

ANALISIS EFISIENSI METODE PENGECORAN PERKERASAN KAKU (*RIGID PAVEMENT*) ANTARA *SLIPFORM PAVER* DAN *FIXED FORM*

Raiza Adella FP¹, Soehartono², Sri Subekti³

^{2,3} Dosen Teknik Sipil, Universitas Pandanaran,

¹ Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Pandanaran Semarang

Email : Raizaafp11@gmail.com, soehartono.sipilunpand@gmail.com, bekti@unpand.ac.id

Abstrak

Pemilihan metode pelaksanaan konstruksi perkerasan kaku merupakan faktor determinan dalam pencapaian efisiensi waktu, biaya, dan mutu pada Proyek Strategis Nasional. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perbandingan efisiensi antara metode otomatisasi *Slipform Paver* dan metode konvensional *Fixed Form* pada ruas Jalan Tol Solo–Yogyakarta Paket 1.2. Metodologi penelitian dilakukan melalui observasi lapangan, analisis produktivitas alat, serta komparasi Harga Satuan Pekerjaan (HSP). Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode *Slipform Paver* memiliki kecepatan produksi riil 3,21 kali lebih cepat dengan durasi 215 menit per 100 meter lari, dibandingkan metode *Fixed Form* yang membutuhkan 690 menit. Dari aspek biaya, metode *Slipform* mereduksi biaya upah hingga 60% dan meminimalisir limbah beton, meskipun memiliki biaya investasi alat yang tinggi. Analisis mutu menunjukkan nilai *International Roughness Index* (IRI) hasil *Slipform* (2,5-3,0 m/km) lebih baik daripada *Fixed Form* (3,5-4,5 m/km). Kesimpulannya, metode *Slipform Paver* lebih efektif dan efisien untuk pekerjaan jalur utama jalan tol dengan volume masif, sementara *Fixed Form* tetap relevan untuk area transisi dengan geometri kompleks.

Kata Kunci: *Rigid Pavement*, *Slipform Paver*, *Fixed Form*, Efisiensi, Jalan Tol.

Abstract

Selecting the construction method for rigid pavement is a decisive factor in achieving efficiency regarding time, cost, and quality in National Strategic Projects. This study aims to compare the efficiency of the automated *Slipform Paver* method versus the conventional *Fixed Form* method on the Solo–Yogyakarta Toll Road (Package 1.2). The research methodology involved field observations, equipment productivity analysis, and a comparison of Unit Work Prices (HSP). The results indicate that the *Slipform Paver* method achieves an actual production speed 3.21 times faster—taking 215 minutes per 100 linear meters—compared to the *Fixed Form* method, which requires 690 minutes. Regarding costs, the *Slipform* method reduces labor costs by up to 60% and minimizes concrete waste, despite the high initial investment cost for the equipment. Quality analysis shows that the *International Roughness Index* (IRI) values achieved via the *Slipform* method (2.5–3.0 m/km) are superior to those of the *Fixed Form* method (3.5–4.5 m/km). In conclusion, the *Slipform Paver* method is more effective and efficient for high-volume main-line toll road construction, whereas the *Fixed Form* method remains relevant for transition areas with complex geometry.

Keywords: *Rigid Pavement*, *Slipform Paver*, *Fixed Form*, Efficiency, Toll Road.

Pendahuluan

Penggunaan perkerasan kaku memiliki keunggulan pada durabilitas jangka panjang dan biaya pemeliharaan yang relatif lebih rendah dibandingkan perkerasan lentur, sehingga sangat ideal untuk mendukung beban repetisi lintas sumbu berat pada jalan bebas hambatan. Pelaksanaan pengecoran perkerasan kaku pada Paket 1.2, khususnya ruas Klaten – Purwomartani, memerlukan ketepatan metode untuk mencapai standar indeks kerataan dan kekuatan struktur yang direncanakan. Metode pengecoran yang umum digunakan melibatkan teknologi *Slipform Paver* yang mampu menghamparkan beton dalam volume besar dengan presisi tinggi. Namun, efisiensi di lapangan sering kali terkendala oleh sinkronisasi antara kapasitas produksi *batching plant* dengan kecepatan hampar alat di lokasi proyek.

Keberhasilan pekerjaan perkerasan kaku sangat bergantung pada manajemen waktu pengecoran dan pengendalian konsistensi nilai *slump* beton agar tidak terjadi *cold joint* yang dapat mereduksi integritas struktural plat beton. (Nugroho dkk. 2021). Efisiensi metode pelaksanaan menjadi parameter kritis dalam menjaga margin keuntungan kontraktor tanpa mengesampingkan mutu teknis. Pada segmen STA 38+000 s.d STA 40+975, tantangan teknis berupa kondisi akses material dan cuaca memerlukan strategi penjadwalan serta penempatan alat yang optimal. Penggunaan alat berat yang tidak seimbang dengan jumlah armada *truck mixer* menyebabkan *idle time* yang meningkatkan biaya operasional secara signifikan.

Tinjauan Pustaka

Karakteristik Perkerasan Kaku (*Rigid Pavement*)

Salah satu jenis perkerasan yang sering digunakan pada proyek jalan tol di Indonesia adalah perkerasan kaku (*rigid pavement*) yang menggunakan beton semen sebagai lapisan utama struktur perkerasan. Menurut Direktorat Jenderal Bina Marga, perkerasan kaku memiliki kekakuan yang tinggi sehingga mampu mendistribusikan beban kendaraan secara lebih merata ke lapisan tanah dasar (Kemen. PUPR, 2017). Perkerasan kaku atau *rigid pavement* didefinisikan sebagai struktur perkerasan yang menggunakan plat beton semen (*cement concrete slab*) sebagai lapis permukaan yang terletak di atas lapis pondasi bawah (*subbase*) atau langsung di atas tanah dasar (*subgrade*). Secara struktural, perkerasan ini memiliki modulus elastisitas yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan perkerasan lentur (*flexible pavement*), sehingga mekanisme penyaluran beban roda kendaraan dilakukan melalui kekakuan plat yang menyebarkan tegangan ke area tanah dasar yang luas (PUPR, 2021).

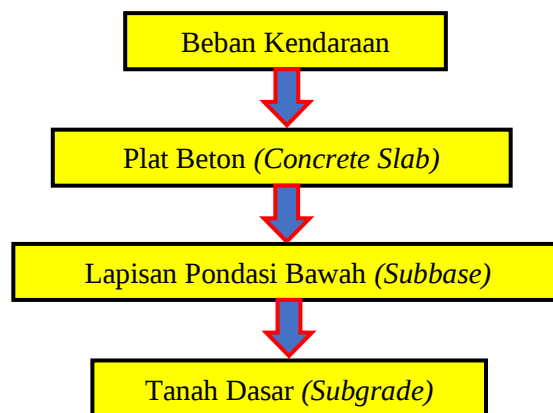
Secara operasional, perkerasan kaku memiliki durasi masa layanan atau umur rencana yang panjang, umumnya berkisar antara 20 hingga 40 tahun dengan biaya pemeliharaan yang relatif rendah dibandingkan perkerasan aspal (Mulyono, 2019). Kekakuan beton menyebabkan distribusi tegangan terjadi secara luas sehingga deformasi yang terjadi lapisan tanah dasar relatif kecil dibandingkan sistem perkerasan lainnya (Bina Marga, 2017).

Tabel 1. Karakteristik Perkerasan Kaku

No	Karakteristik	Perkerasan Kaku (<i>Rigid</i>)
1	Material utama	Semen Portland (PC)
2	Kekakuan struktur	Tinggi (Kaku)
3	Distribusi beban	Menyebar luas melalui plat beton
4	Deformasi	Relatif kecil
5	Umur Rencana	20 - 40 Tahun
6	Pemeliharaan	Rendah namun sulit diperbaiki jika retak
7	Ketahanan terhadap beban berat	Sangat baik
8	Tanah Dasar	Perubahan daya dukung tidak terlalu berpengaruh

(Sumber : Sukirman, 2019; Bina Marga, 2017)

Bagan Mekanisme Distribusi Beban



Gambar 1. Mekanisme Distribusi Beban
(Sumber : Bina Marga, 2017)

Bagan di atas menunjukkan mekanisme distribusi beban pada sistem perkerasan kaku. Beban kendaraan pertama kali diterima oleh plat beton yang kemudian disebarkan ke lapisan pondasi bawah dan akhirnya diteruskan ke tanah dasar. Karena plat beton memiliki kekakuan yang tinggi, distribusi tegangan yang terjadi pada tanah dasar menjadi lebih merata sehingga potensi terjadinya deformasi dapat diminimalkan (*Bina Marga, 2017*).

Tabel 2. Perbandingan Karakteristik Perkerasan Kaku dan Perkerasan Lentur

No	Parameter	Perkerasan Kaku (<i>Rigid</i>)	Perkerasan Lentur (<i>Flexible</i>)
1	Bahan Ikat	Semen Portland (PC)	Aspal (Bitumen)
2	Distribusi Beban	Melalui kekakuan plat (luas)	Melalui antar butir agregat (sempit)
3	Modulus Elastisitas	Tinggi (Kaku)	Rendah (Lentur)
4	Umur Rencana	20 - 40 Tahun	5 - 20 Tahun
5	Tanah Dasar	Perubahan daya	Sangat dipengaruhi

		dukung tidak terlalu berpengaruh	daya dukung tanah dasar
6	Pemeliharaan	Rendah namun sulit diperbaiki jika retak	Tinggi namun mudah dilakukan pelapisan ulang

(Sumber : Diolah dari Pd T-14-2003 dan Spesifikasi Umum Bina

Komponen Struktur Perkerasan Kaku

Secara umum, komponen utama perkerasan kaku terdiri dari : (Bina Marga, 2017).

1. Tanah dasar (*Subgrade*)
2. Lapisan pondasi bawah (*Subbase Course*)
3. Plat beton (*Concrete Slab*)
4. Sistem sambungan (*Joint*)
5. Tulangan atau perangkat transfer beban (*Dowel dan Tie Bar*)

Tanah Dasar (*Subgrade*)

Tanah dasar adalah fondasi paling bawah yang berfungsi sebagai tumpuan seluruh beban struktur perkerasan. Parameter utama dalam penentuan kualitas *subgrade* adalah Nilai *California Bearing Ratio* (CBR) dan Modulus Reaksi Tanah Dasar (*k*). Pada Proyek Jalan Tol Solo – Yogyakarta, stabilitas tanah dasar menjadi krusial karena adanya potensi tanah ekspansif yang dapat menyebabkan penurunan tidak seragam (*differential settlement*). Perbaikan tanah dasar seringkali dilakukan melalui proses stabilisasi semen atau penggunaan geotekstil untuk memastikan nilai CBR desain tercapai sebelum lapisan di atasnya dikerjakan. Lapisan tanah alami yang menjadi dasar bagi seluruh struktur perkerasan jalan. Kinerja struktur perkerasan sangat dipengaruhi oleh kondisi tanah dasar karena lapisan ini berfungsi sebagai penopang utama yang menerima beban dari lapisan perkerasan di atasnya. (Kementerian PUPR, 2017).

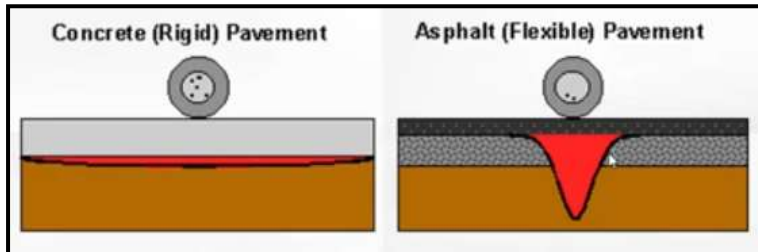
Lapis Pondasi Bawah (*Subbase/Lean Concrete*)

Lapis pondasi bawah pada perkerasan kaku umumnya menggunakan *Lean Concrete* (LC) atau Beton Kurus dengan mutu rendah (sekitar K-125 atau f'c 10 MPa). Fungsi utama LC adalah sebagai lantai kerja yang rata untuk penghamparan plat beton utama, mencegah terjadinya penggerusan tanah dasar akibat air (*pumping*), serta memberikan dukungan yang seragam bagi plat beton. Selain itu, penggunaan *bond breaker* berupa plastik tipis di atas LC sangat penting untuk mencegah terjadinya ikatan (*bonding*) antara LC dan plat beton yang dapat memicu retak refleksi. Lapisan ini berfungsi untuk meningkatkan daya dukung struktur perkerasan serta memberikan permukaan yang stabil bagi pelaksanaan pengecoran plat beton (Sukirman, 2019).

Subbase biasanya terdiri dari material granular atau material yang distabilisasi seperti *Lean Concrete* atau *Cement Treated Base* (CTB). Penggunaan lapisan ini juga bertujuan untuk mengurangi potensi terjadinya *pumping*, yaitu keluarnya air dan partikel tanah dari bawah plat beton akibat tekanan berulang dari beban lalu lintas (Hidayat, 2020).

Plat Beton (*Concrete Slab*)

Plat beton adalah elemen struktural utama yang langsung bersentuhan dengan beban roda kendaraan. Beton yang digunakan harus memiliki kuat tarik lentur (*Flexural Strength*) minimal 4,5 MPa pada umur 28 hari (Bina Marga, 2018).



Gambar 2. Distribusi Pembebanan Perkerasan Kaku dan Lentur
(Sumber : Bina Marga, 2017)

Persyaratan Mutu Material dan Campuran Beton

Dalam perkerasan kaku, beton umumnya dirancang untuk memiliki kekuatan lentur (*flexural strength*) yang cukup tinggi karena beban kendaraan akan menyebabkan tegangan tarik pada bagian bawah plat beton. Mutu beton untuk perkerasan jalan biasanya dinyatakan dalam bentuk kuat lentur (*modulus of rupture*) yang umumnya berkisar antara 4,0–4,5 MPa tergantung pada klasifikasi jalan dan beban lalu lintas yang direncanakan (Bina Marga, 2017). Material penyusun beton pada perkerasan kaku terdiri dari beberapa komponen utama yaitu semen, agregat halus, agregat kasar, air, dan bahan tambah (*admixture*). Setiap material tersebut harus memenuhi persyaratan teknis tertentu agar campuran beton yang dihasilkan memiliki kualitas yang baik serta mampu mencapai umur layanan yang direncanakan (SNI 2847:2019).

Pada umumnya, beton mengandung rongga udara sekitar 1% - 2%, pasta semen (semen dan air) sekitar 25% - 40%, dan agregat (agregat halus dan agregat kasar) sekitar 60% -75%. Untuk mendapatkan kekuatan yang baik, sifat dan karakteristik dari masing – masing bahan penyusun tersebut perlu dipelajari. Beton sering digunakan dalam pekerjaan teknik sipil karena memiliki banyak kelebihan diantaranya tahan terhadap serangan api, tahan terhadap serangan korosi, mudah dibentuk, mampu memikul beban yang berat dengan umur rencana yang lama dibandingkan dengan perkerasan lentur, dan juga biaya pemeliharaan yang relatif kecil. (SNI 2847:2019).

Semen Portland dan Material Pozolan

Semen merupakan bahan ikat hidrolis yang paling krusial. Pada pembangunan jalan tol di Indonesia, jenis semen yang umum digunakan adalah Semen Portland Tipe I atau Tipe IP (PPC) yang memenuhi standar SNI 2049:2015. Persentase penggantian semen dengan *fly ash* biasanya dibatasi maksimal 25% untuk memastikan kekuatan awal beton tetap terpenuhi (Prasetyo, 2025). Dalam konstruksi perkerasan kaku, jenis semen yang umum digunakan adalah Semen Portland (OPC) karena memiliki kekuatan awal dan daya rekat yang baik (Sukirman, 2019).

Karakteristik Agregat Halus dan Kasar

Faktor lain yang perlu diperhatikan adalah gradasi atau distribusi butiran agregat. Apabila ukuran butiran agregat seragam maka volume pori akan bertambah, dan apabila ukuran butiran agregat bervariasi maka volume pori akan mengecil. Hal ini disebabkan butiran agregat yang lebih kecil akan mengisi pori-pori di antara butiran yang lebih besar (SNI 03-2847-2019).

Tabel 3. Persyaratan Gradasi Agregat Gabungan untuk Beton Perkerasan

No	Ukuran Ayakan (mm)	Persen Lolos Kumulatif (%)
1	50,0 (2")	100
2	37,5 (1 ½")	95 – 100
3	19,0 (¾")	45 – 80
4	9,5 (¾")	30 – 60
5	4,75 (No. 4)	22 – 45
6	1,18 (No. 16)	10 – 30
7	0,30 (No. 50)	2 – 10
8	0,15 (No. 100)	0 – 2

(Sumber : Spesifikasi Umum Bina Marga, 2018)

Air dan Bahan Tambah Kimia (*Admixture*)

Air merupakan salah satu komponen penting dalam campuran beton yang berfungsi untuk memicu reaksi hidrasi semen sehingga terbentuk pasta semen yang mengikat agregat. Kualitas air yang digunakan dalam campuran beton harus memenuhi persyaratan tertentu agar tidak mengganggu proses hidrasi semen maupun menurunkan kekuatan beton. Perbandingan antara jumlah air dan semen dalam campuran beton dikenal dengan istilah *water cement ratio* (w/c ratio). Nilai w/c ratio sangat mempengaruhi kekuatan beton yang dihasilkan. Semakin kecil nilai w/c ratio maka kekuatan beton akan semakin tinggi, namun *workability* beton menjadi lebih rendah.

Penggunaan air untuk campuran beton sebaiknya memenuhi syarat sebagai berikut : (SNI 2847:2019)

1. Kandungan lumpur maksimum 2 gram/liter.
2. Kandungan garam-garam yang dapat merusak beton seperti asam, zat organik, dan lain lain maksimum 15 gram/liter.
3. Kandungan klorida (C_l) maksimum 0,5 gram/liter.
4. Kandungan senyawa sulfat maksimum 1 gram/liter

Bahan tambah atau *admixture* merupakan material tambahan yang digunakan dalam campuran beton untuk memperbaiki sifat beton segar maupun beton keras. Penggunaan *admixture* dalam konstruksi perkerasan kaku bertujuan untuk meningkatkan *workability*, mempercepat atau memperlambat waktu pengerasan, meningkatkan durabilitas beton.

Tabel 4. Jenis Bahan Tambah (*Admixture*)

No	Jenis Admixture	Fungsi
1	<i>Water reducer</i>	Mengurangi kebutuhan air
2	<i>Retarder</i>	Memperlambat waktu pengerasan
3	<i>Accelerator</i>	Mempercepat waktu pengerasan
4	<i>Superplasticizer</i>	Meningkatkan <i>workability</i> beton

(Sumber : SNI 2847:2019)

Faktor-faktor yang mempengaruhi mutu beton

1) Sumber Daya Manusia

Hal yang mempengaruhi sumber daya manusia yang menuju ke kinerja manusia dan pencapaian mutu yaitu tingkat pendidikan dari seorang tersebut, pendidikan informal seperti pelatihan-pelatihan di luar pembelajaran formal, pengalaman kerja, kemampuan bersaing antar individu, potensi berprestasi, ketrampilan, jenis kelamin dan juga dari kematangan kepribadian tersebut.

2) Peralatan Penggunaan

Alat juga merupakan faktor utama yang berpengaruh terhadap mutu. Kondisi alat, ketersediaan peralatan, upaya pemeliharaan, kesesuaian spesifikasi alat dengan rencana kerja dan persyaratan (RKS), ketersediaan panduan alat yang lengkap, biaya akuisisi, dan tidak kalah pentingnya, kemampuan operator yang menggunakan alat tersebut.

3) Material Salah

Satu elemen yang memengaruhi mutu adalah faktor material, yang melibatkan beberapa aspek seperti ketersediaan material di tempat, kualitas material itu sendiri, langkah-langkah dalam pengadaan atau transportasi material dari sumber ke lokasi yang dituju, serta komposisi material yang meliputi contoh seperti dalam hal agregat yang membutuhkan komposisi, suhu yang tepat, gradasi partikel yang presisi.

4) Tampilan Format Standar

Format standar yang dimaksud mencakup penggunaan bahasa yang jelas, kejelasan dari isi standar itu sendiri, kejelasan substansi mutu standar, langkah-langkah penerapan kualifikasi standar mutu, panduan yang mendukung standar mutu, aspek keaslian, dan estimasi biaya yang dibutuhkan untuk implementasi standar mutu tersebut.

5) Prosedur Kerja

Prosedur kerja bertujuan untuk mencapai mutu yang diinginkan diperlukan penerapan standar mutu kerja yang meliputi ketetapan standar mutu, dan juga tahapan-tahapan pelaksanaan yang sesuai dengan prosedur sosialisasi keseragaman dan standar mutu.

Metode Pelaksanaan Pengecoran (*Fixed Form* vs *Slipform Paver*)

Metode pelaksanaan pengecoran merupakan variabel penentu utama dalam mencapai efisiensi waktu, biaya, dan mutu pada proyek jalan tol. Pemilihan antara metode konvensional (*fixed form*) dan metode mekanis (*slipform*) didasarkan pada volume pekerjaan, geometri jalan, dan target produktivitas harian. Pelaksanaan pengecoran perkerasan kaku merupakan salah satu aspek penting dalam proses konstruksi jalan beton. Metode pelaksanaan yang tepat akan mempengaruhi kualitas hasil pengecoran, kecepatan pekerjaan, serta efisiensi penggunaan sumber daya pada proyek konstruksi jalan. Dalam praktik konstruksi perkerasan kaku, terdapat dua metode utama yang umum digunakan yaitu metode *Fixed Form* dan metode *Slipform Paver* (Kementerian PUPR, 2018).

1. Metode *Fixed Form*

Merupakan metode pengecoran beton yang menggunakan bekisting tetap sebagai pembatas bentuk plat beton. Metode ini banyak digunakan pada proyek dengan skala kecil hingga menengah karena peralatannya relatif sederhana.

2. Metode *Slipform Paver*

Merupakan metode pengecoran beton menggunakan alat mekanis khusus yang dapat melakukan pengecoran, pemadatan, serta pembentukan permukaan beton secara simultan tanpa menggunakan bekisting tetap.

Tabel 5. Perbandingan Teknis *Fixed Form* vs *Slipform Paver*

No	Parameter Perbandingan	Metode <i>Fixed Form</i>	Metode <i>Slipform Paver</i>
1	Kebutuhan Bekisting	Menggunakan bekisting baja tetap	Tanpa bekisting (cetakan berjalan)
2	Konsistensi Beton	<i>Slump</i> sedang (5–10 cm)	<i>Slump</i> rendah (0–5 cm)
3	Kecepatan Pelaksanaan	Rendah (Manual / Semi - Mekanis)	Sangat Tinggi (Mekanis Penuh)
4	Tenaga Kerja	Padat karya	Minim (Operator Alat Berat)
5	Akurasi Elevasi	Bergantung pada presisi bekisting	Kontrol sensor laser otomatis
6	Biaya alat	Lebih rendah	Lebih tinggi
7	Kesesuaian Lokasi	Area sempit/geometri rumit	Jalan utama (<i>main road</i>) panjang

(Sumber : Diolah dari Spesifikasi Umum Bina Marga, 2018)

Berdasarkan tabel tersebut dapat diketahui bahwa metode *slipform paver* memiliki keunggulan dalam hal produktivitas pekerjaan dan konsistensi kualitas hasil pengecoran. Metode ini membutuhkan investasi peralatan yang lebih besar dibandingkan metode *fixed form*.

Alat Berat dan Manajemen Logistik Beton

Pelaksanaan pekerjaan perkerasan kaku pada proyek jalan tol memerlukan dukungan peralatan konstruksi yang memadai serta sistem manajemen logistik beton yang efektif. Penggunaan alat berat yang tepat dapat meningkatkan produktivitas pekerjaan serta menjamin kualitas hasil pengecoran beton sesuai dengan spesifikasi teknis yang telah ditetapkan. Selain itu, pengelolaan logistik beton yang baik sangat penting untuk menjaga kontinuitas suplai beton selama proses pengecoran berlangsung (Kementerian PUPR, 2018). Dalam proyek konstruksi jalan beton, alat berat berperan dalam berbagai tahapan pekerjaan seperti persiapan permukaan, pengangkutan material, pengecoran beton, pemadatan, hingga finishing permukaan beton. Pemilihan jenis alat berat harus mempertimbangkan kapasitas alat, kondisi proyek, serta volume pekerjaan yang akan dilaksanakan (Sukirman, 2019).

Analisis Kebutuhan *Concrete truck mixer/Agitator Truck*

Concrete truck mixer atau *Agitator truck* berfungsi menjaga homogenitas campuran beton selama perjalanan agar tidak terjadi segregasi. Jumlah kebutuhan truk (*N*) sangat dipengaruhi oleh waktu siklus (*cycle time*) yang meliputi waktu muat, waktu tempuh pergi-

pulang, dan waktu tunggu di lokasi proyek. Ketidakseimbangan jumlah armada dapat menyebabkan antrean panjang yang berisiko membuat beton melampaui waktu ikat awal (*initial setting time*), atau sebaliknya, menyebabkan mesin paver berhenti karena kekurangan pasokan. *Concrete truck mixer* merupakan alat transportasi yang digunakan untuk mengangkut beton segar dari batching plant menuju lokasi pengecoran. Alat ini dilengkapi dengan drum berputar yang berfungsi untuk menjaga homogenitas campuran beton selama proses pengangkutan.

Tabel 6. Alat Pendukung Pekerjaan Beton

No	Jenis Alat	Fungsi
1	<i>Concrete Vibrator</i>	Memadatkan beton
2	<i>Concrete Pump</i>	Memindahkan beton
3	<i>Texturing Machine</i>	Membentuk tekstur permukaan
4	<i>Curing Equipment</i>	Menjaga kelembaban beton

(Sumber : Diolah dari Spesifikasi Umum Bina Marga, 2018)

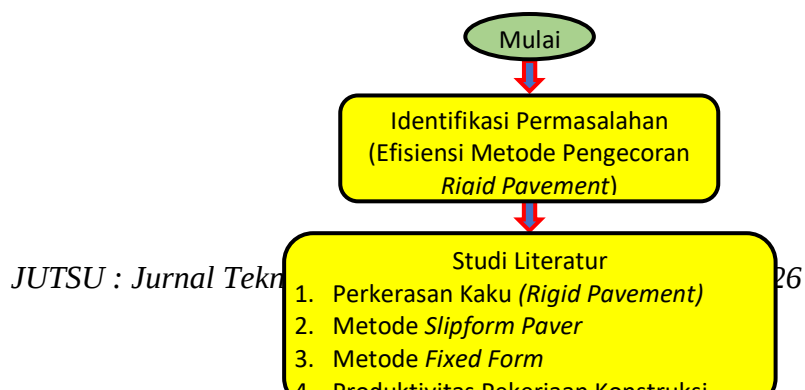
Analisis Varians Waktu dan Biaya (*Time-Cost Trade-off*)

Dalam setiap metode pelaksanaan, terdapat hubungan timbal balik antara waktu dan biaya. Percepatan durasi pengerjaan menggunakan metode *slipform paver* umumnya membutuhkan biaya investasi atau sewa alat yang lebih tinggi, namun dapat menurunkan biaya *overhead* proyek secara keseluruhan. Analisis efisiensi pada tugas akhir ini melibatkan evaluasi apakah peningkatan kecepatan pengerjaan pada panjang 2.975 meter tersebut memberikan penghematan biaya total atau justru menimbulkan inefisiensi akibat penggunaan sumber daya yang berlebihan.

Metode Penelitian

Penelitian ini disusun secara sistematis untuk membandingkan efisiensi dua metode pengecoran. Alur penelitian dimulai dari perumusan masalah, pengumpulan data primer dan sekunder, hingga analisis komparasi produktivitas dan biaya. Penelitian mengambil studi kasus pada Proyek Jalan Tol Solo–Yogyakarta Paket 1.2 Klaten – Purwomartani STA 38+000–STA 40+975. Studi kasus sering digunakan dalam penelitian teknik sipil untuk menganalisis kondisi aktual suatu proyek konstruksi sehingga dapat memberikan gambaran nyata mengenai pelaksanaan pekerjaan di lapangan.

Berikut merupakan bagan alir penelitian yang menggambarkan tahapan penelitian secara sistematis.



Gambar 3. Bagan Alir Penelitian (Flowchart)
(Sumber : Dokumen Pribadi, 2026)

Analisa dan Pembahasan

Analisis Waktu Pelaksanaan Pekerjaan *Rigid Pavement*

Pekerjaan perkerasan kaku (*rigid pavement*) merupakan salah satu tahapan utama dalam pembangunan jalan tol yang memerlukan pengendalian waktu pelaksanaan secara

optimal. Pada proyek pembangunan jalan tol Solo–Yogyakarta Paket 1.2 Klaten – Purwomartani STA 38+000 s.d STA 40+975, pekerjaan *rigid pavement* dilakukan menggunakan dua pendekatan metode pelaksanaan yaitu metode *Slipform Paver* dan metode *Fixed Form*. Analisis waktu pelaksanaan pekerjaan pada penelitian ini dilakukan dengan membandingkan produktivitas pekerjaan *rigid pavement* antara metode *Slipform Paver* dan *Fixed Form*.

Data yang digunakan meliputi :

1. Volume pekerjaan
2. Kapasitas alat
3. Waktu siklus pekerjaan, serta
4. Kondisi operasional di lapangan.

Analisis ini bertujuan untuk mengetahui metode pelaksanaan yang lebih efisien dari segi durasi pekerjaan.

Tahapan Pelaksanaan Pekerjaan *Rigid Pavement*

Pekerjaan *rigid pavement* pada proyek jalan tol umumnya dilakukan melalui beberapa tahapan pekerjaan yang saling berkaitan. Tahapan tersebut meliputi :

1. Persiapan permukaan kerja
2. Pemasangan tulangan dan *dowel*
3. Pengecoran beton
4. Perataan permukaan, serta
5. Pekerjaan *finishing* (*grooving* dan *curing* beton)

Berdasarkan pedoman pelaksanaan perkerasan kaku, proses pelaksanaan dapat dibagi menjadi beberapa tahap utama sebagai berikut :

- 1) Persiapan permukaan kerja (*subbase preparation*)

Tahap ini meliputi pemeriksaan elevasi lapisan pondasi bawah, pembersihan area kerja, serta pemasangan patok elevasi sebagai kontrol ketebalan plat beton.

- 2) Pemasangan *dowel* dan *tie bar*

Dowel berfungsi sebagai penghubung antar plat beton untuk mendistribusikan beban kendaraan, sedangkan *tie bar* berfungsi menjaga stabilitas sambungan memanjang.

- 3) Pengecoran beton

Beton dari *batching plant* diangkut menggunakan *truck mixer* menuju lokasi pekerjaan, kemudian dihampar menggunakan alat *paver* atau secara manual sesuai metode pelaksanaan.

- 4) Perataan dan pemadatan beton

Beton yang telah dihampar diratakan menggunakan *screed* atau sistem *vibrator* untuk memperoleh kepadatan dan kerataan permukaan yang sesuai dengan spesifikasi.

- 5) *Finishing* dan *curing* beton

Tahap akhir meliputi pembuatan tekstur permukaan (*grooving*), penyiraman *curing compound*, serta perlindungan beton selama masa pengerasan.

Tahapan-tahapan tersebut berlaku baik pada metode *Slipform* maupun *Fixed Form*, namun terdapat perbedaan pada mekanisme pengecoran dan peralatan yang digunakan.

Metode *Slipform Paver* menggunakan alat berat otomatis yang berfungsi sekaligus sebagai penghampar, pemadat, dan pembentuk profil perkerasan tanpa memerlukan

bekisting tetap. Keunggulan utama metode ini adalah kecepatan penghamparan yang kontinu.

Tabel 7. Estimasi Siklus Waktu *Slipform Paver* (Per 100 Meter Lari)

No	Tahapan Pekerjaan	Durasi (Jam)	Keterangan
1	Persiapan Jalur dan <i>Stringline</i>	1,0	Pemasangan kawat pemandu
2	Logistik Beton (<i>Truck Mixer</i>)	Kontinu	Bergantung kapasitas <i>Batching Plant</i>
3	Penghamparan dan Konsolidasi	2,5	Kecepatan rata-rata 0.5 - 1.0 m/menit
4	<i>Finishing</i> dan <i>Texturing</i>	1,0	Otomatis/Manual
5	<i>Curing</i> dan <i>Cutting</i>	3,0	Setelah beton mencapai initial set
Total Estimasi Waktu		7,5 jam	

(Sumber : Dokumen Pribadi, 2026)

Produktivitas Metode *Fixed Form* (Acuan Tetap)

Metode *Fixed Form* mengandalkan bekisting baja atau kayu yang dipasang manual di sepanjang tepi rencana perkerasan. Meskipun biaya investasi alat lebih rendah, metode ini memerlukan tenaga kerja yang lebih banyak dan waktu tunggu yang lebih lama untuk proses bongkar-pasang bekisting. Menurut analisis efisiensi pada proyek jalan raya, metode *fixed form* memiliki kendala pada *interruption time* saat perpindahan zona kerja, mengakibatkan produktivitas harian cenderung stagnan.

Tabel 8. Estimasi Siklus Waktu *Fixed Form* (Per 100 Meter Lari)

No	Tahapan Pekerjaan	Durasi (Jam)	Keterangan
1	Pemasangan bekisting baja	4,0	Manual oleh pekerja
2	Pemasangan <i>dowels</i> dan <i>tie bars</i>	2,0	Pengelasan/ikatan
3	Pengecoran dan vibrasi manual	5,0	Menggunakan <i>vibrator roller</i>
4	<i>Finishing</i> manual	2,0	Menggunakan <i>long handle float</i>
5	Bongkar bekisting	3,0	Dilakukan H+1
Total Estimasi Waktu		16,0 jam	

(Sumber : Dokumen Pribadi, 2026)

Tabel 9. Perbandingan Karakteristik Metode Pengecoran *Rigid Pavement*

No	Parameter	<i>Slipform Paver</i>	<i>Fixed Form</i>
1	Sistem pengecoran	Kontinu menggunakan mesin <i>paver</i>	Bertahap menggunakan bekisting
2	Produktivitas	Tinggi	Sedang
3	Kebutuhan tenaga kerja	Relatif sedikit	Relatif lebih banyak
4	Kontrol ketebalan beton	Otomatis oleh mesin	Manual menggunakan bekisting
5	Kecepatan pekerjaan	Lebih cepat	Lebih lambat

(Sumber : Dokumen Pribadi, 2026)

Tabel 10. Perhitungan Durasi Riil Pengecoran (L = 100 m, Tebal = 30 cm)

No	Komponen Aktivitas	<i>Slipform Paver</i> (Menit)	<i>Fixed Form</i> (Menit)	Rasio Efisiensi
1	Persiapan (<i>Stringline</i> vs Bekisting)	60	180	1 : 3,0
2	Pengecoran & Pemasangan	125	300	1 : 2,4
3	Finishing & Texturing	30	90	1 : 3,0
4	Bongkar Bekisting & Pembersihan	0	120	-
	Total Durasi Riil	215 Menit	690 Menit	3,21 Kali

(Sumber : Dokumen Pribadi, 2026)

Analisis Waktu Pelaksanaan Metode *Slipform Paver*

Metode *Slipform Concrete Paver* pada proyek Jalan Tol Solo–Yogyakarta Paket 1.2 merupakan metode pengecoran kontinu yang mengintegrasikan proses penghamparan, pemadatan, dan pembentukan profil perkerasan dalam satu kesatuan kerja alat berat. Secara teknis, efisiensi waktu pada metode ini bersumber dari eliminasi penggunaan bekisting tetap (*fixed form*) di sepanjang jalur pengecoran, sehingga waktu siklus kerja hanya berfokus pada kecepatan linier alat dan kontinuitas suplai beton dari *Batching Plant*. Perbandingan waktu pelaksanaan antara metode *Slipform Paver* dan *Fixed Form* pada pekerjaan *rigid pavement* merupakan aspek penting dalam mengevaluasi efisiensi metode konstruksi, khususnya pada proyek jalan tol dengan volume pekerjaan besar. Metode *slipform paver* menggunakan sistem mekanisasi dengan proses pengecoran beton yang dilakukan secara kontinu, sedangkan metode *fixed form* menggunakan sistem konvensional dengan pemasangan bekisting pada setiap segmen pekerjaan. Perbedaan mendasar tersebut menyebabkan adanya perbedaan signifikan dalam produktivitas dan durasi pelaksanaan pekerjaan.

Analisis Efektivitas Pekerjaan *Rigid Pavement*

Analisis efektivitas pada proyek Jalan Tol Solo–Yogyakarta Paket 1.2 dilakukan untuk menentukan sejauh mana metode pelaksanaan mampu memenuhi target kinerja proyek yang optimal. Efektivitas diukur melalui integrasi antara kecepatan produksi, rasio biaya terhadap volume, serta konsistensi mutu pada segmen STA 38+000 s.d STA 40+975.

Analisis efektivitas pekerjaan *rigid pavement* merupakan tahap integratif yang menggabungkan aspek waktu, biaya, dan mutu untuk menilai keberhasilan metode pelaksanaan konstruksi. Pada proyek Jalan Tol Solo–Yogyakarta Paket 1.2 Klaten – Purwomartani STA 38+000 s.d STA 40+975, efektivitas metode pengecoran dianalisis dengan membandingkan kinerja metode *Slipform Paver* dan *Fixed Form* terhadap target proyek yang telah ditetapkan. Efektivitas pekerjaan konstruksi tidak hanya diukur dari kecepatan penyelesaian pekerjaan, tetapi juga dari efisiensi biaya serta konsistensi mutu hasil pekerjaan. Keberhasilan proyek konstruksi ditentukan oleh keterpaduan antara ketiga aspek tersebut, yang dikenal sebagai konsep *triple constraint (time–cost–quality)*. Analisis

efektivitas pada penelitian ini dilakukan secara *komprehensif* melalui beberapa indikator utama yang relevan dengan pekerjaan *rigid pavement*.

Matriks Penentuan Efektivitas Total

Sebagai kesimpulan dari analisis efektivitas, dibuat sebuah matriks pembobotan yang mencakup aspek waktu, biaya, dan mutu. Pada Proyek Jalan Tol Solo–Yogyakarta Paket 1.2, metode *Slipform Paver* memperoleh skor efektivitas yang lebih tinggi untuk pekerjaan perkerasan utama. Pemilihan metode otomatisasi bukan lagi sekadar pilihan, melainkan kebutuhan teknis untuk mencapai target efektivitas konstruksi pada era transformasi digital industri konstruksi 4.0. Matriks pengambilan keputusan digunakan untuk menentukan metode yang paling efektif berdasarkan beberapa kriteria utama, yaitu waktu, biaya, mutu, dan adaptabilitas.

Tabel 11. Matriks Pembobotan Efektivitas Metode Pelaksanaan

No	Parameter Efektivitas	Bobot (%)	Skor <i>Slipform Paver</i> (1-5)	Skor <i>Fixed Form</i> (1- 5)	Nilai Akhir (S/F)
1	Kecepatan Produksi	35%	5	2	1.75 / 0.70
2	Efisiensi Biaya Total	30%	4	3	1.20 / 0.90
3	Kualitas & Kerataan	25%	5	3	1.25 / 0.75
4	Kemudahan Operasional	10%	3	4	0.30 / 0.40
5	Total Skor Efektivitas	100%	-	-	4.50 / 2.75

(Sumber : Dokumen Pribadi, 2026)

Rekapitulasi Perbandingan Perhitungan Metode Pelaksanaan

Rekapitulasi ini menyajikan perbandingan komprehensif antara metode *Slipform Paver* dan *Fixed Form* berdasarkan hasil analisis yang telah diuraikan pada subbab sebelumnya. Fokus utama rekapitulasi ini adalah pada segmen STA 38+000 s.d STA 40+975 Proyek Jalan Tol Solo–Yogyakarta Paket 1.2 untuk menentukan metode yang paling optimal secara teknis dan ekonomis.

Secara umum, analisis menunjukkan bahwa metode *slipform paver* memiliki keunggulan dalam aspek produktivitas dan efisiensi waktu, sedangkan metode *fixed form* memiliki keunggulan dalam fleksibilitas pelaksanaan. Proyek jalan tol dengan volume pekerjaan besar, aspek waktu dan konsistensi mutu menjadi faktor dominan dalam menentukan efektivitas metode pelaksanaan.

Sintesis Parameter Waktu dan Durasi Pelaksanaan

Berdasarkan hasil analisis pada Subbab 4.1 dan 4.2, metode *Slipform Paver* menunjukkan keunggulan durasi yang signifikan. Kecepatan linier alat berat yang terintegrasi mampu memangkas waktu siklus pekerjaan per 100 meter lari hingga 68,8% dibandingkan metode *Fixed Form*. Efisiensi ini bersumber dari eliminasi proses bongkar-pasang bekisting baja yang pada metode konvensional memakan waktu rata-rata 180 menit per siklus. Akselerasi jadwal pada proyek strategis nasional sangat bergantung pada reduksi *non-productive time* melalui penggunaan alat berat otomatis. Hasil analisis menunjukkan bahwa metode *slipform paver* memiliki produktivitas lebih tinggi dibandingkan metode

fixed form. Produktivitas slipform berada pada kisaran 25–35 m³/jam, sedangkan metode *fixed form* berkisar 15–20 m³/jam.

Tabel 12. Rekapitulasi Waktu dan Durasi Pelaksanaan

No	Parameter Efektivitas	<i>Slipform Paver</i>	Skor <i>Fixed Form</i>
1	Produktivitas	25 – 35 m ³ /jam	15 – 20 m ³ /jam
2	Durasi (500 m ³)	± 16 – 18 jam	± 27 – 30 jam
3	Sistem kerja	Kontinu	Bertahap
4	Efisiensi waktu	Tinggi	Rendah
5	Deviasi jadwal	Kecil	Sedang

(Sumber : Dokumen Pribadi, 2026)

Rekapitulasi Hasil Penelitian

Secara keseluruhan, rekapitulasi ini menunjukkan bahwa untuk STA 38+000 s.d STA 40+975, metode *Slipform Paver* adalah pilihan yang paling rasional. Penghematan waktu total yang mencapai ± 30 hari kerja pada segmen ini memberikan fleksibilitas bagi kontraktor dalam manajemen risiko cuaca. Integrasi data waktu, biaya, dan mutu merupakan landasan utama dalam *Value Engineering* yang harus dilakukan sebelum memulai tahapan konstruksi perkerasan kaku.

Tabel 13. Rekapitulasi Perbandingan Total Metode Pelaksanaan

No	Parameter Analisis	Satuan	<i>Slipform Paver</i>	<i>Fixed Form</i>	Selisih/Rasio
1	Durasi per 100m	Menit	215	690	3,21 Kali
2	Kapasitas Produksi	m/Hari	400 - 600	80 - 120	5,00 Kali
3	Kebutuhan Tenaga	Orang	8 - 10	25 - 30	0,33 Kali
4	Indeks Kerataan (IRI)	m/km	2,5 - 3,0	3,5 - 4,5	28% Lebih Baik
5	Efisiensi Biaya Total	%	100% (Base)	115%	15% Lebih Hemat

(Sumber : Dokumen Pribadi, 2026)

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa dan pembahasan yang telah diuraikan pada Bab IV mengenai perbandingan metode *Slipform Paver* dan *Fixed Form* pada proyek Jalan Tol Solo–Yogyakarta Paket 1.2 Klaten – Purwomartani STA 38+000 s.d STA 40+975. Dapat disimpulkan :

1. Aspek Waktu dan Durasi Pelaksanaan

Metode *Slipform Paver* terbukti jauh lebih efisien dengan durasi siklus kerja riil sebesar 215 menit per 100 meter lari, dibandingkan metode *Fixed Form* yang membutuhkan waktu 690 menit untuk volume yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan teknologi otomatisasi mampu memberikan akselerasi jadwal hingga 3,21 kali lebih cepat. Kecepatan ini sangat krusial dalam memenuhi target progres mingguan pada Proyek Strategis Nasional.

2. Aspek Biaya Pekerjaan

Meskipun metode *Slipform Paver* memerlukan biaya investasi dan mobilisasi alat yang tinggi di awal, namun secara total biaya per satuan volume (*unit price*), metode ini lebih

ekonomis untuk volume pekerjaan yang masif. Efisiensi biaya sebesar 12-15% didapatkan dari reduksi upah tenaga kerja (kurang lebih 60% lebih sedikit pekerja dibandingkan metode manual) dan minimalisasi limbah beton (*waste*) akibat akurasi cetakan mesin yang presisi.

3. Aspek Mutu Pekerjaan

Metode *Slipform Paver* menghasilkan mutu permukaan yang lebih konsisten dengan nilai *International Roughness Index* (IRI) yang lebih rendah (berkisar 2,5 - 3,0 m/km) dibandingkan metode *Fixed Form*. Penggunaan sensor elevasi otomatis dan sistem vibrasi internal terintegrasi menjamin kepadatan beton dan kerataan permukaan yang lebih baik, yang secara langsung berkurang terhadap masa layan struktur dan kenyamanan pengguna jalan.

4. Aspek Efektivitas dan Adaptabilitas

Metode *Slipform Paver* memiliki indeks efektivitas tertinggi untuk pekerjaan jalur utama (*main road*) dengan bentang panjang. Namun, metode *Fixed Form* tetap dinilai efektif untuk area transisi, bahu jalan, atau area dengan geometri sempit di mana ruang gerak alat berat terbatas. Secara integratif, pemilihan metode *Slipform* pada segmen STA 38+000 s.d STA 40+975 adalah keputusan teknis yang paling tepat untuk mencapai target *triple constraint* proyek (Waktu, Biaya, dan Mutu).

5. Hasil Akhir Perbandingan

Secara keseluruhan, efisiensi total penggunaan *Slipform Paver* dibandingkan *Fixed Form* pada lokasi studi kasus menunjukkan keunggulan dominan pada parameter kecepatan dan kualitas hasil akhir, dengan syarat didukung oleh manajemen rantai pasok beton (*supply chain management*) yang kontinu dari *batching plant*.

Daftar Pustaka

- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2017). Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 04/SE/Db/2017. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2018). Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan. Jakarta: Kementerian PUPR.
- Hidayat, M., & Firmansyah, R. (2023). Analisis Perbandingan Biaya dan Waktu Metode Pengecoran Rigid Pavement. *Jurnal Rekayasa Konstruksi Mekanika Sipil*, 6(1), 12–23.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2020). Pedoman Pelaksanaan Perkerasan Beton Semen (Rigid Pavement). Jakarta: PUPR.
- Kusuma, A., & Wijaya, T. (2024). Evaluasi Efektivitas Metode Slipform Paver terhadap Kinerja Proyek Jalan Tol. *Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan*, 26(1), 1–12.
- Prasetyo, A., & Wibowo, A. (2018). Analisis Produktivitas Alat Berat pada Pekerjaan Perkerasan Kaku Jalan Tol. *Jurnal Teknik Sipil*, 25(2), 101–110.
- Putra, R. A., & Susanto, H. (2021). Perbandingan Metode *Fixed Form* dan *Slipform* terhadap Produktivitas Pengecoran Perkerasan Beton. *Jurnal Transportasi dan Infrastruktur*, 7(1), 33–42.
- Sari, D. P., & Nugroho, S. (2019). Evaluasi Kinerja Metode Slipform Paver pada Pembangunan Jalan Tol. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 13(1), 45–54.
- Setiawan, B., Hidayat, A., & Rahman, F. (2020). Analisis Efisiensi Waktu dan Biaya Pekerjaan Rigid Pavement pada Proyek Jalan Tol. *Jurnal Konstruksia*, 11(2), 87–96.

- Wahyudi, E., & Kurniawan, D. (2021). Pengaruh Metode Pelaksanaan terhadap Mutu Perkerasan Beton Semen. *Jurnal Teknik Jalan dan Transportasi*, 18(3), 121–130.
- Yuliana, N., Prabowo, H., & Saputra, I. (2022). Kajian Produktivitas Alat Slipform Paver pada Proyek Jalan Tol di Indonesia. *Jurnal Infrastruktur*, 8(2), 55–66.