

Identifikasi dan Analisis Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Produktivitas Pekerjaan Pemasangan Atap Rangka Baja

A. Yusti¹, A.S.B. Nugroho^{1*}, A. Aminullah¹

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: arief_sbn@ugm.ac.id

INTISARI

Pekerjaan pemasangan atap baja bentang panjang dengan sistem *space frame* menghadirkan tantangan teknis yang kompleks, terutama pada proyek berskala besar dengan geometri struktur yang tidak simetris. Tantangan geometri struktur dan keterbatasan ruang pada proyek skala besar menuntut efisiensi pelaksanaan yang berbasis pada ketepatan metode dan koordinasi teknis di lapangan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menganalisis faktor-faktor yang memengaruhi produktivitas pekerjaan pemasangan atap rangka baja dengan sistem *space frame* pada proyek GIK UGM menggunakan bantuan *tower crane*. Pengumpulan data dilakukan melalui observasi langsung dan pemantauan menggunakan kamera *time lapse* terhadap proses ereksi *Rafter H8* dan *H8'*. Setiap *Rafter* terdiri dari tujuh modul dengan variasi bentuk dan berat. Analisis menunjukkan bahwa berat modul tidak berpengaruh signifikan terhadap durasi pemasangan maupun produktivitas. Produktivitas lebih dipengaruhi oleh faktor-faktor teknis seperti jumlah sambungan *flange*, kompleksitas posisi modul, penyesuaian saat pemasangan, serta efektivitas penggunaan *tower crane* dan sistem *shoring*. Modul dengan jumlah sambungan lebih banyak atau berada di posisi kritis membutuhkan waktu pemasangan yang lebih lama. Produktivitas tertinggi dicapai pada Modul 1 *Rafter H8* (316,9 kg/menit), sedangkan terendah pada Modul 7 *Rafter H8'* (31,15 kg/menit). Rekomendasi teknis seperti metode perakitan penuh (*pre-assembly*) dan evaluasi toleransi fabrikasi disarankan untuk meningkatkan efisiensi dan keselamatan pada proyek serupa di masa depan.

Kata kunci: produktivitas, *tower crane*, struktur rangka baja, *erection process*

1 PENDAHULUAN

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi telah mendorong transformasi signifikan dalam bidang konstruksi, baik dari sisi perencanaan, metode pelaksanaan, maupun efisiensi struktur. Inovasi dalam metode pelaksanaan konstruksi menjadi sangat penting, khususnya pada proyek-proyek skala besar di kawasan perkotaan yang kompleks dan padat. Salah satu elemen penting dalam proyek tersebut adalah struktur atap, terutama ketika dirancang dengan bentang panjang. Dalam penerapannya, struktur atap dapat menggunakan berbagai sistem konstruksi, seperti atap beton, rangka baja tipe *truss*, maupun sistem *space frame*. Rangka ruang atau *space frame* merupakan sistem struktur tiga dimensi yang ringan dan kaku, dengan kemampuan menahan beban dari berbagai arah serta menciptakan bentang panjang tanpa banyak tumpuan (Seong dkk., 2023). Selain itu, bentuk atap yang mengadopsi desain asimetris yakni geometri yang tidak simetris antara satu sisi dengan sisi lainnya dapat menambah nilai estetika sekaligus menimbulkan tantangan teknis dalam proses pelaksanaannya.

Beberapa studi sebelumnya telah menyoroti pentingnya peralatan pengangkatan dalam pekerjaan konstruksi, terutama pada bangunan bertingkat tinggi atau struktur bentang panjang. Pemilihan peralatan seperti *tower crane*, *mobile crane*, maupun *electric winch* harus mempertimbangkan kondisi proyek, efisiensi biaya dan waktu, serta aspek keselamatan kerja (Guo dkk., 2022; Yazdi dkk., 2018). Dari berbagai jenis alat angkat yang tersedia, *tower crane* menjadi pilihan utama dalam banyak proyek karena efisiensinya dalam mengangkat material berat secara vertikal dan horizontal dalam ruang yang terbatas (Han dkk., 2013). Efektivitas penggunaan *tower crane* juga ditingkatkan melalui pendekatan manajerial, seperti metode *core structure succeeding construction* (CSSCM), yang terbukti mampu mengurangi beban pengangkatan hingga 56,3% (Choi dkk., 2020).

Produktivitas konstruksi menjadi indikator penting keberhasilan proyek. Departemen Perdagangan Amerika Serikat mendefinisikannya sebagai rasio antara *output* pekerjaan dan *input* sumber daya dalam waktu tertentu (Yates, 2014). Dalam konteks konstruksi, indikator produktivitas dapat mencakup volume pekerjaan, durasi pelaksanaan, serta kualitas hasil akhir. Meski demikian, studi mengenai produktivitas konstruksi, khususnya yang menekankan pada metrik yang tepat dan terukur, masih tergolong terbatas (Forsythe & Sepasgozar, 2019).

Saat ini, penelitian yang membahas secara komprehensif mengenai pengaruh berat modul terhadap durasi pemasangan serta faktor-faktor teknis lain yang memengaruhi produktivitas pekerjaan ereksi rangka baja dengan dinamika teknis di lapangan masih terbatas. Pemahaman yang mendalam terhadap interaksi antara desain struktur, metode pengangkatan, dan kondisi lapangan sangat dibutuhkan untuk meningkatkan efisiensi pelaksanaan proyek-proyek konstruksi dengan struktur baja bentang lebar.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara berat modul terhadap waktu pemasangan, serta mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi produktivitas dalam pekerjaan pemasangan atap baja dengan sistem *space frame* dan menggunakan *tower crane*. Dengan pendekatan studi empiris lapangan, hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi praktis mengenai metode pemasangan rangka atap baja yang efisien, serta menjadi referensi bagi pelaksanaan proyek konstruksi sejenis di masa mendatang.

2 METODE PENELITIAN

2.1 Pengumpulan Data dan Klasifikasi Pekerjaan

Penelitian ini dilakukan melalui observasi langsung pada pekerjaan erekси baja di Zona F proyek Gelanggang Inovasi dan Kreasi (GIK) Universitas Gadjah Mada, khususnya pada *Rafter H8* dan *H8'*. Klasifikasi pekerjaan erekси baja pada penelitian ini dibagi dalam beberapa kategori proses berdasarkan observasi di lapangan:

- a. Pemasangan *sling* ke rangka modul
- b. Pengangkatan menuju modul acuan terpasang
- c. Pemasangan baut
- d. Pelepasan *sling crane*.

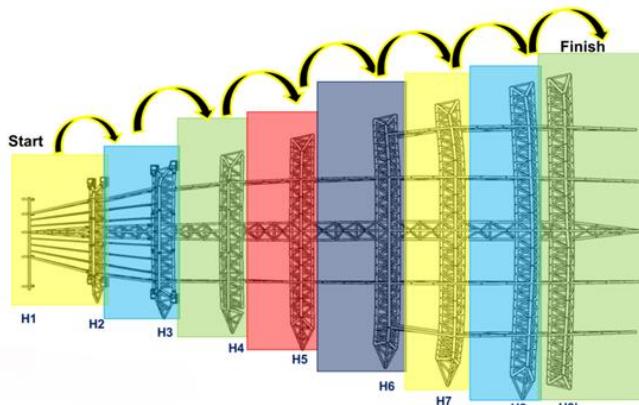


Gambar 1. Pemasangan kamera *Time lapse*

Produktivitas dipantau menggunakan kamera *time-lapse* sebagaimana Gambar 1 yang dipasang di puncak salah satu kolom. Rekaman pada alat ini mendapatkan aktivitas berdurasi menit hingga hari ke dalam hitungan detik, sehingga tiap siklus kerja dapat diidentifikasi dan diukur secara cermat. Di samping data primer berupa video melalui observasi rutin selama 40 hari kalender, penelitian ini juga mengandalkan data sekunder berupa gambar rencana, uraian metode, bobot modul, serta dokumen pendukung lain dari kontraktor pelaksana.

2.2 Karakteristik *Rafter* Zona F

Zona F merupakan salah satu area atap dengan sistem struktur *space frame* yang memiliki geometri asimetris serta variasi panjang bentang. Struktur atap ini dirancang untuk mengikuti kontur bangunan dengan konfigurasi geometris asimetris, ditandai oleh perbedaan elevasi antar sisi serta variasi lebar bentang, yang menuntut presisi tinggi dalam proses fabrikasi dan pemasangan setiap komponennya. Delapan lajur *rafter* yang terbentang di Zona F memiliki dimensi dan konfigurasi berbeda, menyesuaikan desain arsitektural secara keseluruhan.



Gambar 2. Rangka atap Zona F (Dokumen Arsip Proyek, 2023)

Struktur atap rangka baja Zona F terdiri atas delapan *Rafter* (*H2* hingga *H8'*) dengan panjang bentang bervariasi, mulai dari *Rafter* terpendek 16,2 meter hingga *Rafter* terpanjang mencapai 42,4 meter. Dari seluruh *Rafter* tersebut, *H8* dan *H8'* memiliki karakteristik paling kompleks dengan bentuk melengkung serta panjang bentang terbesar yang dapat dilihat pada Gambar 2. Bentuk lengkung dan geometri yang tidak seragam pada kedua *Rafter* ini menyebabkan peningkatan kompleksitas pada tahap fabrikasi, transportasi, serta pemasangan di lapangan. Oleh karena itu, *Rafter* *H8* dan *H8'* dipilih sebagai fokus utama dalam observasi guna memperoleh pemahaman yang lebih mendalam terhadap dinamika produktivitas pekerjaan ereksi *space frame* di lapangan.

Rafter *H8* terdiri atas tujuh modul yang disusun membentuk bentang lengkung sepanjang 40,13 meter, dengan total berat mencapai 23.665,9 kg. Sementara itu, *Rafter* *H8'*, dengan konfigurasi serupa terdiri dari tujuh modul dengan panjang total sedikit lebih besar yaitu 42,37 meter dan berat total 24.364,2 kg. Proses penyambungan diawali pada Modul 1 dengan pengelasan pelat kotak (*box plate*). Sambungan antar-modul selanjutnya yakni antara Modul 1–2, 2–3, 3–4, 4–5, 5–6, dan 6–7 menggunakan *flange* yang dikencangkan dengan baut. Rangkaian penyambungan diakhiri dengan pengelasan Modul 7 ke *box plate*. Desain struktur ini dirancang untuk mengoptimalkan efisiensi sekaligus memudahkan fabrikasi dan pemasangan di lapangan. Jumlah baut pada setiap sambungan tidak seragam, menyesuaikan variasi dimensi batang pipa baja antar modul. Penyesuaian tersebut bertujuan menjaga distribusi gaya tekan dan tarik yang merata di sepanjang *rafter*, sehingga meningkatkan stabilitas dan keandalan struktur secara keseluruhan.

2.3 Produktivitas pekerjaan

Perhitungan produktivitas pekerjaan ereksi struktur *Rafter* *H8* dan *H8'* diukur berdasarkan durasi siklus pekerjaan ereksi untuk setiap modul struktur yang dilaksanakan. Waktu siklus merupakan penjumlahan waktu angkat, pemasangan, bongkar, dan kembali yang mencakup gerak *hoist*, *slewing*, *trolley*, dan *landing* (Sinaga & Solikin, 2023). Metode ereksi utama dilakukan dengan cara pengangkatan modul menggunakan *tower crane*. Agar berat tiap modul tidak melampaui kapasitas angkat *tower crane*, kedua *rafter* masing-masing dibagi menjadi tujuh modul terpisah. Produktivitas pekerjaan ereksi selanjutnya dihitung dengan perbandingan berat modul (kg) dengan waktu siklus (menit).

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pemasangan sling ke modul rangka

Pemasangan sling merupakan tahap awal dalam siklus pengangkatan modul menggunakan *tower crane*. Aktivitas ini dilakukan oleh tiga orang pekerja : dua orang memasang sling dengan *shackle*, sedangkan satu orang bertindak sebagai mandor. Proses ini bertujuan memastikan modul terhubung aman dengan alat angkat sebelum dilakukan pengangkatan.

Gambar 3. Rambu beban maksimal *tower crane*

Permasalahan yang sering dihadapi dalam kegiatan pengangkatan modul adalah terjadinya ketidaksesuaian antara spesifikasi teknis *shackle*, kondisi aktual di lapangan, dan prosedur pengangkatan yang telah direncanakan. Ketidaksesuaian tersebut antara lain berupa perbedaan konfigurasi pengangkatan yang menyebabkan sudut kerja *shackle* melebihi batas toleransi, sehingga menurunkan kapasitas efektif alat angkat. Di beberapa kondisi, ditemukan pula bahwa *shackle* yang digunakan mengalami keausan atau korosi yang tidak teridentifikasi pada saat inspeksi awal. Selain itu, penempatan *pin shackle* yang tidak sesuai, seperti dalam posisi terbalik atau tidak terkunci sempurna, memperbesar risiko kegagalan saat pengangkatan berlangsung. Pada kondisi di lapangan, konfigurasi pengangkatan basket yang tidak sejajar dan distribusi beban yang tidak merata juga memperumit proses pengangkatan, terutama untuk modul dengan bentuk geometri tidak simetris. Ketidaksesuaian ini menunjukkan pentingnya verifikasi teknis dan inspeksi ulang di lapangan secara menyeluruh sebelum proses *lifting* dilaksanakan. Meskipun kontraktor telah menggunakan *shackle* bersertifikat yang sesuai dengan *working load limit* (WLL), verifikasi terhadap kondisi aktual di lapangan tetap menjadi langkah krusial, khususnya untuk memastikan kecukupan kapasitas pengangkatan terhadap berat modul *space frame*. Dalam konteks ini, kapasitas maksimum *tower crane* yang digunakan tercatat sebesar 2,8 ton pada ujung jib 70 meter. Selain itu, sistem keselamatan telah dilengkapi dengan rambu peringatan mengenai batas beban maksimum yang terpasang di sekitar kabin operator, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.

Gambar 4. Pemasangan *sling*

Shackle secara teknis dirancang untuk menahan beban secara aksial atau dalam arah lurus satu sumbu. Apabila digunakan dalam konfigurasi sudut atau menerima beban dari arah lateral, maka kapasitas efektifnya akan menurun secara signifikan. Kondisi ini kerap terjadi dalam proses pengangkatan *rafter* dengan konfigurasi *basket* yang tidak sejajar. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4, pengawasan lapangan oleh mandor menjadi krusial untuk memastikan distribusi beban yang seimbang, salah satunya melalui pelaksanaan *trial lift* atau simulasi pengangkatan ringan guna menentukan posisi *center of gravity* sebelum pengangkatan aktual dilakukan. Risiko tambahan yang perlu diperhatikan meliputi kondisi *shackle* yang telah mengalami keausan, korosi, atau memiliki retakan mikro, serta kesalahan dalam pemasangan, seperti posisi pin yang longgar atau terbalik. Faktor-faktor ini jika dimitigasi dapat berpotensi memicu terjadinya kecelakaan konstruksi. Oleh karena itu, penerapan prosedur operasi standar (SOP) pengangkatan, penggunaan peralatan yang sesuai spesifikasi, dan keterlibatan tenaga kerja bersertifikasi merupakan prasyarat mutlak, khususnya dalam pengangkatan sistem *space frame* yang memiliki karakteristik beban besar dan distribusi massa yang asimetris, sebagaimana pada proyek GIK UGM.

3.2 Pengangkatan modul rangka

Pengangkatan modul adalah aktivitas mengarahkan modul rafter agar berada pada posisi yang tepat untuk dipasang tumpuan dan sambungan. Durasi pada pekerjaan ini dihitung dari pengangkatan modul pada titik penyimpanan material ke tumpuan (*shoring*).



Gambar 5. Pengangkatan menuju modul acuan terpasang

Pengangkatan modul dilakukan oleh operator *tower crane* dengan bantuan tiga pekerja yang mengarahkan modul menggunakan tali pengendali agar tetap stabil secara horizontal. Aktivitas ini berlangsung sejak modul diangkat dari titik penyimpanan hingga diletakkan di atas tumpuan sementara (*shoring*) atau setelah disambungkan dengan modul sebelumnya sebagaimana Gambar 5. Dalam praktiknya, kendala yang kerap dihadapi adalah terjadinya ayunan beban yang disebabkan oleh hembusan angin atau pergerakan crane yang tidak halus. Ayunan ini berpotensi menimbulkan tabrakan antar modul, kesalahan dalam penyambungan, serta membahayakan keselamatan pekerja di sekitar area kerja. Risiko tersebut meningkat secara signifikan apabila komunikasi antara operator crane, *rigger*, dan *signalman* tidak berlangsung secara efektif.

Pada saat modul mendekati posisi acuan, tiga orang pekerja tambahan akan bertugas membantu penyambungan secara manual, khususnya pada sambungan *flange to flange*, sebagaimana terlihat pada Gambar 7. Pengangkatan beban modul dihindari agar modul tidak tergantung terlalu lama yang mana berpotensi memicu keausan komponen maupun ketidakseimbangan sistem peralatan pengangkat seperti *sling*, *shackle*, dan *crane*. Oleh karena itu, koordinasi yang presisi dan komunikasi yang solid di antara seluruh personel lapangan menjadi faktor kunci dalam menjamin keberhasilan proses pemasangan modul, baik dari segi keselamatan kerja maupun efisiensi produktivitas konstruksi.

3.3 Pemasangan Baut

Pemasangan baut diawali dengan penyesuaian posisi antar *flange* sambungan menggunakan batang baja tulangan (*rebar*) sebagai *aligning bar* untuk memastikan kesesuaian lubang baut. Setiap sambungan dikerjakan oleh tiga orang, satu di atas dan dua di bawah modul. Meskipun pengukuran awal telah dilakukan, ketidaksesuaian posisi antar *flange* yang memerlukan tindakan penyesuaian (*adjustment*) menggunakan *chain block*, pengaturan ulang ketinggian *shoring*, dan/atau pergeseran manual modul masing sering terjadi. Proses ini harus dilakukan secara hati-hati untuk mencegah distribusi momen tumpuan yang tidak merata akibat rotasi selama pengangkatan. Pemeriksaan elevasi dilakukan pada tiga titik untuk memantau potensi deformasi dalam periode 2×24 jam.



Gambar 6. Terjadi penyimpangan geometri



Gambar 7. Pemotongan pipa pada akhir pemasangan rafter

Modul 1 menjadi titik acuan penting dalam menentukan geometri keseluruhan *rafter* hingga ke Modul 7. Ketidaksesuaian sudut pada Modul 1 berdampak langsung terhadap posisi sambungan terakhir, termasuk penyimpangan geometri hingga Modul 6 dan Modul 7 yang terlihat pada Gambar 6. Untuk mengatasi penyimpangan ini, dilakukan penurunan *U-head* pada *shoring* modul sebelumnya agar pelat sambung bisa disesuaikan. Verifikasi posisi dilakukan oleh tim pengendali mutu (QC) menggunakan *total station*.



Gambar 8. *Uji penetrant* pada modul yang telah dilakukan pengelasan

Pada proses pemasangan Modul 7, perlu dilakukan penyesuaian panjang pipa untuk dikoneksikan ke bagian tumpuan dengan mekanisme pengelasan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7. Meski prosedur fabrikasi konstruksi baja menyarankan agar pengelasan tidak dilakukan di lapangan guna menjaga integritas dan kualitas kontrol (Vayas dkk., 2019), penyesuaian panjang elemen struktur rangka sebagai bagian dari perencanaan fabrikasi yang memberikan toleransi lebih untuk menghindari kekurangan material tidak mungkin dihindarkan. Untuk itu guna memastikan tidak ada cacat las yang melebihi batas toleransi, uji *penetrant* pada setiap sambungan las dilakukan sebagai mekanisme *quality control* sebagaimana Gambar 8.



Gambar 9. Kondisi akhir pemasangan baut

Pada kondisi tertentu di mana sudut kemiringan modul menyebabkan hambatan dalam pemasangan baut pada *flange*, penyesuaian posisi (*adjustment*) terhadap sambungan *flange* serta baut pada pelat kotak (*box plate*) perlu dilakukan. Jumlah baut per modul bervariasi tergantung pada posisi dan fungsi modul dalam sistem *space frame*. Proses pemasangan Modul 1 relatif lebih cepat sehubungan tidak adanya sambungan *flange* yang perlu dilakukan. Sementara itu Modul 2, 3, 4,5, dan 6 yang masing-masing memiliki dua sambungan *flange* membutuhkan waktu pemasangan relatif lebih lama. Sedangkan Modul 7 yang merupakan modul akhir mensyaratkan satu sambungan *flange* dan pengelasan pada bagian tumpuan. Gambar 9 menunjukkan bagian akhir dari penyambungan Modul 7 ke tumpuan struktur rangka yang berupa *box plate*. Rangkaian tahapan pemasangan struktur rangka diakhiri dengan pekerjaan *grouting* untuk menutup celah antara *box plate* dan tumpuan akibat perbedaan elevasi.

Pada kenyataannya jumlah baut menjadi faktor utama durasi pekerjaan pemasangan setiap modul rangka. Semakin banyak baut, semakin lama waktu pemasangan. Tabel 1 menunjukkan bahwa durasi terlama tercatat pada aktivitas pemasangan baut, yaitu pada Modul 4 *Rafter H8* (1 jam 21 menit dari total 1 jam 30 menit) dan Modul 7 *Rafter H8'* (1 jam 7 menit dari total 1 jam 46 menit). Data ini mengindikasikan bahwa tingkat kerumitan, posisi modul dalam bentang, serta jumlah sambungan *flange* secara langsung memengaruhi produktivitas pemasangan rangka baja di lapangan.

Setelah proses perangkaian modul-modul rangka selesai, dilakukan *torque test* untuk memastikan kekencangan setiap baut sesuai spesifikasi yang disyaratkan. Proses pengencangan wajib dilakukan untuk memastikan distribusi beban terjadi secara merata pada *rafter* dan mencegah deformasi atau kerusakan.

Tabel 1. Durasi Pekerjaan pada Modul 4 dan Modul 7

Aktivitas	Durasi	
	H8 Modul 4	H8' Modul 7
Pemasangan sling ke rangka modul	00:02:10	00:18:30
Pengangkatan menuju modul acuan terpasang	00:14:50	00:16:40
Pemasangan baut	01:21:30	01:07:30
Pelepasan <i>sling crane</i>	00:01:40	00:03:50
Jumlah	01:30:10	01:46:30

3.4 Pelepasan Sling

Pelepasan sling adalah proses melepaskan alat bantu angkat seperti *webbing sling*, *wire rope sling*, atau *chain sling* dari beban atau elemen struktur yang telah diposisikan di tempat tujuan setelah proses pengangkatan selesai (Flaherty, 2019). Alat bantu angkat seperti *webbing sling*, *wire rope sling*, atau *chain sling* baru dapat dilepas jika struktur sudah cukup stabil dan sambungan telah terpasang minimal 50% dari total baut berdasarkan prosedur kerja.

Elemen *rafter* H8 dan H8', yang merupakan sistem *space frame* bentang panjang dengan desain yang kompleks, memiliki sudut kemiringan dengan bentuk geometri melengkung, menghadirkan tantangan signifikan dalam pelaksanaan teknik ereksi struktur baja pada proyek GIK UGM. Pelepasan peralatan pengangkat (*sling*) yang dilakukan sebelum waktunya berpotensi membentuk sistem *cantilever* yang tidak direncanakan, terutama pada kondisi di mana modul *space frame* belum tersambung secara keseluruhan. Situasi ini sangat berisiko karena dapat menimbulkan ketidakseimbangan gaya internal, peningkatan momen lentur, dan kemungkinan terjadinya keruntuhan lokal. Secara prinsip, *space frame* dirancang untuk bekerja sebagai satu kesatuan sistem struktural; apabila hanya sebagian modul yang telah terpasang, distribusi gaya menjadi tidak merata dan dapat memicu fenomena *lateral-torsional buckling*.

Permasalahan yang umum timbul akibat pelepasan *sling* secara prematur meliputi ketidaksesuaian posisi lubang baut (*misalignment*), terjadinya lendutan berlebih, hingga hambatan dalam proses penyambungan antar-modul. Oleh karena itu, ketepatan waktu dalam pelepasan alat pengangkat merupakan aspek krusial untuk menjamin akurasi geometrik, kestabilan struktural, serta keselamatan kerja selama tahap ereksi berlangsung.



Gambar 10. Kondisi sling telah dilepas dan modul sudah terpasang

Keberhasilan dalam proses pelepasan *sling* sangat bergantung pada respons cepat dan ketelitian tenaga kerja lapangan, khususnya *rigger*, dalam menyesuaikan ketinggian tumpuan sementara (*shoring*). Penggunaan komponen seperti *jack base* dan *U-head* memungkinkan penyesuaian elevasi secara fleksibel dan presisi, sehingga mampu mencegah terbentuknya sistem *cantilever* yang tidak diinginkan pada *rafter* yang sedang dipasang. Penyesuaian yang tepat terhadap elemen pendukung ini berperan penting dalam menjaga stabilitas sementara sebelum struktur mencapai kondisi kerja akhir. Kondisi modul yang telah terpasang dengan *sling* yang telah dilepas ditunjukkan pada Gambar 10.

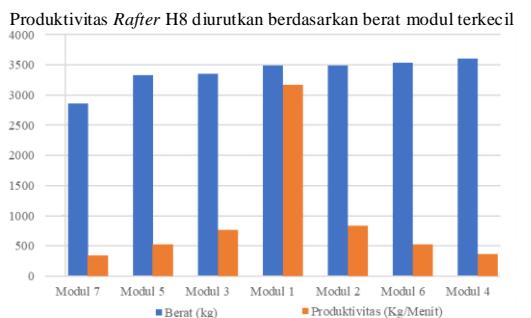
3.5 Produktivitas Pemasangan Modul *Rafter H8* dan Modul *Rafter H8'*

Produktivitas dalam proses pemasangan dihitung berdasarkan rasio antara berat masing-modul terhadap total durasi siklus pemasangan. Seluruh modul *Rafter H8* dan *H8'* memiliki bobot yang berada di bawah kapasitas angkat maksimum *tower crane* serta masih berada dalam jangkauan horizontal alat kerja, yaitu kurang dari 70 meter. Oleh karena itu, variasi produktivitas antar modul lebih disebabkan oleh faktor-faktor teknis di lapangan, seperti metode ereksi, kondisi sambungan, koordinasi antar pekerja, serta efektivitas penggunaan alat bantu pemasangan.

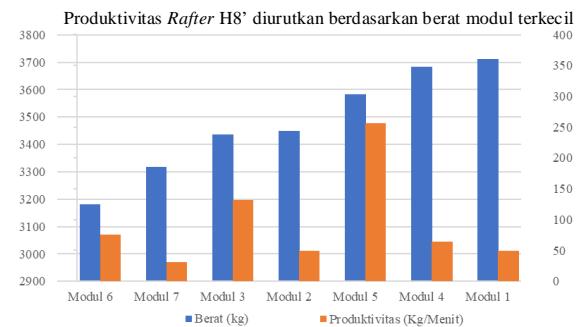
Tabel 2. Produktivitas rangka atap *Rafter H8* dan *H8'*

Rafter H8				Rafter H8'			
Modul	Berat (Kg)	Waktu Pekerjaan (Jam)	Produktivitas (Kg/Menit)	Modul	Berat (Kg)	Waktu Pekerjaan (Jam)	Produktivitas (Kg/Menit)
1	3.485,9	0.11.00	316,9	1	3.712,5	1.15.00	49,5
2	3.491,5	0.42.03	83,0	2	3.449,6	1.10.20	49,0
3	3.357,9	0.44.09	76,1	3	3.435,9	0.26.18	130,6
4	3.604,1	1.40.10	34,6	4	3.683,8	00.57.00	64,6
5	3.332,6	01.03.00	32,0	5	3.583,0	00.14.02	255,3
6	3.533,5	01.08.21	51,7	6	3.182,0	00.42.50	74,3
7	2.860,5	1.25.31	33,4	7	3.317,4	01.46.30	31,2

Hasil pengamatan menunjukkan total durasi pemasangan *Rafter H8* adalah 6 jam 54 menit, dengan berat total sebesar 23.655,9 kg, menghasilkan produktivitas rata-rata 3.427,9 kg/jam. Sementara *Rafter H8'* diselesaikan dalam 6 jam 32 menit untuk total berat 24.364,2 kg, dengan produktivitas rata-rata 3.729,2 kg/jam. Rincian tiap modul disajikan pada Tabel 2.



Gambar 11. Berat dan Produktivitas *Rafter H8*



Gambar 12. Berat dan Produktivitas *Rafter H8'*

Gambar 11 menunjukkan bahwa Modul 1 *Rafter H8*, meskipun bukan modul teringan, memiliki produktivitas tertinggi sebesar 316,90 kg/menit. Sementara itu Modul 7 yang merupakan modul paling ringan justru mencatat produktivitas terendah sebesar 33,45 kg/menit. Hal serupa juga terjadi pada *Rafter H8'*, di mana Modul 5 memiliki produktivitas tinggi (255,32 kg/menit) meski bobotnya hampir setara dengan modul lainnya sebagaimana Gambar 12. Hal ini menunjukkan bahwa berat modul tidak berbanding lurus dengan kecepatan pemasangan.



Gambar 13. Pemotongan pada Modul 7

Produktivitas proses pemasangan terendah tercatat terjadi pada Modul 7 *Rafter H8'* sebesar 31,15 kg/menit. Rendahnya tingkat produktivitas ini disebabkan oleh kendala teknis di lapangan, terutama ketidaksesuaian posisi antar elemen struktur khususnya sehubungan terjadinya deviasi posisi yang cukup besar antara *box plate* dan titik sambungan yang telah direncanakan yang memerlukan modifikasi konfigurasi *rafter* secara menyeluruh. Solusi atas permasalahan ini dilakukan melalui pemotongan sambungan pipa baja secara langsung di lokasi proyek, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 13.

Gambar 14. Penggerahan tenaga kerja untuk reposisi *rafter*Gambar 15. Pengelasan pada *box plate*

Pada kenyataannya kejadian tersebut tidak hanya menghambat waktu pelaksanaan, tetapi juga berimplikasi terhadap efisiensi sumber daya dan keselamatan kerja di lapangan. Selain itu dampak lanjut dari deviasi tersebut menuntut dilakukannya penurunan *U-head* pada *shoring* di modul-modul sebelumnya yang telah terpasang guna penyesuaian elevasi pelat sambung. Proses ini juga menuntut keterlibatan intensif banyak tenaga kerja untuk melakukan reposisi secara manual dan bertahap. Gambar 14 menunjukkan keberadaan delapan tenaga kerja untuk melakukan pengawalan proses penyesuaian elevasi titik-titik *rafter* yang sudah terangkai.

Pasca penyesuaian elevasi titik-titik *rafter* yang sudah terangkai, proses penyambungan akhir antara modul dan *box plate* diselesaikan melalui pekerjaan pengelasan di lapangan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 15. Bagaimanapun proses ini secara signifikan menambah durasi penggerahan dan berpotensi meningkatkan risiko kegagalan apabila tidak dilaksanakan sesuai dengan standar teknis yang berlaku. Kejadian ini menegaskan pentingnya perhatian terhadap toleransi dalam proses fabrikasi serta potensi deviasi selama tahap ereksi struktur. Kesalahan minor pada satu modul dapat menimbulkan konsekuensi sistemik yang berdampak pada akurasi dan kesesuaian sambungan modul-modul berikutnya.

Untuk menghindari terjadinya permasalahan-permasalahan terkait proses ereksi, penggunaan *tower crane* dengan kapasitas angkat yang lebih besar yang dapat melakukan pengangkatan satu bentang penuh *rafter* secara sekaligus dapat dilakukan melalui metode *pre-assembly* di area kerja, sebagaimana dalam penelitian lain pernah diusulkan oleh Han dkk. (2013) dan Shehata dkk. (2007). Strategi ini memungkinkan perakitan menyeluruh di lokasi kerja sebelum pengangkatan, dengan syarat ketersediaan area kerja yang memadai dan memiliki permukaan yang datar. Pendekatan *pre-assembly* tersebut dapat mengeliminasi akumulasi toleransi fabrikasi yang menjadi penyebab utama permasalahan pada Modul 7, serta mengurangi kebutuhan pengelasan di lapangan. Selain itu, metode ini juga berkontribusi terhadap efisiensi waktu dengan meminimalkan aktivitas penyesuaian di ketinggian, sekaligus menurunkan risiko deformasi yang dapat terjadi akibat pengangkatan berulang. Oleh karena itu, optimalisasi perencanaan logistik, pemilihan metode konstruksi, dan spesifikasi alat

angkat yang sesuai merupakan faktor kunci dalam meningkatkan efisiensi serta menjaga keselamatan kerja dalam pelaksanaan proyek konstruksi modular seperti pada kasus ini.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan pengumpulan dan analisis data hasil observasi di lapangan dapat ditarik dua kesimpulan utama terkait pekerjaan pemasangan rangka atap struktur baja yaitu bahwa:

1. Berat modul tidak memiliki pengaruh signifikan terhadap durasi pemasangan maupun tingkat produktivitas pekerjaan. Produktivitas tertinggi tercatat pada Modul 1 *Rafter H8* sebesar 316,9 kg/menit dengan berat modul 3.485,9 kg, sementara produktivitas terendah tercatat pada Modul 7 *Rafter H8'* sebesar 31,15 kg/menit yang mana memiliki berat modul lebih besar dari *Rafter H8* yaitu 3317,4 kg. Modul-modul dengan jumlah sambungan lebih banyak dan berada pada posisi kritis, seperti bagian tumpuan (Modul 4) atau sambungan bagian akhir dengan *box plate* (modul 7), membutuhkan waktu pemasangan lebih lama karena kompleksitas dalam proses penyesuaian dan pengencangan sambungan.
2. Produktivitas lebih dipengaruhi oleh metode kerja yang mencakup fabrikasi yang presisi, pengelolaan toleransi sambungan, penempatan dan penggunaan *tower crane* secara optimal, serta penyesuaian sistem *shoring* yang mendukung kestabilan struktur selama proses *erection*. Faktor-faktor ini sangat krusial untuk meningkatkan efisiensi pemasangan dan menjaga keselamatan kerja di lapangan.

Dalam hal kondisi proyek memungkinkan, metode *pre-assembly* sangat disarankan menjadi pilihan alternatif metode pemasangan rangka atap struktur baja. Metode ini diperkirakan akan dapat mengurangi akumulasi kesalahan akibat deviasi fabrikasi dan mempercepat waktu pemasangan. Selain itu, evaluasi menyeluruh terhadap toleransi geometrik dan perencanaan logistik ereksi untuk mendukung pelaksanaan proyek serupa yang lebih efisien dan aman di masa mendatang juga perlu menjadikan perhatian.

REFERENSI

- Choi, Y. S., Kim, T., & Kim, S. (2020). Comparative Analysis of Lifting Loads of Tower Cranes by Core Structure Construction Methods. *International Journal of High-Rise Buildings*, 9(3), 301–306. <https://doi.org/10.21022/IJHRB.2020.9.3.301>
- Dokumen Arsip Proyek. (2023). Gedung Gelanggang Inovasi dan Kreativitas (GIK) UGM. *Balai Prasarana dan Permukiman Wilayah D.I Yogyakarta*.
- Flaherty, D. M. (2019). *The Critical Pick: A Crane Rigging Demonstration*.
- Forsythe, P. J., & Sepasgozar, S. M. E. (2019). Measuring installation productivity in prefabricated timber construction. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 26(4), 578–598. <https://doi.org/10.1108/ECAM-09-2017-0205>
- Guo, H., Zhou, Y., Pan, Z., Zhang, Z., Yu, Y., & Li, Y. (2022). Automated Selection and Localization of Mobile Cranes in Construction Planning. *Buildings*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/buildings12050580>
- Han, S., Hasan, S., Lei, Z., Altaf, M. S., & Al-Hussein, M. (2013). A framework for crane selection in large-scale industrial construction projects. *ISARC 2013 - 30th International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining, Held in Conjunction with the 23rd World Mining Congress*.
- Seong, T. H., Ngian, S. P., & Zin, R. M. (2023). Economical Aspect of Truss Design Through Geometry Configuration. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 30(1), 105–114. <https://doi.org/10.37934/araset.30.1.105114>
- Shehata, M., Hafez, S. M., El-Lakany, A., & Abo El-Magd, Y. (2007). Establishing the optimum location of a single tower crane using a smart mathematical model. Dalam *Alexandria Engineering Journal* (Vol. 46, Nomor 4).
- Sinaga, F. Z., & Solikin, M. (2023). Produktivitas Alat Berat Tower Crane Untuk Pengecoran Pada Pembangunan Gedung (Studi Kasus Proyek Pembangunan Gedung XYZ di Jl. Pemuda). *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil*.
- Vayas, I., Ermopoulos, J., & Ioannidis, G. (2019). Fabrication and erection. Dalam *Springer Tracts in Civil Engineering* (hlm. 337–400). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95474-5_8
- Yates, J. K. (2014). *Productivity Improvement Construction Engineering and for Implementing Programs That Save Money and Time*. ASCE Press.
- Yazdi, A. J., Maghrebi, M., & Bolouri Bazaz, J. (2018). Optimizing the lift process in high-rise construction projects. <https://doi.org/10.22060/ceej.2018.13868.5496>