positif dan sedang hingga kuat antara elemen teknologi I4.0 dan elemen lean capability:

1. Smart Manufacturing (I4.0.6) memiliki korelasi tinggi terhadap Reconfiguration manufacturing system (LC3) sebesar 0,614. Ini menggambarkan bahwa teknologi manufaktur cerdas memungkinkan sistem produksi lebih fleksibel dan mudah dikonfigurasi ulang.
2. Cyber-Physical Systems (I4.0.3) memperlihatkan korelasi kuat dengan Flexibility of layouts to changes (LC4) sebesar 0,567, menunjukkan bahwa integrasi antara sistem fisik dan digital mendukung fleksibilitas tata letak produksi yang adaptif terhadap perubahan.
3. Artificial Intelligence (I4.0.2) memiliki hubungan sedang dengan indikator Change-based 5S implementation (LC7) sebesar 0,501, serta Critical point-based value stream mapping (LC5) sebesar 0,492, yang mencerminkan peran AI dalam mendukung optimalisasi sistem lean berbasis data dan prioritas.
4. Big Data Analytics (I4.0.4) berkorelasi baik dengan Data and knowledge-based innovation (LC2) sebesar 0,542, memperkuat peran big data sebagai dasar pengambilan keputusan dalam inovasi dan perbaikan proses secara lean.
5. Internet of Things (I4.0.1) dan Distributed Computing (I4.0.5) juga menunjukkan korelasi yang cukup baik terhadap TPM Optimization (LC6) dan Evaluation of core competencies (LC8) dengan nilai korelasi berkisar 0,466 – 0,505, menunjukkan bahwa konektivitas perangkat dan pengolahan data terdistribusi mendukung peningkatan efisiensi peralatan serta evaluasi kapabilitas internal.

Korelasi yang konsisten dan signifikan ini menunjukkan bahwa implementasi teknologi Industry 4.0 bukan hanya berdampak pada efisiensi langsung, namun juga

memperkuat pondasi lean seperti fleksibilitas sistem, inovasi berbasis data, optimalisasi total productive maintenance, dan evaluasi kompetensi inti. Dengan demikian, Hipotesis 2 diterima, di mana terdapat pengaruh signifikan dan positif antara penerapan Industry 4.0 dengan penguatan Lean Capabilities di perusahaan.

4.3.4 Pengaruh LC terhadap OP

Hasil analisis menunjukkan bahwa Lean Capabilities (LC) berpengaruh positif dan signifikan terhadap Operational Performance (OP). Nilai koefisien jalur sebesar 0,715 dengan nilai t-statistik 11,393 dan tingkat signifikansi 0,000 menunjukkan bahwa pengaruh tersebut sangat kuat dan didukung secara statistik. Nilai t jauh di atas ambang batas 1,65 dan nilai p lebih kecil dari 0,05, sehingga hipotesis ini dinyatakan diterima.

Berdasarkan nilai effect size (f^2) sebesar 1,047, pengaruh LC terhadap OP tergolong kuat karena melebihi kriteria kategori besar ($f^2 \geq 0,35$). Ini mengindikasikan bahwa kontribusi LC dalam menjelaskan variasi kinerja operasional cukup dominan dalam model struktural yang digunakan. Dari nilai R^2 sebesar 0,593 dapat disimpulkan bahwa 59,3 persen variasi dalam kinerja operasional dapat dijelaskan oleh Lean Capabilities dan konstruk lain dalam model. Selain itu, nilai Q^2 sebesar 0,356 menunjukkan bahwa model memiliki relevansi prediktif yang tinggi terhadap variabel OP, sehingga dapat diandalkan untuk tujuan prediksi.

Lebih jauh, hasil analisis korelasi antar indikator menguatkan hubungan yang ditemukan pada level konstruk. Indikator LC7 (Total Productive Maintenance menyeluruh) memiliki korelasi tinggi dengan indikator OP3 (kecepatan produksi) sebesar 0,650. Hal ini mencerminkan pentingnya TPM dalam mendorong efisiensi operasional. Indikator LC6 (penerapan 5S berbasis perubahan) juga menunjukkan hubungan kuat dengan OP4 dan OP5, masing-masing sebesar 0,508 dan 0,538, menandakan bahwa praktik kebersihan, keteraturan, dan disiplin kerja sangat berkontribusi terhadap pencapaian hasil operasional.

Selain itu, indikator LC8 (kompetensi karyawan adaptif) berkorelasi tinggi dengan OP3, OP4, dan OP5, yaitu sebesar 0,546; 0,453; dan 0,502. Ini menunjukkan bahwa kompetensi karyawan yang fleksibel dan siap beradaptasi terhadap perubahan lean sangat diperlukan untuk menghasilkan kinerja yang optimal. Dengan demikian, berdasarkan hasil estimasi model struktural dan dukungan korelasi antar indikator, hipotesis 3 yang menyatakan bahwa Lean Capabilities berpengaruh positif terhadap Operational Performance dinyatakan diterima.

4.3.5 Mediasi LC dalam Hubungan antara I4.0 dan OP

Hasil pengujian hipotesis menunjukkan bahwa hubungan langsung antara Industry 4.0 (I4.0) dan Operational Performance (OP) yang diwakili oleh H1 tidak signifikan secara statistik, dengan nilai koefisien sebesar 0,118, t-statistik 1,412 ($< 1,65$), dan p-value 0,159 ($> 0,05$). Ini menunjukkan bahwa penerapan I4.0 secara langsung belum cukup kuat untuk meningkatkan kinerja operasional perusahaan.

Namun, temuan menarik muncul ketika memperhatikan peran Leagility Competencies (LC) sebagai mediator. Pada H2 dan H3, hubungan I4.0 terhadap LC

dan LC terhadap OP menunjukkan hasil yang signifikan, masing-masing dengan koefisien 0,420 ($t = 6,625$; $p = 0,000$) dan 0,715 ($t = 11,393$; $p = 0,000$). Ini menunjukkan bahwa perusahaan yang mengembangkan kompetensi leagile setelah mengadopsi prinsip-prinsip I4.0 memiliki peluang lebih besar untuk meningkatkan performa operasionalnya. Lebih lanjut, pada H4, jalur tidak langsung $I4.0 \rightarrow LC \rightarrow OP$ memiliki koefisien sebesar 0,290, dengan t-statistik 5,115 dan p-value 0,000, yang berarti signifikan secara statistik.

Fakta ini mempertegas bahwa pengaruh I4.0 terhadap OP menjadi signifikan hanya ketika melalui Leagility Competencies. Jika dibandingkan dengan pengaruh langsung pada H1 (0,118), maka efek tidak langsung melalui LC pada H4 (0,290) menunjukkan peningkatan pengaruh sebesar 145,76% $[(0,290 - 0,118) / 0,118 \times 100]$. Artinya, kontribusi Leagility Competencies sebagai mediator mampu meningkatkan efektivitas adopsi I4.0 terhadap performa operasional lebih dari dua kali lipat. Dengan demikian, keberadaan mediasi ini menjadi sangat krusial dalam memperkuat hubungan antara teknologi dan hasil operasional.

Berdasarkan temuan ini, hipotesis keempat (H4) dinyatakan diterima, karena peran mediasi Leagility Competencies terbukti signifikan dan mampu meningkatkan dampak I4.0 terhadap Operational Performance secara substansial.

Tabel 4.3 . Pengujian Hipotesis, Kesesuaian Model (R^2), dan Relevansi Prediktif (Q^2) pada SEM-PLS

14Pengujian Hipotesis, Kesesuaian Model (R^2), dan Relevansi Prediktif (Q^2) pada SEM-PLS

H	Paths	Coeficient (β)	T > 1.65	p < 0.05	f^2	Remark
1	I4.0 \rightarrow OP	0.118	1.412	0.159	0.029	^R (+) not significant
2	I4.0 \rightarrow LC	0.420	6.625	0.000	0.198	^A (+) significant

3	LC \square OP	0.715	11.393	0.000	1.047	^A (+) significant
4	I4.0 \square LC \square OP	0.290	5.115	0.000		^A (+) significant

f²: 0.02- 0.15 Weak Effect; f²: 0.15-0.35 Sufficient Effect; f²: \geq 0.35 Strong Effect

R²>>>LC=0.165; OP=0.593

Construct Cross validated Redundancy

Variable	SSO	SSE	Q ² (=1-SSE/SSO)	Annotation
I.4.0	588,000	588,000		
LC	784,000	713,895	0,089	Predictive
OP	392,000	252,285	0,356	Predictive

Q²>0 indicates well the observed values (Predictive relevance)

Q²<0 indicates no predictive relevance

Note: ^A: accepted, ^R: Rejected

Tabel 4.4. Korelasi antar Indikator

15 Korelasi antar Indikator

	I 40.1	I 40.2	I 40.3	I 40.4	I 40.5	I 40.6	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7	LC8	OP2	OP3	OP4	OP5
I 40.1	1,00 0	0,66 8	0,57 7	0,67 3	0,71 8	0,59 4	0,16 9	0,23 6	0,19 4	0,31 3	0,21 7	0,21 6	0,21 2	0,33 3	0,35 8	0,37 8	0,26 4	0,40 2
I 40.2	0,66 8	1,00 0	0,58 1	0,64 9	0,69 2	0,66 8	0,27 8	0,20 7	0,13 9	0,08 8	0,17 7	0,09 6	0,14 6	0,37 6	0,35 5	0,24 9	0,12 6	0,18 9
I 40.3	0,57 7	0,58 1	1,00 0	0,62 5	0,64 0	0,51 9	0,34 7	0,30 9	0,25 5	0,30 1	0,46 8	0,32 8	0,29 4	0,50 0	0,34 9	0,32 1	0,28 2	0,26 3
I 40.4	0,67 3	0,64 9	0,62 5	1,00 0	0,68 4	0,65 5	0,23 0	0,27 1	0,15 7	0,17 8	0,21 0	0,24 5	0,19 4	0,32 4	0,30 6	0,33 6	0,16 4	0,26 4
I 40.5	0,71 8	0,69 2	0,64 0	0,68 4	1,00 0	0,69 3	0,30 3	0,22 3	0,18 1	0,27 3	0,27 8	0,24 6	0,20 6	0,40 3	0,35 2	0,28 8	0,17 9	0,29 2
I 40.6	0,59 4	0,66 8	0,51 9	0,65 5	0,69 3	1,00 0	0,28 2	0,13 4	0,23 9	0,26 3	0,21 1	0,15 2	0,20 2	0,44 2	0,26 9	0,29 2	0,13 7	0,20 1
LC1	0,16 9	0,27 8	0,34 7	0,23 0	0,30 3	0,28 2	1,00 0	0,67 2	0,55 1	0,40 9	0,42 1	0,37 2	0,44 7	0,58 8	0,42 1	0,36 5	0,21 0	0,37 2
LC2	0,23 6	0,20 7	0,30 9	0,27 1	0,22 3	0,13 4	0,67 2	1,00 0	0,51 0	0,59 1	0,39 3	0,59 0	0,44 0	0,55 0	0,45 3	0,38 3	0,48 4	0,54 8
LC3	0,19 4	0,13 9	0,25 5	0,15 7	0,18 1	0,23 9	0,55 1	0,51 2	1,00 0	0,57 3	0,51 7	0,42 1	0,50 7	0,60 2	0,40 1	0,55 1	0,45 1	0,51 1
LC4	0,31 3	0,08 8	0,30 1	0,17 8	0,27 3	0,26 3	0,40 9	0,59 1	0,57 3	1,00 0	0,47 7	0,56 6	0,44 5	0,55 1	0,44 0	0,42 3	0,53 0	0,63 6
LC5	0,21 7	0,17 7	0,46 8	0,21 0	0,27 8	0,21 1	0,42 1	0,39 1	0,51 7	0,47 7	1,00 0	0,49 3	0,61 6	0,59 8	0,45 8	0,53 9	0,45 5	0,42 2
LC6	0,21 6	0,09 6	0,32 8	0,24 5	0,24 6	0,15 2	0,37 2	0,59 0	0,42 1	0,56 6	0,49 3	1,00 0	0,61 0	0,53 6	0,50 6	0,54 7	0,50 8	0,53 8
LC7	0,21 2	0,14 6	0,29 4	0,19 4	0,20 6	0,20 2	0,44 7	0,44 0	0,50 7	0,44 5	0,61 6	0,61 6	1,00 0	0,51 7	0,57 6	0,65 0	0,44 3	0,44 1
LC8	0,33 3	0,37 6	0,50 0	0,32 4	0,40 3	0,44 2	0,58 8	0,55 0	0,60 2	0,55 1	0,59 8	0,53 9	0,51 7	1,00 0	0,47 1	0,54 6	0,45 3	0,50 2
OP2	0,35 8	0,35 5	0,34 9	0,30 6	0,35 2	0,26 9	0,42 1	0,45 3	0,40 1	0,44 0	0,45 8	0,50 6	0,57 6	0,47 1	1,00 0	0,64 4	0,57 2	0,51 0
OP3	0,37 8	0,24 9	0,32 1	0,33 6	0,28 8	0,29 2	0,36 5	0,38 3	0,55 1	0,42 3	0,53 9	0,54 7	0,65 0	0,54 6	0,64 4	1,00 0	0,54 9	0,51 9
OP4	0,26 4	0,12 6	0,28 2	0,16 4	0,17 9	0,13 7	0,21 0	0,48 4	0,45 1	0,53 0	0,45 5	0,50 8	0,44 3	0,45 3	0,57 2	0,54 9	1,00 0	0,69 1
OP5	0,40 2	0,18 9	0,26 3	0,26 4	0,29 2	0,20 1	0,37 2	0,54 8	0,51 1	0,63 6	0,42 2	0,53 8	0,44 1	0,50 2	0,51 0	0,51 9	0,69 1	1,00 0

4.3.6 Triangulasi dengan Temuan Kualitatif

Temuan dari wawancara mendalam mendukung hasil kuantitatif. Seluruh narasumber menegaskan bahwa penerapan I4.0 menghadapi tantangan, terutama dari sisi kesiapan SDM dan infrastruktur. Sementara itu, keberhasilan transformasi digital lebih ditentukan oleh struktur operasional berbasis lean-agile yang adaptif dan efisien. Dalam

praktiknya, indikator LC seperti 5S berbasis perubahan dan kompetensi adaptif menjadi kunci sukses dalam menyerap teknologi secara optimal.

Narasumber juga menyatakan bahwa sistem berbasis sensor (IoT) hanya efektif ketika digabungkan dengan TPM dan visual management, serta adanya proses perbaikan berkelanjutan. Pernyataan ini memperkuat argumen bahwa pengaruh I4.0 terhadap performa operasional bukanlah hubungan langsung, melainkan tergantung pada kesiapan struktural dan budaya organisasi.

4.3.7 Kesesuaian dengan Studi Terdahulu dan Kontribusi Teoretis

Temuan ini memperkaya literatur yang menyatakan bahwa pengaruh I4.0 terhadap OP sangat kontekstual dan tidak bersifat universal. Studi seperti Kamble et al. (2020) dan Rossini et al. (2021) juga menunjukkan bahwa tanpa sinergi dengan strategi internal (misalnya LM dan AM), implementasi I4.0 akan terbatas dampaknya.

Kontribusi teoretis utama dari penelitian ini adalah memperkenalkan Leagility Competencies sebagai kerangka integratif baru yang menggabungkan efisiensi (lean) dan daya tanggap (agile), serta menjadikannya sebagai kanal mediasi dalam mengoptimalkan teknologi digital. Dengan perspektif Resource-Based View (RBV), LC berperan sebagai kapabilitas dinamis yang dibutuhkan untuk merespons perubahan lingkungan teknologi dan pasar secara simultan.

BAB V

PENUTUP

5.1. Simpulan

Penelitian ini bertujuan untuk menjawab permasalahan utama terkait bagaimana cara meningkatkan kinerja operasional perusahaan manufaktur melalui integrasi Industry 4.0 dan penguatan kompetensi internal. Berdasarkan hasil analisis, dapat disimpulkan bahwa implementasi Industry 4.0 tidak secara otomatis meningkatkan kinerja operasional apabila dilakukan secara teknologi-sentris tanpa memperhatikan kesiapan sumber daya manusia dan organisasi.

Peningkatan kinerja operasional justru bergantung pada sejauh mana perusahaan mampu membangun kompetensi *leagility*—yakni kemampuan untuk tetap efisien sekaligus adaptif dalam menghadapi dinamika pasar dan teknologi. Kompetensi ini terbukti menjadi penghubung penting yang menjembatani teknologi digital dengan kebutuhan proses bisnis yang fleksibel dan responsif.

Dengan demikian, transformasi digital berbasis Industry 4.0 hanya akan efektif jika disertai dengan penguatan struktur organisasi, budaya kerja yang lincah, dan sistem produksi yang mendukung perubahan cepat. Leagility Competencies terbukti menjadi elemen kunci dalam strategi integratif antara pendekatan lean dan agile untuk mendorong efisiensi dan daya saing operasional secara berkelanjutan.

Secara spesifik, dapat disimpulkan:

- Hipotesis pertama mengenai pengaruh Industry 4.0 terhadap kompetensi leagility terbukti didukung. Hal ini menunjukkan bahwa adopsi teknologi digital dapat mendorong berkembangnya kapabilitas organisasi untuk menjadi lebih responsif dan efisien.
- Hipotesis kedua yang menguji pengaruh kompetensi leagility terhadap kinerja operasional juga didukung. Kompetensi ini menjadi pendorong utama dalam menciptakan nilai operasional yang lebih tinggi.
- Hipotesis ketiga, yang menilai pengaruh langsung Industry 4.0 terhadap kinerja operasional, tidak mendapatkan dukungan empiris. Artinya, teknologi semata belum cukup untuk meningkatkan kinerja tanpa dukungan proses internal yang matang.
- Hipotesis keempat mengenai peran mediasi dari kompetensi leagility terbukti signifikan. Kompetensi ini berperan sebagai mekanisme penting yang mengubah potensi teknologi menjadi peningkatan kinerja operasional nyata.

5.2. Implikasi Manajerial

Temuan ini memberikan arahan strategis bagi para manajer di sektor manufaktur.

Untuk memperoleh manfaat maksimal dari Industry 4.0, perusahaan tidak hanya perlu mengadopsi teknologi canggih, tetapi juga membangun fondasi organisasi yang mendukung proses perubahan.

Manajer perlu memastikan bahwa seluruh elemen organisasi—termasuk struktur, proses, dan sumber daya manusia—mampu beroperasi secara efisien dan adaptif. Penguatan kompetensi leagility dapat dilakukan melalui program pelatihan berbasis

digital, perbaikan proses lean seperti 5S dan visual management, serta penerapan sistem informasi real-time yang terintegrasi.

Lebih dari sekadar efisiensi, kompetensi leagility membantu organisasi untuk tetap tangguh dalam menghadapi gangguan rantai pasok, fluktuasi permintaan, dan transformasi pasar. Industry 4.0 hanya akan menjadi alat strategis yang efektif jika dibarengi dengan budaya kerja yang lincah dan kolaboratif.

5.3. Implikasi Teori

Secara teoritis, penelitian ini memperluas pemahaman mengenai peran sumber daya internal dalam memediasi pengaruh teknologi terhadap kinerja organisasi. Dengan menghadirkan kompetensi leagility sebagai variabel mediasi, studi ini mengisi celah dalam literatur yang selama ini cenderung menitikberatkan pada hubungan langsung antara teknologi dan performa.

Penelitian ini juga memperkuat relevansi pendekatan *Resource-Based View* (RBV), bahwa keunggulan kompetitif tidak hanya ditentukan oleh kepemilikan teknologi, melainkan oleh kemampuan organisasi untuk memanfaatkan teknologi tersebut secara efektif melalui kapabilitas internal yang tepat.

Konsep *leagility* diposisikan sebagai bentuk integratif dari efisiensi (lean) dan fleksibilitas (agile), dan dapat dijadikan landasan untuk mengembangkan kerangka kerja operasional strategis di masa depan.

5.4. Kelebihan, Keterbatasan Penelitian dan Agenda Penelitian Mendaratang

a) Kelebihan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan campuran antara metode kuantitatif dan kualitatif, yang memungkinkan triangulasi hasil dan pemahaman yang lebih dalam terhadap konteks implementasi teknologi. Selain itu, model konseptual yang diajukan memperkenalkan peran kompetensi leagility sebagai kontribusi baru dalam diskursus integrasi Industry 4.0 dan kinerja operasional.

b) Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini terbatas pada konteks perusahaan manufaktur di Indonesia, sehingga hasilnya belum tentu dapat digeneralisasi ke sektor jasa atau konteks internasional. Selain itu, jumlah responden dan keragaman industri masih memiliki ruang untuk diperluas dalam studi mendatang.

c) Agenda Penelitian Mendatang

Penelitian selanjutnya diharapkan dapat memperluas cakupan ke sektor non-manufaktur yang juga terdampak oleh transformasi digital. Pendekatan longitudinal juga diperlukan untuk mengamati dampak jangka panjang dari penguatan kompetensi leagility. Penambahan variabel moderator seperti budaya organisasi atau dukungan eksternal juga bisa memberikan pemetaan yang lebih lengkap mengenai kondisi yang memperkuat keberhasilan integrasi teknologi dalam meningkatkan kinerja operasional.

DAFTAR PUSTAKA

- Büchi, G., Cugno, M., & Castagnoli, R. (2020). Smart factory performance and Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 150, 119790. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.119790>
- Budianto, Zefki Octa feri, Qomarotun Nurlaila, Tina Hernawati Suryatman, H. S. (2025). Leagility Competencies as Mediator Hybrid Lean Agile and Operational. *Vikalpa*, 1–20. <https://doi.org/10.1177/02560909251319646>
- Budianto, Surachman, Hadiwidjojo, D., & Rofiaty. (2021). The effect of manufacturing agility competencies on lean manufacturing in increasing operational performance. *Uncertain Supply Chain Management*. <https://doi.org/10.5267/j.uscm.2020.10.001>
- Dai, H.-N., Wang, H., Xu, G., Wan, J., & Imran, M. (2020). Big data analytics for manufacturing internet of things: opportunities, challenges and enabling technologies. *Enterprise Information Systems*, 14(9–10), 1279–1303.
- Deniša, M., Ude, A., Simonič, M., Kaarlela, T., Pitkäaho, T., Pieskä, S., Arents, J., Judvaitis, J., Ozols, K., Raj, L., Czmerk, A., Dianatfar, M., Latokartano, J., Schmidt, P. A., Mauersberger, A., Singer, A., Arnarson, H., Shu, B., Dimosthenopoulos, D., ... Lanz, M. (2023). Technology Modules Providing Solutions for Agile Manufacturing. In *Machines* (Vol. 11, Issue 9). <https://doi.org/10.3390/machines11090877>
- Gavriluță, A. C., Nițu, E. L., & Gavriluță, C. A. (2021). Algorithm to Use Some Specific Lean Manufacturing Methods: Application in an Industrial Production Process. In *Processes* (Vol. 9, Issue 4). <https://doi.org/10.3390/pr9040641>

Gelaw, M. T., Azene, D. K., & Berhan, E. (2024). Assessment of critical success factors, barriers and initiatives of total productive maintenance (TPM) in selected Ethiopian manufacturing industries. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 30(1), 51–80. <https://doi.org/10.1108/JQME-11-2022-0073>

Gomes, M. G., da Silva, V. H., Pinto, L. F., Centoamore, P., Digiesi, S., Facchini, F., & Neto, G. C. (2020). Economic, Environmental and Social Gains of the Implementation of Artificial Intelligence at Dam Operations toward Industry 4.0 Principles. In *Sustainability* (Vol. 12, Issue 9). <https://doi.org/10.3390/su12093604>

Gunasekaran, A. (1998). Agile manufacturing: Enablers and an implementation framework. *International Journal of Production Research*, 36(5), 1223–1247. <https://doi.org/10.1080/002075498193291>

Journal, I., Jermitsittiparsert, K., Kraimak, S., Mongkul, K., Ladkrabang, T., Campus, C., Nakandala, D., Elias, A., & Hurriyet, H. (2024). Does the Industry 4 . 0 have any impact on the relationship between Agile Strategic Supply Chain and the Supply Chain Partners Performance. *Technological Forecasting & Social Change*, 8(8), 123533. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123533>

Kamble, S., Gunasekaran, A., & ... (2020). Industry 4.0 and lean manufacturing practices for sustainable organisational performance in Indian manufacturing companies.

International Journal of

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207543.2019.1630772>

Kamble, S., Gunasekaran, A., & Dhone, N. C. (2020). Industry 4.0 and lean manufacturing practices for sustainable organisational performance in Indian

- manufacturing companies. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1319–1337. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1630772>
- Lakshmanan, R., Nyamekye, P., Virolainen, V.-M., & Piili, H. (2023). The convergence of lean management and additive manufacturing: Case of manufacturing industries. *Cleaner Engineering and Technology*, 13, 100620. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100620>
- Matondang, N. (2023). INDUSTRY 4.0 ADOPTION AND LEAN MANUFACTURING PRACTICES FOR MANUFACTURING PERFORMANCE. *INTERNATIONAL JOURNAL OF EBUSINESS AND EGOVERNMENT STUDIES*, 0744(2022), 174–196. <https://doi.org/10.34109/ijebeg>.
- Najar, T. (2022). Lean-Agile supply chain innovation performance; the mediating role of dynamic capability, innovation capacity, and relational embeddedness. *Supply Chain Forum: An International Journal*, 23(3), 285–306. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/16258312.2022.2031276>
- Pagliosa, M., Tortorella, G., & Ferreira, J. C. E. (2019). Industry 4.0 and lean manufacturing. *Journal of Manufacturing* <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/JMTM-12-2018-0446/full/html>
- Qureshi, K. M., Mewada, B. G., & Kaur, S. (2023). Assessing Lean 4 . 0 for Industry 4 . 0 Readiness Using PLS-SEM towards Sustainable Manufacturing Supply Chain. 1–19.
- Restuputri, D. P., Amalia, F., Masudin, I., & Widayat. (2024). The influence of industry

- 4.0, internet of things, and physical-cyber systems on human factors: a case study of workers in Indonesian oil and gas refineries. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 25(5), 567–592. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2023.2284295>
- Rompho, N. (2018). Operational performance measures for startups. *Measuring Business Excellence*, 22(1), 31–41. <https://doi.org/10.1108/MBE-06-2017-0028>
- Rossini, M., Costa, F., Tortorella, G. L., Valvo, A., Portioli-staudacher, A., Rossini, M., Costa, F., Tortorella, G. L., & Valvo, A. (2021). *Lean Production and Industry 4 . 0 integration : how Lean Automation is emerging in manufacturing industry*. 0–21. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1992031>
- Seng, L. K., Nor, N. M., & Ismail, F. (2021). *Industry 4 . 0 and Lean Manufacturing Practices : An Approach to Enhance Operational Performance in Singapore ' s Manufacturing Sector*. 2(1), 456–472.
- Sharma, V., Raut, R. D., Hajiaghaei-Keshteli, M., Narkhede, B. E., Gokhale, R., & Priyadarshinee, P. (2022). Mediating effect of industry 4.0 technologies on the supply chain management practices and supply chain performance. *Journal of Environmental Management*, 322, 115945.
- Tortorella, G. L., & Giglio, R. (2018). Industry 4 . 0 as a moderator on the relationship between lean and operational performance. *25th International Annual EurOMA Conference*, 1–10.
- Uhrin, Á., Bruque-Cámara, S., & Moyano-Fuentes, J. (2017). Lean production, workforce development and operational performance. *Management Decision*, 55(1), 103–118. <https://doi.org/10.1108/MD-05-2016-0281>

- van Hoek, R. I. (2000). The thesis of leagility revisited. *International Journal of Agile Management Systems*, 2(3), 196–201. <https://doi.org/10.1108/14654650010356103>
- Varela, L., Araújo, A., Ávila, P., Castro, H., & Putnik, G. (2019). Evaluation of the relation between lean manufacturing, Industry 4.0, and sustainability. *Sustainability*, 11, 1439. <https://doi.org/10.3390/su11051439>
- Vates, U. K., Sharma, B. P., Kanu, N. J., Gupta, E., & ... (2021). Modeling and Optimization of IoT Factors to Enhance Agile Manufacturing Strategy-based Production System Using SCM and RSM. *Smart Science*. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/23080477.2021.2017543>

- Womack, J. P., & Jones, D. T. (1996). Lean Thinking by Womack and Jones. *Review Literature And Arts Of The Americas*.

