

Pemodelan Kepadatan Lapangan Campuran Beraspal Panas Menggunakan Regresi Kuadratik Berganda pada Lapisan AC-WC dan AC-BC

Andre Bachtiar Sihalo*, Gina Cynthia Raphita Hasibuan, M. Ridwan Anas

Universitas Sumatera Utara, Indonesia

Email: andre.sihalo*@usu.student.ac.id*, gina.hasibuan@usu.ac.id, ridwan.anas@usu.ac.id

Keywords:	Abstract
AC-WC; AC-BC; campuran beraspal panas; regresi kuadratik berganda; suhu penggulungan sedang.	<i>Field density is an important parameter in hot mix asphalt quality control because it is closely related to pavement stability, durability, and service performance. This study aims to model the field density of hot mix asphalt layers, specifically AC-WC and AC-BC, using multiple quadratic regression with roller passes and intermediate rolling temperature as the main variables. The study used secondary data from hot mix asphalt pavement works within BBPJN North Sumatra, consisting of 120 observations, including 66 AC-WC data and 54 AC-BC data. The analysis was conducted separately for each layer using descriptive statistics, Pearson correlation, multiple linear regression, multiple quadratic regression, and single-variable quadratic regression to determine the operational optimum point. The results indicate different compaction mechanisms between AC-WC and AC-BC layers. In the AC-WC layer, roller passes have a moderate positive and statistically significant relationship with field density, with a correlation coefficient of 0.481, while intermediate rolling temperature is not significant. In the AC-BC layer, intermediate rolling temperature has a positive and statistically significant relationship with a correlation coefficient of 0.301, while roller passes are not significant. The multiple quadratic regression model improves the explanatory ability compared with the linear model, increasing R^2 from 0.328 to 0.395 for AC-WC and from 0.249 to 0.283 for AC-BC. The operational optimum analysis shows that AC-WC is more representatively controlled by roller passes, with an optimum value of 25.62 passes or 25–26 passes, while AC-BC is more representatively controlled by intermediate rolling temperature, with an optimum value of 121.42°C or 120–122°C. This study provides a quantitative basis for layer-specific compaction control in hot mix asphalt construction.</i>
Kata kunci:	Abstrak
AC-WC; AC-BC; campuran beraspal panas; regresi kuadratik berganda; suhu intermediate rolling.	Kepadatan lapangan merupakan parameter penting dalam pengendalian mutu campuran beraspal panas karena berkaitan dengan stabilitas, durabilitas, dan kinerja perkerasan selama masa pelayanan. Penelitian ini bertujuan memodelkan kepadatan lapangan campuran beraspal panas pada lapisan AC-WC dan AC-BC menggunakan regresi kuadratik berganda dengan variabel utama jumlah lintasan alat pemadat dan suhu intermediate rolling. Data yang digunakan merupakan data sekunder pekerjaan campuran beraspal panas di wilayah BBPJN Sumatera Utara sebanyak 120 data pengamatan, terdiri atas 66 data AC-WC dan 54 data AC-BC. Analisis dilakukan secara terpisah untuk masing-masing lapisan melalui statistik deskriptif, korelasi Pearson, regresi linier berganda, regresi kuadratik berganda, dan regresi kuadratik satu variabel untuk menentukan titik optimum operasional. Hasil penelitian menunjukkan adanya perbedaan mekanisme pemadatan antara AC-WC dan AC-BC. Pada AC-WC, jumlah lintasan memiliki hubungan positif sedang dan signifikan terhadap kepadatan lapangan dengan koefisien korelasi 0,481, sedangkan suhu intermediate rolling tidak signifikan. Pada AC-BC, suhu intermediate rolling memiliki hubungan positif dan signifikan dengan koefisien korelasi 0,301, sedangkan jumlah lintasan tidak signifikan. Model regresi kuadratik berganda meningkatkan kemampuan penjelasan dibandingkan model linier, yaitu dari R^2 0,328 menjadi 0,395 pada AC-WC dan dari R^2 0,249 menjadi 0,283 pada AC-BC. Titik optimum operasional menunjukkan bahwa AC-WC

lebih representatif dikendalikan melalui jumlah lintasan sebesar 25,62 lintasan atau 25–26 lintasan, sedangkan AC-BC lebih representatif dikendalikan melalui suhu intermediate rolling sebesar 121,42°C atau 120–122°C. Penelitian ini memberikan dasar kuantitatif untuk pengendalian pemadatan campuran beraspal panas secara spesifik berdasarkan jenis lapisan

PENDAHULUAN

Kepadatan lapangan merupakan salah satu parameter utama dalam pengendalian mutu pekerjaan campuran beraspal panas atau hot mix asphalt (HMA). Kepadatan yang memadai menunjukkan bahwa campuran telah menerima energi pemadatan yang cukup, sehingga rongga udara dapat dikendalikan, struktur agregat menjadi lebih stabil, dan lapisan perkerasan mampu mendukung beban lalu lintas selama masa pelayanan. Kepadatan yang rendah dapat meningkatkan rongga udara, memperbesar peluang infiltrasi air dan udara, mempercepat penuaan aspal, serta meningkatkan potensi kerusakan dini seperti ravelling, stripping, rutting, dan retak. Sebaliknya, kepadatan yang terlalu tinggi juga tidak selalu menguntungkan karena dapat menurunkan rongga udara secara berlebihan dan meningkatkan risiko bleeding atau deformasi plastis. Oleh karena itu, pencapaian kepadatan lapangan harus dipahami sebagai hasil keseimbangan antara desain campuran, kondisi material, dan proses pemadatan di lapangan (Al-Qadi et al., 2011) dan (fisher et al., 2010; Hand et al., 2021; Kandhal et al., 1995)

Dalam pekerjaan campuran beraspal panas, kepadatan akhir tidak hanya ditentukan oleh rancangan campuran di laboratorium. Faktor desain seperti kadar aspal optimum, gradasi agregat, karakteristik volumetrik, dan Job Mix Formula (JMF) memang menjadi dasar teknis penting, tetapi pada pekerjaan yang telah menggunakan formula campuran kerja, variasi kepadatan di lapangan banyak dipengaruhi oleh faktor operasional pemadatan. Faktor-faktor tersebut antara lain jumlah lintasan alat pemadat, suhu campuran saat pemadatan, jenis dan berat roller, mode pemadatan, kecepatan roller, tebal hamparan, kondisi lapisan bawah, serta kondisi lingkungan. Dari berbagai faktor tersebut, jumlah lintasan dan suhu pemadatan merupakan dua variabel operasional yang penting karena keduanya dapat diamati, dicatat, dan dikendalikan secara langsung selama pelaksanaan pekerjaan (Hainin et al., 2016; Hu et al., 2017; Kassem, Scullion, Masad, Chowdhury, et al., 2012; Micaelo et al., 2014)

Jumlah lintasan alat pemadat merepresentasikan besarnya energi pemadatan yang diberikan pada campuran beraspal panas. Pada tahap awal pemadatan, penambahan lintasan umumnya meningkatkan kepadatan karena rongga udara di dalam campuran masih dapat dikurangi dan partikel agregat masih dapat tersusun lebih rapat. Namun, setelah campuran mendekati kondisi padat tertentu, tambahan lintasan tidak selalu menghasilkan peningkatan kepadatan yang sebanding. Bahkan, pada kondisi tertentu, lintasan yang berlebihan dapat menyebabkan over-compaction atau gangguan struktur internal campuran. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa hubungan antara jumlah lintasan dan indikator kepadatan tidak selalu bersifat linier, tetapi dapat membentuk pola kurva yang memiliki titik optimum atau kecenderungan plateau setelah energi pemadatan tertentu tercapai (Hu et al., 2017; Micaelo et al., 2014; Zhao et al., 2021).

Suhu pemadatan juga memiliki peran penting karena berkaitan dengan viskositas aspal dan workability campuran. Campuran yang masih berada dalam rentang suhu efektif lebih mudah dipadatkan karena aspal masih cukup plastis untuk memungkinkan pergerakan dan penguncian agregat. Apabila suhu terlalu rendah, campuran menjadi lebih kaku sehingga

tambahan energi pemadatan tidak lagi efektif untuk meningkatkan kepadatan. Sebaliknya, apabila suhu terlalu tinggi, campuran dapat belum cukup stabil terhadap tekanan alat pemadat dan berpotensi mengalami deformasi. Kassem, Scullion, Masad, & Chowdhury (2012) menunjukkan bahwa temperatur pemadatan berpengaruh terhadap rongga udara dan hasil kepadatan, sedangkan Hayat et al. (2019) menjelaskan bahwa kehilangan suhu selama pelaksanaan dapat mempersempit waktu efektif pemadatan. Dengan demikian, suhu pemadatan perlu dikendalikan dalam rentang yang tepat agar proses pemadatan dapat menghasilkan kepadatan lapangan yang optimal.

Karakter hubungan antara jumlah lintasan, suhu pemadatan, dan kepadatan lapangan menunjukkan bahwa pendekatan linier belum tentu cukup untuk menggambarkan perilaku pemadatan campuran beraspal panas. Regresi linier berganda dapat digunakan sebagai model awal untuk melihat pengaruh simultan variabel operasional terhadap kepadatan lapangan. Namun, model linier mengasumsikan bahwa setiap tambahan lintasan atau perubahan suhu menghasilkan perubahan kepadatan secara konstan. Dalam kenyataan lapangan, proses pemadatan memiliki batas efektivitas dan dapat membentuk hubungan nonlinier. Oleh karena itu, regresi kuadratik berganda menjadi pendekatan yang relevan karena mampu memasukkan komponen linier dan kuadratik dari variabel bebas, sehingga pola hubungan melengkung dan kecenderungan titik optimum dapat ditangkap secara lebih representatif (Montgomery & Runger, 2014).

Penelitian-penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa variabel pemadatan memiliki hubungan yang kompleks terhadap kepadatan campuran beraspal. Micaelo et al. (2014) menunjukkan bahwa derajat kepadatan lapangan dipengaruhi oleh jumlah lintasan, suhu, jenis roller, mode pemadatan, dan karakteristik alat pemadat. Hainin et al. (2016) menjelaskan bahwa suhu, jenis roller, ketebalan hamparan, dan rasio tebal terhadap nominal maximum aggregate size memengaruhi compactibility campuran beraspal panas. Hu et al. (2017) menekankan bahwa penggunaan jumlah lintasan tetap tidak selalu menjamin keseragaman kepadatan karena hasil pemadatan dipengaruhi oleh variasi suhu dan kondisi dukungan lapisan bawah. Sementara itu, Zhao et al. (2021) menunjukkan bahwa derajat pemadatan berkaitan dengan energi pemadatan dan dapat digambarkan melalui hubungan nonlinier. Temuan-temuan tersebut memperkuat perlunya model empiris yang mampu menjelaskan hubungan antara variabel operasional pemadatan dan kepadatan lapangan secara lebih terukur.

Penelitian ini memiliki kebaruan (novelty) dalam pengembangan model regresi kuadratik berganda yang secara spesifik membedakan respons pemadatan antara lapisan AC-WC dan AC-BC berdasarkan data lapangan aktual. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya menggunakan pendekatan linier atau menggabungkan berbagai jenis lapisan dalam satu model, penelitian ini melakukan pemodelan terpisah dengan mempertimbangkan karakteristik teknis masing-masing lapisan serta menentukan titik optimum operasional secara kuantitatif. Urgensi penelitian ini terletak pada kebutuhan akan dasar teknis yang lebih terukur bagi pengendalian mutu pemadatan di lapangan, mengingat praktik pengendalian saat ini sering kali masih bersifat umum dan belum secara spesifik membedakan strategi pemadatan berdasarkan jenis lapisan.

Meskipun demikian, kajian yang secara khusus memodelkan kepadatan lapangan campuran beraspal panas berdasarkan data pelaksanaan aktual dengan membedakan respons lapisan AC-WC dan AC-BC masih perlu dikembangkan. AC-WC dan AC-BC memiliki fungsi,

posisi, ketebalan, dan karakteristik campuran yang berbeda dalam struktur perkerasan lentur. AC-WC sebagai lapis aus berada pada bagian paling atas dan menerima pengaruh langsung dari beban lalu lintas serta lingkungan, sedangkan AC-BC berperan sebagai lapis antara yang meneruskan beban dari lapisan permukaan ke lapisan di bawahnya. Perbedaan karakteristik tersebut memungkinkan adanya perbedaan mekanisme pemadatan, sehingga pemodelan kepadatan lapangan sebaiknya dilakukan secara terpisah untuk setiap jenis lapisan.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan memodelkan kepadatan lapangan campuran beraspal panas pada lapisan AC-WC dan AC-BC menggunakan regresi kuadratik berganda. Variabel terikat yang digunakan adalah kepadatan lapangan, sedangkan variabel bebas utama adalah jumlah lintasan alat pemadat dan suhu intermediate rolling. Pemodelan dilakukan secara terpisah untuk lapisan AC-WC dan AC-BC agar perbedaan karakteristik pemadatan masing-masing lapisan dapat diidentifikasi secara lebih jelas. Selain itu, penelitian ini juga mengevaluasi kecenderungan nilai optimum operasional untuk mendukung pengendalian pemadatan berbasis data lapangan. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan dasar kuantitatif bagi pelaksanaan pengendalian mutu pemadatan campuran beraspal panas, khususnya dalam menentukan variabel operasional yang lebih representatif pada setiap jenis lapisan.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode pemodelan statistik berbasis data lapangan. Objek penelitian adalah kepadatan lapangan campuran beraspal panas pada lapisan Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) dan Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC). Data yang digunakan merupakan data sekunder hasil pelaksanaan pekerjaan dan pengendalian mutu campuran beraspal panas pada ruas/paket pekerjaan di wilayah Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional (BBPJN) Sumatera Utara. Data tersebut mencerminkan kondisi aktual pemadatan lapangan, sehingga relevan digunakan untuk membangun model empiris hubungan antara variabel operasional pemadatan dan kepadatan lapangan.

Jumlah data yang dianalisis sebanyak 120 data pengamatan, terdiri atas 66 data lapisan AC-WC dan 54 data lapisan AC-BC. Data tersebut berasal dari 23 ruas/paket pekerjaan yang memiliki kelengkapan informasi mengenai jenis lapisan, kepadatan lapangan, jumlah lintasan alat pemadat, dan suhu intermediate rolling. Pemisahan data AC-WC dan AC-BC dilakukan karena kedua lapisan memiliki fungsi, posisi, karakteristik campuran, dan respons pemadatan yang berbeda. AC-WC sebagai lapis aus berada pada bagian paling atas struktur perkerasan dan menerima pengaruh langsung dari beban lalu lintas serta lingkungan, sedangkan AC-BC berfungsi sebagai lapis antara yang meneruskan beban dari lapisan permukaan ke lapisan di bawahnya. Oleh karena itu, pemodelan dilakukan secara terpisah agar hasil yang diperoleh lebih representatif terhadap karakteristik masing-masing lapisan.

Tabel 1. Variabel Penelitian

No.	Variabel	Simbol	Satuan	Fungsi dalam Model
1	Kepadatan lapangan	Y	gr/cm ³	Variabel terikat
2	Jumlah lintasan alat pemadat	X ₁	lintasan	Variabel bebas utama
3	Suhu intermediate rolling	X ₂	°C	Variabel bebas utama
4	Kuadrat jumlah lintasan	X ₁ ²	lintasan ²	Komponen kuadratik
5	Kuadrat suhu intermediate rolling	X ₂ ²	°C ²	Komponen kuadratik

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian, 2026.

Variabel terikat dalam penelitian ini adalah kepadatan lapangan campuran beraspal panas yang dinyatakan dalam satuan gr/cm^3 . Variabel bebas utama terdiri atas jumlah lintasan alat pemadat dan suhu intermediate rolling. Jumlah lintasan merepresentasikan energi pemadatan yang diterima campuran selama proses pelaksanaan, sedangkan suhu intermediate rolling merepresentasikan kondisi termal campuran pada tahap pemadatan antara. Pada model regresi kuadratik berganda, kedua variabel bebas tersebut ditambahkan dalam bentuk kuadrat, yaitu kuadrat jumlah lintasan dan kuadrat suhu intermediate rolling. Transformasi kuadrat ini digunakan untuk menangkap kemungkinan hubungan nonlinier antara variabel operasional pemadatan dan kepadatan lapangan.

Tahapan analisis diawali dengan pemeriksaan dan seleksi data untuk memastikan bahwa setiap data pengamatan memiliki informasi utama yang dibutuhkan dalam pemodelan. Data kemudian dikelompokkan berdasarkan jenis lapisan, yaitu AC-WC dan AC-BC. Setelah itu, dilakukan analisis statistik deskriptif untuk mengetahui karakteristik umum data, meliputi nilai rata-rata, minimum, maksimum, standar deviasi, rentang, skewness, dan kurtosis. Analisis deskriptif digunakan untuk memahami sebaran kepadatan lapangan, jumlah lintasan, dan suhu intermediate rolling sebelum dilakukan analisis hubungan dan pemodelan regresi.

Analisis korelasi Pearson digunakan sebagai tahap awal untuk mengetahui arah, kekuatan, dan signifikansi hubungan linier antara variabel bebas dan kepadatan lapangan. Hubungan dinyatakan signifikan apabila nilai signifikansi lebih kecil dari 0,05. Korelasi Pearson tidak digunakan sebagai model prediksi akhir, tetapi sebagai dasar awal untuk membaca kecenderungan hubungan antara jumlah lintasan, suhu intermediate rolling, dan kepadatan lapangan pada masing-masing lapisan.

Pemodelan regresi linier berganda dilakukan sebagai model pembanding sebelum pengembangan model kuadratik. Model linier digunakan untuk melihat kemampuan jumlah lintasan dan suhu intermediate rolling dalam menjelaskan variasi kepadatan lapangan secara simultan. Setelah itu, model regresi kuadratik berganda dibangun dengan menambahkan komponen kuadrat dari masing-masing variabel bebas. Model kuadratik digunakan karena proses pemadatan campuran beraspal panas secara teknis tidak selalu menunjukkan hubungan linier. Pada tahap tertentu, penambahan lintasan atau perubahan suhu dapat meningkatkan kepadatan, tetapi setelah melewati kondisi optimum, peningkatan tersebut dapat melambat atau tidak lagi efektif.

Tabel 2. Bentuk Model yang Digunakan dalam Penelitian

No.	Model	Bentuk Persamaan
1	Regresi linier berganda	$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon$
2	Regresi kuadratik berganda	$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_1^2 + \beta_3 X_2 + \beta_4 X_2^2 + \varepsilon$
3	Regresi kuadratik satu variabel	$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \varepsilon$

Keterangan: Y = kepadatan lapangan; X_1 = jumlah lintasan alat pemadat; X_2 = suhu intermediate rolling; ε = galat model.

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian, 2026.

Evaluasi kinerja model dilakukan menggunakan beberapa indikator statistik, yaitu koefisien korelasi berganda (R), koefisien determinasi (R^2), adjusted R^2 , uji F, uji t, dan nilai kesalahan model. Nilai R^2 digunakan untuk mengetahui proporsi variasi kepadatan lapangan yang dapat dijelaskan oleh model. Uji F digunakan untuk menilai signifikansi model secara

simultan, sedangkan uji t digunakan untuk menilai signifikansi masing-masing koefisien secara parsial. Interpretasi model tidak hanya didasarkan pada nilai statistik, tetapi juga mempertimbangkan kesesuaian hasil dengan prinsip teknis pemadatan campuran beraspal panas.

Penentuan titik optimum operasional dilakukan melalui regresi kuadratik satu variabel. Pendekatan ini digunakan karena nilai optimum dari model regresi kuadratik berganda dapat dipengaruhi oleh keberadaan variabel lain di dalam model, sehingga berpotensi menimbulkan bias interpretasi apabila langsung digunakan sebagai rekomendasi operasional. Oleh karena itu, titik optimum jumlah lintasan dan suhu intermediate rolling dianalisis secara parsial untuk memperoleh nilai yang lebih mudah ditafsirkan dalam konteks pelaksanaan lapangan. Nilai optimum hanya digunakan sebagai rekomendasi apabila berada dalam rentang data pengamatan, memiliki bentuk hubungan yang sesuai secara teknis, dan didukung oleh signifikansi model yang memadai.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Data Penelitian

Data penelitian terdiri atas 120 data pengamatan kepadatan lapangan campuran beraspal panas yang diperoleh dari pekerjaan lapangan pada wilayah BBPJN Sumatera Utara. Data tersebut terbagi menjadi 66 data lapisan AC-WC dan 54 data lapisan AC-BC. Pemisahan data dilakukan karena AC-WC dan AC-BC memiliki fungsi, posisi, ketebalan, dan karakteristik respons pemadatan yang berbeda. AC-WC merupakan lapis aus yang berada pada bagian paling atas struktur perkerasan dan menerima pengaruh langsung dari beban lalu lintas serta lingkungan, sedangkan AC-BC merupakan lapis antara yang berfungsi meneruskan beban dari lapisan permukaan ke lapisan di bawahnya. Oleh karena itu, pemodelan dilakukan secara terpisah agar hasil analisis lebih representatif terhadap karakteristik masing-masing lapisan.

Tabel 3. Statistik Deskriptif Utama Variabel Penelitian

Jenis Lapisan	Variabel	Minimum	Maksimum	Rata-Rata	Standar Deviasi
AC-WC	Kepadatan lapangan (gr/cm ³)	2,208	2,335	2,270	0,024
AC-WC	Jumlah lintasan	14	28	21,14	2,997
AC-WC	Suhu intermediate rolling (°C)	110	125	116,71	4,726
AC-BC	Kepadatan lapangan (gr/cm ³)	2,231	2,384	2,287	0,033
AC-BC	Jumlah lintasan	18	30	23,72	2,804
AC-BC	Suhu intermediate rolling (°C)	110	125	116,91	5,296

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian, 2026.

Berdasarkan statistik deskriptif, lapisan AC-WC memiliki nilai kepadatan lapangan rata-rata sebesar 2,270 gr/cm³ dengan standar deviasi 0,024 gr/cm³. Nilai minimum kepadatan AC-WC sebesar 2,208 gr/cm³ dan nilai maksimum sebesar 2,335 gr/cm³. Jumlah lintasan pada AC-WC berada pada rentang 14–28 lintasan dengan rata-rata 21,14 lintasan, sedangkan suhu intermediate rolling berada pada rentang 110–125°C dengan rata-rata 116,71°C. Nilai tersebut menunjukkan bahwa data AC-WC memiliki variasi kepadatan yang relatif terkendali, tetapi tetap memiliki variasi jumlah lintasan dan suhu yang memadai untuk dianalisis secara statistik.

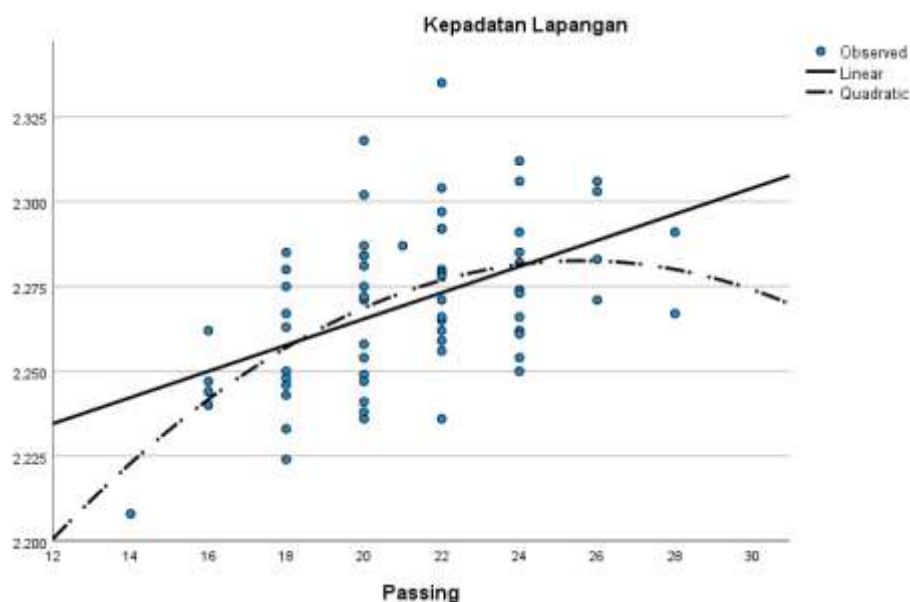
Pada lapisan AC-BC, nilai rata-rata kepadatan lapangan sebesar 2,287 gr/cm³ dengan standar deviasi 0,033 gr/cm³. Nilai minimum kepadatan AC-BC sebesar 2,231 gr/cm³ dan nilai

maksimum sebesar 2,384 gr/cm³. Jumlah lintasan pada AC-BC berada pada rentang 18–30 lintasan dengan rata-rata 23,72 lintasan, sedangkan suhu intermediate rolling berada pada rentang 110–125°C dengan rata-rata 116,91°C. Dibandingkan AC-WC, lapisan AC-BC menunjukkan variasi kepadatan yang lebih besar. Hal ini mengindikasikan bahwa kepadatan AC-BC lebih dipengaruhi oleh variasi kondisi pelaksanaan di lapangan.

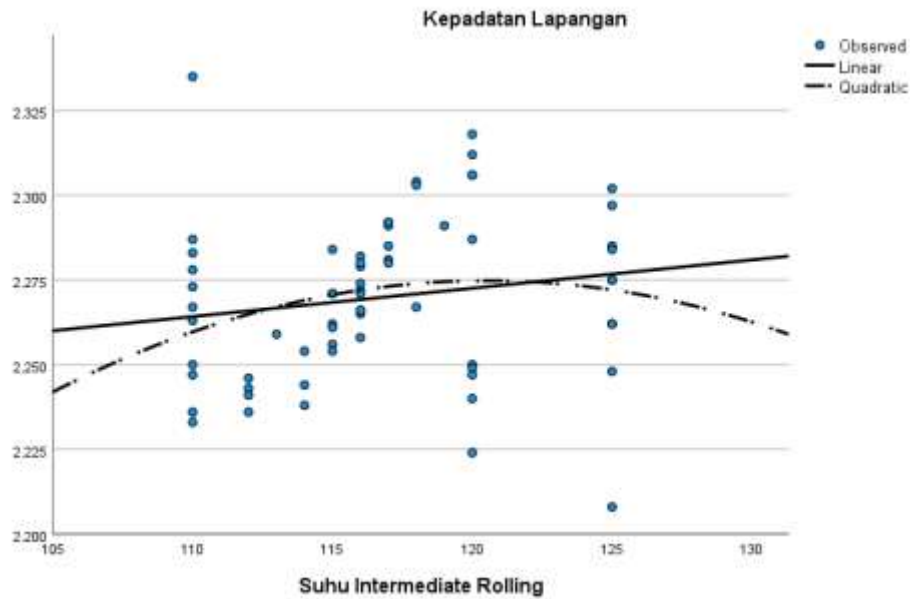
Perbedaan karakteristik data AC-WC dan AC-BC memperkuat alasan bahwa kedua lapisan tidak sebaiknya digabungkan dalam satu model umum. Meskipun rata-rata suhu intermediate rolling kedua lapisan relatif berdekatan, respons kepadatan yang dihasilkan berbeda. Kondisi ini menunjukkan bahwa pengaruh variabel operasional pemadatan tidak hanya ditentukan oleh besar kecilnya nilai lintasan atau suhu, tetapi juga oleh karakteristik lapisan yang dipadatkan.

Hubungan Antarvariabel Berdasarkan Korelasi Pearson

Analisis korelasi Pearson digunakan untuk mengetahui hubungan awal antara variabel operasional pemadatan dan kepadatan lapangan. Pada lapisan AC-WC, jumlah lintasan memiliki hubungan positif sedang dan signifikan terhadap kepadatan lapangan, dengan koefisien korelasi sebesar 0,481 dan nilai signifikansi 0,000. Sebaliknya, suhu intermediate rolling memiliki hubungan positif lemah dengan koefisien korelasi sebesar 0,165 dan nilai signifikansi 0,187, sehingga tidak signifikan secara statistik. Hasil ini menunjukkan bahwa pada lapisan AC-WC, jumlah lintasan lebih berperan dalam pembentukan kepadatan lapangan dibandingkan suhu intermediate rolling.

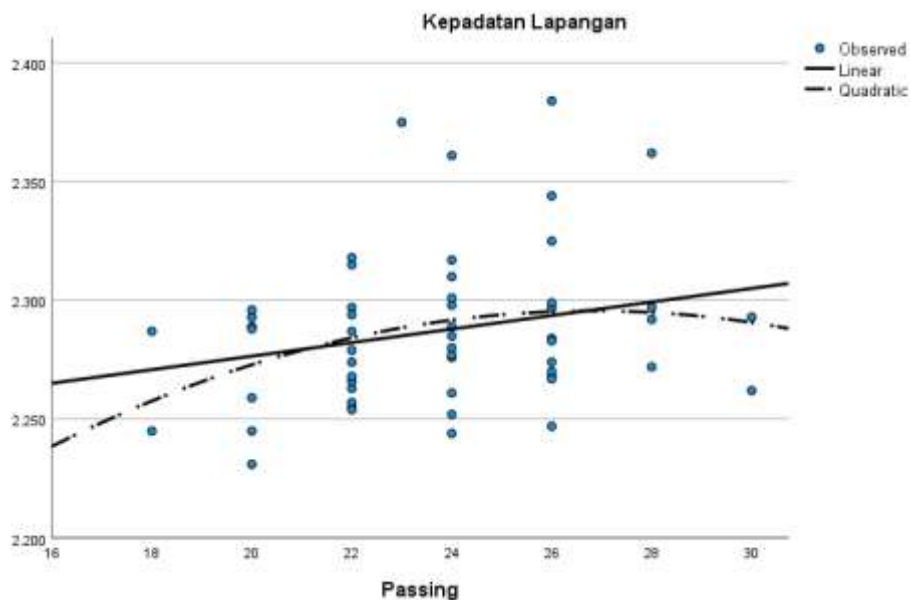


Gambar 1. Scatter Plot variabel passing terhadap kepadatan lapangan AC-WC

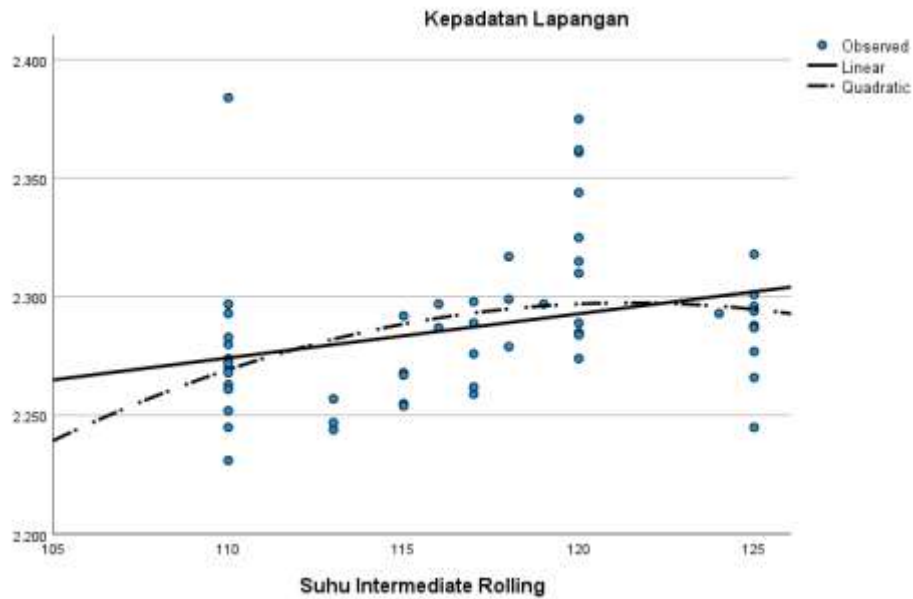


Gambar 2. Scatter Plot variabel suhu intermediate terhadap kepadatan lapangan AC-WC

Pada lapisan AC-BC, jumlah lintasan memiliki hubungan positif lemah terhadap kepadatan lapangan dengan koefisien korelasi sebesar 0,244 dan nilai signifikansi 0,075, sehingga tidak signifikan secara statistik. Sementara itu, suhu intermediate rolling memiliki hubungan positif dan signifikan terhadap kepadatan lapangan dengan koefisien korelasi sebesar 0,301 dan nilai signifikansi 0,027. Hasil ini menunjukkan bahwa pada lapisan AC-BC, suhu intermediate rolling lebih representatif dalam menjelaskan perubahan kepadatan lapangan dibandingkan jumlah lintasan.



Gambar 3. Scatter Plot variabel passing terhadap kepadatan lapangan AC-BC



Gambar 4. Scatter Plot variabel suhu intermediate terhadap kepadatan lapangan AC-BC

Tabel 4. Hasil Korelasi Pearson terhadap Kepadatan Lapangan

Jenis Lapisan	Variabel Bebas	Koefisien Korelasi	Signifikansi
AC-WC	Jumlah lintasan	0,481	0,000
AC-WC	Suhu intermediate rolling	0,165	0,187
AC-BC	Jumlah lintasan	0,244	0,075
AC-BC	Suhu intermediate rolling	0,301	0,027

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian, 2026.

Perbedaan hasil korelasi tersebut menunjukkan adanya perbedaan mekanisme pemadatan antara AC-WC dan AC-BC. Pada AC-WC, kepadatan lebih berkaitan dengan energi pemadatan yang direpresentasikan oleh jumlah lintasan. Pada AC-BC, kepadatan lebih berkaitan dengan kondisi termal campuran pada tahap intermediate rolling. Selain itu, korelasi negatif antara jumlah lintasan dan suhu intermediate rolling pada kedua lapisan menunjukkan bahwa semakin banyak lintasan dilakukan, suhu campuran cenderung menurun karena durasi pemadatan menjadi lebih panjang. Kondisi ini menunjukkan bahwa jumlah lintasan dan suhu tidak sepenuhnya berdiri sendiri dalam proses pemadatan lapangan.

Temuan tersebut sejalan dengan Kassem, Scullion, Masad, & Chowdhury (2012), yang menjelaskan bahwa temperatur pemadatan berpengaruh terhadap rongga udara dan kepadatan campuran, serta bahwa keseragaman lintasan tidak selalu menjamin keseragaman kepadatan. Hu et al. (2017) juga menunjukkan bahwa jumlah lintasan, suhu permukaan campuran, dan dukungan lapisan bawah dapat memengaruhi hasil pemadatan. Dengan demikian, hasil korelasi dalam penelitian ini memperlihatkan bahwa hubungan antara lintasan, suhu, dan kepadatan perlu dianalisis lebih lanjut melalui pemodelan regresi, bukan hanya berdasarkan korelasi sederhana.

Model Regresi Kuadratik Berganda Lapisan AC-WC

Model regresi kuadratik berganda pada lapisan AC-WC dibangun dengan memasukkan jumlah lintasan, suhu intermediate rolling, kuadrat jumlah lintasan, dan kuadrat suhu

intermediate rolling sebagai prediktor. Hasil pemodelan menunjukkan nilai R sebesar 0,628 dan R^2 sebesar 0,395. Nilai R^2 tersebut menunjukkan bahwa model kuadratik berganda mampu menjelaskan 39,5% variasi kepadatan lapangan AC-WC, sedangkan sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model.

Jika dibandingkan dengan regresi linier berganda, model kuadratik memberikan peningkatan kemampuan penjelasan. Model linier berganda pada AC-WC menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,328, sedangkan model kuadratik berganda menghasilkan R^2 sebesar 0,395. Dengan demikian, terdapat peningkatan kemampuan penjelasan sebesar 0,067 atau 6,7%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa hubungan antara jumlah lintasan, suhu intermediate rolling, dan kepadatan lapangan AC-WC tidak sepenuhnya linier.

Secara teknis, hasil tersebut sesuai dengan karakteristik pemadatan campuran beraspal panas. Pada tahap awal, penambahan lintasan dapat meningkatkan kepadatan karena campuran masih memiliki rongga udara yang dapat dikurangi. Akan tetapi, setelah mendekati kondisi padat tertentu, tambahan lintasan tidak selalu menghasilkan peningkatan kepadatan yang sebanding. Kondisi ini menunjukkan adanya batas efektivitas energi pemadatan. Oleh karena itu, bentuk hubungan kuadratik lebih representatif dibandingkan hubungan linier murni.

Temuan pada AC-WC sejalan dengan Micaelo et al. (2014), yang menunjukkan bahwa derajat kepadatan campuran beraspal dipengaruhi oleh jumlah lintasan, suhu, tipe roller, mode pemadatan, dan karakteristik alat pemadat. Micaelo et al. Juga menunjukkan bahwa peningkatan kepadatan cenderung terjadi pada lintasan awal dan dapat melambat setelah campuran mendekati kondisi padat tertentu. Hu et al. (2017) juga menjelaskan bahwa indikator pemadatan dapat meningkat pada lintasan awal dan kemudian mengalami plateau atau penurunan pada lintasan berikutnya. Dengan demikian, hasil penelitian ini memperkuat bukti bahwa jumlah lintasan pada AC-WC memiliki kecenderungan hubungan nonlinier terhadap kepadatan lapangan.

Model Regresi Kuadratik Berganda Lapisan AC-BC

Model regresi kuadratik berganda pada lapisan AC-BC menghasilkan nilai R sebesar 0,532 dan R^2 sebesar 0,283. Nilai tersebut menunjukkan bahwa model mampu menjelaskan 28,3% variasi kepadatan lapangan AC-BC. Jika dibandingkan dengan model regresi linier berganda yang menghasilkan R^2 sebesar 0,249, model kuadratik berganda meningkatkan kemampuan penjelasan sebesar 0,034 atau 3,4%.

Peningkatan R^2 pada AC-BC lebih kecil dibandingkan AC-WC. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan komponen kuadratik tetap memperbaiki kemampuan model, tetapi pengaruhnya tidak sebesar pada lapisan AC-WC. Secara teknis, kondisi ini dapat terjadi karena kepadatan AC-BC lebih dipengaruhi oleh kombinasi faktor lapangan yang lebih kompleks, seperti tebal hamparan, kondisi lapisan bawah, jenis alat pemadat, pola lintasan, waktu pemadatan, dan variasi suhu selama proses pelaksanaan.

Hasil korelasi Pearson sebelumnya menunjukkan bahwa suhu intermediate rolling memiliki hubungan positif dan signifikan terhadap kepadatan AC-BC, sedangkan jumlah lintasan tidak signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa pada AC-BC, kondisi termal campuran saat intermediate rolling lebih menentukan pencapaian kepadatan dibandingkan penambahan lintasan semata. Dengan kata lain, tambahan lintasan tidak selalu efektif apabila suhu campuran tidak berada pada rentang yang mendukung workability campuran.

Temuan ini sejalan dengan Hainin et al. (2016), yang menjelaskan bahwa suhu campuran, jenis roller, ketebalan hamparan, dan rasio tebal lapisan terhadap nominal maximum aggregate size memengaruhi compactibility campuran beraspal panas. Hayat et al. (2019) juga menegaskan bahwa kehilangan suhu selama pelaksanaan dapat mempersempit waktu efektif pemadatan. Apabila suhu campuran turun terlalu jauh, campuran menjadi lebih kaku sehingga tambahan lintasan tidak lagi efektif meningkatkan kepadatan. Dengan demikian, hasil penelitian ini memperkuat bahwa pengendalian suhu intermediate rolling menjadi aspek penting pada pemadatan AC-BC.

Perbandingan Model Linier dan Kuadratik Berganda

Perbandingan antara model linier dan kuadratik menunjukkan bahwa regresi kuadratik berganda memberikan kemampuan penjelasan yang lebih baik pada kedua jenis lapisan. Pada AC-WC, nilai R^2 meningkat dari 0,328 pada model linier menjadi 0,395 pada model kuadratik. Pada AC-BC, nilai R^2 meningkat dari 0,249 pada model linier menjadi 0,283 pada model kuadratik. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa hubungan antara variabel operasional pemadatan dan kepadatan lapangan memiliki kecenderungan nonlinier.

Tabel 5. Perbandingan Kinerja Model Linier dan Kuadratik Berganda

Jenis Lapisan	Model	R	R^2	Perubahan R^2
AC-WC	Regresi linier berganda	0,572	0,328	-
AC-WC	Regresi kuadratik berganda	0,628	0,395	+0,067
AC-BC	Regresi linier berganda	0,499	0,249	-
AC-BC	Regresi kuadratik berganda	0,532	0,283	+0,034

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian, 2026.

Meskipun demikian, nilai R^2 yang diperoleh tidak dapat ditafsirkan sebagai kemampuan model untuk menjelaskan seluruh variasi kepadatan lapangan. Nilai R^2 sebesar 0,395 pada AC-WC dan 0,283 pada AC-BC menunjukkan bahwa jumlah lintasan dan suhu intermediate rolling hanya menjelaskan sebagian variasi kepadatan. Faktor lain seperti karakteristik campuran, gradasi agregat, kadar aspal, tebal hamparan, jenis roller, berat roller, mode pemadatan, kecepatan roller, overlap lintasan, kondisi lapisan bawah, suhu udara, dan waktu pelaksanaan juga berpotensi memengaruhi hasil pemadatan.

Kondisi tersebut sejalan dengan Hu et al. (2017), yang menunjukkan bahwa hasil pemadatan tidak hanya ditentukan oleh jumlah lintasan, tetapi juga dipengaruhi oleh suhu, dukungan lapisan bawah, dan variasi pelaksanaan lapangan. Kassem, Scullion, Masad, & Chowdhury (2012) juga menegaskan bahwa keseragaman lintasan tidak selalu menghasilkan keseragaman kepadatan karena distribusi energi pemadatan dan kondisi suhu dapat berbeda pada setiap titik. Oleh karena itu, nilai R^2 yang tidak terlalu tinggi pada penelitian ini masih dapat dipahami sebagai konsekuensi logis dari penggunaan data lapangan aktual yang dipengaruhi oleh banyak variabel pelaksanaan.

Hasil ini juga memperkuat posisi regresi kuadratik berganda sebagai model empiris yang digunakan untuk membaca kecenderungan hubungan, bukan sebagai model deterministik tunggal. Model kuadratik berganda bermanfaat karena mampu menunjukkan adanya pola nonlinier dan batas efektivitas pemadatan. Namun, model tetap perlu ditafsirkan secara hati-

hati karena variabel yang digunakan hanya mewakili sebagian dari faktor-faktor yang memengaruhi kepadatan lapangan.

Titik Optimum Operasional Pemadatan

Penentuan titik optimum operasional dilakukan menggunakan regresi kuadratik satu variabel. Pendekatan ini digunakan karena nilai optimum yang langsung dihitung dari model regresi kuadratik berganda dapat dipengaruhi oleh keberadaan variabel lain di dalam model. Dengan analisis satu variabel, hubungan masing-masing variabel terhadap kepadatan lapangan dapat dibaca secara lebih jelas dan lebih mudah ditafsirkan sebagai rekomendasi operasional.

Tabel 6. Perhitungan Titik Optimum Operasional Pemadatan

Jenis Lapisan	Variabel Optimum	Model Kuadratik Satu Variabel	Rumus Titik Optimum	Nilai Optimum	Rentang Data	Rekomendasi Operasional
AC-WC	Jumlah lintasan	$Y = 1,992069 + 0,022695X_1 - 0,000443X_1^2$	$X_{opt} = -\beta_1 / 2\beta_2$	25,62 lintasan	14–28 lintasan	25–26 lintasan
AC-BC	Suhu intermediate rolling	$Y = -0,872894 + 0,052210X_2 - 0,000215X_2^2$	$X_{opt} = -\beta_1 / 2\beta_2$	121,42°C	110–125°C	120–122°C

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian, 2026.

Pada lapisan AC-WC, variabel yang paling representatif untuk dikendalikan adalah jumlah lintasan. Hasil analisis menunjukkan nilai optimum jumlah lintasan sebesar 25,62 lintasan, sehingga secara operasional direkomendasikan rentang 25–26 lintasan. Rekomendasi ini menunjukkan bahwa pencapaian kepadatan AC-WC lebih efektif dikendalikan melalui pengaturan jumlah lintasan alat pemadat.

Pada lapisan AC-BC, variabel yang paling representatif adalah suhu intermediate rolling. Hasil analisis menunjukkan nilai optimum suhu intermediate rolling sebesar 121,42°C, sehingga secara operasional direkomendasikan rentang 120–122°C. Rekomendasi ini menunjukkan bahwa pengendalian pemadatan AC-BC sebaiknya lebih difokuskan pada pengendalian suhu saat intermediate rolling dibandingkan hanya menambah jumlah lintasan.

Temuan titik optimum ini sejalan dengan Zhao et al. (2021), yang menjelaskan bahwa derajat pemadatan berkaitan dengan energi pemadatan dan dapat menunjukkan kecenderungan nonlinier. Konsep tersebut mendukung bahwa penambahan energi pemadatan tidak dapat diasumsikan selalu meningkatkan kepadatan secara terus-menerus. Pada titik tertentu, pemadatan mencapai batas efektivitas sehingga diperlukan penentuan kondisi optimum yang lebih terukur.

Implikasi Teknis Hasil Penelitian

Hasil penelitian menunjukkan bahwa strategi pengendalian pemadatan tidak sebaiknya diterapkan secara seragam pada seluruh jenis lapisan. Pada AC-WC, jumlah lintasan menjadi variabel yang lebih representatif, sehingga pengendalian pemadatan perlu menitikberatkan pada kecukupan jumlah passing alat pemadat. Sebaliknya, pada AC-BC, suhu intermediate rolling menjadi variabel yang lebih representatif, sehingga pengendalian pemadatan perlu menitikberatkan pada pengaturan suhu campuran selama tahap intermediate rolling.

Perbedaan ini menunjukkan bahwa AC-WC dan AC-BC memiliki mekanisme pemadatan yang berbeda. AC-WC sebagai lapis aus lebih responsif terhadap energi pemadatan yang diberikan secara langsung melalui jumlah lintasan. Sementara itu, AC-BC sebagai lapis antara lebih sensitif terhadap kondisi termal campuran, sehingga suhu intermediate rolling menjadi faktor yang lebih penting dalam pencapaian kepadatan lapangan. Hasil ini memperkuat temuan Hainin et al. (2016) dan Micaelo et al. (2014), bahwa compactibility campuran beraspal dipengaruhi oleh karakteristik lapisan, suhu, lintasan, dan kondisi pelaksanaan.

Berdasarkan temuan tersebut, penelitian ini memberikan dasar kuantitatif bagi pengendalian pemadatan campuran beraspal panas secara spesifik berdasarkan jenis lapisan. Pada pekerjaan AC-WC, pengendalian jumlah lintasan dapat diarahkan pada rentang 25–26 lintasan. Pada pekerjaan AC-BC, pengendalian suhu intermediate rolling dapat diarahkan pada rentang 120–122°C. Rekomendasi ini tetap perlu ditafsirkan sebagai rekomendasi empiris berdasarkan rentang data penelitian, sehingga penerapannya di lapangan perlu mempertimbangkan jenis alat pemadat, tebal hamparan, kondisi cuaca, suhu awal campuran, kondisi lapisan bawah, serta hasil trial compaction pada masing-masing proyek.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini memperkuat pemahaman bahwa kepadatan lapangan campuran beraspal panas merupakan hasil interaksi antara energi pemadatan, suhu campuran, karakteristik lapisan, dan kondisi pelaksanaan. Kontribusi utama penelitian ini adalah penggunaan regresi kuadratik berganda berbasis data lapangan aktual untuk membedakan respons pemadatan AC-WC dan AC-BC. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengonfirmasi adanya kecenderungan hubungan nonlinier sebagaimana ditunjukkan oleh penelitian terdahulu, tetapi juga memberikan dasar operasional untuk pengendalian pemadatan yang lebih spesifik, terukur, dan berbasis jenis lapisan.

KESIMPULAN

Penelitian ini memodelkan kepadatan lapangan campuran beraspal panas pada lapisan AC-WC dan AC-BC menggunakan regresi kuadratik berganda dengan variabel utama jumlah lintasan alat pemadat dan suhu intermediate rolling. Hasil penelitian menunjukkan adanya perbedaan mekanisme pemadatan antara kedua jenis lapisan. Pada lapisan AC-WC, kepadatan lapangan lebih berkaitan dengan jumlah lintasan alat pemadat, sedangkan pada lapisan AC-BC kepadatan lapangan lebih berkaitan dengan suhu intermediate rolling.

Hasil korelasi Pearson menunjukkan bahwa pada AC-WC, jumlah lintasan memiliki hubungan positif sedang dan signifikan terhadap kepadatan lapangan dengan koefisien korelasi 0,481 dan nilai signifikansi $p\text{-value} < 0,000$, sedangkan suhu intermediate rolling tidak signifikan. Pada AC-BC, suhu intermediate rolling memiliki hubungan positif dan signifikan terhadap kepadatan lapangan dengan koefisien korelasi 0,301 dan nilai signifikansi 0,027, sedangkan jumlah lintasan tidak signifikan. Temuan ini menunjukkan bahwa variabel operasional yang paling representatif terhadap kepadatan lapangan berbeda antara AC-WC dan AC-BC.

Model regresi kuadratik berganda memberikan kemampuan penjelasan yang lebih baik dibandingkan model linier berganda. Pada AC-WC, nilai R^2 meningkat dari 0,328 pada model linier menjadi 0,395 pada model kuadratik. Pada AC-BC, nilai R^2 meningkat dari 0,249 pada model linier menjadi 0,283 pada model kuadratik. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa

hubungan antara variabel pemadatan dan kepadatan lapangan tidak sepenuhnya linier, tetapi memiliki kecenderungan nonlinier. Namun, nilai R^2 yang tidak terlalu tinggi juga menunjukkan bahwa kepadatan lapangan masih dipengaruhi oleh faktor lain di luar model, seperti karakteristik campuran, tebal hamparan, jenis alat pemadat, pola lintasan, kondisi lapisan bawah, suhu udara, dan variasi pelaksanaan di lapangan.

Analisis titik optimum menunjukkan bahwa pada AC-WC, jumlah lintasan optimum sebesar 25,62 lintasan, sehingga direkomendasikan rentang operasional 25–26 lintasan. Pada AC-BC, suhu intermediate rolling optimum sebesar 121,42°C, sehingga direkomendasikan rentang operasional 120–122°C. Dengan demikian, pengendalian pemadatan campuran beraspal panas sebaiknya tidak diterapkan secara seragam pada seluruh jenis lapisan. Penelitian ini memberikan dasar kuantitatif bahwa AC-WC lebih tepat dikendalikan melalui jumlah lintasan, sedangkan AC-BC lebih tepat dikendalikan melalui suhu intermediate rolling.

REFERENSI

- Al-Qadi, I., Leng, Z., & Larkin, A. (2011). In-place hot mix asphalt density estimation using ground penetrating radar and 3-d finite element analyses. *Illinois University of Illinois at Urbana-Champaign Advanced Transportation Research and Engineering Laboratory (Atrel)*.
- Fisher, J., Graves, C., Blankenship, P., Hakimzadeh-Khoei, S., & Anderson, R. M. (2010). Factors Affecting Asphalt Pavement Density and The Effect on Long Term Pavement Performance.
- Hainin, M. R., Oluwasola, E. A., & Brown, E. R. (2016). Density profile of hot mix asphalt layer during compaction with various types of rollers and lift thickness. *Construction and Building Materials*, 121, 265–277. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.129>
- Hand, A. J. T., Aschenbrener, T., Tran, N., & Leiva, F. (2021). Achieving asphalt pavement density with minimal mat defects. *Transportation Research Record*, 2675(7), 513–525. <https://doi.org/10.1177/03611981211020003>
- Hayat, A., Hussain, A., & Afridi, H. F. (2019). Determination of in-field temperature variations in fresh HMA and corresponding compaction temperatures. *Construction and Building Materials*, 216, 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.262>
- Hu, W., Shu, X., Huang, B., & Woods, M. (2017). Field investigation of intelligent compaction for hot mix asphalt resurfacing. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 11(1), 47–55. <https://doi.org/10.1007/s11709-016-0362-x>
- Kandhal, P. S., Foo, K. Y., & D'angelo, J. A. (1995). *Field Management of Hot Mix Asphalt Volumetric Properties*.
- Kassem, E., Scullion, T., Masad, E., & Chowdhury, A. (2012). Comprehensive evaluation of compaction of asphalt pavements and a practical approach for density predictions. *Transportation Research Record*, (2268), 98–107. <https://doi.org/10.3141/2268-12>
- Kassem, E., Scullion, T., Masad, E., Chowdhury, A., Liu, W., Estakhri, C., & Dessouky, S. (2012). Comprehensive Evaluation Of Compaction Of Asphalt Pavements And Development Of Compaction Monitoring System. <http://www.ntis.gov>
- Micaelo, R., Azevedo, M. C., & Ribeiro, J. (2014). Hot-mix asphalt compaction evaluation with field tests. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 9(4), 306–316. <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2014.37>

- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2014). *Applied Statistics and Probability for Engineers* (6th ed.). Wiley.
- Sivagnanasuntharam, S., Sountharajah, A., Ghorbani, J., Bodin, D., & Kodikara, J. (2023). A state-of-the-art review of compaction control test methods and intelligent compaction technology for asphalt pavements. *Road Materials and Pavement Design*, 24(1), 1–30. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.2015423>
- Wang, S., Al-Qadi, I. L., & Cao, Q. (2020). Factors impacting monitoring asphalt pavement density by ground penetrating radar. *NDT & E International*, 115, 102296. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102296>
- Wang, S., Zhao, S., & Al-Qadi, I. L. (2018). Continuous real-time monitoring of flexible pavement layer density and thickness using ground penetrating radar. *NDT & E International*, 100, 48–54. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.08.005>
- Xue, Z., Cao, W., Liu, S., Ren, F., & Wu, Q. (2021). Artificial neural network-based method for real-time estimation of compaction quality of hot asphalt mixes. *Applied Sciences*, 11(15), 7136. <https://doi.org/10.3390/app11157136>
- Yu, S., Shen, S., & Lu, M. (2023). Data sensing and compaction condition modeling for asphalt pavements. *Automation in Construction*, 154, 105021. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105021>
- Zhao, Y., Xie, S., Gao, Y., Zhang, Y., & Zhang, K. (2021). Prediction of the number of roller passes and degree of compaction of asphalt layer based on compaction energy. *Construction and Building Materials*, 277. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122274>
- Zhu, X., Bai, S., Xue, G., Yang, J., Cai, Y., Hu, W., Jia, X., & Huang, B. (2018). Assessment of compaction quality of multi-layer pavement structure based on intelligent compaction technology. *Construction and Building Materials*, 161, 316–329. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.139>