

Studi Optimasi Pembuatan Nanoaspal Karet dari Asbuton

**RINY YOLANDHA PARAPAT*¹, AYU RISNAWATI¹,
MARSYA IMARA SABRILIA¹, INDRA NOER HAMDHAN², IMAM ASCHURI²**

¹Program Studi Teknik Kimia, Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia

² Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia

Email: rinyyolandha@itenas.ac.id

ABSTRAK

Jumlah mobil yang terus meningkat memberi dampak tidak hanya pada kondisi jalan, tetapi juga pada penumpukan limbah ban. Penyebab kerusakan jalan menuntut penggunaan material untuk perkerasan jalan dengan kualitas yang lebih tinggi. Pemanfaatan Crumb Rubber (CR) dari ban mobil menjadi bahan aditif campuran aspal adalah solusi terbaik untuk kedua masalah tersebut. Para peneliti telah melaporkan bahwa penambahan CR dan nanopartikel dapat meningkatkan kualitas aspal jalan secara signifikan. Tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan komposisi optimum nanoaspal karet untuk meningkatkan mutu aspal Asbuton. Komposisi campuran aspal hasil ekstraksi, CR dan nanopartikel kemudian dioptimasi untuk mendapatkan kualitas nanoaspal karet yang memenuhi standar dengan menggunakan metode Central Composite dan Response Surface Method. Response yang diukur adalah Penetrasi, Daktilitas, Kelarutan dan Densitas dari nanoaspal karet. Hasil optimasi menunjukkan bahwa pada komposisi 3,682%NP; 4,694%CR; dan pada ukuran CR sebesar 88,5 nm; keempat parameter uji di atas terpenuhi.

Kata kunci: asbuton, crumb rubber, nanoaspal karet, nanopartikel

ABSTRACT

The increasing number of cars has an impact not only on road conditions, but also on the accumulation of waste tires. The cause of road damage demands the use of materials for road pavement with higher quality. Utilization of Crumb Rubber (CR) from car tires as an additive to asphalt mixture is the best solution for both problems. Researchers have reported that the addition of CR and nanoparticles can significantly improve the quality of road asphalt. The purpose of this research is to obtain the optimum composition of rubber nano-asphalt to improve the quality of Asbuton asphalt. The composition of asphalt, CR and nanoparticles is then optimized using the Central Composite and Response Surface Method. Responses measured were penetration, ductility, solubility and density of rubber nanoasphalt. The optimization results show that at a composition of 3.682%NP, 4.694%CR, and CR size of 88.5 nm, the test parameters above are fulfilled.

Keywords: asbuton, crumb rubber, rubber nanoasphalt, nanoparticles

1. PENDAHULUAN

Seiring dengan pertumbuhan ekonomi setiap masyarakat umumnya sejalan dengan peningkatan penggunaan jalan karena meningkatnya jumlah kendaraan bermotor. Juga banyaknya kendaraan yang bermuatan lebih Hal ini akan menyebabkan beban jalan yang berlebihan yang berujung pada kerusakan jalan. Oleh karena itu kualitas campuran aspal perlu ditingkatkan agar aspal dapat menahan beban kendaraan yang berat. Menurut data yang dilaporkan oleh Direktorat Jenderal Bina Marga (DJB), kondisi jalan di kabupaten/kota di Indonesia jalan yang memiliki kondisi baik hanya 52% [15]. Di sisi lain, pemerintah Indonesia telah membuat peraturan yang mengharuskan pemanfaatan aspal Asbuton untuk menggantikan aspal minyak yang depositnya semakin menipis. Selain itu peningkatan jumlah mobil juga mengakibatkan peningkatan kuantitas limbah ban yang pada akhirnya dapat menimbulkan polusi yang berdampak buruk bagi kesehatan lingkungan dan perekonomian. Oleh karena itu untuk memberikan solusi bagi kedua permasalahan di atas, kualitas jalan harus ditingkatkan dengan pemanfaatan limbah ban bekas.

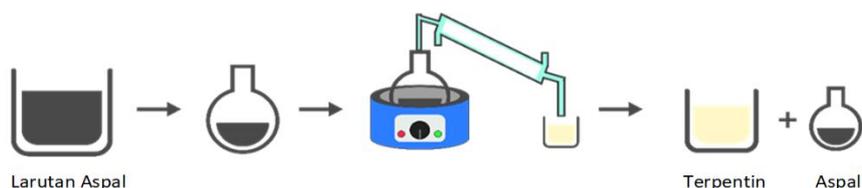
Peningkatan modifikasi aspal dapat dilakukan dengan menambahkan aditif seperti polimer, plastik dan arang [1] [2]. Kriteria bahan aditif untuk campuran aspal wajib harus menghasilkan stabilitas serta titik lembek yang besar, meningkatkan fleksibilitas, meningkatkan energi tahan/durabilitas serta meningkatkan energi ikat aspal terhadap agregat [11] [13]. Adapun beberapa penelitian mengenai pembuatan aspal dengan menggunakan zat aditif salah satunya adalah penambahan zat aditif plastik dalam agregat kasar limbah beton [11], kemudian ada juga yang menggunakan nanosilika sebagai campuran modifikasi aspal komposit [3]. Namun demikian, penelitian-penelitian yang sudah dilakukan masih menggunakan aspal minyak sebagai bahan utamanya. Pada penelitian ini digunakan aspal Asbuton sebagai bahan utama dengan menambahkan CR dan nanopartikel. Modifikasi aspal dengan penambahan CR dan nanopartikel memberikan efek perbaikan terhadap peningkatan kualitas aspal.

Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan mutu aspal Asbuton dengan menambahkan CR dan nanopartikel. Dalam penelitian ini juga dilakukan optimasi komposisi CR dan nanopartikel juga ukuran CR dalam pembuatan nanoaspal karet dengan menggunakan metode Central Composite Design (CCD) dan Response Surface Method (RSM). Response parameter uji yang diukur berupa Penetrasi, Daktilitas, Kelarutan dan Densitas. Optimasi terhadap campuran nanoaspal minyak telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Hasil studi dari mereka kebanyakan menyimpulkan bahwa untuk desain campuran nanoaspal dengan sifat kinerja tinggi dengan menggunakan RSM merupakan pendekatan yang sangat baik [3] [8] [16] [17].

Nanoaspal merupakan campuran dari aspal dengan partikel nano. Penambahan partikel nano ke dalam campuran aspal sudah terbukti dapat meningkatkan kualitas aspal [18]. Pengaruh positif yang langsung terlihat adalah terhadap viskositas aspal, selain itu ketahanan alur dan *fatigue resistance* juga mengalami peningkatan [6] [7] [14]. Nanopartikel merupakan material berukuran nano dengan sifat kimia dan fisika yang lebih unggul dari material yang berukuran besar (*bulk*). Selain dari bentuk ukuran, nanopartikel juga memiliki luas permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan partikel lainnya. Ini membuat nanopartikel bersifat lebih reaktif. Sifat reaktivitas nanopartikel dapat dinyatakan karena atom-atom dipermukaan nanopartikel bersentuhan secara langsung dengan material lainnya. Hukum fisika yang berlaku yaitu hukum kuantum, dimana hukum ini semakin dipertegas ketika ukuran partikel ke menuju orde nano [20]. Sifat fisika pada nanopartikel dapat berubah-ubah karena pengaruh dari fenomena fisika kuantum, dimana terjadinya keterbatasan ruang gerak elektron mengakibatkan partikel membawa muatan lainnya. Perubahan sifat yang terjadi seperti kekuatan mekanik, konduktivitas listrik, perubahan warna yang dipancarkan, transparansi, dan magnetisasi terjadi karena fenomena fisika kuantum. Perubahan rasio jumlah atom yang menempati permukaan

2.3 Proses Distilasi Pelarut Alami dari Larutan Aspal

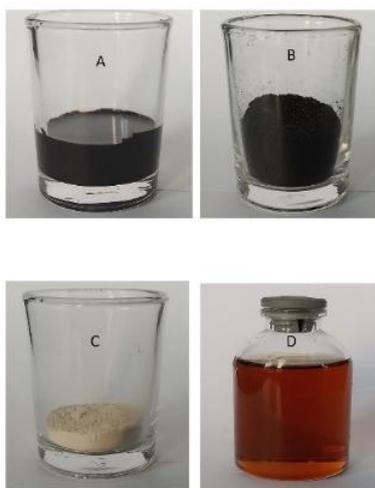
Setelah proses ekstraksi, proses distilasi dilakukan untuk memisahkan terpentin dari aspal hasil ekstraksi. Larutan aspal dan terpentin dimasukkan kedalam labu bundar, kemudian larutan tersebut didistilasi pada suhu titik didih terpentin yaitu sekitar 152°C, selama kurang lebih 30 menit. Distilasi dilakukan hingga terpentin tidak menetes lagi dan aspal dalam labu bundar sudah mengental. Skema proses distilasi untuk pemisahan aspal Asbuton dan terpentin disajikan pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Skema proses distilasi untuk pemisahan aspal Asbuton dan terpentin

2.4 Proses Pembuatan Nanoaspal

Proses terakhir yang dilakukan dalam pembuatan nanoaspal adalah pencampuran antara aspal Asbuton dengan CR dan nanopartikel yang telah dibuat. Bahan-bahan tersebut disajikan pada **Gambar 4**. Pada proses pembuatan nanoaspal, aspal Asbuton dicampurkan secara manual dengan CR yang sudah disaring berdasarkan ukurannya, dan nanopartikel (nanomineral Asbuton yang dihaluskan lagi dan distabilisasi dalam terpentin). Proses pengadukan dilakukan pada suhu 200°C selama kurang lebih 1 jam hingga tercampur rata (homogen).



Gambar 4. Bahan pembuatan nanoaspal karet: Asbuton (A), CR (B), nanomineral Asbuton (C), dan nanopartikel terstabilisasi dalam terpentin (D)

Setelah tercampur rata maka nanoaspal akan melewati tahap pengujian standar berdasarkan literatur dari Pd-2018-B [21] (**Tabel 1**). Dalam studi ini, pengujian yang dilakukan hanya untuk parameter uji Penetrasi, uji Kelarutan, uji Daktilitas, serta uji Densitas nanoaspal.

Tabel 1. Literatur Pengujian Aspal Asbuton Modifikasi

No.	Tipe Uji	Metode	Standar Aspal Polimer
1	Penetrasi, 25°C, 100 gr, 5 detik; 0,1 mm	SNI 06-2456-1991	50-80
2	Daktilitas, 25°C; cm	SNI 06-2432-1991	Min 50
3	Kelarutan	SNI 06-2438-1991	99
4	Densitas	SNI 06-2441-1991	Min 1,0

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sesuai dengan tujuan penelitian dalam studi ini yaitu untuk meningkatkan kualitas aspal Asbuton yang belum memenuhi standar dengan cara menambahkan CR dan NP Asbuton ke dalam campuran aspal kemudian mengoptimasi komposisi campuran tersebut dengan menggunakan CCD dan RSM. Dalam studi ini peningkatan kualitas aspal hanya difokuskan pada parameter Penetrasi, Daktilitas, Kelarutan, dan Densitas. Pada penelitian ini faktor yang digunakan ada tiga yaitu %NP, %CR dan ukuran CR dimana nilai levelnya (*Low – High*) disajikan dalam **Tabel 2**. Data-data hasil pengukuran terhadap Penetrasi, Daktilitas, Kelarutan, dan Densitas untuk setiap variasi run yang mengikuti pola susunan CCD disajikan pada **Tabel 3**. Data-data pada **Tabel 3** tersebut digunakan untuk tahap selanjutnya yaitu optimisasi dengan menggunakan RSM.

Tabel 2. Tabel Low-High untuk Desain Faktor

Level	Faktor		
	%NP	%CR	Uk CR
Low (-)	1	3	88
High (+)	3	7	125

Dalam penggunaan RSM untuk optimisasi, CCD adalah pendekatan desain yang efektif untuk evaluasi statistik hubungan antara variabel independen dan respon. Dalam penelitian ini, variabel independen dipelajari dalam tiga level berdasarkan desain CCD (*face-centered*). CCD *face-centered* adalah kasus CCD yang berbeda di mana α sama dengan 1,0; dalam desain CCD, α memaksa titik aksial untuk ditempatkan di permukaan kubik daripada di ruang bola seperti pada desain CCD yang membuat desain CCD *face-centered* menjadi CCD tiga tingkat. Dalam investigasi ini, perangkat lunak Minitab 2019 digunakan untuk analisis statistik dan eksperimen desain. **Tabel 3** menyajikan level dan range nilai aktual dari variabel independen diselidiki. Untuk masing-masing respon dianalisis, sebanyak 20 jumlah percobaan dilakukan secara acak dengan lima replikasi dari titik pusat untuk memungkinkan perkiraan kesalahan percobaan yang akurat. Model polinomial orde dua yang digunakan untuk prediksi kondisi optimal seperti yang ditunjukkan pada **Persamaan 1**.

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + e \quad \dots(1)$$

dengan: y adalah hasil prediksi; β_0 adalah nilai respons tetap titik pusat percobaan; β_j dan β_{ji} adalah efek urutan pertama dan kedua; β_{ij} adalah efek interaksi silang; x_i, x_j adalah faktor kode sedangkan e adalah kesalahan acak model [4].

3.1 Optimasi faktor terhadap respon dengan menggunakan CCD dan RSM

Setelah data-data CCD diolah dan di optimasi dengan RSM (**Gambar 5**) maka diperoleh faktor-faktor %NP, %CR, dan Ukuran CR yang menghasilkan nilai-nilai respon Penetrasi, Daktilitas, Kelarutan, dan Densitas yang teroptimasi. Dalam hal ini, proses optimisasi dimaksudkan untuk mencari nilai-nilai ketiga faktor diatas yang dapat menghasilkan nilai-nilai respon yang ditargetkan agar memenuhi standar seperti yang disajikan pada **Tabel 4**.

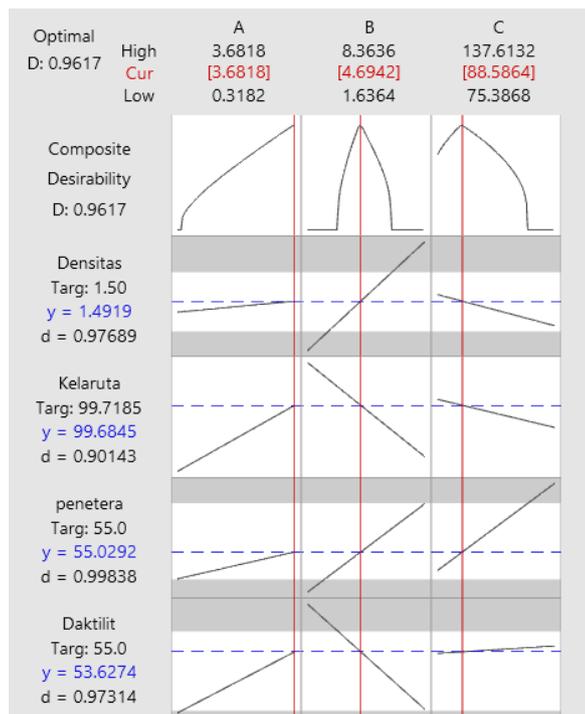
Untuk membuktikan bahwa proses optimisasi bekerja dengan baik, nilai *Desireability* (D) harus mencapai nilai 1. **Gambar 5** menunjukkan bahwa nilai D telah mencapai nilai mendekati 1 menunjukkan bahwa optimisasi bekerja dengan baik yaitu saat nilai faktor berada pada garis berwarna merah. Pada gambar tersebut juga terlihat bahwa garis kurva berwarna hitam yang menunjukkan nilai d untuk masing-masing respon, sedangkan garis putus-putus berwarna biru memperlihatkan nilai respon pada saat nilai d tertentu. Hasil optimisasi menunjukkan bahwa

nilai-nilai respon Densitas, Kelarutan, Penetrasi, dan Daktilitas telah mendekati target yang merupakan standar aspal yang diinginkan.

Tabel 3. Respon Penetrasi, Daktilitas, Kelarutan, dan Densitas dengan menggunakan variasi *Run* yang mengikuti metode CCD

Run	Faktor			Respon			
	NP	CR	uk CR	Penetrasi	Duktilitas	Kelarutan	Densitas
1	3,00	3,00	88,00	53,10	44,99	99,63	1,21
2	1,00	7,00	125,00	28,50	53,00	99,67	1,44
3	2,00	5,00	75,39	26,70	47,42	99,57	1,47
4	2,00	5,00	106,50	29,41	55,62	99,59	1,42
5	3,00	7,00	88,00	28,40	62,99	99,63	1,82
6	2,00	1,64	106,50	37,21	49,10	99,66	1,21
7	3,00	7,00	125,00	16,40	72,99	99,53	1,57
8	2,00	5,00	106,50	29,41	55,62	99,59	1,42
9	2,00	5,00	106,50	29,41	55,62	99,59	1,42
10	1,00	3,00	88,00	3,90	46,00	99,66	1,40
11	1,00	3,00	125,00	8,50	51,00	99,51	1,42
12	3,68	5,00	106,50	50,83	65,49	99,65	1,44
13	2,00	8,36	106,50	21,61	62,13	99,53	1,64
14	2,00	5,00	106,50	29,41	55,62	99,59	1,42
15	2,00	5,00	106,50	29,41	55,62	99,59	1,42
16	1,00	7,00	88,00	25,80	49,00	99,37	1,39
17	3,00	3,00	125,00	70,70	64,99	99,71	1,15
18	2,00	5,00	106,50	29,41	55,62	99,59	1,42
19	0,32	5,00	106,50	7,99	45,74	99,53	1,41
20	2,00	5,00	137,61	32,12	63,81	99,62	1,37

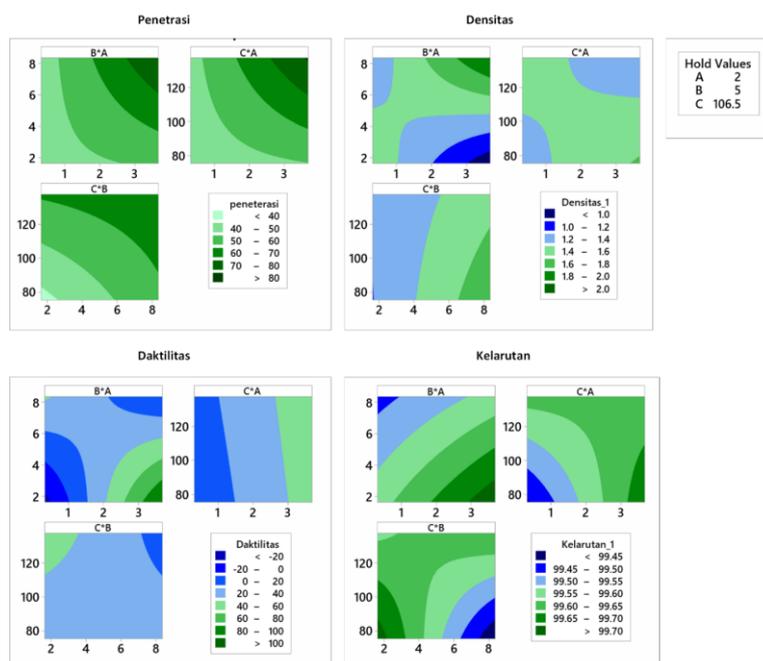
Hasil optimasi disajikan dalam **Tabel 4** dimana terlihat bahwa nilai-nilai respon telah memenuhi standar, khususnya Penetrasi dan Daktilitas. Walaupun nilai awal Kelarutan dan Densitas masih masuk standar namun masih berada di *range* paling bawah. Optimisasi menunjukkan bahwa nilai kedua respon tersebut dapat ditingkatkan sehingga mendapatkan nilai yang lebih baik. Validasi terhadap hasil optimisasi respon menunjukkan adanya perbedaan (*error*) yang relatif kecil yaitu untuk Penetrasi sebesar 2,3%; Kelarutan 0,02%; Daktilitas 4,01%; dan Densitas sebesar 5,06%. Hasil optimisasi dikonfirmasi dengan profil *contour plot* yang disajikan pada **Gambar 6** yang menunjukkan bahwa nilai-nilai respon Penetrasi, Daktilitas, Kelarutan, dan Densitas ada di daerah pada *range* yang diinginkan. Hasil optimisasi ini juga dikonfirmasi dengan **Gambar 7** yang menunjukkan bahwa nilai-nilai respon Penetrasi, Daktilitas, Kelarutan, dan Densitas ada di daerah pada titik di daerah *surface plot* yang diinginkan.



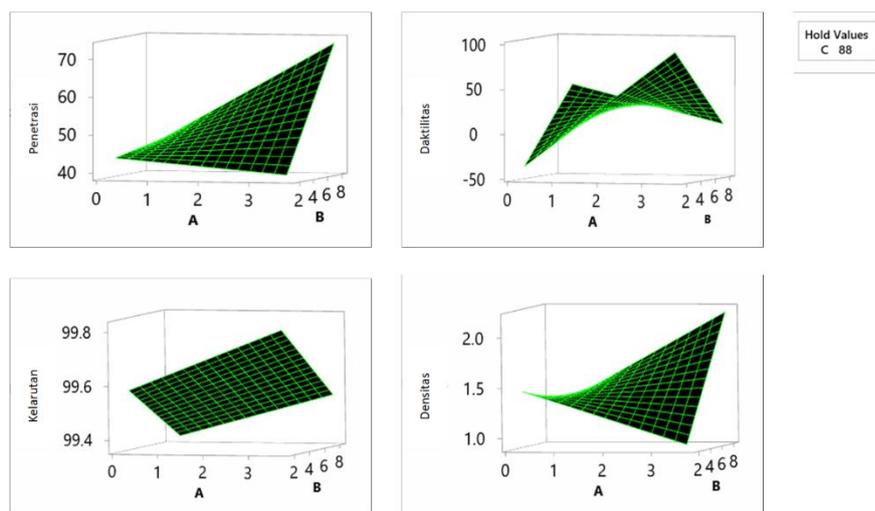
Gambar 5. Hasil optimisasi faktor %NP (A), %CR(B), dan ukuran CR (C) terhadap respon densitas, kelarutan, penetrasi, dan daktilitas dengan menggunakan RSM

Tabel 4. Hasil optimisasi kualitas aspal Asbuton setelah ditambah %NP dan %CR

Faktor	Respon								
	Penetrasi		Kelarutan		Daktilitas		Densitas		
Desain	Optimized	Awal	Optimized	Awal	Optimized	Awal	Optimized	Awal	Optimized
A: %NP	3,68								
B: %CR	4,69	46,33	55,02	99,02%	99,68%	1,8 cm	53,62 cm	1,02	1,49
C: Uk CR	88,5								
Standar		50-80		Min. 99,00%		Min. 50 cm		Min. 1,00	



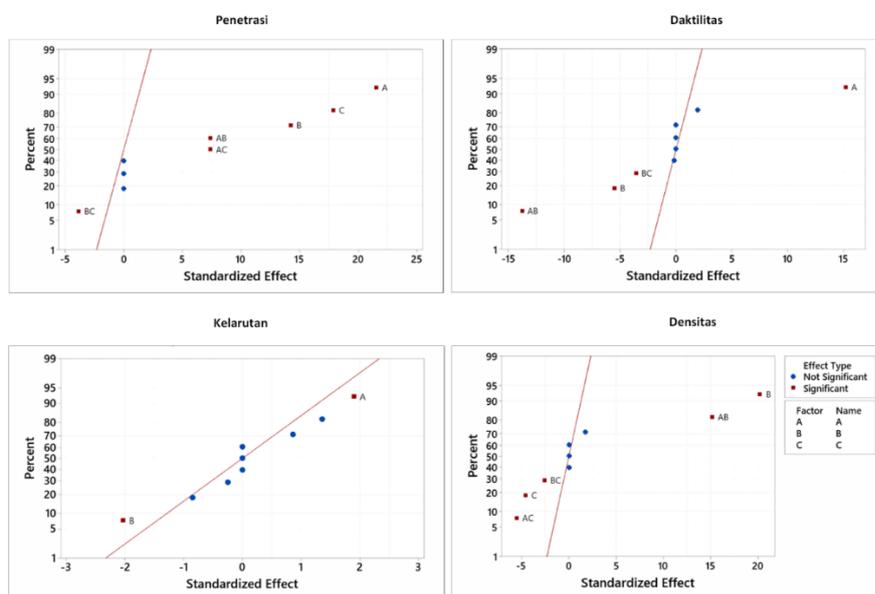
Gambar 6. Gambar contour plots dari respon penetrasi, Daktilitas, Kelarutan, dan Densitas pada nilai 2%NP (A), 5%CR (B), dan ukuran CR 106,5 nm (C)



Gambar 7. Surface plots dari respon daktilitas, penetrasi, kelarutan, dan densitas nanoaspal karet dengan parameter ukuran CR (C) yang dijaga tetap 88 nm

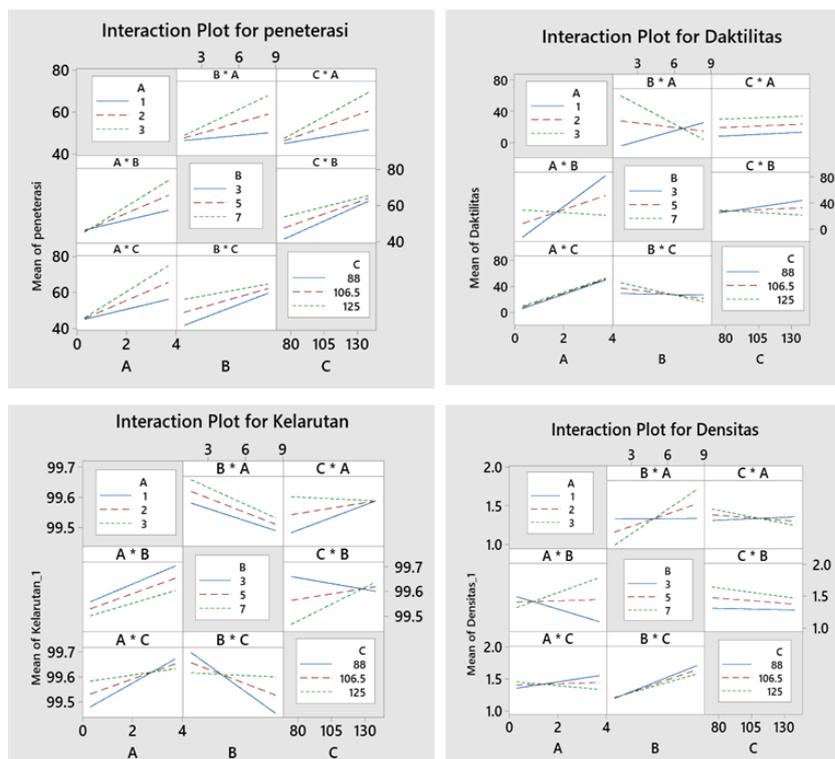
3.2 Evaluasi terhadap Faktor-faktor dan Interaksinya terhadap Respon

Untuk memahami lebih lanjut faktor-faktor yang mempengaruhi nilai Penetrasi, Daktilitas, Kelarutan, dan Densitas, perlu dilihat standardized effect dari keempat respon tersebut. Pada **Gambar 8** terlihat bahwa untuk respon uji Penetrasi dan Densitas dipengaruhi secara signifikan oleh faktor %NP, %CR, dan ukuran CR, sedangkan untuk Daktilitas dan Kelarutan dipengaruhi oleh faktor %CR dan ukuran CR. Hasil ini juga sesuai dengan apa yang diperoleh dan dipublikasi oleh beberapa peneliti [5] [9] [10] [12] [19].



Gambar 8. Standardized effect dari respon penetrasi, daktilitas, kelarutan, dan densitas

Pada **Gambar 9**, terlihat bagaimana antar faktor berinteraksi pada setiap parameter uji. Untuk Penetrasi tidak ada interaksi antar faktor yang signifikan. Untuk Daktilitas dan Densitas, %NP dan %CR berinteraksi secara signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa efek %NP terhadap Daktilitas dan Densitas sangat dipengaruhi oleh %CR. Sedangkan untuk Kelarutan, %CR dan ukuran CR berinteraksi secara signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa efek %CR terhadap Kelarutan sangat dipengaruhi oleh besarnya ukuran CR.



Gambar 9. Full matrix intraction plots antar faktor untuk respon Penetrasi, Daktilitas, Kelarutan, dan Densitas

4. KESIMPULAN

Pembuatan nanoaspal karet dilakukan melalui 3 tahap yaitu tahap persiapan bahan baku, ekstraksi dan distilasi aspal dari batuan Asbuton, dan tahap pencampuran CR dan nanopartikel ke dalam aspal Asbuton. Kemudian campuran aspal Asbuton nanopartikel, nanomineral dan CR tersebut dihomogenkan secara manual untuk menghasilkan nanoaspal karet. Nanoaspal karet tersebut kemudian diuji kualitasnya berdasarkan standard Penetrasi, Daktilitas, Kelarutan, dan Densitas. Setelah hasil uji didapatkan, komposisi nanoaspal karet tersebut dioptimasi menggunakan CCD dan RSM untuk mendapatkan komposisi nanoaspal karet yang memenuhi standard. Hasil optimisasi pembuatan nanoaspal karet menunjukkan bahwa dengan komposisi 3,682%NP, 4,694%CR, dan pada ukuran CR sebesar 88,5 nm ke empat standard tersebut terpenuhi. Validasi terhadap hasil optimisasi respon parameter uji menunjukkan adanya perbedaan (error) yang relatif kecil yaitu untuk Penetrasi sebesar 2,3%, Kelarutan 0,02%, Daktilitas 4,01%, dan Densitas sebesar 5,06%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Afriyanto, B., Indriyati, E. W., and Hardini, P. (2019a): ANALISIS VARIASI KADAR LIMBAH PLASTIK LOW DENSITY POLYETHYLENE (LDPE) DALAM ASPAL MODIFIKASI TERHADAP KARAKTERISTIK DASAR ASPAL, *Prosiding Forum Studi Transportasi Antar Perguruan Tinggi*, retrieved January 13, 2023 from internet: <https://ojs.fstpt.info/index.php/ProsFSTPT/article/view/399>.
- [2] Afriyanto, B., Indriyati, E. W., and Hardini, P. (2019b): PENGARUH LIMBAH PLASTIK LOW DENSITY POLYETHYLENE TERHADAP KARAKTERISTIK DASAR ASPAL, *Jurnal Transportasi*, **19**(1), 59–66. <https://doi.org/10.26593/jtrans.v19i1.3263.59-66>
- [3] Bala, N., Napiah, M., and Kamaruddin, I. (2020a): Nanosilica composite asphalt mixtures performance-based design and optimisation using response surface methodology,

- International Journal of Pavement Engineering*, **21**(1), 29–40. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1435881>
- [4] Bala, N., Napiyah, M., and Kamaruddin, I. (2020b): Nanosilica composite asphalt mixtures performance-based design and optimisation using response surface methodology, *International Journal of Pavement Engineering*, **21**(1), 29–40. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1435881>
- [5] Bian, G., Qi, L., Liu, J., Wang, X., Xu, X., and Wang, Z. (2022): Effects of tetraethyl orthosilicate on rheological behaviors of crumb rubber modified asphalt, *Construction and Building Materials*, **325**, 126807. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126807>
- [6] Enieb, M., and Diab, A. (2017): Characteristics of asphalt binder and mixture containing nanosilica, *International Journal of Pavement Research and Technology*, **10**(2), 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.11.009>
- [7] Han, L., Zheng, M., Li, J., Li, Y., Zhu, Y., and Ma, Q. (2017): Effect of nano silica and pretreated rubber on the properties of terminal blend crumb rubber modified asphalt, *Construction and Building Materials*, **157**, 277–291. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.187>
- [8] Khairuddin, F. H., Alamawi, M. Y., Yusoff, N. I. Md., Badri, K. H., Ceylan, H., and Tawil, S. N. M. (2019): Physicochemical and thermal analyses of polyurethane modified bitumen incorporated with Cecabase and Rediset: Optimization using response surface methodology, *Fuel*, **254**, 115662. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115662>
- [9] Li, B., Zhou, J., Zhang, Z., Yang, X., and Wu, Y. (2019): Effect of Short-Term Aging on Asphalt Modified Using Microwave Activation Crumb Rubber, *Materials*, **12**(7), 1039. <https://doi.org/10.3390/ma12071039>
- [10] Li, H., Cui, C., Temitope, A. A., Feng, Z., Zhao, G., and Guo, P. (2022): Effect of SBS and crumb rubber on asphalt modification: A review of the properties and practical application, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, **9**(5), 836–863. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.03.002>
- [11] Lopang, I., Tedjasukmana, N., P, A. L. Y., Jerry, J., and Makmur, A. (2018): PENGARUH PENGGUNAAN PLASTIK HDPE SEBAGAI BAHAN ADITIF TERHADAP ASPAL DENGAN AGREGAT KASAR HASIL LIMBAH BETON, *Jurnal Teknik Dan Ilmu Komputer*, retrieved January 13, 2023 from internet: <http://ejournal.ukrida.ac.id/ojs/index.php/JTIK/article/view/1598>.
- [12] Pang, L., Liu, K., Wu, S., Lei, M., and Chen, Z. (2014): Effect of LDHs on the aging resistance of crumb rubber modified asphalt, *Construction and Building Materials*, **67**, 239–243. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.040>
- [13] Said, M. S. (2019): "ANALISIS KARAKTERISTIK CAMPURAN ASPAL PANAS (AC-WC) DENGAN MENGGUNAKAN ASPAL PLASTIK DAN PENDAMAN BERULANG," Thesis, UNIVERSITAS BOSOWA, retrieved January 13, 2023 from internet: <http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/1303>.
- [14] Shafabakhsh, Gh., Mirabdolazimi, S. M., and Sadeghnejad, M. (2014): Evaluation the effect of nano-TiO₂ on the rutting and fatigue behavior of asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, **54**, 566–571. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.064>
- [15] Siswanto, H., Sulistio, H., Djakfar, L., and Wicaksono, A. (2016): SISTEM MANAJEMEN JALAN DAN KONDISI KERUSAKAN JALAN DI INDONESIA: SEBUAH KAJIAN PUSTAKA.
- [16] Tan, Y., Guo, M., Cao, L., and Zhang, L. (2013): Performance optimization of composite modified asphalt sealant based on rheological behavior, *Construction and Building Materials*, **47**, 799–805. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.015>
- [17] Usman, A., Sutanto, M. H., Napiyah, M., Zoorob, S. E., Abdulrahman, S., and Saeed, S. M. (2021): Irradiated polyethylene terephthalate fiber and binder contents optimization

- for fiber-reinforced asphalt mix using response surface methodology, *Ain Shams Engineering Journal*, **12**(1), 271–282. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.06.011>
- [18] Yang, J., and Tighe, S. (2013): A Review of Advances of Nanotechnology in Asphalt Mixtures, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, **96**(Supplement C), 1269–1276. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.144>
- [19] Zhang, H., Zhang, Y., Chen, J., Liu, W., and Wang, W. (2022): Effect of Desulfurization Process Variables on the Properties of Crumb Rubber Modified Asphalt, *Polymers*, **14**(7), 1365. <https://doi.org/10.3390/polym14071365>
- [20] Abdullah, M., Yudistira, V., Nirmin & Khairurrijal, 2008. Review: Sintesis Nanomaterial, *Jurnal Nanosains & Nanoteknologi*, **1**(2), 33-57.
- [21] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2011): *Pd 05-2018-B tentang Perancangan dan pelaksanaan campuran beraspal panas bergradasi menerus (laston) menggunakan slag*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.