

## BAB 5

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh permasalahan tingginya suhu produksi pada *Hot Mix Asphalt* (HMA) yang berdampak buruk terhadap lingkungan, sehingga dikembangkan teknologi *Warm Mix Asphalt* (WMA) yang memungkinkan proses pencampuran dan pemadatan dilakukan pada suhu yang lebih rendah. Untuk mendukung hal ini, penelitian dilakukan dengan menambahkan zeolit alam sebagai aditif aspal untuk menurunkan suhu produksi sekaligus mempertahankan atau meningkatkan kualitas campuran. Penelitian bertujuan menganalisis pengaruh penambahan zeolit terhadap karakteristik *Marshall* campuran WMA HRS-WC dengan metode eksperimental di laboratorium menggunakan metode *Marshall* dengan kontrol campuran WMA HRS-WC yang menggunakan aspal konvensional Pen 60/70 tanpa zeolit. Total sebanyak 60 sampel dibuat dengan variasi kadar aspal (6%; 6,5%; 7%; 7,5%; 8%) dan kadar zeolit (0%, 0,1%, 0,2%, 0,3%). Pengujian dilakukan terhadap sifat agregat, sifat aspal, serta karakteristik *Marshall* (stabilitas, *flow*, *density*, VIM, VMA, VFA, dan MQ).

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik beberapa kesimpulan, antara lain:

- a) Zeolit terbukti mampu menurunkan suhu pencampuran dan pemadatan pada campuran beraspal hangat HRS-WC, dan semakin tinggi kadar zeolit yang digunakan, penurunan suhu yang terjadi juga semakin besar.
- b) Stabilitas campuran aspal modifikasi tidak selalu lebih tinggi dibandingkan campuran dengan aspal Pen 60/70. Anomali ditemukan pada kadar aspal 7% untuk campuran Pen 60/70 yang menunjukkan nilai stabilitas lebih tinggi. Setelah dilakukan penghapusan data outlier dan penyesuaian, hasil menunjukkan tren yang lebih mendekati hipotesis awal. Ketidaksesuaian ini kemungkinan disebabkan oleh tidak terkendalinya suhu pencampuran dan pemadatan selama proses uji.
- c) Campuran beraspal hangat HRS-WC yang dimodifikasi dengan zeolit, terutama pada kadar 0,2%, menunjukkan performa *Marshall* yang unggul dan

berpotensi menjadi alternatif yang lebih baik dibandingkan campuran tanpa zeolit. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa:

- 1) Pada kadar aspal tinggi (8%), penambahan zeolit secara konsisten meningkatkan *density* seiring dengan peningkatan kadar zeolit, menunjukkan kemampuan pemadatan yang lebih baik.
  - 2) Kadar zeolit 0,2% adalah yang paling efektif dalam meningkatkan stabilitas campuran, menghasilkan nilai stabilitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan semua variasi lainnya, termasuk campuran tanpa zeolit.
  - 3) Zeolit, terutama pada kadar 0,2% dan 0,3% cenderung menurunkan nilai *flow* campuran pada kadar aspal menengah hingga tinggi. Penurunan *flow* ini mengindikasikan peningkatan kekakuan dan ketahanan campuran terhadap deformasi.
  - 4) Penambahan zeolit, khususnya pada kadar 0,2% dan 0,3% di kadar aspal 8%, secara efektif mengurangi nilai VIM. Ini menunjukkan bahwa zeolit membantu mengurangi rongga udara, yang penting untuk durabilitas perkerasan.
  - 5) Pada kadar aspal tinggi (8%), zeolit cenderung menunjukkan tren penurunan VMA, mengindikasikan pengisian rongga yang lebih efisien oleh aspal modifikasi.
  - 6) VFA meningkat pada kadar aspal tinggi (misalnya, 8% dengan zeolit 0,3%), menunjukkan bahwa rongga terisi aspal dengan sangat baik.
  - 7) Nilai MQ cenderung meningkat terutama pada kadar 0,2% dan 0,3% zeolit, yang mengindikasikan peningkatan kekakuan dan ketahanan terhadap deformasi plastis.
- d) Pemanfaatan aspal modifikasi zeolit pada campuran beraspal hangat HRS-WC memengaruhi perubahan Kadar Aspal Optimum (KAO). Pergeseran KAO dari 7,50% (tanpa zeolit) menjadi 8,00% (dengan zeolit) mengindikasikan efektivitas zeolit dalam pengisian rongga aspal pada kadar yang sedikit lebih tinggi, sambil tetap mempertahankan atau meningkatkan performa.

## 5.2 Refleksi

Berdasarkan hasil penelitian yang sudah dilakukan, terdapat sejumlah hal yang perlu dievaluasi dan dijadikan bahan refleksi untuk pengembangan lebih lanjut, yaitu:

- a) Pemilihan metode uji *Marshall* sudah tepat dan relevan dengan tujuan penelitian, karena metode ini mampu menilai karakteristik campuran seperti stabilitas, *flow*, dan *density* secara langsung. Namun, metode ini hanya mengevaluasi performa jangka pendek campuran, sehingga pengaruh zeolit terhadap ketahanan jangka panjang (seperti *rutting* dan *fatigue*) belum diketahui sepenuhnya.
- b) Jumlah sampel sebanyak 60 buah sudah cukup untuk melihat pola atau tren dari karakteristik campuran yang diuji, dan juga sudah sesuai dengan standar pengujian di laboratorium. Namun, jika jumlah sampel ditambah, misalnya menjadi 80 atau lebih, keakuratan data dapat ditingkatkan dan *outlier* seperti yang ditemukan pada kadar aspal 7% bisa lebih terkontrol.
- c) Variasi kadar aspal (6%; 6,5%; 7%; 7,5%; 8%) dan zeolit (0%, 0,1%, 0,2%, 0,3%) yang digunakan dalam penelitian ini sudah cukup memberikan gambaran yang jelas tentang bagaimana kombinasi bahan memengaruhi hasil campuran. Dari variasi tersebut, terlihat bahwa kadar zeolit 0,2% memberikan hasil karakteristik terbaik. Namun, tidak dilakukan eksplorasi terhadap kadar yang lebih rendah atau lebih tinggi dari rentang tersebut, sehingga belum dapat dipastikan apakah 0,2% adalah kadar yang paling optimal.
- d) Zeolit alam dari Gunung Kidul berhasil menunjukkan efektivitas sebagai aditif ramah lingkungan dalam menurunkan suhu pencampuran dan pemadatan, sekaligus meningkatkan karakteristik *Marshall*. Akan tetapi, penelitian ini hanya menggunakan satu jenis zeolit sehingga belum membandingkan efektivitas zeolit dari sumber atau jenis lain, seperti zeolit sintetis.
- e) Agregat dan aspal yang digunakan dalam penelitian ini sudah memenuhi standar teknis dari Bina Marga 2018, yang menunjukkan bahwa kualitas material di laboratorium sudah baik. Namun, kondisi di laboratorium biasanya lebih ideal dibandingkan dengan kondisi di lapangan. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya sebaiknya mempertimbangkan penggunaan jenis agregat

lain yang lebih umum digunakan di proyek jalan raya, agar hasilnya bisa lebih mencerminkan kondisi nyata di lapangan.

- f) Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan teknologi *Warm Mix Asphalt* (WMA) dengan tambahan zeolit bisa menjadi pilihan yang lebih hemat energi dan ramah lingkungan. Zeolit terbukti bisa menurunkan suhu pencampuran dan pemadatan tanpa mengurangi kualitas campuran. Namun, agar bisa diterapkan secara luas di proyek jalan raya, masih perlu dilakukan kajian lebih lanjut tentang kelayakan teknis dan biaya penggunaannya dalam skala besar.

### 5.3 Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan perlu dilakukan studi lanjut, seperti:

- a) Menambahkan metode uji performa jangka panjang seperti uji *wheel tracking* atau *fatigue test*, agar dapat mengevaluasi ketahanan campuran terhadap deformasi dan kelelahan akibat beban lalu lintas. Hal ini penting karena uji Marshall hanya mencerminkan karakteristik jangka pendek dan belum menggambarkan kinerja aktual di lapangan secara menyeluruh.
- b) Menggunakan jumlah sampel yang lebih banyak, seperti 80 atau 100 buah, untuk memperkuat validitas statistik dan mengurangi pengaruh data yang menyimpang (*outlier*). Dengan jumlah sampel yang lebih besar, hasil penelitian akan lebih representatif dan mendekati kondisi nyata di lapangan.
- c) Menambah kadar zeolit yang lebih bervariasi, tidak hanya 0,1% sampai 0,3%, tetapi juga kadar yang lebih kecil seperti 0,05% atau lebih besar seperti 0,4%. Tujuannya adalah untuk mengetahui seberapa besar atau seberapa kecil kadar zeolit yang masih memberikan pengaruh terhadap campuran. Dengan begitu, bisa ditemukan kadar zeolit optimum yang paling tepat dan efisien, baik dari segi teknis maupun biaya.
- d) Menggunakan jenis zeolit yang berbeda, misalnya zeolit buatan (sintetis) atau zeolit dari daerah lain. Hal ini penting karena setiap jenis zeolit memiliki kandungan kimia dan ukuran pori yang berbeda-beda, yang bisa memengaruhi hasil campuran aspal. Dengan membandingkan beberapa jenis zeolit, bisa diketahui mana yang paling cocok dan efektif untuk digunakan.
- e) Mempertimbangkan penggunaan jenis agregat yang berbeda, seperti batu kapur atau batu basalt, yang sering digunakan di proyek jalan di lapangan.

Tujuannya adalah untuk melihat apakah zeolit tetap memberikan hasil yang baik jika digunakan dengan material yang berbeda dari yang dipakai di laboratorium. Hal ini penting karena kondisi di lapangan tidak selalu sama dengan kondisi ideal saat pengujian.

- f) Penelitian lanjutan yang melihat seberapa layak penggunaan zeolit jika diterapkan langsung pada proyek jalan yang sebenarnya. Penelitian ini bisa mencakup perhitungan biaya, manfaat terhadap lingkungan, dan seberapa besar energi yang bisa dihemat. Dengan begitu, hasil penelitian akan lebih bermanfaat dan bisa digunakan oleh pihak-pihak yang terlibat dalam pembangunan jalan, seperti pemerintah, kontraktor, atau konsultan.

