

## **PENGARUH VARIASI SUHU PEMADATAN CAMPURAN TERHADAP KINERJA COLD PAVING HOT MIX ASBUTON (CPHMA) DENGAN PENAMBAHAN SEMEN PORTLAND**

### **[The Effect of Compaction Temperature Variations on the Performance of Cold Paving Hot Mix Asbuton (CPHMA) With The Addition of Portland Cement]**

**Fera Fitri Salsabila<sup>1)\*</sup>, Hasyim<sup>2)</sup>, Fatimah Nurul Azizzah<sup>3)</sup>**

**Universitas Mataram**

***salsabilafe@unram.ac.id (corresponding)***

#### **ABSTRAK**

Indonesia memiliki potensi besar aspal alam yang berasal dari Pulau Buton, Sulawesi Tenggara, yang dikenal dengan Asbuton. Salah satu produk pengembangan dari pemanfaatan Asbuton adalah Cold Paving Hot Mix Asbuton (CPHMA) yang dapat digunakan sebagai lapis permukaan jalan dengan keunggulan dapat dipadatkan pada suhu rendah. Namun, kinerja campuran sangat dipengaruhi oleh suhu pemadatan dan penggunaan bahan tambahan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi suhu pemadatan dan penambahan semen Portland terhadap karakteristik volumetrik dan mekanik campuran CPHMA. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Jalan Raya, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Mataram. Variasi yang digunakan meliputi suhu pemadatan 30°C, 90°C, dan 150°C, serta persentase penambahan semen Portland sebesar 0%, 7%, 8%, dan 9%. Pengujian yang dilakukan meliputi analisa saringan, berat jenis agregat, aggregate impact value, serta pengujian karakteristik volumetrik (VMA, VIM, VFB) dan mekanik menggunakan alat Marshall. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu pemadatan berpengaruh signifikan terhadap kinerja campuran, di mana peningkatan suhu pemadatan menghasilkan campuran yang lebih padat dan stabil. Penambahan semen Portland juga memberikan kontribusi positif dalam meningkatkan kekuatan ikatan campuran. Kondisi optimum diperoleh pada suhu pemadatan 150°C dengan kadar semen 8%, yang menghasilkan keseimbangan terbaik antara karakteristik volumetrik dan kinerja mekanik CPHMA.

---

**Kata kunci:** CPHMA; Marshall Test; Semen Portland; Suhu Pemadatan.

#### **ABSTRACT**

Indonesia has significant potential for natural asphalt derived from Buton Island, Southeast Sulawesi, known as Asbuton. One product developed from its utilization is Cold Paving Hot Mix Asbuton (CPHMA), which can serve as a road surface layer and offers the advantage of low-temperature compaction. However, the performance of CPHMA mixtures is strongly influenced by compaction temperature and the use of additives. Therefore, this study aimed to determine the effect of variations in compaction temperature and the addition of Portland cement on the volumetric and mechanical characteristics of CPHMA mixtures. The research was conducted at the Highway Laboratory, Civil Engineering Study Program, Mataram University. Variations included compaction temperatures of 30°C, 90°C, and 150°C, and Portland cement contents of 0%, 7%, 8%, and 9%. Tests performed consisted of sieve analysis, aggregate density, aggregate impact value, and evaluation of volumetric (VMA, VIM, VFB) and mechanical characteristics using the Marshall method. The results indicated that compaction temperature significantly affected mixture performance, where higher temperatures produced denser and more stable mixtures. The addition of Portland cement also enhanced bond strength. The optimum condition was achieved at 150°C with 8% cement content, providing the best balance between volumetric properties and mechanical performance.

---

**Keywords:** CPHMA; Compaction Temperature; Marshall Test; Portland Cement.

## PENDAHULUAN

Indonesia memiliki salah satu cadangan aspal alam terbesar di dunia, yang sebagian besar terletak di Pulau Buton, yang dikenal sebagai Aspal Buton (Asbuton) dengan estimasi sumber daya mencapai sekitar 677 juta ton. Asbuton merupakan potensi strategis nasional dalam mendukung pembangunan infrastruktur jalan jangka panjang. Pemanfaatan aspal alam tidak hanya membantu meningkatkan kemandirian dalam penggunaan material dalam negeri, tetapi juga mendukung arah perkembangan konstruksi dunia yang kini semakin menekankan prinsip keberlanjutan dan efisiensi energi.

Salah satu inovasi tersebut adalah *Cold Paving Hot Mix Asbuton* (CPHMA), yang hadir sebagai alternatif menjanjikan. Tidak seperti HMA yang memerlukan suhu tinggi dalam produksi dan pemadatan, CPHMA dirancang untuk memungkinkan pemadatan pada suhu yang jauh lebih rendah, sehingga memungkinkan aplikasi di lapangan, terutama di daerah terpencil yang jauh dari *Asphalt Mixing Plant* (AMP). Kebutuhan energi yang lebih rendah ini memberikan manfaat lingkungan yang signifikan, termasuk konsumsi bahan bakar yang lebih rendah dan penurunan emisi gas rumah kaca. Laporan sebelumnya menunjukkan bahwa teknologi aspal suhu rendah dapat mengurangi konsumsi energi hingga 30% dibandingkan produksi HMA konvensional. Pengurangan ini sangat relevan dalam konteks pembangunan infrastruktur berkelanjutan dan praktik rekayasa yang ramah iklim.

Meskipun memiliki keunggulan tersebut, teknologi aspal suhu rendah seperti *Cold Mix Asphalt* (CMA) dan CPHMA umumnya menunjukkan karakteristik mekanis dan daya tahan yang berbeda dibandingkan dengan HMA. CMA biasanya diterapkan di area dengan lalu lintas rendah karena stabilitasnya yang relatif rendah dan kerentanannya terhadap deformasi akibat beban berulang. Namun, fleksibilitas dalam aplikasi dan kemampuannya digunakan pada suhu lingkungan yang lebih rendah menjadikannya lebih adaptif (Khamelda et al., 2023). Demikian pula, CPHMA menunjukkan peningkatan kinerja yang menjanjikan ketika dimodifikasi dengan aditif seperti minyak kemiri, khususnya dalam meningkatkan adhesi dan durabilitas (Khamelda et al., 2023). Namun, baik CMA maupun CPHMA masih memiliki keterbatasan dalam aplikasi lalu lintas tinggi, di mana HMA tetap menunjukkan ketahanan yang lebih unggul terhadap beban mekanis dan pengaruh iklim (Khamelda et al., 2023). Keterbatasan ini menegaskan perlunya optimalisasi parameter desain campuran secara sistematis untuk meningkatkan performa CPHMA.

Salah satu faktor krusial yang memengaruhi kinerja campuran aspal adalah suhu pemadatan. Suhu pemadatan memainkan peran penting dalam menentukan kemudahan kerja campuran, penguncian agregat, efisiensi pelapisan binder, dan kepadatan akhir. Suhu pemadatan yang lebih tinggi umumnya mendukung pencampuran dan ikatan yang lebih baik antara agregat dan binder aspal, menghasilkan campuran yang lebih padat dengan kinerja struktural yang lebih baik (Liu et al., 2022). Sebaliknya, suhu yang terlalu rendah dapat menghambat pengaturan ulang partikel secara optimal, mengakibatkan peningkatan rongga udara dan penurunan durabilitas jangka panjang (Pan et al., 2025). Berbagai studi menekankan bahwa pemeliharaan suhu pemadatan optimal sangat penting untuk mencapai sifat volumetrik yang memadai dan meminimalkan risiko deformasi akibat beban lalu lintas (Ma et al., 2024).

Dampak dari suhu pemadatan yang tidak mencukupi tidak hanya terbatas pada pengurangan kepadatan. Suhu rendah dapat meningkatkan kekakuan campuran saat penempatan, mengurangi kemudahan kerja, serta menghambat ikatan yang memadai antara aspal dan agregat. Akibatnya, perkerasan dapat menunjukkan kadar rongga udara yang lebih tinggi, meningkatkan kerentanan terhadap masuknya air dan mempercepat proses kerusakan (Pan et al., 2025). Selain itu, pemadatan yang tidak memadai dapat menyebabkan campuran menjadi getas dan mudah retak akibat tegangan termal (Chen et al., 2024). Perilaku termal pada suhu yang tidak optimal juga dapat mengurangi ketahanan terhadap deformasi plastis, berkontribusi pada kegagalan struktural dini akibat beban lalu lintas berulang (Ma et al., 2024). Oleh karena itu, pengendalian suhu selama pemadatan merupakan faktor kunci dalam menentukan umur layan dan keberfungsian perkerasan.

Seiring dengan pengelolaan suhu, penambahan aditif mineral juga telah dieksplorasi sebagai strategi untuk meningkatkan performa campuran aspal suhu rendah. Semen Portland, ketika digunakan sebagai filler atau bahan pengikat hidrolik, dilaporkan dapat meningkatkan karakteristik ikatan, kekakuan campuran, dan ketahanan terhadap pengaruh lingkungan. Penambahan semen dapat mendorong kohesi yang lebih baik antara binder dan agregat serta berkontribusi pada peningkatan

stabilitas Marshall dan kinerja mekanis secara keseluruhan. Namun, sebagian besar studi sebelumnya mengevaluasi pengaruh suhu pemadatan atau kandungan aditif secara terpisah, dengan sedikit perhatian pada efek interaksinya dalam sistem CPHMA.

Dari perspektif keberlanjutan, integrasi sumber daya aspal alam seperti Asbuton memberikan kontribusi signifikan terhadap praktik rekayasa perkerasan yang ramah lingkungan. Penggunaan aspal alam lokal mengurangi ketergantungan terhadap binder berbasis minyak bumi dan menurunkan suhu produksi, sehingga menurunkan emisi karbon selama konstruksi (Khamelda et al., 2023). Keuntungan logistik dari penggunaan material domestik juga mengurangi dampak lingkungan terkait transportasi dan meningkatkan efisiensi energi. Selain itu, CPHMA menawarkan manfaat praktis untuk daerah terpencil dan berlalulintas rendah, di mana keterbatasan infrastruktur dan peralatan sering menjadi tantangan bagi penerapan hot mix konvensional (Barraj et al., 2022; Kim et al., 2024; Khamelda et al., 2023). Namun demikian, untuk sepenuhnya merealisasikan manfaat lingkungan dan logistik tersebut, optimalisasi performa tetap menjadi keharusan.

Masih ada celah penelitian yang cukup penting mengenai bagaimana kombinasi variasi suhu pemadatan dan penambahan semen Portland secara bersama-sama memengaruhi kinerja volumetrik dan mekanis CPHMA. Meskipun perilaku reologi yang bergantung pada suhu dan fenomena segregasi diketahui mempengaruhi durabilitas campuran dingin dan ketahanan terhadap retak (Liu et al., 2023), studi komprehensif yang mengintegrasikan variasi suhu secara sistematis dengan kadar semen bertingkat masih jarang. Pemahaman terhadap interaksi ini sangat penting terutama pada pemadatan dingin karena campuran lebih sensitif terhadap suhu. Menutup kesenjangan ini diperlukan agar dapat disusun pedoman desain yang efisien energi dan tetap menjamin kekuatan struktur.

Studi ini meneliti pengaruh gabungan suhu pemadatan dan kandungan semen Portland terhadap performa CPHMA. Suhu pemadatan 30°C, 90°C, dan 150°C diuji untuk merepresentasikan kondisi suhu rendah, menengah, dan tinggi. Kandungan semen Portland sebesar 0%, 7%, 8%, dan 9% ditambahkan berdasarkan berat total campuran untuk mengevaluasi perannya sebagai filler. Penilaian kinerja dilakukan berdasarkan parameter volumetrik, termasuk Voids in Mineral Aggregate (VMA), Voids in Mixture (VIM), dan Voids Filled with Bitumen (VFB), serta karakteristik mekanis Marshall. Hipotesis dalam studi ini menyatakan bahwa peningkatan suhu pemadatan akan meningkatkan densitas dan kekuatan mekanik campuran, sementara penambahan semen akan meningkatkan ikatan dan stabilitas. Selain itu, diperkirakan terdapat kombinasi optimal antara suhu pemadatan dan kandungan semen yang dapat mencapai keseimbangan antara persyaratan volumetrik dan kinerja mekanik.

Cold Paving Hot Mix Asbuton (CPHMA) adalah inovasi campuran asbuton yang terdiri dari agregat, asbuton butir, bahan peremaja, dan aditif lain yang dapat dipadatkan pada suhu rendah sekitar 30°C. Campuran ini digunakan untuk pekerjaan penambalan, pelebaran bahu jalan, serta perkerasan dengan volume lalu lintas rendah hingga sedang (PUPR, 2015). Keunggulan utama CPHMA adalah efisiensi energi dan pengurangan emisi gas rumah kaca karena tidak membutuhkan pemanasan tinggi dalam proses pencampuran, sehingga lebih ramah lingkungan dibandingkan campuran aspal panas konvensional (PUPR, 2020). Penggunaan CPHMA mampu menghemat energi hingga 30% sekaligus mempercepat proses pelaksanaan di lapangan. Namun, kelemahan yang masih ditemui adalah workability yang rendah akibat kepadatan campuran yang terbatas, sehingga kualitas hasil sangat dipengaruhi oleh suhu pemadatan.

Semen Portland tipe biasa (OPC) digunakan sebagai filler mineral dan pengikat hidraulik untuk memodifikasi campuran CPHMA. Semen ditambahkan berdasarkan persentase terhadap total berat campuran, dengan empat variasi kadar: 0%, 7%, 8%, dan 9%. Penambahan semen Portland memengaruhi kekakuan campuran, karakteristik pemadatan, proses curing, dan durabilitas jangka panjang (Khamelda et al., 2023; Wan et al., 2023). Filler hidraulik dapat memerlukan kondisi curing tertentu untuk mengoptimalkan daya ikat dan ketahanan terhadap kelembaban (Barraj et al., 2022; Chen et al., 2024).

Agregat dalam perkerasan jalan adalah material granular berupa kerikil, pasir, batu pecah, atau kombinasi dari keduanya yang menjadi komponen utama campuran aspal maupun beton. Agregat berfungsi memberikan kekuatan, kestabilan, dan daya tahan terhadap beban lalu lintas pada lapisan perkerasan. Komposisi, gradasi, dan kualitas agregat sangat menentukan kinerja perkerasan, termasuk kekuatan struktural dan umur layan jalan.

Agregat kasar adalah butiran agregat yang tertahan pada saringan No. 4 (4,75 mm) dan umumnya berupa kerikil, batu pecah, atau kombinasi keduanya. Material ini berperan penting dalam memberikan kekuatan, kestabilan, serta interlocking pada campuran perkerasan jalan. Kualitas agregat kasar, seperti bentuk, tekstur permukaan, dan ketahanan aus, sangat memengaruhi daya dukung serta ketahanan perkerasan terhadap beban lalu lintas.

Agregat halus adalah butiran agregat yang lolos saringan No. 4 (4,75 mm) namun tertahan pada saringan No. 200 (0,075 mm). Biasanya berupa pasir alami atau hasil pemecahan batu, agregat halus berfungsi mengisi rongga antar-agregat kasar sehingga campuran lebih padat dan stabil. Gradasi, bentuk butir, dan kebersihan agregat halus sangat berpengaruh terhadap workability, kepadatan, serta daya tahan perkerasan jalan

**Tabel 1. Spesifikasi Gradasi Agregat CPHMA**

Ukuran Ayakan		% Berat Lolos
ASTM	(mm)	Terhadap Total Agregat
3/4"	19	100
1/2"	12,5	90 - 100
No.4	4,75	45 - 70
No.8	2,36	30 - 55
No.50	0,300	12 - 25
No.200	0,075	6 - 15

Sumber : Direktorat Jenderal Bina Marga, Spesifikasi Umum 2018 Revisi 2

Suhu pemadatan merupakan faktor krusial dalam proses konstruksi perkerasan jalan karena berpengaruh langsung terhadap kepadatan, stabilitas, dan daya tahan campuran aspal. Pada dasarnya, pemadatan dilakukan untuk mengurangi rongga udara (void) dalam campuran sehingga tercapai kepadatan optimal yang mampu meningkatkan interlocking antar-agregat serta ikatan antara aspal dan agregat. Suhu yang terlalu rendah menyebabkan campuran menjadi kaku dan sulit dipadatkan, sehingga meningkatkan porositas dan menurunkan stabilitas lapisan. Sebaliknya, suhu yang terlalu tinggi dapat menurunkan viskositas aspal secara berlebihan dan menyebabkan bleeding atau deformasi plastis. Oleh karena itu, pemilihan suhu pemadatan yang tepat harus disesuaikan dengan jenis campuran aspal yang digunakan agar diperoleh keseimbangan antara workability dan ketahanan campuran terhadap beban lalu lintas maupun kondisi lingkungan.

Sifat volumetrik campuran adalah karakteristik yang menggambarkan hubungan antara volume agregat, aspal, dan rongga udara dalam campuran perkerasan. Parameter ini digunakan untuk menilai kepadatan, stabilitas, serta durabilitas lapisan perkerasan jalan. Sifat mekanik campuran aspal merupakan karakteristik mengenai bagaimana campuran aspal menerima beban yang diterima selama penggunaannya. Sifat mekanik dapat diuji dengan melakukan pengujian Marshall.

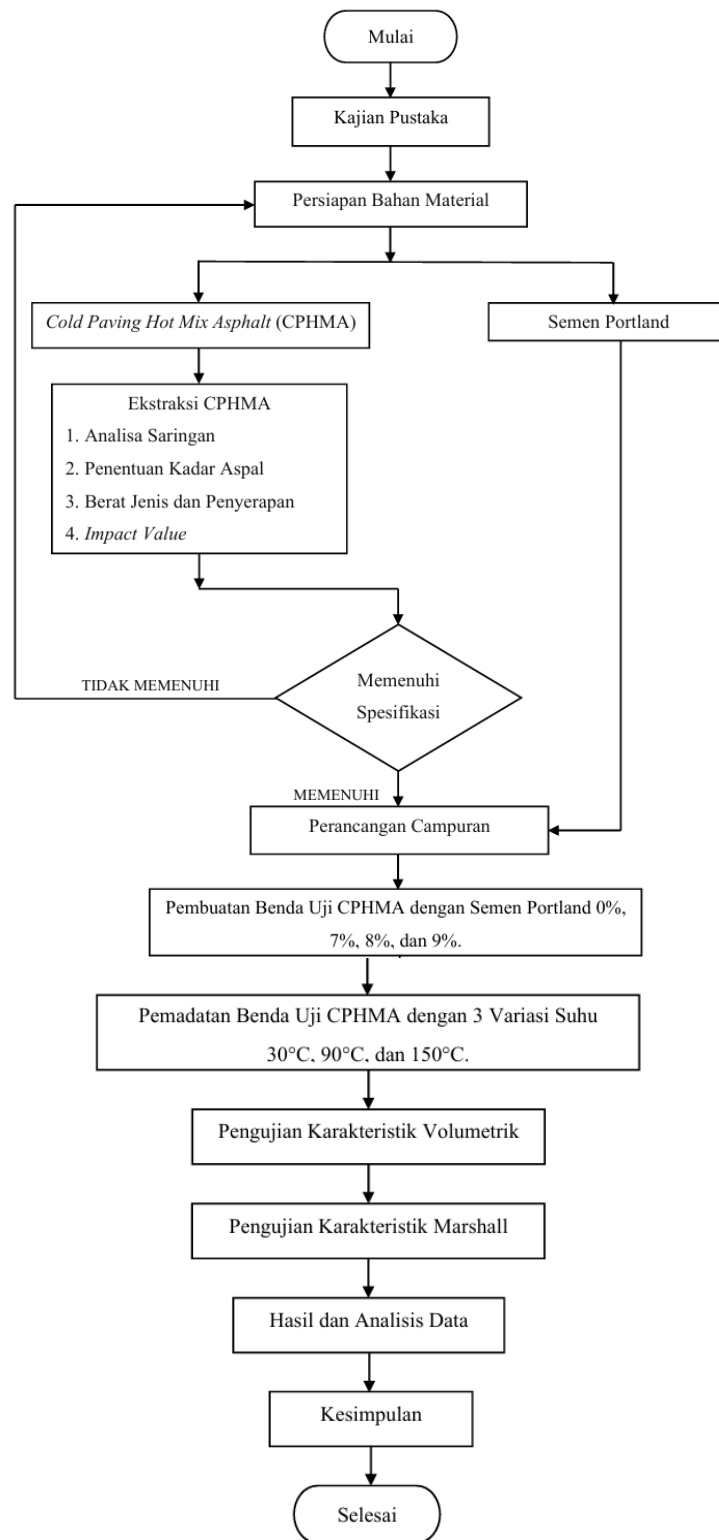
## METODE PENELITIAN

### Lokasi Penelitian dan Desain Eksperimen

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Transportasi dan Jalan Raya, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mataram. Studi ini menggunakan pendekatan eksperimen laboratorium yang terkendali untuk mengevaluasi kinerja volumetrik dan mekanis dari campuran Cold Paving Hot Mix Asbuton (CPHMA) yang dimodifikasi dengan semen Portland pada berbagai suhu pemadatan.

Terdapat dua tahap yang akan dilakukan dalam penelitian ini. Pertama, melakukan pengujian pada agregat penyusun CPHMA dan kedua melakukan pengujian terhadap campuran yaitu CPHMA dengan Semen Portland dengan variasi suhu pemadatan. Dalam pencampuran tersebut dilakukan berdasarkan metode Marshall yang merupakan salah satu metode yang paling banyak digunakan untuk menilai stabilitas, aliran, dan parameter volumetrik campuran aspal (Wan et al., 2023; Leon et al., 2023). Metode ini dilakukan untuk mendapatkan komponen-komponen dalam Marshall seperti stabilitas, kepadatan, VIM, VMA, dan VFB. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan akan diperoleh nilai stabilitas dan kelelahan. Selanjutnya, peneliti akan melakukan analisis, evaluasi, dan

penarikan kesimpulan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh suhu pemadatan terhadap campuran aspal buton CPHMA dan penambahan semen Portland. Pengendalian suhu selama pemadatan dilakukan untuk mensimulasikan kondisi lapangan yang berbeda, sesuai dengan prinsip simulasi laboratorium sebagaimana dijelaskan dalam studi sebelumnya (Liu et al., 2022; Awan et al., 2022). Dengan memvariasikan suhu pemadatan secara sistematis, penelitian ini mengevaluasi ketahanan CPHMA terhadap deformasi dan potensi retak (Chen et al., 2025).



**Gambar 1. Bagan Alir Penelitian**

### Alat dan Bahan Penelitian

Alat-alat penelitian yang digunakan adalah alat-alat yang terdapat pada Laboratorium Transportasi dan Rekayasa Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mataram,

yaitu meliputi: alat uji ekstraksi, alat uji analisa saringan, neraca analitik, oven, wadah, piknometer, kerucut terpancung, compactor, ejector, water bath, kompor, sarung tangan anti panas, mould, jangka sorong, dan alat uji stabilitas Marshall.

Bahan-bahan yang digunakan meliputi:

1. CPHMA yang dibeli dari PT. Asphalt Karya Nusantara, Kec. Labuapi, Lombok Barat.
2. Semen Portland curah kemasan 50 kg.

### Variabel Eksperimen

Dua variabel independen utama yang diteliti:

1. Suhu pemadatan: 30°C, 90°C, dan 150°C.
2. Kadar semen Portland: 0%, 7%, 8%, dan 9% dari total berat campuran.

### Rancangan Pengujian

#### 1. Pengujian Material

Pengujian material dilakukan sebelum pembuatan benda uji Marshall.

##### a. Pengujian Ekstraksi

Pengujian ekstraksi dilakukan untuk menentukan kadar aspal dan agregat dari campuran CPHMA. Prosedur mengikuti standar seperti AASHTO T 164 dan ASTM D 2041 yang menetapkan metode penentuan kandungan aspal dan berat jenis campuran aspal (Laib et al., 2025).

##### b. Pengujian Analisa Saringan

Analisa saringan dilakukan untuk mengetahui gradasi agregat dan memastikan kesesuaian dengan Spesifikasi Bina Marga 2018.

##### c. Pengujian Berat Jenis dan Ketahanan Aus Agregat

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui berat jenis agregat sebagai indikator kepadatan dan kualitas material dalam campuran. Selain itu, dilakukan pengujian ketahanan aus untuk menilai kemampuan agregat dalam menahan gesekan dan beban lalu lintas. Parameter ini penting untuk perhitungan volumetrik dan evaluasi performa (Boarie et al., 2024).

##### d. Pembuatan Benda uji

#### 2. Pengujian Campuran Marshall

Pembuatan benda uji Marshall mengikuti prosedur pemadatan standar menggunakan cetakan Marshall, palu pemadat, dan pengkondisian suhu yang dikontrol. Simulasi suhu dilakukan menggunakan sistem pemanas terkontrol untuk mempertahankan suhu pemadatan pada 30°C, 90°C, dan 150°C, sesuai praktik simulasi laboratorium (Liu et al., 2022; Awan et al., 2022).

Performa mekanis dievaluasi melalui pengujian stabilitas dan aliran Marshall menggunakan alat uji Marshall standar. Marshall Quotient (MQ), yaitu rasio antara stabilitas dan aliran, dihitung untuk menunjukkan kekakuan dan ketahanan terhadap deformasi (Boarie et al., 2024; Ma et al., 2023).

Penambahan semen Portland membutuhkan kontrol ketat selama pencampuran dan pembuatan benda uji untuk memastikan penyebaran merata dan ikatan yang baik. Prosedur dimodifikasi untuk memperhitungkan perubahan kekakuan dan perilaku pemadatan akibat penggunaan filler hidrolik (Khamelda et al., 2023; Wan et al., 2023).

### Alur Kerja Penelitian

Alur kerja penelitian secara keseluruhan terdiri atas tahapan berikut:

1. Persiapan dan kalibrasi peralatan laboratorium.
2. Pengadaan dan pengkondisian material CPHMA dan semen Portland.
3. Pengujian ekstraksi untuk menentukan kandungan aspal dan agregat.
4. Analisis saringan untuk verifikasi gradasi agregat.
5. Penentuan berat jenis agregat dan nilai benturan.
6. Pembuatan benda uji Marshall dengan kadar semen 0%, 7%, 8%, dan 9%.
7. Pemadatan benda uji pada suhu 30°C, 90°C, dan 150°C.
8. Pengukuran parameter volumetrik (densitas, VIM, VMA, VFB).
9. Pengujian stabilitas dan aliran Marshall.
10. Perhitungan nilai Marshall Quotient (MQ).

11. Analisis statistik dan interpretasi hasil untuk menentukan kombinasi suhu dan semen yang optimal.

Metodologi eksperimen ini mengikuti prinsip desain Marshall yang telah diakui, dengan menggabungkan simulasi suhu yang terkontrol dan modifikasi menggunakan filler hidrolik. Pendekatan ini memastikan bahwa evaluasi campuran CPHMA konsisten dengan standar pengujian yang diakui dan mampu menangkap pengaruh interaktif antara suhu pemadatan dan penambahan semen Portland terhadap kinerja volumetrik dan mekanis.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Pemeriksaan Material CPHMA

#### 1. Hasil Uji Ekstraksi

Pengujian ekstraksi dilakukan untuk menentukan kandungan aspal dari material CPHMA sebelum dimodifikasi dengan semen Portland. Dua sampel representatif dengan masing-masing berat 1000 g diuji. Hasil menunjukkan tingkat konsistensi yang tinggi antara sampel, yang menandakan keseragaman material yang baik. Kandungan aspal yang didapatkan adalah 6,92% dan 6,89%, dengan rata-rata 6,90%.

**Tabel 1. Hasil Pengujian Ekstraksi CPHMA**

Perhitungan	Sampel A	Sampel B
Berat sampel sebelum diekstraksi (gr)	1000	1000
Berat kertas filter (gr)	50.7	50.5
Berat kertas filter setelah diekstraksi (gr)	51.3	53.35
Berat massa dari kertas filler (gr)	0.6	2.85
Berat sampel setelah diekstraksi (gr)	930.2	928.25
Kadar aspal (%)	6.92%	6.89%
Rata-rata kadar aspal (%)	6.90%	

Sumber: Hasil uji laboratorium.

#### 2. Hasil Gradasi Agregat

Analisis saringan dilakukan untuk mengevaluasi gradasi agregat dan kesesuaiannya dengan spesifikasi Bina Marga untuk CPHMA. Hasil menunjukkan bahwa persentase lolos untuk semua ukuran saringan berada dalam batas spesifikasi, yang menandakan bahwa gradasi agregat layak untuk uji Marshall dan mendukung karakteristik volumetrik yang baik.

**Tabel 2. Hasil Pengujian Gradasi Agregat CPHMA**

No	Ukuran Saringan (ASTM)	% Lolos Saringan		Rata-rata	Spesifikasi Bina Marga
		Uji-1	Uji-2		
1	3/4"	100.00%	100.00%	100%	100
2	1/2"	91.84%	94.37%	93%	90-100
3	No.4	57.79%	58.51%	58%	45-70
4	No.8	38.56%	42.63%	41%	30-55
5	No.50	22.53%	23.08%	23%	12-25
6	No.200	7.95%	7.94%	8%	6-15

Sumber: Hasil uji laboratorium.

#### 3. Sifat Fisik Agregat

Hasil pengujian sifat fisik agregat menunjukkan bahwa seluruh material memenuhi persyaratan spesifikasi untuk digunakan dalam campuran CPHMA. Nilai berat jenis curah melampaui batas minimum 2,5 untuk agregat kasar, agregat halus, dan filler. Nilai penyerapan air seluruhnya di bawah 3%, dan ketahanan aus agregat berada dalam batas yang diizinkan, menunjukkan durabilitas yang memadai.

**Tabel 3. Hasil Pemeriksaan Berat Jenis dan Keausan Agregat**

No.	Jenis Pemeriksaan	Hasil Pemeriksaan			Persyaratan
		Agregat Kasar	Agregat Halus	Filler	
1	Berat jenis bulk	2.681	2.645	2.500	≥ 2,5
2	Berat jenis semu	2.868	2.857	2.692	≥ 2,5
3	Berat jenis efektif	2.774	2.751	2.596	≥ 2,5
4	Keausan dengan alat impact (%)	18.8%	-	-	< 30%
5	Penyerapan (%)	2.437	2.812	2.857	< 3%

Sumber: Hasil uji laboratorium.

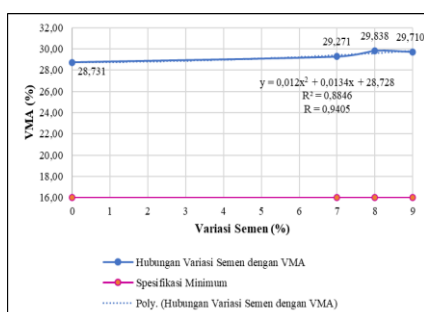
**Hasil Uji Marshall pada Suhu Pemadatan 30°C**

Seluruh campuran yang dipadatkan pada suhu 30°C menunjukkan performa volumetrik dan mekanis yang buruk. Nilai VIM berada di rentang 17,758% hingga 19,036%, jauh melebihi batas spesifikasi 4–10%. Nilai VFB juga sangat rendah, antara 36,213% hingga 38,230%. Stabilitas Marshall jauh di bawah batas minimum 500 kg, menunjukkan kapasitas dukung beban yang tidak memadai pada kondisi pemadatan dingin.

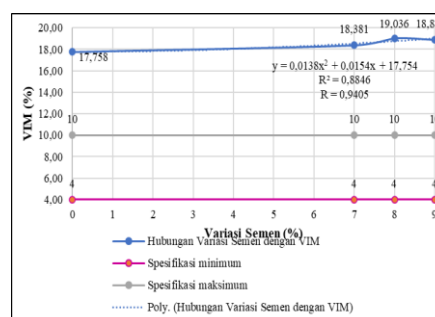
**Tabel 4. Hasil Pengujian pada suhu 30°C**

Parameter	Spesifikasi	Variasi Penambahan Semen Portland			
		0%	7%	8%	9%
VMA (%)	Min 16	28,731	29,271	29,838	29,710
VIM (%)	4-10	17,758	18,381	19,036	18,888
VFB (%)	Min 60	38,230	37,266	36,213	36,434
Stabilitas (kg)	Min 500	235,246	231,267	253,653	241,314
Flow (mm)	2-5	3,800	7,300	7,517	5,283
MQ (kg/mm)	Min 250	63,398	34,841	34,866	46,720

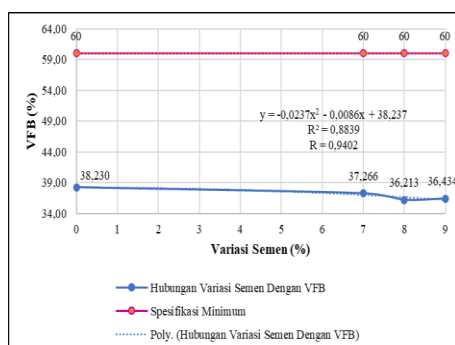
Sumber: Hasil uji laboratorium.



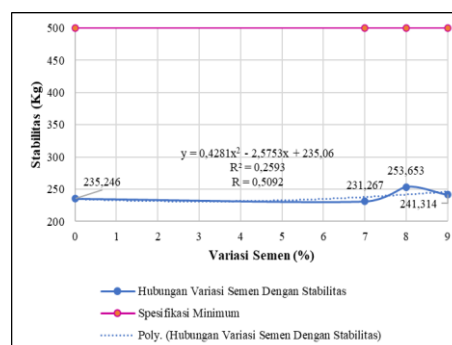
**Gambar 2. Hubungan semen dengan VMA**



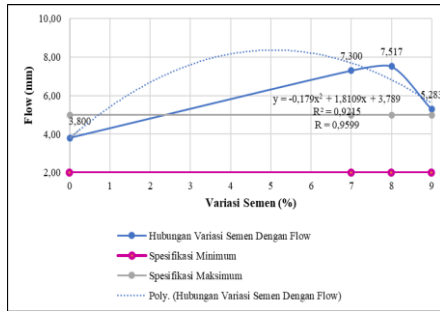
**Gambar 3. Hubungan semen dengan VIM**



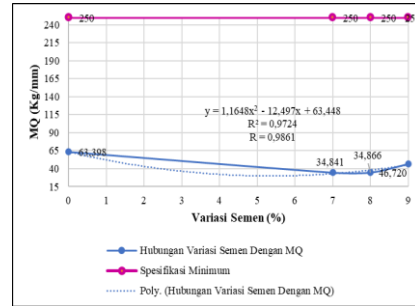
**Gambar 4. Hubungan semen dengan VFB**



**Gambar 5. Hubungan semen dengan stabilitas**



Gambar 6. Hubungan semen dengan flow



Gambar 7. Hubungan semen dengan MQ

Pada suhu pemadatan 30°C, seluruh variasi penambahan semen Portland menunjukkan nilai VMA yang memenuhi spesifikasi karena berada di atas batas minimum 16%. Namun, nilai VIM berada jauh di atas rentang 4–10%, menandakan rongga udara yang terlalu besar. Kondisi ini berbanding terbalik dengan VFB yang hanya 36–38%, jauh di bawah syarat minimum 60%, sehingga rongga yang ada belum terisi aspal secara optimal.

Dari segi mekanik, stabilitas Marshall menunjukkan hasil yang sangat rendah, tidak mencapai batas minimum 500 kg. Nilai flow hanya sesuai spesifikasi pada campuran tanpa semen Portland (0%), sementara pada variasi 7%, 8%, dan 9% nilai flow terlalu tinggi yang menandakan deformasi plastis berlebih. Selain itu, MQ juga berada jauh di bawah syarat minimum 250 kg/mm, menunjukkan stabilitas rendah dengan deformasi yang besar.

Dengan demikian, campuran pada suhu pemadatan 30°C tidak dapat dikategorikan optimum. Meskipun parameter VMA memenuhi syarat, parameter penting lain seperti VIM, VFB, stabilitas, flow, dan MQ tidak terpenuhi. Rendahnya kualitas ini disebabkan oleh suhu pemadatan yang terlalu rendah sehingga ikatan antara agregat dan aspal buruk, menghasilkan kekuatan campuran yang rendah.

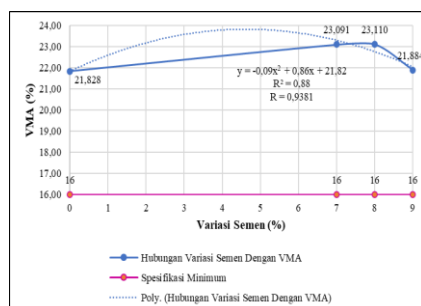
### Hasil Uji Marshall pada Suhu Pemadatan 90°C

Peningkatan suhu pemadatan menjadi 90°C menghasilkan perbaikan signifikan pada performa mekanis. Nilai stabilitas Marshall meningkat tajam dan melampaui 1400 kg untuk semua kadar semen. Nilai flow berada dalam rentang spesifikasi 2–5 mm, dan nilai MQ melebihi batas minimum, menandakan peningkatan kekakuan dan ketahanan terhadap deformasi. Namun, masih ditemukan ketidaksesuaian parsial pada nilai VIM dan VFB untuk beberapa kadar semen.

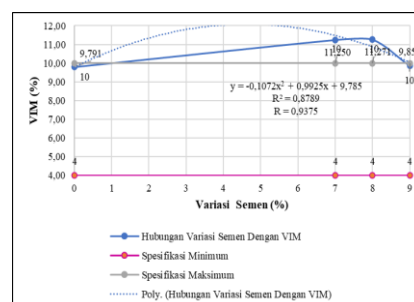
Tabel 5. Hasil Pengujian pada suhu 90°C

Parameter	Spesifikasi	Variasi Penambahan Semen Portland			
		0%	7%	8%	9%
VMA (%)	Min 16	21,828	23,091	23,110	21,884
VIM (%)	4-10	9,791	11,250	11,271	9,857
VFB (%)	Min 60	55,188	51,452	51,296	54,960
Stabilitas (kg)	Min 500	1529,464	1529,675	1537,668	1437,105
Flow (mm)	2-5	2,417	2,767	3,433	2,933
MQ (kg/mm)	Min 250	637,189	551,581	454,448	491,463

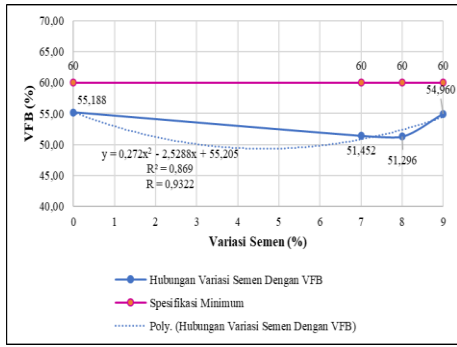
Sumber: Hasil uji laboratorium.



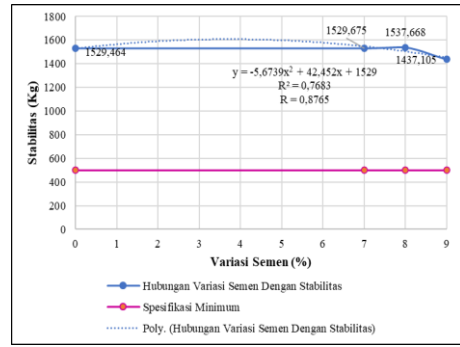
Gambar 8. Hubungan semen dengan VMA



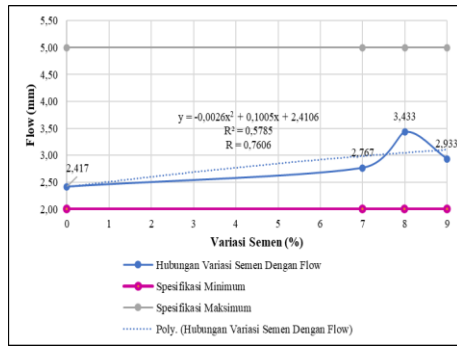
Gambar 9. Hubungan semen dengan VIM



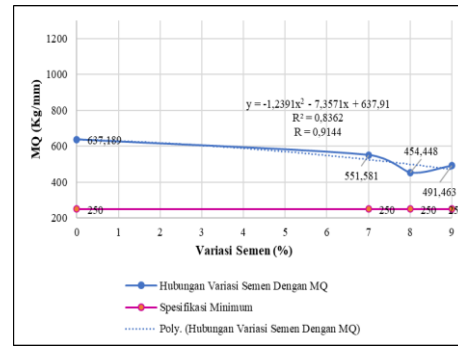
Gambar 10. Hubungan semen dengan VFB



Gambar 11. Hubungan semen dengan Stabilitas



Gambar 12. Hubungan semen dengan Flow



Gambar 13. Hubungan semen dengan MQ

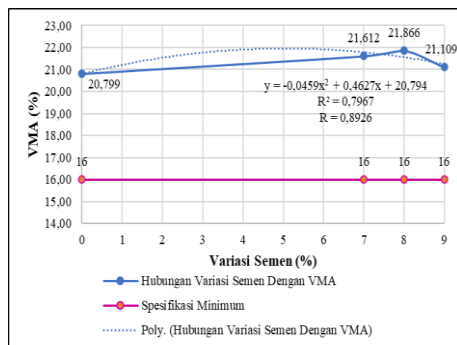
### Hasil Uji Marshall pada Suhu Pematatan 150°C

Nilai stabilitas Marshall tertinggi diperoleh pada suhu pematatan 150°C. Stabilitas meningkat seiring kenaikan kadar semen hingga 8%, di mana nilai maksimum sebesar 2164,807 kg tercapai. Nilai flow tetap dalam batas spesifikasi, dan MQ menunjukkan keseimbangan yang baik antara kekuatan dan ketahanan deformasi. Namun demikian, nilai VFB masih belum memenuhi batas minimum untuk semua variasi.

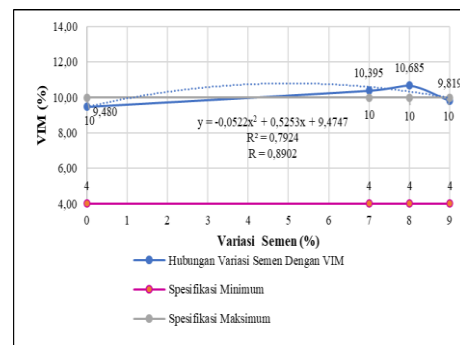
Tabel 6. Hasil Pengujian pada suhu 150°C

Parameter	Spesifikasi	Variasi Penambahan Semen Portland			
		0%	7%	8%	9%
VMA (%)	Min 16	20,799	21,612	21,866	21,109
VIM (%)	4-10	9,480	10,395	10,685	9,819
VFB (%)	Min 60	54,789	51,979	51,155	53,483
Stabilitas (kg)	Min 500	1681,445	1992,924	2164,807	1979,338
Flow (mm)	2-5	3,150	4,167	4,410	3,757
MQ (kg/mm)	Min 250	534,182	485,959	493,542	527,800

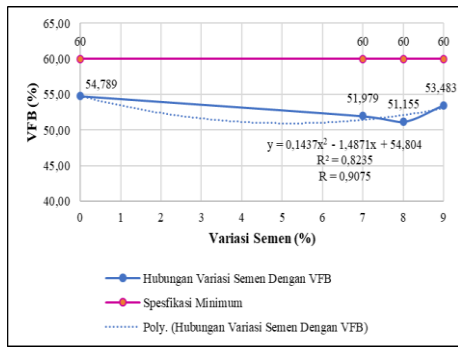
Sumber: Hasil uji laboratorium.



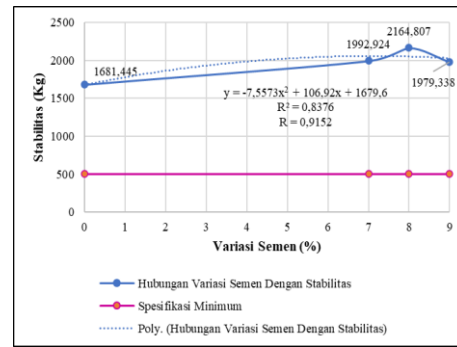
Gambar 13. Hubungan semen dengan VMA



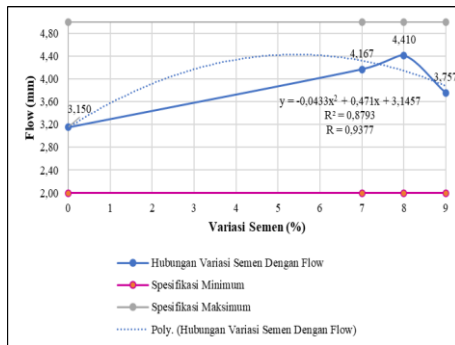
Gambar 14. Hubungan semen dengan VIM



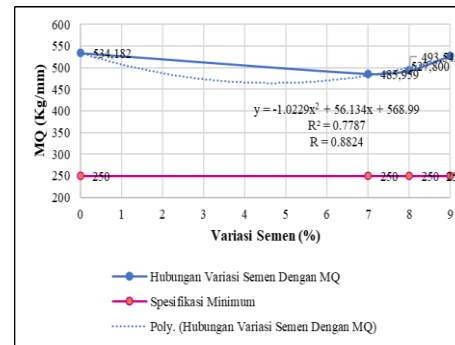
Gambar 15. Hubungan semen dengan VFB



Gambar 16. Hubungan semen dengan Stabilitas



Gambar 17. Hubungan semen dengan Flow



Gambar 18. Hubungan semen dengan MQ

Pada suhu pemadatan 90°C, nilai VMA pada seluruh variasi semen Portland berada pada kisaran 21–23% dan memenuhi syarat karena lebih tinggi dari batas minimum 16%. Nilai VIM sebagian besar mendekati rentang spesifikasi 4–10%, meskipun pada variasi 7% dan 8% sedikit melebihi batas maksimum sehingga rongga udara masih cenderung berlebih.

Nilai VFB pada semua variasi masih belum mencapai syarat minimum 60%, menunjukkan bahwa meskipun rongga udara berkurang dibanding suhu 30°C, aspal belum sepenuhnya mengisi rongga agregat. Namun, dari sisi mekanik, hasil pengujian Marshall menunjukkan peningkatan signifikan. Stabilitas berada pada 1437,105–1537,668 kg, jauh di atas syarat minimum, flow seluruhnya dalam rentang 2–5 mm, dan MQ melebihi 250 kg/mm, menandakan campuran memiliki stabilitas tinggi serta ketahanan deformasi yang baik.

Dengan demikian, suhu 90°C menghasilkan kinerja campuran yang jauh lebih baik dibandingkan 30°C. Hampir semua parameter volumetrik dan mekanik dapat memenuhi persyaratan, kecuali VFB yang masih konsisten di bawah standar serta VIM pada variasi tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa suhu pemadatan lebih tinggi mendukung ikatan antarpartikel dan meningkatkan performa campuran secara signifikan.

## PENUTUP

### Simpulan

Berdasarkan hasil pengujian, analisa data, dan pembahasan, maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Suhu pemadatan terbukti memberikan pengaruh signifikan terhadap parameter volumetrik campuran CPHMA. Nilai VMA pada seluruh variasi suhu pemadatan selalu berada di atas batas minimum spesifikasi ( $\geq 16\%$ ), sehingga dapat dikatakan sudah memenuhi persyaratan. Namun, nilai VFB secara konsisten berada di bawah batas minimum spesifikasi (60%) pada semua variasi suhu dan kadar semen Portland, sehingga tidak ada kondisi yang memenuhi syarat. Sementara itu, nilai VIM pada suhu 30°C sama sekali tidak memenuhi persyaratan karena jauh melampaui batas maksimum 10%, yaitu berkisar antara 17,758% hingga 19,036%. Pada suhu 90°C dan 150°C, nilai VIM mengalami perbaikan, tetapi hanya memenuhi spesifikasi pada kadar semen Portland 0% dan 9%, sedangkan pada kadar 7% dan 8% masih melebihi batas maksimum. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa meskipun peningkatan suhu pemadatan

memperbaiki nilai VIM, namun belum mampu meningkatkan VFB hingga sesuai dengan spesifikasi.

2. Hasil pengujian Marshall menunjukkan bahwa suhu pemadatan memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap peningkatan stabilitas, flow, dan Marshall Quotient (MQ). Pada suhu 30°C, stabilitas yang diperoleh hanya sebesar 253,653 kg, masih jauh di bawah batas spesifikasi minimum 500 kg, sehingga kinerja campuran dapat dikatakan sangat rendah. Ketika suhu pemadatan dinaikkan menjadi 90°C, stabilitas meningkat signifikan hingga mencapai 1537,668 kg, dengan nilai flow dan MQ yang juga berada dalam batas persyaratan. Pada suhu 150°C, kinerja Marshall semakin baik, ditandai dengan peningkatan stabilitas yang jauh lebih tinggi yaitu sebesar 2164,807 kg, serta nilai flow dan MQ yang seluruhnya memenuhi ketentuan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi suhu pemadatan, semakin baik kinerja mekanik campuran CPHMA yang dihasilkan.
3. Berdasarkan keseluruhan hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa suhu pemadatan memiliki pengaruh yang lebih dominan dibandingkan variasi kadar semen Portland. Suhu pemadatan 150°C menghasilkan kinerja mekanik terbaik, meskipun parameter VFB belum terpenuhi. Sementara itu, variasi penambahan semen Portland 7%, 8%, dan 9% tidak menunjukkan perbaikan signifikan terhadap parameter volumetrik maupun mekanik. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa tidak terdapat kondisi yang benar-benar optimum karena tidak ada variasi yang memenuhi seluruh parameter volumetrik dan mekanik. Namun, kombinasi kadar semen 8% dengan suhu pemadatan 150°C dapat dianggap sebagai kondisi terbaik, karena menghasilkan nilai stabilitas Marshall paling tinggi yaitu 2164,807 kg.

### Saran

1. Untuk memperbaiki nilai VFB yang belum memenuhi spesifikasi, penelitian selanjutnya disarankan menambahkan variasi kadar aspal atau bahan aditif lain, sekaligus memperluas rentang suhu pemadatan agar diperoleh kondisi optimum terhadap sifat volumetrik CPHMA.
2. Penelitian berikutnya sebaiknya difokuskan pada penggunaan bahan tambah aspal atau peningkatan kadar aspal dalam campuran, karena hal tersebut dinilai lebih efektif dalam meningkatkan stabilitas, flow, serta nilai Marshall Quotient (MQ) dibandingkan hanya dengan penambahan semen Portland.

### DAFTAR PUSTAKA

- Awan, H. H., Hussain, A., Javed, M. F., Qiu, Y., Alrowais, R., Mohamed, A. M., Fathi, D., & Alzahrani, A. M. (2022). Predicting Marshall Flow and Marshall Stability of Asphalt Pavements Using Multi Expression Programming. *Buildings*, 12(3), 314. <https://doi.org/10.3390/buildings12030314>
- Barraj, F., Khatib, J., Castro, A., & Elkordi, A. (2022). Effect of Chemical Warm Mix Additive on the Properties and Mechanical Performance of Recycled Asphalt Mixtures. *Buildings*, 12(7), 874. <https://doi.org/10.3390/buildings12070874>
- Boarie, A., Abdelsalam, M. K., Gamal, A., & Rabah, M. (2024). Laboratory and Environmental Assessment of Asphalt Mixture Modified With a Compound of Reclaimed Asphalt Pavement and Waste Polyethylene. *Buildings*, 14(5), 1186. <https://doi.org/10.3390/buildings14051186>
- Chen, B., Chen, K., Xiong, X., Deng, Y., Chen, Z. H., Li, W., & Yu, H. (2025). Design and Construction Control of Warm Mix Epoxy Asphalt Mixture With Low Epoxy Content for Service Area Pavements. *Buildings*, 15(10), 1673. <https://doi.org/10.3390/buildings15101673>
- Chen, Y., Li, X., & Tian, X. (2024). Performance Evaluation of Soybean Oil/SBR Reclaimed Asphalt and Mixtures. *Buildings*, 14(7), 2085. <https://doi.org/10.3390/buildings14072085>
- Khamelda, L., Djakfar, L., & Wisnumurti, W. (2023). Optimization of Lawele Granular Asphalt (LGA) Performance in Cold Paving Hot Mix Asbuton (CPHMA) With Candlenut Oil Modifier. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(6 (126)), 51–61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.292080>

- Kim, J. W., Kim, K., & Le, T. H. M. (2024). Optimizing Rural Pavements With SBS-Modified Asphalt Binders and Petroleum Resin. *Buildings*, *14*(1), 116. <https://doi.org/10.3390/buildings14010116>
- Laib, S., Nafa, Z., Merdas, A., Chetbani, Y., Tayeh, B. A., & Tang, Y. (2025). Experimental and Statistical Evaluations of Recycled Waste Materials and Polyester Fibers in Enhancing Asphalt Concrete Performance. *Buildings*, *15*(15), 2747. <https://doi.org/10.3390/buildings15152747>
- Leon, L. P., Roopnarine, K., Azamathulla, H. M., Chadee, A. A., & Rathnayake, U. (2023). A Performance-Based Design Framework for Enhanced Asphalt Concrete in the Caribbean Region. *Buildings*, *13*(7), 1661. <https://doi.org/10.3390/buildings13071661>
- Liu, L., Zhang, Z., Zhang, L., Tang, Y., & Yin, J. (2023). Effect of Temperature on Interface Characteristics Between Compacted Recycled Asphalt Pavement and Geogrid. *Advances in Civil Engineering*, *2023*, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2023/4596750>
- Liu, P., Wang, C., Lü, W., Moharekpour, M., Oeser, M., & Wang, D. (2022). Development of an FEM-DEM Model to Investigate Preliminary Compaction of Asphalt Pavements. *Buildings*, *12*(7), 932. <https://doi.org/10.3390/buildings12070932>
- Ma, J., Wang, X., Zhang, Z., Dai, G., Huo, Y., & Zhao, Y. (2023). Performance Analysis of Industrial-Waste-Based Artificial Aggregates: CO<sub>2</sub> Uptake and Applications in Bituminous Pavement. *Buildings*, *13*(11), 2823. <https://doi.org/10.3390/buildings13112823>
- Ma, R., Li, Y., Cheng, P.-F., Chen, X., & Cheng, A. (2024). Low-Temperature Cracking and Improvement Methods for Asphalt Pavement in Cold Regions: A Review. *Buildings*, *14*(12), 3802. <https://doi.org/10.3390/buildings14123802>
- Pan, R., Jianmin, C., & Chen, Y. (2025). Study on Composition Design and Performance Characteristics of Warm-Mixed Rubber–Asphalt Mixture for Cold-Region Stress Absorption Layers. *Buildings*, *15*(7), 1164. <https://doi.org/10.3390/buildings15071164>
- Wan, C., Qiang, Y., & Zhang, X. (2023). Characteristics of Internal Water Flow Conduction Within Asphalt Mixtures Based on Real Three-Dimensional Void Structure. *Buildings*, *13*(7), 1746. <https://doi.org/10.3390/buildings13071746>