

EVALUASI NILAI INDEKS PENETRASI BITUMEN DAUR ULANG

Novita Pradani

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Tadulako
Jl. Soekarno - Hatta Km 9 Sulawesi Tengah,
Tondo, Kec. Mantikulore,
Kota Palu, Sulawesi Tengah 94148

Rita Irmawaty

Departemen Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin
Jalan Poros Malino Km. 6, Bontomarannu,
Kab. Gowa, Sulawesi Selatan, 92171

Muhammad Wihardi Tjaronge

Departemen Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin
Jalan Poros Malino Km. 6, Bontomarannu,
Kab. Gowa, Sulawesi Selatan, 92171

Irwan Ridwan Rahim¹

Departemen Teknik Lingkungan,
Universitas Hasanuddin
Jalan Poros Malino Km. 6, Bontomarannu,
Kab. Gowa, Sulawesi Selatan, 92171

Abstract

The penetration index (PI) of bitumen is one of the parameters to measure the temperature sensitivity of bitumen. The bitumen quality will decrease if the bitumen's resistance to temperature changes decreases. This evaluation was based on previous research that used recycled bitumen from the extraction process. Bitumen modification was done by adding different percentages of recycled bitumen to fresh bitumen. PI values were determined using the Pfeiffer and Van Doormall equation, which shows the relationship between penetration and bitumen softening point. Based on the analysis, it was found that adding recycled bitumen up to 30% can increase the PI of bitumen, but the PI of bitumen will decrease with the addition of RAP. Adding recycled bitumen can reduce the bitumen's resistance to temperature, so a rejuvenating agent is needed to restore the physical properties of bitumen containing a high percentage of recycled bitumen.

Keywords: penetration index, bitumen, reclaimed asphalt pavement, recycling

Abstrak

Indeks penetrasi (PI) bitumen merupakan salah satu parameter untuk mengukur sensitivitas bitumen terhadap temperatur. Sensitivitas bitumen terhadap temperatur dipengaruhi oleh perubahan viskoelastis bitumen. Kualitas bitumen akan menurun bila ketahanan bitumen terhadap perubahan temperatur juga menurun. Evaluasi ini didasarkan pada penelitian sebelumnya yang menggunakan bitumen daur ulang dari proses ekstraksi. Modifikasi bitumen dilakukan dengan menambahkan bitumen daur ulang dengan presentase yang berbeda pada *fresh* bitumen. Nilai PI ditentukan menggunakan persamaan *Pfeiffer* dan *Van Doormall*, yang menunjukkan hubungan antara nilai penetrasi dan nilai titik lembek bitumen. Berdasarkan hasil analisis diperoleh bahwa penambahan bitumen daur ulang hingga 30% dapat meningkatkan nilai PI bitumen, namun PI bitumen akan menurun seiring penambahan RAP. Berarti bahwa penambahan bitumen daur ulang dapat menurunkan ketahanan bitumen terhadap temperatur sehingga bahan peremaja diperlukan untuk mengembalikan sifat fisik bitumen yang mengandung bitumen daur ulang dengan persentase yang tinggi.

Kata Kunci: indeks penetrasi, bitumen, *reclaimed asphalt pavement*, daur ulang

PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir, daur ulang limbah yang berasal dari konstruksi dan produk industri telah menjadi masalah yang sangat penting untuk mengurangi penggunaan bahan baku yang digunakan untuk pembangunan jalan (Affandi dan Kusnianti, 2013). Karena harga bitumen terus mengalami peningkatan, Indonesia hanya mampu memproduksi 900

¹ Corresponding author: irwanrr@eng.unhas.ac.id

ribu ton bitumen per tahun, dengan Pertamina hanya mampu memproduksi 600 ribu ton dan Sarana Karya 300 ribu ton. Yang tersisa diimpor untuk memenuhi kekurangannya (Illyin, 2012). Dependensi bahan ini menjadi salah satu alasan dalam penggunaan bahan perkerasan daur ulang dimana *Reclaimed Pavement Asphalt* (RAP) merupakan bahan preferensi yang bermanfaat untuk material penyusun perkerasan karena mampu memangkas pemakaian *fresh agregat* dan bahan pengikat *fresh bitumen* yang dibutuhkan dalam campuran perkerasan lentur (Copeland, 2011). Selain itu, RAP juga dapat memperbaiki dan/atau menggantikan lapisan perkerasan jalan yang mengalami kerusakan struktural dan deformasi permanen (Valdes dkk., 2011). Namun demikian, beberapa penelitian telah menemukan kekurangan dalam pemanfaatan RAP, terutama dengan persentase yang besar dalam campuran. Kelelahan dan *thermal cracking* merupakan kerusakan yang umum terjadi pada campuran yang mengandung RAP dalam jumlah besar (Zaumanis dkk., 2013; Zaumanis dkk., 2014). Oleh karena itu, metode pengujian campuran perkerasan lentur yang mengandung RAP harus diperhatikan untuk mendapatkan perkerasan RAP yang tahan lama (Zaumanis dkk., 2013). Salah satu indikator yang baik untuk mengetahui pengerasan oksidatif dan keretakan adalah Indeks Penetrasi (PI) (Zaumanis dkk., 2013; Burke dkk., 2011; Hesp dkk., 2010).

Meskipun teknologi pemanfaatan RAP telah memiliki banyak kegunaan, namun di Indonesia teknologi ini masih memerlukan penelitian lebih lanjut. Berkaitan dengan hal tersebut, penelitian ini yang menjadi bagian dari evaluasi campuran perkerasan lentur menggunakan RAP, diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai sensitivitas campuran perkerasan lentur terhadap temperatur yang diindikasikan dengan nilai Indeks Penetrasi (PI).

LANDASAN TEORI

Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

Perkerasan daur ulang merupakan penggunaan ulang material perkerasan lama (agregat dan bitumen) untuk digunakan sebagai perkerasan jalan baru dengan penambahan agregat baru, bitumen baru dan/atau *rejuvenating agent*. Untuk memperoleh hasil yang akseptabel, bitumen dan agregat lama perlu pembaruan baik dari segi sifat fisik maupun susunan ukuran butirannya (Pradani dkk., 2011). Secara substansial, bitumen RAP telah mengalami penuaan selama produksi, menerima beban kendaraan, dan dampak lingkungan ketika membentuk lapis struktur perkerasan. Hal ini disebabkan karena bitumen telah mengalami oksidasi dan kelelahan, mengakibatkan bitumen pada RAP cenderung memadat dan menjadi keras (O'Sullivan, 2011).

Material RAP lazimnya digabungkan dengan berbagai kadar agregat baru dan bitumen untuk membentuk campuran perkerasan baru, RAP dapat dimanfaatkan pada lapis perkerasan yang memiliki mutu lebih rendah yaitu lapisan pengikat untuk meningkatkan kemampuan menerima beban lalu lintas (Al-Qadi dkk., 2012). Pemanfaatan RAP dalam campuran panas sebesar 10-35% untuk satuan produksi tipe takaran, sedangkan untuk satuan produksi tipe drum volume praktisnya berkisar 10-50% dengan kisaran pemakaian dalam campuran adalah 40% (Asphalt Institute, 1993).

Indeks Penetrasi (PI) Bitumen

Pada dasarnya, semua jenis bitumen adalah termoplastik, yang dapat berubah sifat tergantung pada suhu, yang ketika temperatur tinggi, cenderung melunak dan cenderung memadat ketika temperatur menurun. Kepekaan terhadap suhu dapat direpresentasikan dengan nilai Indeks Penetrasi (PI). Nilai indeks penetrasi bitumen (PI) merupakan fungsi dari nilai penetrasi dan titik leleh bitumen. Nilai penetrasi bitumen menunjukkan tingkat kekerasan bitumen yang mempengaruhi kinerja campuran yang dihasilkan (Tjaronge dkk., 2019). Kisaran nilai penetrasi untuk bitumen pen 60/70 adalah 61 hingga 67 dmm (Widyatmoko, 2008; Pradani, 2011). Bitumen hasil ekstraksi memiliki nilai penetrasi yang lebih rendah dibandingkan dengan bitumen baru. Bitumen RAP dan bitumen alam Buton memiliki nilai penetrasi yang sangat rendah, hal ini mengindikasikan bahwa tingkat kekerasan bitumen tersebut cukup tinggi (Tjaronge dkk., 2019; Bethary dan Subagio, 2020) sehingga apabila digunakan pada perkerasan jalan berpotensi menghasilkan perkerasan yang lebih kaku bahkan cenderung getas dan memicu terjadinya keretakan. Nilai titik leleh bitumen Pen 60/70 yang sering digunakan untuk konstruksi jalan di Indonesia berkisar antara 49-51°C (Tjaronge dkk., 2019; Widyatmoko, 2008; Pradani, 2011).

Terdapat beberapa persamaan untuk menentukan nilai *Penetration Index* (PI), seperti yang ditunjukkan pada persamaan (1), (2) dan (3). Persamaan tersebut didasarkan pada hubungan antara nilai penetrasi dan nilai titik meleleh bitumen. Nilai kemiringan A merupakan fungsi dari nilai PI, oleh karena itu nilai kemiringan A dapat digunakan dengan tujuan yang sama dengan PI (Shell Bitumen, 2003). Semakin landai kemiringan nilai A, maka semakin rendah sensitivitas bitumen terhadap transformasi suhu, yang berarti semakin baik ketahanan bitumen terhadap perubahan temperatur. Begitu juga sebaliknya, semakin curam grafik PI, maka semakin sensitif bitumen terhadap transformasi suhu yang terjadi.

Dalam menentukan nilai *Penetration Index* (PI) bitumen tersebut, digunakan persamaan di bawah ini (Pfeiffer dan Van Doormall) (Zaumanis dkk., 2013):

$$PI = \frac{20(1 - 25A)}{1 + 50A} \quad (1)$$

Nilai *Penetration Index* (PI) merupakan fungsi dari nilai A yang dapat dimanfaatkan untuk orientasi yang sama, yang ditentukan dari nilai penetrasi pada 2 (dua) suhu yang berbeda, sehingga diperoleh persamaan:

$$A = \frac{\log .pen.T_1 - \log .pen.T_2}{T_1 - T_2} \quad (2)$$

Pfeiffer dan Van Doormall mendapati bahwa sebagian besar bitumen memiliki nilai penetrasi 800 dmm pada temperatur titik leleh, dengan demikian persamaan A menjadi:

$$A = \frac{\log .pen.T_1 - \log .800}{T_1 - SP} \quad (3)$$

Dimana:

- PI = Indeks Penetrasi Bitumen
- T₁ = Nilai Penetrasi Bitumen
- SP = Titik Lembek Bitumen

Tabel 2. Hubungan PI dengan kepekaan aspal terhadap temperatur

No.	Nilai PI	Kepekaan terhadap perubahan temperatur
1	> 2	Rendah
2	+2 s/d -2	Normal
3	< -2	Tinggi

Sumber : Bina Marga PU, 2008 (Affandi, 2008)

Sedangkan berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga, divisi 6 tahun 2010, nilai Penetrasi Indeks (PI) untuk bitumen PEN 60/70 adalah minimal -1,0. Persamaan (1), (2) dan (3) juga digunakan sebagai acuan dalam penentuan nilai PI pada Spesifikasi Bina Marga.

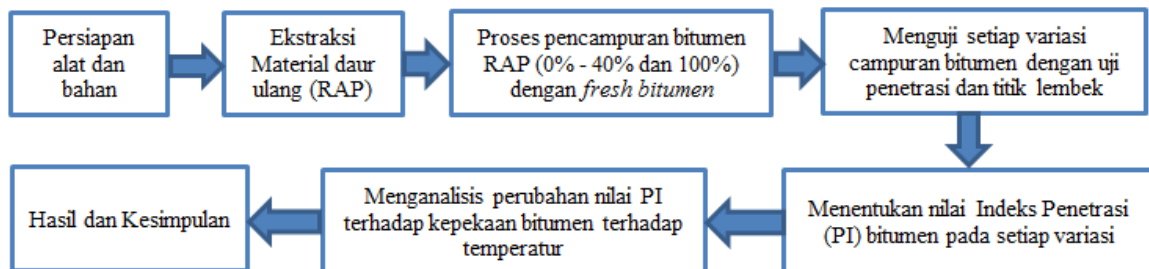
METODOLOGI

Material

Material daur ulang yang digunakan pada penelitian ini adalah material yang diperoleh dari kupasan perkerasan jalan pasca bencana dari Balaroa, Kota Palu, Sulawesi Tengah. *Fresh Bitumen* dengan PEN 60/70 yang digunakan pada penelitian ini berasal dari Pertamina.

Tahapan Penelitian

Secara garis besar, tahapan penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan penelitian



(a)



(b)

Gambar 2. (a) Pengujian ekstraksi material RAP, (b) Pengujian pemulihan bitumen RAP

Penelitian ini diawali dengan uji ekstraksi terhadap material RAP, menggunakan alat Reflux yang bertujuan untuk memisahkan agregat dan bitumen dari bahan daur ulang (RAP) berdasarkan standar ASTM D2172/D2172M – 11 (Gambar 2a). Pengujian ini menggunakan cairan *Trichlorethylene* (TCE) sebagai media pelarut. Kemudian untuk memisahkan antara bitumen dan cairan TCE, digunakan *Rotary Evaporator* yang metode pengujiannya sepenuhnya mengacu pada metode ASTM D5404/D5404M-12 (Gambar 2b). Selanjutnya dilakukan pengujian Penetrasi dan Titik Lembek terhadap bitumen RAP, *Fresh Bitumen* PEN 60/70 dan kombinasi keduanya. Penentuan nilai indeks penetrasi, dilakukan dengan pendekatan terhadap hasil uji Penetrasi dan Uji Titik Lembek berdasarkan persamaan (3).

Metode Analisis

Analisis terhadap hasil penelitian dilakukan dengan membandingkan hasil yang diperoleh terhadap nilai spesifikasi terhadap bitumen dengan PEN 60/70 (Spesifikasi Bina Marga tahun 2018, revisi 2), serta melakukan evaluasi terhadap hasil penelitian lain yang telah dilakukan sebelumnya.

ANALISIS DAN DISKUSI

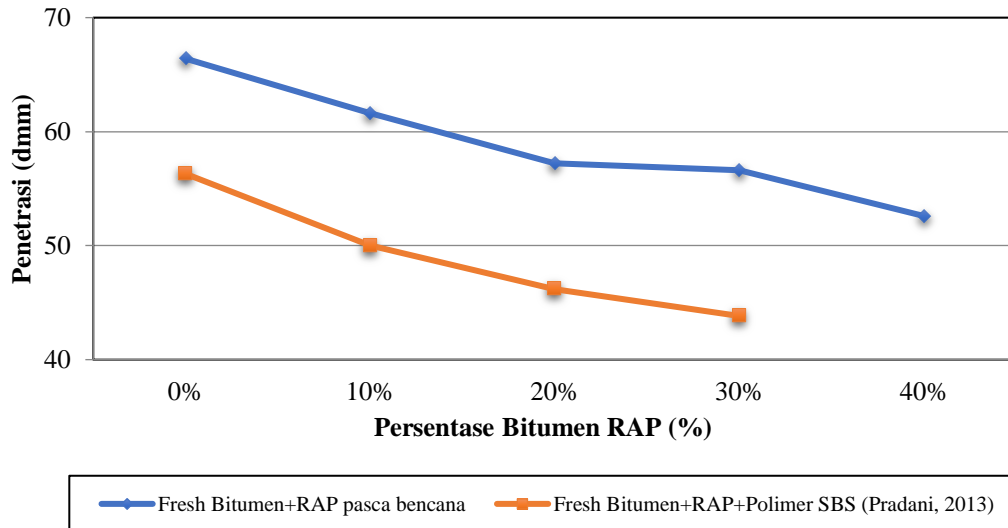
Sifat Bitumen

Bitumen RAP mengalami penuaan secara signifikan pada saat produksi, menerima beban kendaraan, dan dampak lingkungan ketika membentuk lapis struktur perkerasan. Hal ini menyebabkan menurunnya sifat adhesi yang berdampak kepada ikatan yang terjadi antara agregat dengan bitumen cenderung berkurang, sifat adhesi bitumen ini dapat dipulihkan kembali dengan cara memodifikasi bitumen RAP tersebut dengan cara mencampurkan dengan bitumen baru dan bahan peremajaan. Bitumen RAP diekstraksi dan kemudian di-*recovery* untuk mendapatkan bitumen RAP murni (Shell Bitumen, 2003).

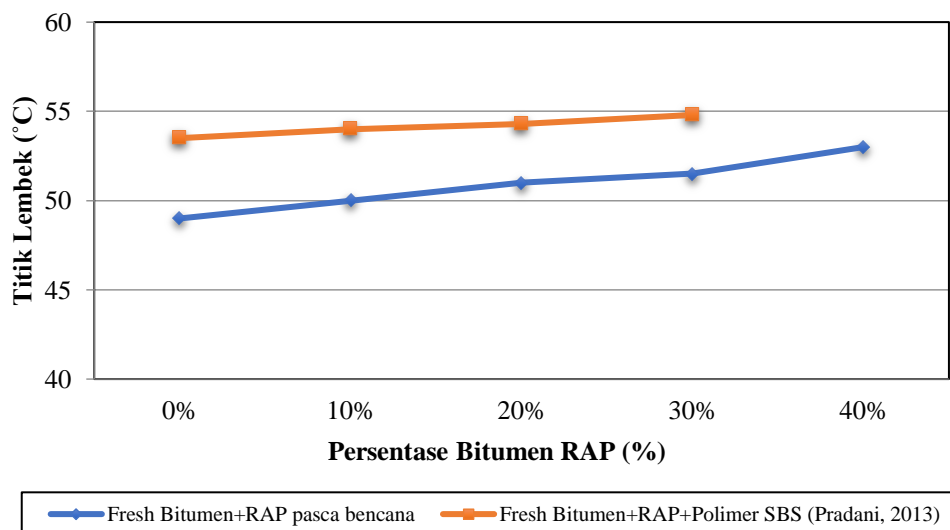
Berdasarkan pengujian sebelumnya terhadap sifat fisik bitumen hasil ekstraksi, menunjukkan bahwa nilai penetrasi bitumen hasil ekstraksi mengalami penurunan yang cukup besar dibandingkan dengan batas bawah bitumen baru untuk Pen 60/70 sebesar 60 dan Pen 40/50 sebesar 40 (Bethary dan Subagio, 2020; Pradani, 2013; Noferini dkk., 2017). Nilai ini tidak sesuai standar spesifikasi yang disyaratkan, oleh karena itu perlu dilakukan penambahan bitumen baru agar sesuai dengan standar spesifikasi yang dipersyaratkan. Uji fisik bitumen yang diamati terhadap bitumen RAP dalam kaitannya dengan nilai penetrasi bitumen dan titik lembek, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3 dan Gambar 4.

Dari Gambar 3 dapat dilihat bahwa campuran yang mengandung bitumen RAP memiliki nilai penetrasi yang lebih rendah dibandingkan dengan bitumen konvensional. Atau dengan kata lain, penambahan material RAP dapat memberikan kecenderungan bitumen menjadi lebih keras. Hal ini terjadi karena bitumen RAP telah mengalami proses penuaan selama masa pelayanannya, sehingga kandungan maltana (fraksi ringan) pada bitumen RAP telah teroksidasi dan menyisakan bagian bitumen yang cukup keras. Berdampak kepada nilai penetrasi yang diperoleh akan cenderung menurun atau kekerasan bitumen akan semakin besar seiring dengan bertambahnya kadar bitumen RAP. Dengan adanya penambahan

polimer SBS pada campuran, nilai penetrasi mengalami penurunan. Fenomena ini dikarenakan bitumen modifikasi polimer elastomer memiliki nilai penetrasi cenderung rendah, sehingga pencampuran dengan bitumen RAP yang telah memadat akibat proses penuaan selama masa pelayanannya akan menghasilkan nilai penetrasi yang rendah (Pradani, 2013).



Gambar 3. Hubungan nilai penetrasi terhadap persentase bitumen RAP



Gambar 4. Hubungan nilai titik lemek terhadap persentase bitumen RAP

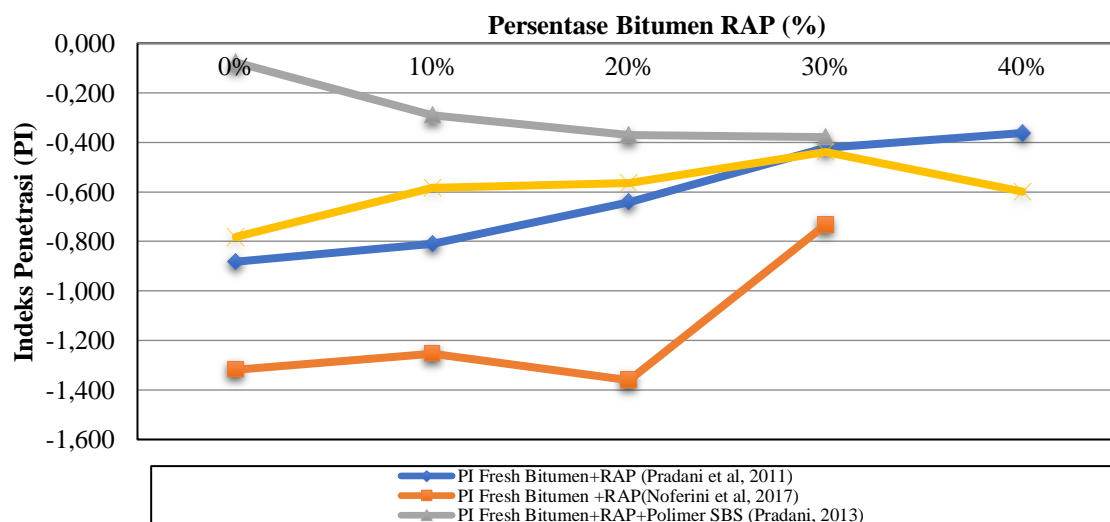
Nilai titik lemek pada Gambar 4 menunjukkan peningkatan seiring dengan bertambahnya persentase bitumen RAP karena tingkat kekerasan bitumen yang berbanding lurus dengan bertambahnya persentase bahan RAP. Peningkatan titik lemek ini diharapkan dapat mengantisipasi kerusakan yang diakibatkan oleh pembengkakan dan deformasi permanen yang rentan terjadi pada suhu yang cukup tinggi.

Berdasarkan Gambar 3 dan 4, dapat dilihat perbandingan antara bitumen baru yang ditambahkan bitumen RAP dengan campuran bitumen baru yang ditambahkan bitumen RAP dan dimodifikasi menggunakan polimer elastomer SBS. Terlihat bahwa penambahan bahan RAP cenderung menurunkan nilai penetrasi dan meningkatkan nilai titik lembek baik pada campuran yang telah dimodifikasi polimer SBS maupun pada campuran tanpa modifikasi (Pradani dkk., 2011; Pradani, 2013)

Analisis Sensitivitas Bitumen terhadap Temperatur

Indeks Penetrasi (PI) adalah indikator kerentanan suhu bitumen. Indeks Penetrasi (PI) dihitung dari data titik penetrasi dan titik lembek. Bitumen baru untuk perkerasan jalan umumnya memiliki PI pada kisaran 1.5 hingga +0.7, biasanya mendekati 0. Semakin positif PI bitumen, semakin tidak rentan terhadap suhu. Juga diketahui bahwa kerentanan suhu bitumen berkurang seiring dengan mengerasnya bitumen (contoh: bitumen RAP). Sehingga nilai PI yang tinggi mengindikasikan tingkat pengerasan bitumen yang cukup tinggi (Widyatmoko, 2008).

Beberapa penelitian sebelumnya telah dilakukan untuk mengetahui nilai PI dari bitumen, khususnya bitumen yang mengandung bahan RAP (Zaumanis dkk., 2013; Zaumanis dkk., 2014; Widyatmoko, 2008; Bethary dan Subagio, 2020; Pradani, 2013; Noferini dkk., 2017). Campuran bitumen baru yang mengandung bitumen RAP menghasilkan nilai PI yang lebih tinggi seiring dengan penambahan persentase bitumen RAP (Pradani, 2013; Noferini dkk., 2017). Fenomena ini sesuai dengan hasil yang didapatkan untuk RAP pasca bencana, terlihat bahwa penambahan bitumen RAP cenderung menghasilkan PI yang lebih tinggi dibandingkan bitumen tanpa RAP. Gambar 5 di bawah ini merangkum hasil penelitian sebelumnya yang meneliti hubungan antara persentase bitumen RAP terhadap nilai PI dibandingkan terhadap hasil penelitian yang diperoleh yaitu kombinasi antara bitumen RAP pasca bencana + *fresh* bitumen.



Gambar 5. Korelasi indeks penetrasi dan persentase bitumen RAP berdasarkan hasil penelitian terhadap hasil penelitian sebelumnya

Berdasarkan Gambar 5, terlihat bahwa kenaikan bitumen RAP berpotensi meningkatkan nilai PI hingga persentase 30%. Nilai PI yang semakin besar mengindikasikan ketahanan bitumen terhadap transformasi suhu. Dengan harapan ketika digunakan sebagai bahan perkerasan, bitumen modifikasi ini tidak akan getas pada suhu rendah dan tidak terlalu plastis pada suhu tinggi. Pada Gambar 4 juga dapat dilihat bahwa bitumen yang dimodifikasi dengan polimer cenderung memiliki nilai PI yang cukup kecil sehingga lebih tahan terhadap perubahan temperatur.

Nilai PI yang semakin meningkat seiring dengan penambahan persentase bitumen RAP juga perlu mengacu pada spesifikasi yang disyaratkan. Dalam hal ini di Indonesia, spesifikasi yang disyaratkan adalah yang dikeluarkan oleh Departemen Pekerjaan Umum, dimana syarat minimum nilai PI adalah -1,0 (Kementerian PU, 2010). Agar bitumen, khususnya bitumen RAP dapat tahan terhadap perubahan temperatur, maka diperlukan suatu *modifier* berupa bahan peremaja agar setiap sifat fisik bitumen yang mengandung bitumen RAP dapat memenuhi spesifikasi yang telah ditetapkan dan diharapkan dapat memperpanjang usia dan masa layan perkerasan jalan.

KESIMPULAN

Beberapa hal yang dapat disimpulkan dari hasil analisis terhadap nilai penetrasi bitumen dengan penambahan bitumen daur ulang adalah sebagai berikut:

1. Pemanfaatan material RAP merupakan salah satu teknologi hijau dalam pembangunan jalan, yaitu pemanfaatan limbah jalan disamping penghematan material bitumen dan agregat yang digunakan dalam pembangunan jalan.
2. Nilai penetrasi bitumen Pen 60/70 yang ditambahkan dengan bitumen RAP, cenderung mengalami penurunan atau semakin keras. Sedangkan nilai titik lembek meningkat seiring dengan penambahan bitumen RAP.
3. Nilai *Penetration Index* (PI) merupakan salah satu indikator yang sangat baik untuk mengukur kepekaan bitumen terhadap perubahan suhu.
4. Nilai *Penetration Index* (PI) campuran bitumen Pen 60/70 yang ditambahkan dengan bitumen RAP cenderung mengalami peningkatan hingga kadar RAP 30% selanjutnya nilai PI akan mengalami penurunan. Sehingga diperlukan bahan peremaja untuk mengembalikan sifat-sifat bitumen yang mengandung bitumen RAP dengan persentase yang cukup tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Affandi, F. dan Kusnianti, N., 2013, Warm Mixed Paved Pavement Performance That Supports Environmentally Friendly Development, Road Engineering Regional Conference (KRTJ) 12 Bandung
- Affandi, F., 2008. Karakteristik Bitumen Asbuton Butir untuk Campuran Beraspal Panas. Jurnal Pusat Litbang Jalan dan Jembatan, Bandung.
- Al-Qadi I. L., Qazi Aurangzeb, Samuel H. Carpenter, William J. Pine, James Trepanier, 2012, Impact of High RAP Contents on Structural and Performance Properties of

- Asphalt Mixtures, Research Report FHWA-ICT-12-002, Illinois Center for Transportation.
- Asphalt Institute Manual Series No. 2, 1993, Mix Design Method for Asphaltic Concrete and Other Hot Mix Types.
- ASTM D2172/D2172M – 11. 2011. Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen From Bituminous Paving Quantitative Extraction of Bitumen From Bituminous Paving Mixture.
- ASTM D5404/D5404M-12. 2017. Standard Practice for Recovery of Asphalt from Solution Using the Rotary Evaporator.
- Bethary. R.T., Subagio B.S., 2020, Rheological Characteristics of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Evaluation using Reclamite Rejuvenating Material, 6th AMMSE 2019, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 739 (2020) 012006.
- Burke, K., and S. A. Hesp., 2011, Penetration Testing of Waste Engine Oil Residue Modified Asphalt Cements. Proc., 1st Conference of Transportation Research Group Of India (CTRG), Bangalore, India.
- Copeland A., 2011, Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice, Report No FHWA-HRT-11-021.
- Directorate General of Highways, 2014, General Specifications for Roads and Bridges 2010 Revision 3, Jakarta, Directorate General of Highways.
- Hesp, S. A., and H. F. Shurvell., 2010, X-Ray Fluorescence Detection of Waste Engine Oil Residue in Asphalt and Its Effect on Cracking in Service. International Journal of Pavement Engineering, Vol. 11, No. 6, pp. 541–553.
- Illyin, A.B., 2012, Asphalt Production From Asbutone by Extraction Using Acetic Acid Thesis University of Indonesia.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2010, Section 6.3 Spesifikasi Campuran Beraspal Panas. Jakarta.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. 2018. Spesifikasi Campuran Aspal Panas Revisi 2, Seksi 6.3. Jakarta.
- Noferini L., Simone A., Sangiorgi C. and Mazzotta F., 2017, Investigation on performances of asphalt mixtures made with Reclaimed Asphalt Pavement: Effects of interaction between virgin and RAP bitumen, International Journal of Pavement Research and Technology 10 (2017) 322–332.
- O'Sullivan, K. A., 2011, Rejuvenation of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in Hot Mix Asphalt Recycling with High RAP Content. Worcester, Worcester Polytechnic Institute.
- Pradani. N., 2011, Performance of Resilient and Fatigue Modulus from Asphaltic Wearing Course (AC-WC) Using Styrene-Butadiene-Styrene Recycled Materials and Polymers (SBS), Thesis, Master of Systems and Road Engineering (STJR) Program, Bandung Institute of Technology.
- Pradani N., Subagio B.S., dan Rahman H., 2011, Fatigue Performance of Asphalt Concrete Mixtures, Journal of Transportation. 11. (3) , pg 163-172.
- Pradani N., 2013, The Effect of Adding Elastomeric Polymer To The Penetration Index of Bitumen Contains Recycling Material, INFRASTRUKTUR Vol. 3 No. 1 Juni 2013: 9 -15.
- Pradani, N., Irmawaty, R., Tjaronge, M.W. and Rahim, I.R., 2023, January. Basic properties of post-disaster recycled material in Palu City as flexible pavement materials. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2643, No. 1). AIP Publishing.

- Shell Bitumen, 2003, *The Shell Bitumen Handbook*, Shell Bitumen, U.K.
- Tjaronge M.W., Fakhrudin, Caronge M.A., Zaifullah M.H., and Rahmat M.F., 2019, Preliminary Study on Compressive Strength of Porous Asphalt Containing Modified Buton Asphalt, Waste Plastic and Limestone Powder, The 3rd EPI International Conference on Science and Engineering 2019 (EICSE2019), IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 875 (2020) 012032.
- Valdes G, Felix Perez-Jimenez, Rodrigo Miro, Adriana Martinez dan Ramon Botella, 2011, Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP), *Construction and Building Materials* 25.
- Widyatmoko I., 2008, Mechanistic-empirical mixture design for hot mix asphalt pavement recycling, *Construction and Building Materials* 22 (2008) 77–87.
- Zaumanis M., Mallick R.B. and Frank Robert, 2013, Evaluation of Rejuvenator's Effectiveness with Conventional Mix Testing for 100% Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2370, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2013, pp. 17–25.
- Zaumanis M. and Mallick R.B., 2014, Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art, *International Journal of Pavement Engineering*, 16:1, 39-55.