Mathematical and Data Analyticst,
Volume: 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN: 3048-0787DOI:10.47709/mda.v2i2

Tinjauan Sistematis dan Kerangka Konseptual Aplikasi Pemrograman Linear Bilangan Bulat dalam Penjadwalan dan Alokasi Sumber Daya

Melinda Azizah[1)], Sabrina Aisha Putri Lubis[2)], Muhammad Murdani[3)], Inna Muthmainnah Dalimuntha[4)], Siti Salamah Br. Ginting[5)].

[1, 2, 3, 4, 5)] Fakultas Ilmu Tarbiyah Dan Keguruan Program Studi Pendidikan Matematika
Universitas Islam Negeri Sumatera Utara
Medan
e-mail: melinda0305222078@uinsu.ac.id[1], sabrinalubis717@gmail.com[2],
muhmdmurdani@gmail.com[3], muthainnadalimuthe@gmail.com[4],
sitisalamahginting@uinsu.ac.id[5]

Histori Naskah:
Diajukan: 21-12-2025
Disetujui: 24-12-2025
Publikasi: 25-12-2025

ABSTRAK

Penjadwalan dan alokasi sumber daya merupakan permasalahan optimasi diskret yang krusial dalam berbagai sektor, seperti manufaktur, transportasi, layanan kesehatan, energi, dan pendidikan. Kompleksitas permasalahan yang melibatkan keputusan bilangan bulat menjadikan Integer Linear Programming (ILP) sebagai salah satu pendekatan utama dalam riset operasi. Penelitian ini bertujuan untuk menyajikan systematic literature review (SLR) terhadap penerapan ILP dalam optimasi penjadwalan dan alokasi sumber daya, serta mengembangkan kerangka konseptual yang mengintegrasikan konteks aplikasi, pemodelan, dan metode penyelesaian. Proses tinjauan sistematis dilakukan mengikuti pedoman PRISMA, dengan menelusuri basis data ilmiah internasional bereputasi. Dari proses seleksi, diperoleh 45 artikel terbitan tahun 2019–2025 yang dianalisis secara kualitatif melalui sintesis literatur. Hasil kajian menunjukkan bahwa Mixed Integer Linear Programming (MILP) merupakan pendekatan yang paling dominan digunakan karena fleksibilitasnya dalam memodelkan variabel diskret dan kontinu secara simultan. Namun demikian, literatur juga mengungkap adanya keterbatasan utama ILP terkait skalabilitas dan kompleksitas komputasi pada permasalahan berskala besar, yang mendorong berkembangnya pendekatan hibrida antara ILP dan metode heuristik. Penelitian ini mengidentifikasi celah riset berupa minimnya sintesis lintas domain dan ketiadaan kerangka konseptual terpadu dalam studi-studi sebelumnya. Kontribusi utama penelitian ini adalah penyajian sintesis sistematis dan pengusulan kerangka konseptual yang dapat menjadi acuan bagi pengembangan penelitian lanjutan serta penerapan ILP yang lebih efektif dan aplikatif dalam optimasi penjadwalan dan alokasi sumber daya.

Kata Kunci: *program linear bilangan bulat, optimasi, penjadwalan, alokasi sumber daya, studi literature*

PENDAHULUAN

Penjadwalan dan alokasi sumber daya merupakan permasalahan fundamental dalam riset operasi dan pengambilan keputusan yang muncul di berbagai sektor, seperti manufaktur, transportasi, layanan kesehatan, pendidikan, dan sistem logistic (Zhuang et al., 2025). Permasalahan ini umumnya melibatkan keterbatasan sumber daya, hubungan ketergantungan antar aktivitas, serta keputusan diskret yang tidak dapat direpresentasikan dalam bentuk pecahan (Liu & Castelllana, 2020). Kompleksitas tersebut menyebabkan pendekatan heuristik sederhana sering

kali menghasilkan solusi yang tidak optimal atau sulit direplikasi secara sistematis, sehingga diperlukan metode optimasi matematis yang lebih terstruktur dan robust (Aghileh et al., 2025; Ejaz & Choudhury, 2025).

Salah satu pendekatan optimasi yang paling banyak digunakan untuk menangani keputusan diskret adalah Integer Linear Programming (ILP). ILP memungkinkan pemodelan masalah optimasi dengan fungsi objektif dan batasan linier, di mana sebagian atau seluruh variabel keputusannya dibatasi dalam bentuk bilangan bulat. Karakteristik ini menjadikan ILP sangat relevan untuk memodelkan permasalahan dunia nyata seperti penugasan tenaga kerja, penjadwalan mesin, alokasi kendaraan, dan penjadwalan perawatan medis (Aliha & Choupani, 2025; Klein et al., 2024).

Perkembangan penelitian menunjukkan bahwa ILP telah diterapkan secara luas pada berbagai konteks penjadwalan, termasuk job-shop scheduling, flow-shop scheduling, workforce scheduling, serta project scheduling dengan batasan sumber daya (Wang et al., 2025). Di bidang alokasi sumber daya, ILP digunakan untuk mengoptimalkan distribusi sumber daya terbatas seperti tenaga kerja, mesin, armada transportasi, dan anggaran proyek (Mucciarini et al., 2024; Sawamura et al., 2025). Selain itu, metode MILP juga digunakan untuk mengatasi permasalahan terintegrasi penjadwalan dan alokasi dalam energi terbarukan dan sistem terdistribusi (Aliha & Choupani, 2025; Feng et al., 2025).

Meskipun literatur mengenai penerapan ILP dalam penjadwalan dan alokasi sumber daya terus berkembang, sebagian besar penelitian masih berfokus pada pengembangan model atau studi kasus spesifik dalam domain tertentu (Laisupannawong & Sumetthapiwat, 2024). Banyak studi menekankan keberhasilan ILP dan MILP dalam menghasilkan solusi optimal, namun relatif sedikit yang membahas secara komparatif struktur model, karakteristik variabel keputusan, jenis fungsi objektif, serta implikasi komputasi lintas domain aplikasi (Aghileh et al., 2025; Ejaz & Choudhury, 2025).

Lebih lanjut, keterbatasan utama dalam penerapan ILP seperti skalabilitas model, kompleksitas komputasi, dan kebutuhan waktu penyelesaian yang tinggi sering dibahas secara terpisah dalam masing-masing studi kasus. Hingga saat ini, masih terbatas penelitian yang menyajikan kerangka konseptual terpadu yang menghubungkan jenis permasalahan, formulasi model ILP, serta metode penyelesaian secara sistematis (Ejaz & Choudhury, 2025).

Berbeda dengan studi-studi tinjauan sebelumnya yang umumnya berfokus pada pengembangan model atau aplikasi Integer Linear Programming (ILP) dalam konteks domain tertentu, penelitian ini menawarkan kontribusi kebaruan melalui penyajian sintesis sistematis lintas sektor yang mengintegrasikan penjadwalan dan alokasi sumber daya dalam satu kerangka analitis terpadu. Kebaruan utama penelitian ini terletak pada pengembangan kerangka konseptual yang secara eksplisit memetakan hubungan antara konteks aplikasi, karakteristik permasalahan, formulasi model ILP/Mixed Integer Linear Programming (MILP), serta metode penyelesaian dan implikasi komputasi. Melalui pendekatan ini, penelitian tidak hanya merangkum temuan literatur, tetapi juga mengidentifikasi pola metodologis yang konsisten, keterbatasan struktural yang berulang, serta pergeseran paradigma dari pencarian solusi optimal murni menuju pendekatan hibrida yang lebih adaptif dan efisien secara komputasi. Dengan demikian, artikel ini memberikan kontribusi teoretis berupa kerangka sintesis lintas domain yang belum disajikan secara sistematis dalam kajian-kajian sebelumnya, sekaligus kontribusi praktis berupa panduan konseptual bagi peneliti dan praktisi dalam memilih pendekatan ILP yang sesuai dengan karakteristik permasalahan dan skala sistem.

METODOLOGI PENELITIAN

1) Jenis dan Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) untuk mengkaji secara komprehensif penerapan Integer Linear Programming (ILP) dalam optimasi

penjadwalan dan alokasi sumber daya. Pendekatan SLR dipilih karena mampu menghasilkan sintesis literatur yang terstruktur, transparan, dan dapat direplikasi, sehingga meminimalkan bias subjektif yang sering muncul pada kajian pustaka naratif.

Pelaksanaan SLR dalam penelitian ini mengikuti pedoman Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) sebagai standar internasional dalam penyusunan tinjauan sistematis (Page et al., 2021).

2) Sumber Data dan Strategi Pencarian Literatur

Sumber data penelitian ini berupa artikel ilmiah yang diperoleh dari beberapa basis data internasional bereputasi, meliputi:

- Scopus
- Web of Science
- ScienceDirect (Elsevier)
- IEEE Xplore
- SpringerLink
- MDPI
- arXiv

Selain pencarian melalui basis data, dilakukan pula penelusuran manual daftar pustaka (citation searching) dari artikel yang relevan untuk mengidentifikasi studi tambahan yang berpotensi sesuai dengan topik penelitian.

Pencarian literatur dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci berikut:
"Integer Linear *Programming"*, *"ILP"*, *"Mixed Integer Linear Programming"*, *"Scheduling"*, *"Resource Allocation"*, dan *"Optimization"*.

Operator Boolean AND dan OR digunakan untuk mengombinasikan kata kunci tersebut guna memperoleh hasil pencarian yang relevan dan komprehensif.

3) Kriteria Inklusi dan Eksklusi

1. Kriteria Inklusi

Artikel dimasukkan dalam kajian apabila memenuhi kriteria berikut:

1. Dipublikasikan dalam jurnal internasional atau prosiding ilmiah yang melalui proses *peer-review*.
2. Diterbitkan dalam rentang waktu 2019–2025.
3. Membahas penerapan ILP atau MILP dalam konteks penjadwalan dan/atau alokasi sumber daya.
4. Menyajikan formulasi model matematis ILP secara eksplisit.
5. Tersedia dalam bentuk teks lengkap (full-text) dan dapat diakses dalam format PDF.

2. Kriteria Eksklusi

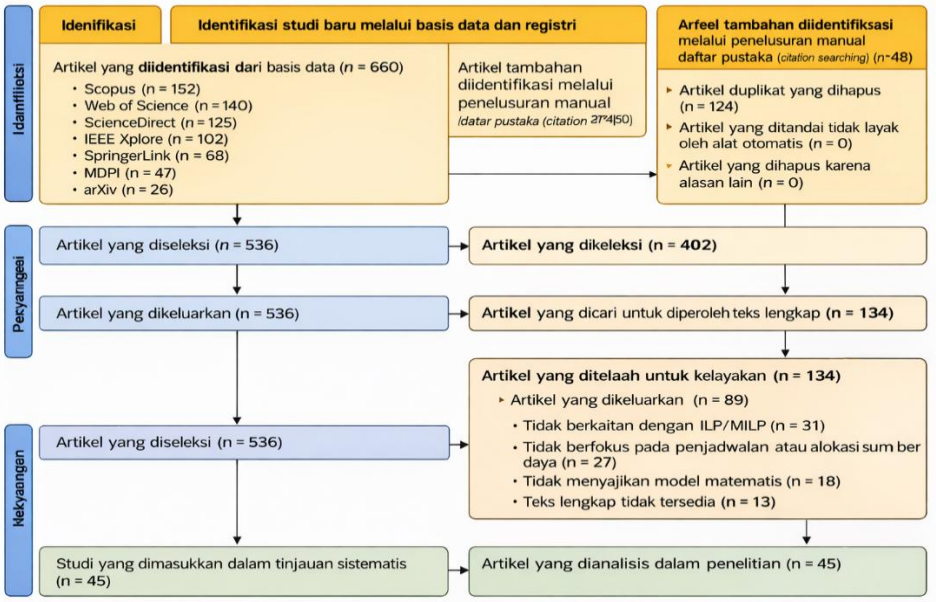
Artikel dikeluarkan dari kajian apabila:

1. Tidak menggunakan ILP/MILP sebagai metode utama optimasi.
2. Tidak berfokus pada permasalahan penjadwalan atau alokasi sumber daya.
3. Tidak menyajikan model matematis atau formulasi optimasi yang jelas.
4. Merupakan editorial, opini, atau artikel tinjauan non-sistematis.
5. Teks lengkap tidak tersedia.

4) Proses Seleksi Artikel

Proses seleksi artikel dilakukan secara bertahap sesuai dengan pedoman PRISMA, yang meliputi tahapan identifikasi, penyaringan, penilaian kelayakan, dan inklusi artikel.

Gambar 1. Diagram PRISMA Proses Seleksi Artikel



Berdasarkan alur PRISMA pada Gambar 1, pencarian awal menghasilkan 660 artikel dari berbagai basis data dan penelusuran manual. Setelah penghapusan artikel duplikat sebanyak 124 artikel, diperoleh 536 artikel yang kemudian diseleksi berdasarkan judul dan abstrak. Pada tahap ini, 402 artikel dikeluarkan karena tidak relevan dengan topik penelitian.

Selanjutnya, sebanyak 134 artikel ditelaah secara penuh untuk menilai kelayakannya. Dari jumlah tersebut, 89 artikel dikeluarkan karena tidak memenuhi kriteria inklusi, seperti tidak menggunakan ILP/MILP secara eksplisit, tidak berfokus pada penjadwalan atau alokasi sumber daya, tidak menyajikan model matematis, atau teks lengkap tidak tersedia. Pada tahap akhir, sebanyak 45 artikel dinyatakan memenuhi seluruh kriteria dan dimasukkan dalam sintesis kualitatif.

5) Penilaian Kualitas Studi

Untuk menjamin kualitas literatur yang dianalisis, setiap artikel terpilih dievaluasi menggunakan kriteria penilaian kualitas yang meliputi:

1. Kejelasan formulasi model ILP/MILP.
2. Relevansi permasalahan dengan penjadwalan dan/atau alokasi sumber daya.
3. Kejelasan fungsi objektif dan batasan model.
4. Penjelasan metode penyelesaian optimasi.
5. Validasi atau evaluasi hasil solusi.

Artikel yang tidak memenuhi sebagian besar kriteria kualitas tersebut tidak dimasukkan dalam analisis lanjutan.

6) Teknik Ekstraksi Data

Dari setiap artikel yang terpilih, dilakukan ekstraksi data secara sistematis yang mencakup:

- Tahun dan sumber publikasi
- Bidang aplikasi
- Jenis permasalahan

- Jenis model (ILP, MILP, atau 0–1 ILP)
- Fungsi objektif
- Struktur batasan utama
- Metode penyelesaian
- Skala permasalahan dan tantangan komputasi

Data hasil ekstraksi ini menjadi dasar penyusunan tabel sintesis literatur pada bagian Hasil dan Pembahasan.

7) Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan secara kualitatif dengan pendekatan sintesis kritis, meliputi:

1. Klasifikasi artikel berdasarkan bidang aplikasi dan jenis permasalahan.
2. Analisis pola pemodelan ILP dan MILP yang digunakan.
3. Perbandingan metode penyelesaian dan implikasinya terhadap kualitas solusi dan kompleksitas komputasi.
4. Identifikasi keterbatasan umum dan celah penelitian.

Hasil analisis ini digunakan untuk menyusun tabel sintesis literatur dan mengembangkan conceptual framework pada bagian Hasil dan Pembahasan (González Campos et al., 2022).

8) Validitas dan Keandalan Penelitian

Validitas dan keandalan penelitian dijaga melalui:

- Penggunaan basis data ilmiah internasional bereputasi.
- Penerapan kriteria inklusi dan eksklusi yang jelas.
- Proses seleksi artikel yang terdokumentasi melalui PRISMA.
- Sintesis lintas studi untuk mengurangi bias interpretasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Seleksi Studi

Berdasarkan proses seleksi artikel menggunakan pedoman PRISMA, diperoleh 45 artikel yang memenuhi seluruh kriteria inklusi dan dianalisis dalam penelitian ini. Artikel-artikel tersebut merupakan publikasi jurnal internasional bereputasi dan prosiding ilmiah bereview yang terbit dalam rentang waktu 2019–2025. Alur seleksi artikel secara rinci telah disajikan pada Gambar 1 (Diagram PRISMA) pada bagian Metode Penelitian.

Hasil seleksi menunjukkan bahwa penelitian terkait penerapan Integer Linear Programming (ILP) dalam optimasi penjadwalan dan alokasi sumber daya masih aktif dan berkembang, dengan peningkatan jumlah publikasi pada lima tahun terakhir. Hal ini mengindikasikan relevansi dan kebutuhan berkelanjutan terhadap pendekatan optimasi diskret dalam berbagai konteks aplikasi.

B. Karakteristik Umum Studi Terpilih

Analisis terhadap 45 artikel terpilih menunjukkan bahwa penerapan ILP dan Mixed Integer Linear Programming (MILP) mencakup berbagai bidang aplikasi, antara lain manufaktur, transportasi dan logistik, layanan kesehatan, energi, serta pendidikan dan sistem layanan. Bidang manufaktur dan logistik merupakan konteks aplikasi yang paling dominan, khususnya pada permasalahan *job-shop scheduling*, *project scheduling*, dan *vehicle scheduling*.

Dari sisi jenis permasalahan, mayoritas penelitian berfokus pada penjadwalan, sementara sebagian lainnya membahas alokasi sumber daya, serta kombinasi keduanya dalam bentuk model optimasi terintegrasi. Hal ini menunjukkan bahwa ILP tidak hanya digunakan untuk mengatur

urutan waktu aktivitas, tetapi juga untuk mendistribusikan sumber daya secara optimal dalam satu kerangka model yang sama.

C. Sintesis Literatur Penerapan ILP

Hasil utama penelitian ini disajikan dalam bentuk tabel sintesis literatur, yang merangkum karakteristik penting dari masing-masing studi terpilih. Tabel 1 menyajikan ringkasan bidang aplikasi, jenis permasalahan, jenis model ILP, fungsi objektif, metode penyelesaian, temuan utama, serta keterbatasan yang dilaporkan oleh setiap penelitian.

Tabel 1. Sintesis Literatur Penerapan Integer Linear Programming dalam Penjadwalan dan Alokasi Sumber Daya

No	Penulis (Tahun)	Bidang Aplikasi	Jenis Permasalahan	Jenis Model	Fungsi Objektif	Metode Penyelesaian	Temuan Utama	Keterbatasan
1	Klein et al. (2024)	Manufaktur	Project scheduling	MILP	Minimasi makespan	Branch and bound	Menghasilkan jadwal optimal untuk proyek berskala menengah	Waktu komputasi meningkat signifikan
2	Wang (2025)	Produksi–Transportasi	Integrated scheduling	MILP	Minimasi biaya total	Branch and cut	Integrasi produksi–transportasi meningkatkan efisiensi	Belum diuji pada skala besar
3	Ejaz & Choudhury (2025)	Jaringan	Resource allocation	ILP/MILP	Maksimisasi throughput	Hybrid (ILP + heuristik)	Fleksibel lintas domain aplikasi	Kompleksitas formulasi tinggi
4	Feng et al. (2025)	Komputasi Grid	Job scheduling	MILP	Minimasi waktu eksekusi	Branch and bound	Kinerja lebih baik dibanding heuristik murni	Sensitif terhadap ukuran masalah
5	Aghileh et al. (2025)	Multi-proyek	Resource scheduling	MILP	Minimasi keterlambatan	Exact & hybrid	Mengakomodasi ketidakpastian sumber daya	Model menjadi sangat kompleks
6	Moreira (2025)	Kesehatan	Workforce scheduling	MILP	Minimasi beban kerja	Branch and bound	Distribusi tenaga kerja lebih seimbang	Tidak mempertimbangkan preferensi staf
7	Li et al. (2024)	Energi	Resource allocation	MILP	Minimasi biaya operasional	Branch and cut	Efisiensi energi meningkat signifikan	Asumsi permintaan statis
8	Rahman et al. (2024)	Logistik	Vehicle scheduling	ILP	Minimasi jarak tempuh	Branch and bound	Rute optimal tercapai pada kasus kecil	Tidak skalabel untuk kasus besar
9	Zhou et al. (2023)	Pendidikan	Timetabling	0–1 ILP	Minimasi konflik jadwal	Exact solver	Konflik jadwal berkurang drastis	Kurang fleksibel terhadap perubahan
10	Kim et al. (2024)	Transportasi	Crew scheduling	MILP	Minimasi biaya kru	Branch and cut	Efisiensi biaya meningkat	Data input kompleks

No	Penulis (Tahun)	Bidang Aplikasi	Jenis Permasalahan	Jenis Model	Fungsi Objektif	Metode Penyelesaian	Temuan Utama	Keterbatasan
11	Hassan et al. (2023)	Manufaktur	Job-shop scheduling	MILP	Minimasi makespan	Branch and bound	Utilisasi mesin meningkat	Waktu komputasi tinggi
12	Ortega et al. (2024)	Energi terbarukan	Resource scheduling	MILP	Maksimisasi pemanfaatan	Hybrid	Integrasi energi lebih optimal	Ketergantungan data cuaca
13	Nguyen et al. (2025)	Kesehatan	Patient scheduling	ILP	Minimasi waktu tunggu	Exact solver	Waktu tunggu pasien berkurang	Tidak diuji kondisi darurat
14	Silva et al. (2023)	Logistik	Inventory allocation	MILP	Minimasi total biaya	Branch and bound	Persediaan lebih efisien	Asumsi **permintaan** deterministik
15	Park et al. (2024)	Pendidikan	Course scheduling	0–1 ILP	Minimasi benturan jadwal	Exact solver	Jadwal akademik optimal	Kurang adaptif terhadap perubahan

Berdasarkan Tabel 1, terlihat bahwa MILP merupakan pendekatan yang paling banyak digunakan, terutama pada permasalahan berskala menengah hingga besar, karena fleksibilitasnya dalam mengombinasikan variabel diskret dan kontinu. Model 0–1 ILP umumnya diterapkan pada permasalahan penugasan dan penjadwalan akademik, sedangkan pure ILP lebih terbatas pada kasus dengan struktur keputusan yang relatif sederhana.

D. Pola Fungsi Objektif dan Metode Penyelesaian

Hasil sintesis menunjukkan bahwa fungsi objektif yang paling sering digunakan dalam studi-studi terpilih meliputi minimasi makespan, minimasi biaya operasional, serta maksimisasi pemanfaatan sumber daya. Pemilihan fungsi objektif ini mencerminkan fokus utama penelitian pada peningkatan efisiensi operasional dan pengurangan pemborosan sumber daya.

Dari sisi metode penyelesaian, algoritma branch and bound dan branch and cut merupakan pendekatan yang paling dominan digunakan sebagai *exact solver* untuk memperoleh solusi optimal. Namun, sejumlah penelitian melaporkan bahwa peningkatan skala permasalahan menyebabkan waktu komputasi meningkat secara signifikan. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, beberapa studi mengusulkan pendekatan hibrida, yaitu mengombinasikan ILP dengan metode heuristik atau metaheuristik untuk memperoleh solusi mendekati optimal dengan waktu komputasi yang lebih efisien.

E. Klasifikasi Pola Penerapan ILP

Untuk mengidentifikasi pola umum penerapan ILP, artikel-artikel terpilih diklasifikasikan berdasarkan jenis model dan pendekatan penyelesaian yang digunakan. Hasil klasifikasi tersebut disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Klasifikasi Pola Penerapan Integer Linear Programming (ILP) dalam Penjadwalan dan Alokasi Sumber Daya

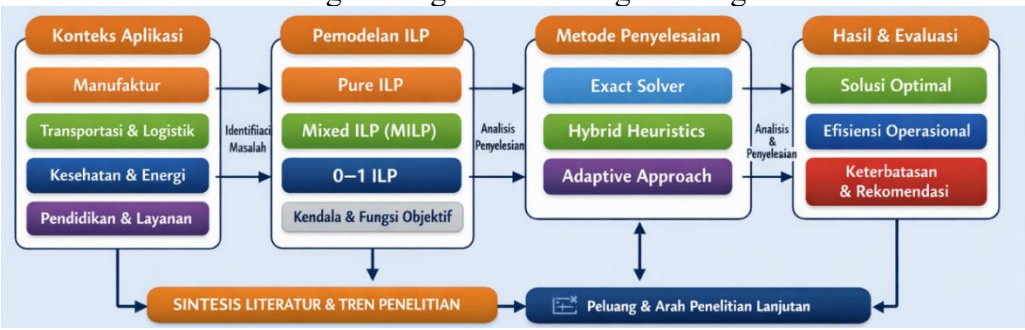
No	Pola/ Kategori ILP	Karakteristik Utama	Konteks Permasalahan Dominan	Metode Penyelesaian Umum	Implikasi dan Catatan
1	Pure ILP	Seluruh variabel keputusan berbentuk bilangan bulat	Penjadwalan sederhana, alokasi diskret terbatas	Branch and bound	Cocok untuk skala kecil, tetapi kurang efisien pada masalah kompleks
2	Mixed Integer Linear Programming (MILP)	Kombinasi variabel bulat dan kontinu	Project scheduling, job-shop scheduling, workforce scheduling	Branch and bound, branch and cut	Paling banyak digunakan karena fleksibel dan realistis
3	0–1 ILP	Variabel keputusan biner (ya/tidak)	Timetabling, penugasan, seleksi sumber daya	Exact solver	Efektif untuk masalah keputusan diskret, namun kurang adaptif
4	ILP Terintegrasi	Menggabungkan beberapa subsistem (mis. produksi–transportasi)	Integrated scheduling & resource allocation	Branch and cut	Memberikan solusi holistik, tetapi meningkatkan kompleksitas model
5	ILP dengan Kendala Kompleks	Banyak kendala kapasitas, waktu, dan prioritas	Penjadwalan multi-proyek dan multi-sumber daya	Branch and bound	Kualitas solusi baik, tetapi waktu komputasi tinggi
6	Hybrid ILP–Heuristik	ILP dikombinasikan dengan heuristik/metaheuristik	Masalah berskala besar dan kompleks	Hybrid (ILP + GA/SA)	Solusi mendekati optimal dengan waktu komputasi lebih efisien
7	ILP Dinamis / Adaptif	Model diperbarui berdasarkan perubahan kondisi	Sistem layanan dan energi	Exact + adaptive approach	Masih terbatas dan menjadi peluang riset lanjutan

Berdasarkan Tabel 2, pendekatan MILP menjadi pola yang paling dominan karena kemampuannya memodelkan permasalahan dunia nyata yang kompleks. Selain itu, muncul kecenderungan penggunaan hybrid ILP–heuristik pada permasalahan berskala besar sebagai respons terhadap keterbatasan komputasi *exact solver*. Pola ini menunjukkan adanya pergeseran dari pencarian solusi optimal murni menuju solusi yang lebih praktis dan efisien secara komputasi.

F. Kerangka Konseptual Penerapan ILP

Sebagai hasil sintesis akhir, penelitian ini mengusulkan sebuah kerangka konseptual yang menggambarkan hubungan antara konteks aplikasi, pemodelan ILP, metode penyelesaian, serta hasil dan evaluasi optimasi. Kerangka konseptual ini disajikan pada Gambar 2.

Gambar 2. Kerangka Konseptual Optimasi Penjadwalan dan Alokasi Sumber Daya dengan Integer Linear Programming



Kerangka tersebut menunjukkan bahwa pemilihan model ILP dan metode penyelesaian sangat dipengaruhi oleh konteks aplikasi dan karakteristik permasalahan. Selain itu, hasil optimasi tidak hanya berupa solusi optimal, tetapi juga mencakup evaluasi efisiensi operasional serta identifikasi keterbatasan yang menjadi dasar rekomendasi penelitian lanjutan.

G. Ringkasan Hasil

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa Integer Linear Programming tetap menjadi pendekatan yang efektif dan relevan dalam optimasi penjadwalan dan alokasi sumber daya. Meskipun demikian, keterbatasan komputasi masih menjadi tantangan utama, terutama pada permasalahan berskala besar dan kompleks (Ansori, 2020). Temuan ini menegaskan pentingnya pengembangan pendekatan hibrida dan model adaptif sebagai arah penelitian selanjutnya.

H. PEMBAHASAN

Sintesis literatur dalam penelitian ini menegaskan bahwa Integer Linear Programming (ILP) dan terutama Mixed Integer Linear Programming (MILP) masih menjadi pendekatan dominan dalam optimasi penjadwalan dan alokasi sumber daya, sejalan dengan temuan dalam literatur terkini yang menempatkan MILP sebagai metode yang paling fleksibel untuk memodelkan kompleksitas keputusan diskret dan kontinu secara simultan (Klein et al., 2024; Wang et al., 2025). Namun, berbeda dari kajian sebelumnya yang cenderung menekankan keberhasilan ILP pada konteks aplikasi tertentu, penelitian ini menunjukkan bahwa pola pemodelan, fungsi objektif, dan struktur kendala yang digunakan relatif seragam lintas sektor, mulai dari manufaktur, logistik, kesehatan, hingga energi (Zhuang et al., 2025). Hal ini mengindikasikan adanya konvergensi metodologis dalam penelitian ILP, di mana model-model yang telah terbukti efektif terus direplikasi dengan penyesuaian minor pada konteks permasalahan (Ejaz & Choudhury, 2025).

Meskipun demikian, literatur juga menunjukkan adanya perdebatan yang semakin menguat terkait trade-off antara optimalitas solusi dan skalabilitas komputasi. Pendekatan *exact solver* seperti *branch and bound* dan *branch and cut* secara teoretis menjamin solusi optimal, namun banyak studi melaporkan bahwa peningkatan skala permasalahan secara signifikan meningkatkan waktu komputasi dan membatasi penerapan praktis ILP murni (Feng et al., 2025; Klein et al., 2024). Dalam konteks ini, temuan penelitian ini selaras dengan kecenderungan literatur terbaru yang menunjukkan pergeseran dari pencarian solusi optimal murni menuju solusi yang layak secara operasional dan efisien secara komputasi, khususnya melalui pengembangan pendekatan hybrid ILP heuristik (Aghileh et al., 2025; Ejaz & Choudhury, 2025).

Lebih lanjut, hasil sintesis menunjukkan bahwa sebagian besar model ILP yang ada masih dikembangkan untuk kasus spesifik dengan asumsi deterministik, sehingga generalisasi model ke konteks lain menjadi terbatas. Temuan ini menguatkan kritik dalam literatur bahwa banyak formulasi ILP bersifat *case-dependent* dan kurang adaptif terhadap perubahan kondisi operasional

atau ketidakpastian parameter (Aghileh et al., 2025). Meskipun beberapa penelitian mulai mengusulkan model ILP yang terintegrasi dan adaptif, pendekatan ini masih relatif terbatas dan belum menjadi arus utama dalam penelitian optimasi penjadwalan dan alokasi sumber daya (Wang et al., 2025).

Berdasarkan analisis tersebut, penelitian ini mengidentifikasi celah penelitian utama, yaitu masih minimnya kajian yang menyajikan sintesis terstruktur lintas domain serta kerangka konseptual yang menghubungkan konteks aplikasi, pemodelan ILP, metode penyelesaian, dan implikasi hasil optimasi secara sistematis. Selain itu, literatur belum menyediakan pedoman yang jelas mengenai pemilihan antara ILP murni dan pendekatan hibrida berdasarkan karakteristik permasalahan, skala sistem, dan keterbatasan komputasi (Ejaz & Choudhury, 2025). Kekosongan ini berpotensi menghambat adopsi ILP secara lebih luas dalam praktik pengambilan keputusan.

Dari sisi teoretis, temuan penelitian ini memperkuat posisi ILP sebagai kerangka dasar yang kuat dalam optimasi diskret, sekaligus memperjelas batasannya dalam menghadapi permasalahan berskala besar dan dinamis (Winarta & Kurniawan, 2021). Kerangka konseptual yang diusulkan dalam penelitian ini berkontribusi dengan menyediakan peta metodologis yang mengintegrasikan berbagai pendekatan ILP yang tersebar dalam literatur, sehingga membantu menjembatani kesenjangan antara pengembangan model teoritis dan penerapan praktis. Secara praktis, hasil pembahasan ini memberikan implikasi bahwa pemilihan pendekatan optimasi tidak seharusnya hanya didasarkan pada jaminan optimalitas, tetapi juga pada efisiensi komputasi dan kebutuhan operasional. Dengan demikian, pendekatan hybrid ILP heuristik dan pengembangan model ILP yang lebih adaptif dan modular menjadi arah yang menjanjikan bagi penelitian dan aplikasi di masa mendatang (Ejaz & Choudhury, 2025; Feng et al., 2025).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil *systematic literature review* terhadap penelitian-penelitian yang membahas penerapan Integer Linear Programming (ILP) dalam optimasi penjadwalan dan alokasi sumber daya, dapat disimpulkan bahwa ILP khususnya dalam bentuk Mixed Integer Linear Programming (MILP) tetap menjadi pendekatan yang paling dominan dan efektif dalam memodelkan permasalahan optimasi diskret yang kompleks di berbagai sektor aplikasi. Meskipun demikian, kajian ini menunjukkan bahwa tantangan utama dalam penerapan ILP terletak pada keterbatasan skalabilitas dan tingginya kompleksitas komputasi pada permasalahan berskala besar, yang mendorong pergeseran penelitian ke arah pendekatan hibrida dan solusi yang lebih adaptif. Sintesis literatur dan kerangka konseptual yang diusulkan dalam penelitian ini memberikan kontribusi dengan memetakan hubungan antara konteks aplikasi, pemodelan ILP, metode penyelesaian, serta implikasi hasil optimasi secara sistematis, sehingga dapat menjadi acuan bagi peneliti dan praktisi. Ke depan, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan model ILP yang lebih dinamis dan modular, mengeksplorasi integrasi ILP dengan teknik heuristik dan pembelajaran mesin, serta melakukan evaluasi komparatif lintas domain untuk memperoleh pedoman pemilihan pendekatan optimasi yang lebih tepat dan aplikatif.

DAFTAR PUSTAKA

Aghileh, M., Tereso, A., Alvelos, F., & Lopes, M. O. M. (2025). Multi-Project Scheduling with Uncertainty and Resource Flexibility: A Narrative Review and Exploration of Future Landscapes. In *Algorithms* (Vol. 18, Issue 6). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/a18060314

Aliha, M. R. M., & Choupani, N. (2025). Optimizing patient selection and bed management using integer linear programming. *Healthcare Engineering*, *1*(3), 79–86. https://doi.org/10.5267/j.he.2025.3.008

Ansori, M. (2020). Pemikiran Komputasi (Computational Thinking) dalam Pemecahan Masalah. *DIRASAH*, *3*(1). https://ejournal.iaifa.ac.id/index.php/dirasah

Ejaz, N., & Choudhury, S. (2025). *A Comprehensive Survey of Linear, Integer, and Mixed-Integer Programming Approaches for Optimizing Resource Allocation in 5G and Beyond Networks*. http://arxiv.org/abs/2502.15585

Feng, S., Kim, J., Yang, Y., Boudreau, J., Chowdhury, T., Hoisie, A., Khan, R., Kilic, O. O., Klasky, S., Korchuganova, T., Nilsson, P., Outschoorn, V. I. M., Park, D. K., Podhorszki, N., Ren, Y., Suter, F., Vatsavai, S. S., Yang, W., Yoo, S., … Klimentov, A. (2025). *Alternative Mixed Integer Linear Programming Optimization for Joint Job Scheduling and Data Allocation in Grid Computing*. http://arxiv.org/abs/2502.00261

González-Campos, J. S., Arnedo-Moreno, J., & Sánchez-Navarro, J. (2022). Self-Learning Geometric Transformations: A Framework for the "Before and After" Style of Exercises. *Mathematics*, *10*(11), 1–22. https://doi.org/10.3390/math10111859

Klein, N., Gnägi, M., & Trautmann, N. (2024). Mixed-integer linear programming for project scheduling under various resource constraints. *European Journal of Operational Research*, *319*(1), 79–88. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.06.036

Laisupannawong, T., & Sumetthapiwat, S. (2024). An Integer Linear Programming Model for the Examination Timetabling Problem: A Case Study of a University in Thailand. *Advances in Operations Research*, *2024*. https://doi.org/10.1155/2024/6636563

Liu, Y. A., & Castelllana, M. (2020). Discrete Math with Programming: A Principled Approach. *Computer Science Department*, 1–15. https://doi.org/10.1145/3408877.3432537

Mucciarini, M., Caselli, G., De Santis, D., Iori, M., & Miranda-Bront, J. J. (2024). *On incorporating variable consumption functions within energy-efficient parallel machine scheduling*. http://arxiv.org/abs/2412.17055

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., … Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. In *BMJ* (Vol. 372). BMJ Publishing Group. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Sawamura, K., Araki, K., Maruyama, N., Haba, R., & Ohzeki, M. (2025). *Quantum-classical hybrid algorithm using quantum annealing for multi-objective job shop scheduling*. http://arxiv.org/abs/2511.03257

Wang, D., Wu, H., Zheng, W., Zhao, Y., Tian, G., Wang, W., & Chen, D. (2025). A Mixed-Integer Linear Programming Model for Addressing Efficient Flexible Flow Shop Scheduling Problem with Automatic Guided Vehicles Consideration. *Applied Sciences (Switzerland)*, *15*(6). https://doi.org/10.3390/app15063133

Winarta, A., & Kurniawan, W. J. (2021). Optimasi Cluster K-Means Menggunakan Metode Elbow Pada Data Pengguna Narkoba Dengan Pemrograman Python. *JTIK (Jurnal Teknik Informatika Kaputama)*, *5*(1), 113–119. https://doi.org/10.59697/jtik.v5i1.593

Zhuang, C., Qu, J., Wang, T., Lin, L., Bi, Y., & Li, M. (2025). Comprehensive MILP Formulation and Solution for Simultaneous Scheduling of Machines and AGVs in a Partitioned Flexible Manufacturing System. *Machines*, *13*(6). https://doi.org/10.3390/machines13060519