

Penjadwalan Aliran Material Berbasis RCPSP pada Fasilitas Lift Barang Terbatas

Muhammad Tajuddin¹, Manik Ayu Titisari²

^{1,2} Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas PGRI Adi Buana Surabaya, Indonesia

e-mail: muhammادتajuddin2002@gmail.com¹; manikayu@unipasby.ac.id²

Abstrak

Fasilitas material handling yang digunakan secara bersama dapat menjadi sumber ketidakpastian operasional ketika perusahaan belum memiliki aturan penggunaan yang formal. Penelitian ini bertujuan menganalisis kondisi penjadwalan aliran material, memetakan kendala fasilitas, serta menyusun jadwal penggunaan lift barang pada pabrik krimer melalui Resource Constrained Project Scheduling Problem. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan desain studi kasus. Data diperoleh melalui observasi proses, wawancara dengan personel produksi dan pergudangan, telaah dokumen operasional, serta pengukuran waktu terhadap 18 aktivitas pada Departemen Material Planner, Oracle, dan Retail dalam shift pagi. Aktivitas disusun berdasarkan hubungan finish-to-start, durasi, kebutuhan sumber daya, kapasitas angkut, jumlah perjalanan, serta perbedaan jam kerja dan istirahat. Hasil menunjukkan bahwa satu lift harus melayani 37 pallet melalui 15 perjalanan. Jadwal berbasis batasan sumber daya memberikan slot penggunaan yang jelas: Retail menggunakan lift pada menit 39,41-113,31 dan Oracle mulai menit 169,86. Makespan tetap 441,06 menit, utilisasi lift 64,64%, dan waktu tunggu kedua departemen 0 menit. Temuan tersebut menunjukkan bahwa manfaat utama model bukan penurunan indikator waktu pada kondisi data saat ini, melainkan pembentukan jadwal yang layak, terdokumentasi, dan mudah dijadwalkan ulang. Model ini berimplikasi pada peningkatan kepastian koordinasi antar-departemen dan menyediakan dasar pengendalian fasilitas bersama ketika volume material, jadwal shift, atau kondisi lift berubah.

Kata Kunci: Aliran Material; Fasilitas Terbatas; Lift Barang; Penjadwalan; RCPSP

Abstract

Shared material-handling facilities can create operational uncertainty when a company has no formal allocation rules. This study aimed to analyze material-flow scheduling, identify facility constraints, and develop a freight-elevator schedule in a creamer factory using the Resource-Constrained Project Scheduling Problem. A descriptive quantitative case-study design was applied. Data were collected through process observations, interviews with production and warehouse personnel, operational-document reviews, and time measurements for 18 activities performed by the Material Planner, Oracle, and Retail departments during the morning shift. Activities were modeled by considering finish-to-start relationships, processing durations, resource requirements, carrying capacity, number of trips, and differences in working and break times. The findings show that one freight elevator must serve 37 pallets through 15 trips. The resource-feasible schedule assigns explicit service windows: Retail uses the elevator from minute 39.41 to 113.31, while Oracle begins at minute 169.86. The makespan remains 441.06 minutes, elevator utilization is 64.64%, and both departments record zero waiting time. Thus, the model's primary value is not an immediate reduction in time-based indicators under the observed workload, but the creation of a feasible, documented, and reschedulable operating plan. The proposed schedule strengthens interdepartmental coordination and provides a

control baseline for responding to changes in material volume, shift arrangements, or elevator availability.

Keywords: Freight Elevator; Material Flow; RCPSP; Resource Constraint; Scheduling

LATAR BELAKANG

Keteraturan aliran material merupakan prasyarat bagi kontinuitas manufaktur pangan karena bahan, kemasan, dan produk jadi harus berpindah pada waktu yang sesuai dengan urutan proses. Literatur penjadwalan manufaktur menunjukkan bahwa keputusan produksi tidak dapat dipisahkan dari keputusan transportasi internal, khususnya ketika mesin dan alat angkut berbagi ruang, waktu, atau lintasan yang sama (Hosseini et al., 2024). Sistem material handling juga memerlukan desain yang formal karena alokasi peralatan, kapasitas, dan jumlah unit menentukan kemampuan sistem menjaga kelancaran operasi (Soufi et al., 2024). Pada pabrik bertingkat, lift barang berfungsi sebagai sumber daya bersama yang ketersediaannya membatasi waktu mulai aktivitas antar-lantai. Apabila pemakaiannya hanya berdasarkan kesiapan sesaat, perubahan volume atau keterlambatan satu departemen dapat memicu antrean, penumpukan material, dan gangguan terhadap aktivitas berikutnya.

Resource Constrained Project Scheduling Problem merupakan kerangka untuk menetapkan waktu mulai aktivitas dengan tetap memenuhi hubungan ketergantungan dan kapasitas sumber daya. Kajian mutakhir menegaskan bahwa model ini telah berkembang dari masalah makespan klasik menuju variasi multi-mode, multi-skill, transfer sumber daya, ketidakpastian durasi, dan penerapan industri nyata (Hartmann & Briskorn, 2022; Ding et al., 2023; Artigues et al., 2026). Pengembangan algoritma mencakup matheuristic, meta-learning, negosiasi multiagen, dan optimasi multiobjektif (Fernandes & de Souza, 2021; Fink & Gerhards, 2021; Chu et al., 2023; Hessami et al., 2024). Meskipun pendekatan tersebut menghasilkan solusi komputasional yang kuat, penerapannya pada operasi harian tidak selalu harus dimulai dari algoritma kompleks. Untuk sistem dengan satu sumber daya kritis, jadwal layak berbasis aturan prioritas dan hubungan finish-to-start dapat menjadi instrumen kendali yang lebih mudah diadopsi.

Objek penelitian adalah pabrik krimer dengan struktur multi-lantai yang menggunakan satu lift barang untuk melayani Departemen Retail dan Oracle, sedangkan Material Planner beroperasi di lantai dasar. Kondisi eksisting belum memiliki slot penggunaan lift yang terdokumentasi; departemen memakai fasilitas berdasarkan siapa yang lebih dahulu siap. Data awal tidak memperlihatkan konflik aktual atau waktu tunggu, tetapi ketiadaan jadwal formal tetap menciptakan risiko operasional ketika volume pallet, jam shift, waktu persiapan, atau kondisi fasilitas berubah. Temuan penelitian industri menunjukkan bahwa masalah penjadwalan sumber daya tunggal dan transfer antarlokasi memerlukan keterpaduan antara urutan aktivitas, waktu perpindahan, serta ketersediaan fasilitas (Liu et al., 2021; Liu et al., 2023a; Liu et al., 2023b). Di sisi lain, studi produksi berkelanjutan dan implementasi proyek industri memperlihatkan pentingnya jadwal yang dapat dieksekusi, transparan, dan mudah disesuaikan (Trebuña et al., 2022; Torba et al., 2024; Vrchota et al., 2021).

Kesenjangan penelitian terletak pada dominannya studi RCPSP yang menilai keberhasilan melalui penurunan makespan atau pencarian solusi mendekati optimum, sedangkan kebutuhan operasional perusahaan dapat berupa standardisasi penggunaan fasilitas walaupun indikator waktu pada beban aktual tidak berubah. Studi algoritmik di Indonesia juga menunjukkan efektivitas optimasi RCPSP pada berbagai kasus, tetapi belum secara khusus menempatkan lift barang sebagai unit-capacity shared resource untuk aliran material pabrik pangan (Fitriyani et al., 2021; Sikomena et al., 2021). Oleh karena itu, pertanyaan penelitian ini adalah: bagaimana kondisi penjadwalan aliran material saat ini, kendala apa yang membatasi penggunaan lift, bagaimana jadwal layak dapat dibentuk dengan RCPSP, dan apa perubahan kinerja serta nilai manajerialnya dibandingkan kondisi eksisting? Penelitian bertujuan memetakan aktivitas dan kendala, menyusun jadwal penggunaan lift yang memenuhi batasan preseden dan sumber daya, serta mengevaluasi makespan, utilisasi, waktu tunggu, dan keteraturan jadwal. Kontribusi ilmiahnya adalah memperluas pemaknaan

manfaat RCPSP dari sekadar reduksi durasi menjadi mekanisme formal untuk kontrol dan rescheduling fasilitas bersama.

METODE

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan studi kasus pada aliran material shift pagi di sebuah pabrik krimer. Objek analisis mencakup seluruh aktivitas serah terima material vertikal dan aktivitas pendahulunya pada Departemen Material Planner, Retail, dan Oracle. Sampel operasional dipilih secara purposif berdasarkan dua kriteria: aktivitas berada dalam satu siklus aliran material pagi dan aktivitas menggunakan atau menentukan kesiapan penggunaan lift barang. Sebanyak 18 aktivitas dianalisis, terdiri atas tiga aktivitas Material Planner, enam aktivitas Oracle, dan sembilan aktivitas Retail. Informasi tenaga kerja digunakan sebagai konteks kapasitas pelaksanaan, bukan sebagai variabel optimasi terpisah.

Data dikumpulkan melalui observasi alur pemindahan bahan dan produk, wawancara dengan karyawan produksi, supervisor, dan bagian warehouse, dokumentasi kebutuhan pallet dan jadwal shift, serta pengukuran waktu aktual. Data yang dicatat meliputi lokasi asal-tujuan, jumlah pallet, kapasitas lift, waktu perjalanan per lantai, durasi repallet dan parkir, jam mulai departemen, jam istirahat, serta ketergantungan antaraktivitas. Validasi operasional dilakukan dengan mencocokkan hasil observasi, dokumen perusahaan, dan penjelasan personel yang terlibat dalam proses.

Pengolahan dimulai dengan menyusun activity list, menghitung jumlah perjalanan, mengagregasi durasi aktivitas, dan menetapkan hubungan finish-to-start. Model menggunakan satu sumber daya terbarukan berkapasitas satu unit, yaitu lift barang; dua aktivitas yang membutuhkan lift tidak boleh berlangsung bersamaan. Penyusunan jadwal dilakukan melalui aturan prioritas berdasarkan kesiapan paling awal dengan tetap menghormati jam shift dan istirahat. Hasil kemudian dibandingkan dengan kondisi eksisting menggunakan makespan, waktu aktif dan idle lift, tingkat utilisasi, waktu tunggu departemen, serta keberadaan slot penggunaan yang formal. Karena penelitian tidak menggunakan exact solver atau metaheuristic berskala besar, keluaran diposisikan sebagai jadwal layak dan terstruktur, bukan bukti optimum global. Pendekatan ini konsisten dengan literatur yang membedakan kebutuhan kecepatan implementasi, kualitas solusi, dan kompleksitas model (Tian et al., 2022; Wei et al., 2023; Karnebogen & Zimmermann, 2024).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik aliran material dan kendala sumber daya

Pemetaan proses mengidentifikasi 18 aktivitas dengan pola preseden yang berbeda pada setiap departemen. Material Planner menangani 37 pallet bahan di lantai 1 sehingga tidak memakai lift, tetapi aktivitasnya tetap dianalisis untuk menggambarkan beban kerja shift. Oracle memindahkan 22 pallet kemasan dari lantai 1 ke lantai 6, sedangkan Retail memindahkan tujuh pallet bahan ke lantai 3 dan menurunkan delapan pallet produk jadi. Lift memiliki kapasitas dua pallet untuk bahan baku serta tiga pallet untuk kemasan dan produk jadi. Dengan demikian, Oracle membutuhkan delapan perjalanan, Retail membutuhkan empat perjalanan naik dan tiga perjalanan turun, sehingga total beban lift mencapai 15 perjalanan untuk 37 pallet.

Tabel 1. Daftar aktivitas pada model penjadwalan RCPSP

Kode	Departemen	Aktivitas	Menggunakan lift
A1	Material Planner	Repallet material bahan	Tidak
A2	Material Planner	Parkir material	Tidak
A3	Material Planner	Memasukkan material ke area Material Planner	Tidak

Kode	Departemen	Aktivitas	Menggunakan lift
B1	Oracle	Repallet material kemasan	Tidak
B2	Oracle	Parkir material kemasan	Tidak
B3	Oracle	Memasukkan material kemasan ke lift	Ya
B4	Oracle	Menaikkan material kemasan ke lantai 6	Ya
B5	Oracle	Memasukkan material ke area penyimpanan kemasan	Ya
B6	Oracle	Menurunkan lift ke lantai 1	Ya
C1	Retail	Repallet material bahan Retail	Tidak
C2	Retail	Parkir material bahan Retail	Tidak
C3	Retail	Memasukkan material bahan Retail ke lift	Ya
C4	Retail	Menaikkan material bahan Retail ke lantai 3	Ya
C5	Retail	Memasukkan material ke area penyimpanan Retail	Ya
C6	Retail	Memasukkan produk jadi ke lift	Ya
C7	Retail	Menurunkan produk jadi ke lantai 1	Ya
C8	Retail	Mengeluarkan produk jadi dan parkir	Tidak
C9	Retail	Repallet produk jadi	Tidak

Kendala tidak hanya berasal dari jumlah unit lift. Oracle memulai pekerjaan pukul 08.00, sedangkan Retail dan Material Planner pukul 06.30. Retail dan Material Planner beristirahat pukul 10.30-11.30, sementara Oracle pukul 12.00-13.00. Durasi repallet dan parkir menentukan kapan material siap dipindahkan. Kombinasi ini menghasilkan empat kategori batasan: fasilitas tunggal, kapasitas per perjalanan, jendela waktu shift-istirahat, dan jumlah operator yang menyebabkan beberapa aktivitas berjalan berurutan. Secara konseptual, kondisi tersebut sesuai dengan RCPSP karena waktu mulai ditentukan oleh penyelesaian predecessor dan ketersediaan sumber daya. Riset transfer-time menunjukkan bahwa sumber daya berkapasitas satu menuntut keputusan penjadwalan sekaligus perpindahan, sebab suatu aktivitas baru dapat dimulai setelah fasilitas tersedia pada lokasi yang tepat (Liu et al., 2021).

Tabel 2. Data operasional dan kendala utama penjadwalan

Komponen	Retail	Oracle	Implikasi model
Jam mulai shift	06.30	08.00	Waktu rilis aktivitas berbeda
Jam istirahat	10.30-11.30	12.00-13.00	Aktivitas dapat terpotong kalender kerja
Material yang memakai lift	7 pallet bahan; 8 pallet produk jadi	22 pallet kemasan	Total 37 pallet

Komponen	Retail	Oracle	Implikasi model
Kapasitas lift	2 pallet bahan; 3 pallet produk jadi	3 pallet kemasan	Kapasitas menentukan jumlah perjalanan
Jumlah perjalanan	7 trip	8 trip	Total 15 trip
Sumber daya bersama	1 lift barang	1 lift barang	Tidak boleh terjadi penggunaan simultan

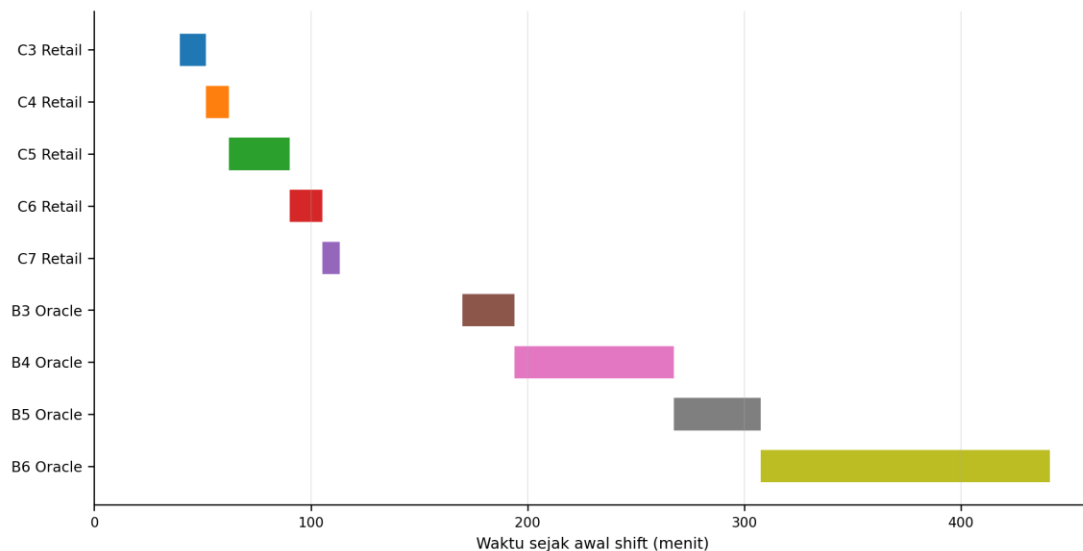
Tabel 2 menegaskan bahwa lift bukan sekadar alat bantu transportasi, melainkan sumber daya yang menghubungkan kesiapan material dengan urutan produksi. Pada sistem material handling, keputusan kapasitas dan alokasi peralatan harus diperlakukan sebagai bagian dari desain operasi, bukan respons ad hoc terhadap permintaan sesaat (Soufi et al., 2024). Dengan satu unit fasilitas, ketidakpastian kecil pada repallet atau parkir dapat menggeser seluruh slot berikutnya. Karena itu, kontribusi pemodelan terletak pada perubahan dari aturan informal menjadi urutan yang eksplisit dan dapat diaudit.

Pembentukan jadwal berbasis preseden dan kapasitas lift

Jadwal dibentuk dengan memulai aktivitas yang tidak menggunakan lift secara paralel sesuai jam rilis departemen. Retail menyelesaikan repallet dan parkir pada menit ke-39,41, lebih awal daripada Oracle yang baru siap pada menit ke-169,86. Berdasarkan prioritas kesiapan paling awal, Retail memperoleh slot lift pertama. Rangkaian C3-C7 berlangsung dari menit ke-39,41 sampai 113,31. Setelah itu, aktivitas C8 dan C9 tidak lagi memakai lift. Oracle menjalankan B1 dan B2 sejak menit ke-90 dan baru memasuki rangkaian lift pada menit ke-169,86. Rangkaian B3-B6 berakhir pada menit ke-441,06 karena B6 terpotong jam istirahat Oracle. Urutan tersebut memenuhi seluruh preseden dan mencegah overlap penggunaan lift.

Tabel 3. Slot penggunaan lift pada jadwal RCPSP

Kode	Departemen	Aktivitas pengguna lift	Mulai (menit)	Selesai (menit)
C3	Retail	Memasukkan bahan Retail ke lift	39,41	51,41
C4	Retail	Menaikkan bahan dari lantai 1 ke 3	51,41	62,21
C5	Retail	Menyimpan bahan di area Retail	62,21	90,21
C6	Retail	Memasukkan produk jadi ke lift	90,21	105,21
C7	Retail	Menurunkan produk jadi ke lantai 1	105,21	113,31
B3	Oracle	Memasukkan kemasan ke lift	169,86	193,86
B4	Oracle	Menaikkan kemasan dari lantai 1 ke 6	193,86	267,46
B5	Oracle	Menyimpan kemasan di lantai 6	267,46	307,46
B6	Oracle	Menurunkan lift ke lantai 1	307,46	441,06



Gambar 1. Urutan aktivitas penggunaan lift pada jadwal RCPSP

Gambar 1 memperlihatkan pemisahan yang tegas antara rangkaian aktivitas Retail dan Oracle. Ruang kosong di antara kedua kelompok aktivitas bukan konflik jadwal, melainkan konsekuensi waktu kesiapan Oracle yang ditentukan oleh repallet dan parkir material. Visualisasi ini memudahkan supervisor membedakan waktu idle yang berasal dari ketergantungan proses dengan waktu idle akibat pelaksanaan yang menyimpang dari rencana.

Jeda menit ke-113,31 sampai 169,86 menunjukkan bahwa tidak setiap idle time merupakan inefisiensi yang dapat dihilangkan. Oracle belum siap karena repallet dan parkir masih berlangsung; mempercepat penggunaan lift tanpa mengubah aktivitas pendahulu tidak akan menurunkan makespan. Temuan ini penting karena evaluasi penjadwalan sering terlalu cepat mengartikan idle time sebagai pemborosan. Dalam RCPSP, idle dapat menjadi konsekuensi logis dari preseden, waktu rilis, atau kalender kerja. Kajian algoritmik juga menunjukkan bahwa kualitas jadwal bergantung pada representasi hubungan aktivitas dan karakteristik sumber daya, bukan semata-mata pemadatan seluruh slot waktu (Chu et al., 2023; Fernandes & de Souza, 2021).

Konstruksi jadwal sederhana ini tidak meniadakan pentingnya pendekatan optimasi lebih lanjut. Model multi-mode dapat mengevaluasi alternatif kapasitas, jumlah operator, atau metode pemindahan, sedangkan model robust dapat mengakomodasi gangguan durasi dan ketidakpastian fasilitas (Hessami et al., 2024; Fu et al., 2024; Liu et al., 2024). Namun, untuk kondisi saat ini, jadwal feasible sudah menghasilkan nilai praktis yang jelas: departemen mengetahui kapan fasilitas tersedia, supervisor dapat memantau deviasi, dan perubahan beban dapat dimasukkan kembali ke struktur aktivitas. Hal tersebut sejalan dengan aplikasi industri nyata yang menekankan perlunya model yang mengakomodasi kendala spesifik pabrik, mesin, dan sumber daya manusia (Torba et al., 2024).

Evaluasi kinerja dan makna akademik temuan

Perbandingan menunjukkan bahwa makespan kondisi eksisting dan jadwal RCPSP sama-sama 441,06 menit atau 7 jam 21 menit, dengan aktivitas terakhir B6 milik Oracle. Lift aktif selama 285,10 menit dan idle 155,96 menit, sehingga utilisasi pada kedua kondisi sebesar 64,64%. Retail siap memakai lift pada menit ke-39,41 ketika fasilitas tersedia; Oracle siap pada menit ke-169,86 ketika lift telah bebas sejak menit ke-113,31. Akibatnya, waktu tunggu kedua departemen tetap 0 menit. Secara numerik, model tidak memperbaiki tiga indikator tersebut karena pada data aktual memang belum terjadi overlap kebutuhan lift.

Tabel 4. Perbandingan kondisi eksisting dan jadwal berbasis RCPSP

Indikator	Kondisi eksisting	Jadwal RCPSP	Interpretasi
Makespan	441,06 menit	441,06 menit	Tidak berubah karena tidak ada konflik aktual
Waktu aktif lift	285,10 menit	285,10 menit	Beban transportasi sama
Waktu idle lift	155,96 menit	155,96 menit	Sebagian dipengaruhi kesiapan aktivitas pendahulu
Utilisasi lift	64,64%	64,64%	Tidak berubah pada volume yang sama
Waktu tunggu Retail	0 menit	0 menit	Retail memperoleh slot saat siap
Waktu tunggu Oracle	0 menit	0 menit	Oracle siap setelah slot Retail selesai
Acuan penggunaan	Situasional	Slot waktu formal	Kontrol dan koordinasi meningkat
Penjadwalan ulang	Tidak memiliki model dasar	Dapat dilakukan dari jaringan aktivitas	Lebih responsif terhadap perubahan

Kesamaan hasil kuantitatif bukan berarti metode tidak memberikan perbaikan. Pada kondisi eksisting, tidak adanya waktu tunggu terjadi tanpa mekanisme yang menjamin kondisi tersebut akan berulang. Pada jadwal RCPSP, waktu tunggu nol diperoleh dari alokasi yang memenuhi preseden dan kapasitas. Perbedaan ini mengubah sifat sistem dari kebetulan operasional menjadi keputusan yang dapat dijelaskan. Dalam manajemen operasi, keteraturan jadwal diperlukan untuk memastikan sumber daya digunakan dalam urutan yang dapat diprediksi dan untuk mengurangi variabilitas koordinasi. Studi penjadwalan hijau juga menekankan bahwa perangkat penjadwalan bernilai ketika meningkatkan keterlihatan dan disiplin rencana, bukan hanya ketika menghasilkan penurunan makespan (Trebuña et al., 2022).

Temuan ini memperkaya literatur RCPSP dalam tiga aspek. Pertama, unit-capacity resource dapat berupa fasilitas logistik vertikal yang melayani aktivitas berulang, bukan hanya tenaga ahli atau mesin proyek. Kedua, keberhasilan implementasi dapat dinilai melalui formalitas, keterlacakan, dan kesiapan rescheduling, selain indikator durasi. Ketiga, model sederhana tetap relevan sebagai tahap awal menuju optimasi lanjutan. Literatur menunjukkan bahwa varian transfer-time, partially renewable resources, dan multi-skill memperluas kemampuan model untuk menangani kondisi kompleks (Liu et al., 2023a; Liu et al., 2023b; Karnebogen & Zimmermann, 2024; Tian et al., 2022). Penelitian ini menunjukkan bahwa sebelum kompleksitas tersebut ditambahkan, perusahaan perlu memiliki data aktivitas dan kalender operasi yang konsisten.

Dibandingkan studi yang melaporkan penurunan durasi melalui metaheuristic, hasil penelitian ini menekankan batas interpretasi. Penerapan algoritma tidak otomatis memendekkan jadwal apabila konflik sumber daya belum aktif atau aktivitas terakhir didominasi durasi pendahulu. Fitriyani et al. (2021) dan Sikomena et al. (2021) menunjukkan bahwa hasil optimasi sangat dipengaruhi solusi awal, struktur masalah, dan metode pencarian. Wei et al. (2023) juga memperlihatkan bahwa karakteristik problem menentukan kelayakan pendekatan algoritmik. Dengan demikian, klaim kontribusi harus disesuaikan dengan data: model berhasil membuat jadwal feasible dan formal, tetapi belum membuktikan penghematan waktu, biaya, atau peningkatan output produksi.

Implikasi praktisnya adalah perusahaan dapat menjadikan slot pada Tabel 3 sebagai baseline harian dan menetapkan aturan deviasi. Apabila Retail terlambat, Oracle tidak langsung menggunakan slot tanpa pemeriksaan kesiapan dan dampak preseden; supervisor melakukan rescheduling berdasarkan waktu aktual. Apabila volume meningkat, jumlah perjalanan harus dihitung ulang sebelum slot dialokasikan. Pendekatan ini sejalan dengan pandangan bahwa scheduling manufacturing with transportation perlu mengintegrasikan keputusan proses dan perpindahan agar tidak terjadi optimasi parsial (Hosseini et al., 2024). Secara bertahap, model dapat dikembangkan dengan skenario kerusakan lift, prioritas material kritis, kapasitas alternatif, atau integrasi Master Production Schedule. Perkembangan RCPSP mutakhir menunjukkan bahwa integrasi data dan ketidakpastian menjadi arah penting untuk menghasilkan jadwal yang robust dan adaptif (Ding et al., 2023; Artigues et al., 2026).

Untuk penerapan operasional, jadwal perlu ditempatkan sebagai standar kerja harian yang disertai titik kontrol. Waktu selesai repallet Retail dan Oracle dapat dijadikan milestone kesiapan. Ketika deviasi melampaui toleransi perusahaan, supervisor perlu memperbarui waktu mulai aktivitas yang belum berjalan, bukan mempertahankan jadwal awal secara kaku. Mekanisme tersebut menjaga model tetap berfungsi sebagai alat pengambilan keputusan, sekaligus mencegah terbentuknya antrean informal di depan lift. Dokumentasi aktual juga menghasilkan basis data untuk mengestimasi variasi durasi dan menyusun skenario robust pada penelitian berikutnya.

Model dasar ini juga memungkinkan evaluasi kebijakan kapasitas secara lebih objektif. Penambahan operator hanya relevan apabila mempercepat aktivitas pendahulu yang berada pada jalur penyelesaian, sedangkan penambahan lift baru perlu dipertimbangkan ketika permintaan penggunaan mulai tumpang tindih secara konsisten. Pada beban yang diamati, tidak terdapat bukti bahwa investasi fasilitas tambahan akan memperpendek makespan. Oleh sebab itu, prioritas manajemen yang rasional adalah menerapkan jadwal formal, mengukur kepatuhan serta variabilitas aktual, kemudian menilai kebutuhan kapasitas dari data beberapa periode.

Dari perspektif akademik, hasil tersebut menegaskan perbedaan antara optimization gain dan governance gain. Optimization gain tercermin pada perubahan nilai tujuan, misalnya makespan atau waktu tunggu, sedangkan governance gain tercermin pada meningkatnya keterlacakan keputusan, kejelasan hak penggunaan fasilitas, dan kemampuan melakukan penjadwalan ulang. Kasus ini memperlihatkan bahwa governance gain dapat muncul lebih dahulu ketika struktur eksisting kebetulan sudah feasible. Pemisahan kedua manfaat tersebut membantu penelitian terapan menghindari klaim efisiensi yang berlebihan dan menilai keberhasilan implementasi secara lebih proporsional.

Keterbatasan penelitian perlu ditekankan. Data hanya merepresentasikan satu siklus shift pagi dan satu tingkat volume, sehingga hasil tidak dapat digeneralisasi untuk seluruh variasi permintaan. Durasi diperlakukan deterministik, kerusakan lift dan gangguan tenaga kerja tidak dimodelkan, serta jadwal belum diuji melalui implementasi longitudinal. Selain itu, aturan prioritas menghasilkan jadwal layak tetapi tidak menjamin optimum global. Meski demikian, justru keterbatasan ini memperjelas tahap kematangan sistem: perusahaan telah memperoleh model dasar yang dapat diuji, dibandingkan, dan dikembangkan tanpa mengklaim manfaat yang tidak didukung data.

SIMPULAN

Penelitian menghasilkan jadwal aliran material yang memenuhi hubungan preseden dan batas kapasitas satu lift barang. RCPSP menetapkan slot Retail pada menit 39,41-113,31 dan Oracle mulai menit 169,86, tanpa tumpang tindih. Makespan tetap 441,06 menit, utilisasi 64,64%, dan waktu tunggu 0 menit; manfaat utamanya ialah kepastian koordinasi, dokumentasi, serta dasar penjadwalan ulang. Secara teoretis, temuan memperluas evaluasi RCPSP dari reduksi durasi menuju formalisasi kendali fasilitas bersama. Keterbatasannya adalah data satu shift, durasi deterministik, dan belum ada uji implementasi. Penelitian berikutnya perlu mengintegrasikan jadwal produksi, variasi volume, dan skenario gangguan lift.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Teknik Industri Universitas PGRI Adi Buana Surabaya dan pihak pabrik krimer yang telah mendukung pengumpulan serta verifikasi data operasional penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Artigues, C., Hartmann, S., & Vanhoucke, M. 2026. Fifty Years Of Research On Resource-Constrained Project Scheduling Explored From Different Perspectives. *European Journal Of Operational Research*, 328(2): 367-389. Amsterdam: Elsevier.
- Chu, X., Li, S., Gao, F., Cui, C., Pfeiffer, F., & Cui, J. 2023. A Data-Driven Meta-Learning Recommendation Model For Multi-Mode Resource Constrained Project Scheduling Problem. *Computers & Operations Research*, 157: 106290. Amsterdam: Elsevier.
- Ding, H., Zhuang, C., & Liu, J. 2023. Extensions Of The Resource-Constrained Project Scheduling Problem. *Automation In Construction*, 153: 104958. Amsterdam: Elsevier.
- Fernandes, G. A., & De Souza, S. R. 2021. A Matheuristic Approach To The Multi-Mode Resource Constrained Project Scheduling Problem. *Computers & Industrial Engineering*, 162: 107592. Amsterdam: Elsevier.
- Fink, A., & Gerhards, P. 2021. Negotiation Mechanisms For The Multi-Agent Multi-Mode Resource Investment Problem. *European Journal Of Operational Research*, 295(1): 261-274. Amsterdam: Elsevier.
- Fitriyani, E. R., Rosyida, I., & Mashuri, M. 2021. Penyelesaian Resource Constrained Project Scheduling Problem Menggunakan Algoritma Cat Swarm Optimization. *Indonesian Journal Of Mathematics And Natural Sciences*, 44(2): 48-60. Semarang: Universitas Negeri Semarang.
- Fu, F., Liu, Q., & Yu, G. 2024. Robustifying The Resource-Constrained Project Scheduling Against Uncertain Durations. *Expert Systems With Applications*, 238: 122002. Amsterdam: Elsevier.
- Hartmann, S., & Briskorn, D. 2022. An Updated Survey Of Variants And Extensions Of The Resource-Constrained Project Scheduling Problem. *European Journal Of Operational Research*, 297(1): 1-14. Amsterdam: Elsevier.
- Hessami, S., Davari-Ardakani, H., Javid, Y., & Ameli, M. 2024. Bi-Objective Optimization Of A Multi-Mode, Multi-Site Resource-Constrained Project Scheduling Problem. *Journal Of Modelling In Management*, 19(4): 1136-1154. Bingley: Emerald Publishing.
- Hosseini, A., Otto, A., & Pesch, E. 2024. Scheduling In Manufacturing With Transportation: Classification And Solution Techniques. *European Journal Of Operational Research*, 315(3): 821-843. Amsterdam: Elsevier.
- Karnebogen, M., & Zimmermann, J. 2024. Generation Schemes For The Resource-Constrained Project Scheduling Problem With Partially Renewable Resources And Generalized Precedence Constraints. *Annals Of Operations Research*. Cham: Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/S10479-023-05788-3>.
- Liu, W., Zhang, H., Chen, Y., Qu, C., & Zhang, J. 2024. Simulation-Based Hybrid Genetic Algorithms For The Stochastic Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem With Minimized Financial Risk. *Applied Soft Computing*, 161: 111716. Amsterdam: Elsevier.
- Liu, Y., Jin, S., Zhou, J., & Hu, Q. 2023a. A Branch-And-Bound Algorithm For The Unit-Capacity Resource Constrained Project Scheduling Problem With Transfer Times. *Computers & Operations Research*, 151: 106097. Amsterdam: Elsevier.
- Liu, Y., Zhou, J., Lim, A., & Hu, Q. 2021. Lower Bounds And Heuristics For The Unit-Capacity Resource Constrained Project Scheduling Problem With Transfer Times. *Computers & Industrial Engineering*, 161: 107605. Amsterdam: Elsevier.
- Liu, Y., Zhou, J., Lim, A., & Hu, Q. 2023b. A Tree Search Heuristic For The Resource Constrained Project Scheduling Problem With Transfer Times. *European Journal Of Operational Research*, 304(3): 939-951. Amsterdam: Elsevier.

- Sikomana, E. F., Widyadana, I. G. A., & Prayogo, D. 2021. Optimasi Resource Constrained Project Scheduling Problem Menggunakan Metode Genetic Algorithm Dan Symbiotic Organisms Search. *Dimensi Utama Teknik Sipil*, 8(1): 49-59. Surabaya: Universitas Kristen Petra.
- Soufi, Z., David, P., & Yahouni, Z. 2024. Generation Of Material Handling System Alternatives: A Constraints Satisfaction Problem Approach. *Computers In Industry*, 155: 104045. Amsterdam: Elsevier.
- Tian, Y., Xiong, T., Liu, Z., Mei, Y., & Wan, L. 2022. Multi-Objective Multi-Skill Resource-Constrained Project Scheduling Problem With Skill Switches: Model And Evolutionary Approaches. *Computers & Industrial Engineering*, 167: 107897. Amsterdam: Elsevier.
- Torba, R., Dauzère-Pérès, S., Yugma, C., Gallais, C., & Pouzet, J. 2024. Solving A Real-Life Multi-Skill Resource-Constrained Multi-Project Scheduling Problem. *Annals Of Operations Research*. Cham: Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/S10479-023-05784-7>.
- Trebuňa, P., Pekarčíková, M., Dic, M., & Kopec, J. 2022. Optimization Of Production Schedule Using Advanced Scheduling Tools For Green Production. *Acta Mechanica Slovaca*, 26(2): 18-23. Košice: Technical University Of Košice.
- Vrchota, J., Řehoř, P., Maříková, M., & Pech, M. 2021. Critical Success Factors Of The Project Management In Relation To Industry 4.0 For Sustainability Of Projects. *Sustainability*, 13(1): 281. Basel: MDPI.
- Wei, H., Su, Z., & Qi, J. 2023. New Pseudo Polynomial Algorithms For A Partial Resource-Constrained Project Scheduling Problem. *Journal Of Industrial And Management Optimization*, 19(11): 8271-8298. Springfield: American Institute Of Mathematical Sciences.