

TR-25

HUBUNGAN REGANGAN VERTIKAL DAN DURASI WAKTU UJI AKIBAT BEBAN TARIK CAMPURAN AC-WC BERBAHAN ASBUTON DAN PLASTIK PET

Erikson P. Fonataba^{1*}, M. W. Tjaronge¹, Rita Irmawaty¹ dan Muralia Hustim³

^{1*}Mahasiswa Program Doktor, Program Studi Ilmu Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia

e-mail: eriksonfonataba@gmail.com

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia

e-mail: tjaronge@yahoo.co.jp

² Program Studi Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia

e-mail: Rita_irmawaty@yahoo.co.id

³Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia

e-mail: muraliahustim@ft.unhas.ac.id

ABSTRAK

Limbah plastik adalah salah satu limbah padat utama yang dihasilkan dalam jumlah besar di seluruh dunia. Polyethylene Terephthalate (PET) adalah plastik yang paling banyak digunakan dan terbuang. Dalam penelitian ini pengaruh ukuran partikel PET dan konten pada beberapa sifat rekayasa beton aspal yang mengandung Asbuton dimodifikasi telah diselidiki. Berbagai konsentrasi limbah PET termasuk, 0, 1, dan 2% (berdasarkan berat pengikat) dalam dua rentang ukuran yang berbeda adalah untuk beton aspal dan stabilitas Marshall, kecerdasan Marshall, kekuatan tarik tidak langsung (ITS) dan properti creep dinamis uniaksial dievaluasi. Hasil menunjukkan bahwa stabilitas Marshall dan hasil bagi Marshall meningkat dengan meningkatnya konten PET. Hasil uji kekuatan tarik tidak langsung (ITS) menunjukkan bahwa ITS tertinggi diperoleh dengan menambahkan 2% PET ke dalam campuran dan di luar itu ITS berkurang dengan meningkatnya konten PET. Hasil uji dinamis mengungkapkan bahwa resistensi terhadap deformasi permanen berkurang dengan meningkatnya konten PET. Namun, campuran yang mengandung partikel PET bergradasi halus memiliki ketahanan lebih terhadap deformasi permanen daripada campuran yang mengandung partikel PET bergradasi kasar. Membandingkan hasil pada campuran yang dimodifikasi Asbuton dalam penelitian ini dengan yang pada campuran konvensional yang dicapai sebelumnya mengungkapkan bahwa trennya berbeda.

Kata kunci: PET, ITS, Asbuton, Beton aspal, AC-WC

PENDAHULUAN

Mengelola limbah padat yang banyak dan mengurangi dampak negatifnya terhadap lingkungan telah menjadi perhatian utama masyarakat. Pembuangan limbah ke alam, selain menempati tanah yang berharga, dapat berbahaya bagi kehidupan manusia dan makhluk lain. Oleh karena itu, langkah-langkah yang sesuai harus dicari untuk mengurangi dampak ini. Banyak limbah padat berbeda dihasilkan oleh rumah tangga, industri, dan jasa. plastik adalah salah satu limbah padat utama, yang membutuhkan waktu lama untuk terurai di alam dan dianggap sebagai limbah berbahaya.

Didalam metode pencampuran dilakukan dua hal yaitu:

Dalam metode yang lebih umum dari proses basah, limbah plastik PET pertama-tama dicampur dengan semen aspal pada suhu tinggi dan menggunakan *mixer* khusus, dan aspal yang dimodifikasi dicampur dengan agregat panas dalam *mixer* pabrik aspal.

Dalam proses kering, partikel Plastik PET ditambahkan ke dalam agregat dan kemudian dicampur dengan semen aspal panas dalam *mixer* pabrik aspal.

Salah satu faktor kunci dalam kinerja pengikat yang dimodifikasi plastik adalah interaksi antara cacahan plastik PET dan aspal. Pembengkakan dan pembubaran adalah dua mekanisme yang terjadi secara



bersamaan selama interaksi partikel plastik yang ditambahkan (Chen J. S. *et al.* 2001; Croney, D, 1977). Ketika partikel cacahan plastik ditambahkan ke dalam pengikat aspal panas, dimana pengikat viskositas ditingkatkan hingga faktor 10 (Shu X. *et al.* 2008; Somna K. *et al.* 2011; Hermadi M., Sjahdanulirwan M., 2008). Studi tentang pengikat dan campuran plastik yang dimodifikasi telah mengungkapkan peningkatan dalam sifat-sifat seperti resistensi *rutting*, dan kelelahan, ketahanan retak termal dan reflektif (Kementerian Pekerjaan Umum, 2010; Departemen Perhubungan Direktorat Jenderal Perhubungan Udara. (2005)).

Di antara sampah plastik, *Polyethylene Terephthalate* (PET), yang terutama digunakan untuk kemasan minuman, makanan, pembersih, minyak dll. (J. Karger-Kocsis. *et al.*, 2013), adalah yang paling terbuang. Di AS saja, 2675 ton PET telah terbuang pada tahun 2010, dari mana hanya 29,1% yang didaur ulang dan sisanya dibuang (M. Blumenthal, 1994). PET bukanlah bahan yang dapat terdegradasi, dan perlu berabad-abad untuk terurai. Pembuangannya ke lingkungan menyebabkan pencemaran sungai dan lautan dan membahayakan kehidupan makhluk. Karena itu, mengelola limbah PET sangat penting untuk melindungi lingkungan. Menemukan aplikasi, di mana bahan berkualitas tinggi tidak diperlukan, adalah cara untuk menggunakan kembali limbah PET secara efektif (M. Heitzman, 1992). Salah satu aplikasi potensial untuk PET adalah dalam campuran aspal [17] - [22] (L. Zanzotto and G. J. Kennepohl, 1996; M. A. Abdelrahman and S. H. Carpenter, 1999; B. Hu and R. Davies, 1994; G. D. Airey, T. M. Singleton, and A. C. Collop, 2002; L. N. Mohammad. *et al.*, 2000; G. Hicks and J. Epps, 2000). (Baghaee Moghaddam *et al.*) menemukan bahwa kekakuan maksimum diperoleh pada konten PET 1% (dengan berat agregat), setelah itu menurun dengan meningkatnya konten PET (B. Huang and L. N. Mohammad, 2002). Mereka juga menemukan bahwa kinerja kelelahan campuran jauh meningkat dengan dimasukkannya PET. Dalam karya penelitian lain, Baghaee Moghadam *et al.* menemukan bahwa inklusi PET menurunkan stabilitas Marshall dan kekuatan tarik tidak langsung dari campuran SMA (P. Frantzis, 2003). Mereka juga menemukan bahwa resistansi terhadap deformasi permanen berkurang dengan meningkatnya konten PET di bawah pembebanan statis. Namun, perilaku di bawah pembebanan dinamis berlawanan dan ketahanan terhadap deformasi permanen meningkat dengan meningkatkan konten PET. Hasil serupa ditemukan oleh Ahmadinia *et al.*, 2012 yang menemukan bahwa pada semua kondisi pengujian, ketahanan terhadap deformasi permanen dari campuran yang mengandung PET lebih tinggi dari pada campuran kontrol tanpa PET. Ahmadinia *et al.* menemukan bahwa stabilitas Marshall tertinggi dan Marshall quotient (MQ) diperoleh dengan menggunakan 2% (berdasarkan berat pengikat) PET dalam campuran SMA (M. A. Abdelrahman and S. H. Carpenter, 1999). Mereka juga menemukan bahwa modulus ulet dan ketahanan terhadap drainase ditingkatkan dengan penambahan PET.

(Modarres dan Hamed, 2014), menemukan bahwa kekakuan dan kekuatan tarik campuran dapat ditingkatkan dengan menambahkan 2% (berdasarkan berat pengikat) PET ke dalam beton aspal. Dengan menambahkan PET ke dalam campuran menggunakan metode basah dan kering, Earnest menemukan bahwa modifikasi PET meningkatkan kinerja pengikat dan campuran pada suhu tinggi, tanpa mempengaruhi viskositas dan kemampuan kerja (A. Hassani. *et al.* 2005). Proses basah juga ditemukan lebih efektif daripada proses kering dalam meningkatkan ketahanan terhadap deformasi permanen dan kerusakan kelembaban. Tes Hamburg dan kekuatan tarik tidak langsung (ITS) menunjukkan bahwa campuran yang dimodifikasi menggunakan proses kering menunjukkan kinerja yang lebih baik terhadap kerusakan kelembaban. Modulus dinamis dari campuran yang dimodifikasi oleh PET ditemukan lebih rendah daripada, dan sudut fase ditemukan lebih tinggi daripada mereka dari campuran kontrol tanpa PET. Almeida *et al.* menemukan bahwa campuran yang mengandung 5% PET mikronisasi memiliki kekuatan tarik tidak langsung yang lebih tinggi, ketahanan terhadap kerusakan kelembaban dan retak kelelahan dan modulus ulet daripada campuran kontrol tanpa PET (M. D. Earnest, 2015). Namun jumlah aliran campuran ditemukan lebih rendah daripada campuran kontrol, menunjukkan bahwa ketahanan terhadap deformasi permanen berkurang dengan modifikasi PET. Mereka juga menemukan bahwa peningkatan modulus ulet pada suhu yang lebih tinggi kurang dari pada suhu menengah.

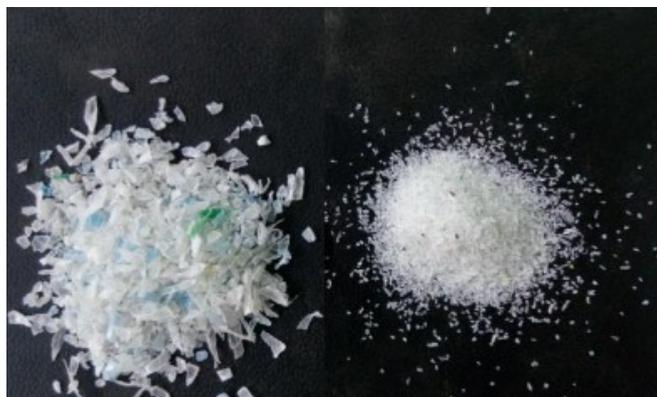
Menelusuri literatur menunjukkan bahwa efek menambahkan PET limbah pada beton aspal plastik yang dimodifikasi belum dilakukan, sementara ada beberapa kontradiksi di antara penelitian yang diteliti dilakukan pada efek menggunakan Limbah PET dalam campuran konvensional. Oleh karena itu, dalam

penelitian ini, itu bertujuan untuk mempelajari pengaruh penambahan limbah PET pada beberapa sifat rekayasa beton aspal yang terbuat dari pengikat yang dimodifikasi dengan plastik.

MATERIAL

Empat jenis material termasuk limbah plastik PET, agregat batu kapur, dan semen aspal modifikasi semen telah digunakan dalam penelitian terdahulu. Partikel limbah PET diperoleh dari menghancurkan botol air limbah PET. Pertama, tutup dan label botol dilepas. Kemudian, limbah botol PET dicuci dan dipotong-potong kecil. Kemudian, ditumbuk menjadi partikel yang lebih halus menggunakan *crusher* khusus. Dalam penelitian ini partikel PET digunakan dalam dua rentang ukuran yang berbeda. Dalam tulisan ini, partikel bertingkat halus dan kasar masing-masing ditandai oleh P50, dan P16. Setelah menyaring PET yang dihancurkan, partikel P50 diperoleh dari yang lolos saringan No. 30 dan tertahan pada saringan No. 50, dan partikel P16 diperoleh dari yang lolos saringan No. 8 dan tertahan pada saringan No. 16. Gambar 1, Tabel 1 dan 2, masing-masing menunjukkan partikel PET halus dan kasar, gradasi halus dan partikel PET kasar dan sifat-sifat PET yang digunakan dalam penelitian ini.

Beton aspal Asbuton modifikasi yang diperoleh dengan aspal Buton butir yang telah mengalami proses semi ekstraksi dan dinamakan Asbuton modifikasi (atau biasa dikenal dengan istilah Retona Blend 55). yang dimodifikasi oleh 2% Cacahan Plastik PET bekas digunakan sebagai pengikat dalam campuran. Plastik ditambahkan ke pengikat menggunakan metode Kering, pada suhu 180C, dan dicampur selama 2 jam menggunakan mixer putaran tinggi pada 1000 rpm. Agregat yang digunakan dalam penelitian ini bersumber dari batu alam dan dikumpulkan dari pabrik aspal lokal di kota Makassar. persyaratan spesifikasi nasional dipenuhi oleh kelompok agregat. Penyerapan kelembaban partikel halus dan kasar masing-masing diukur menjadi 0,1 dan 1,2%. Kepadatan massal fraksi kasar, halus dan pengisi masing-masing adalah 2,65, 2,66 dan 2,65. Menurut spesifikasi nasional [26], gradasi padat dengan ukuran agregat maksimum 19 mm dipilih dari campuran. Gambar 2 menunjukkan gradasi campuran dan batas bawah dan atas spesifikasi.



Gambar 1. Partikel PET kasar dan halus

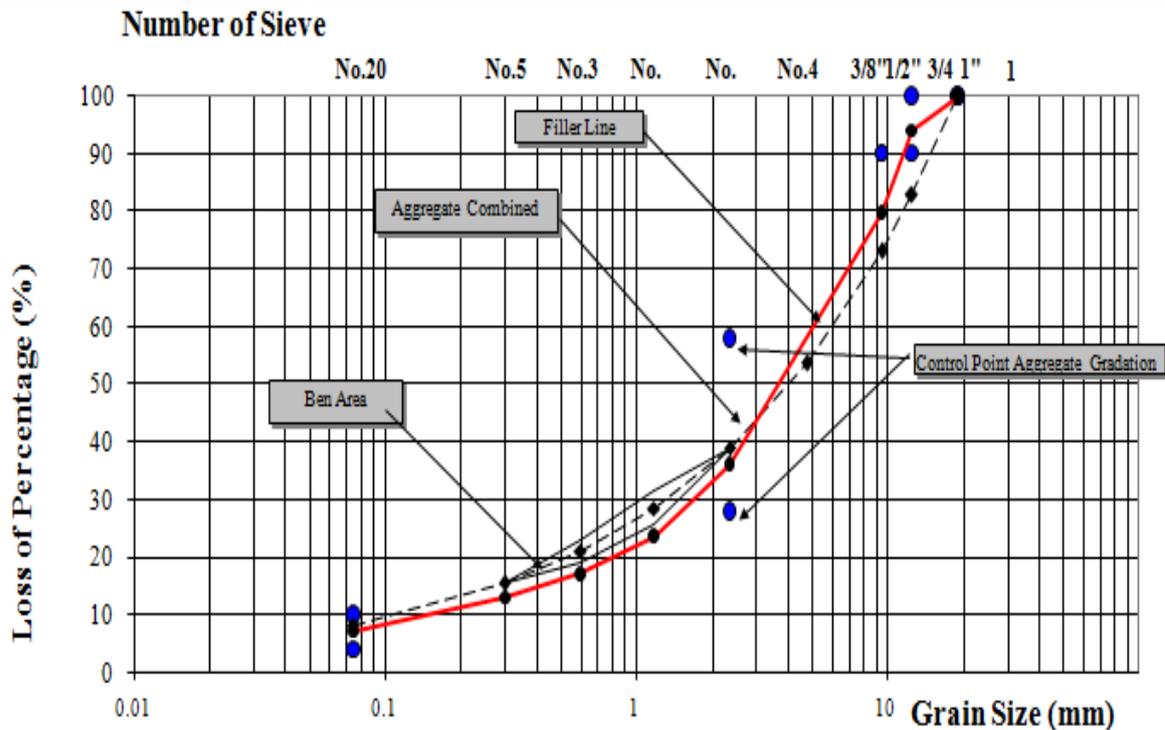
Tabel 1. Distribusi ukuran partikel PET

Ukuran saringan (mm)	Persentase lolos saringan (%)
Coarse graded PET	
2,36	100
1,18	5
Fine graded PET	
0,6	100
0,3	5

Tabel 2. Beberapa properti limbah yang ditambah dalam penelitian ini

Karakteristik	Standar metode	Nilai
Berat jenis (gr/cm ³)	ASTM D792	1,35

Kelembaban penyerapan (%)	ASTM D570	0,1
Titik leleh (°C)		250
Kuat tarik (kPa)	ASTM D638	850
Suhu transisi kaca (°C)		75



Gambar 2. Gradasi campuran yang digunakan dalam penelitian ini

RENCANA DAN PEMBUATAN BENDA UJI

Kandungan pengikat optimal dari campuran tanpa PET diperoleh dengan mengikuti metode desain campuran Marshall, menurut ASTM D1559. Kandungan pengikat optimal dari campuran yang dibuat oleh aspal plastik yang dimodifikasi dengan bahan pengikat Asbuton modifikasi yang diperoleh dengan aspal Buton butir yang telah mengalami proses semi ekstraksi dan dinamakan Asbuton modifikasi (atau biasa dikenal dengan istilah Retona Blend 55) ditentukan masing-masing 4,5 dan 6%. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa kandungan pengikat optimal dari campuran yang dimodifikasi PET mirip dengan campuran tanpa PET. Oleh karena itu, campuran dibuat oleh 6% dari kadar aspal pengikat. Sifat volumetrik dari campuran diperiksa untuk memenuhi persyaratan spesifikasi rongga berdasarkan Marshall. Metode Marshall, mengikuti standar ASTM D1559, digunakan untuk pembuatan spesimen silinder yang digunakan untuk pengujian. Pertama, agregat yang dipanaskan dan pengikat dicampur selama 5 menit, setelah itu, jumlah partikel PET yang diperlukan ditambahkan ke dalam campuran dan dicampur secara menyeluruh selama 2 menit sampai agregat dan partikel PET sepenuhnya dilapisi dengan aspal. Metode pencampuran ini memastikan mempertahankan keadaan semi-kristal PET dan terjadinya perubahan minimum dalam sifat dan bentuk partikel PET. PET memiliki transisi gelas sekitar 70°C. Bagian amorf PET dilelehkan pada suhu pencampuran, menghasilkan peningkatan kohesi pengikat, sedangkan bagian kristalin tidak berubah. Rongga antara partikel agregat diisi dengan bagian kristal PET, menghasilkan peningkatan kekakuan campuran. Campuran ditempatkan dalam cetakan dan dipadatkan dengan menerapkan 75 tumbukan ke setiap sisi. Benda Uji yang dipadatkan dikeluarkan dari cetakan setelah 24 jam pemadatan, dan disimpan sampai digunakan untuk pengujian kuat tarik tidak langsung.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki efek dari ukuran dan konten partikel PET pada beberapa sifat rekayasa yang mengandung beton aspal plastik yang dimodifikasi dengan Asbuton.

Partikel PET dalam dua rentang ukuran yang berbeda ditambahkan ke dalam campuran pada 3 isi berbeda 0, 1, dan 2% (dengan berat pengikat) dan stabilitas dan aliran Marshall, kekuatan tarik tidak langsung dan dinamis memiliki telah diselidiki.

METODE PENGUJIAN

Tes Marshall dilakukan pada spesimen sesuai dengan metode standar ASTM D1559. Spesimen ditempatkan dalam water bath yang diatur pada 60°C selama 30 menit, setelah itu, mereka dimuat menggunakan uji Marshall, pada tingkat konstan 50,8 mm/menit, dan gaya yang diperlukan untuk memecahkan spesimen diukur sebagai stabilitas Marshall, dan deformasi diameter spesimen pada kegagalan diukur sebagai aliran Marshall. Dalam penelitian ini, uji kekuatan tarik tidak langsung (ITS) dilakukan pada spesimen pada 25°C menurut metode standar AASHTO T283. Tiga spesimen ulangan dari setiap campuran dibuat dengan kandungan rongga udara $7 \pm 0,5\%$, seperti yang disyaratkan dalam metode standar AASHTO T283. Kekuatan tarik tidak langsung (ITS) diukur setelah menempatkannya dalam kantong plastik dan tenggelam dalam water bath yang diatur pada suhu 25°C. ITS itu spesimen diukur dengan menempatkan mereka dalam alat pengujian ITS dan dimuat menggunakan uji Marshall yang diatur pada tingkat 50,8 mm/menit sampai mengalami kehancuran/kegagalan. Gaya yang diperlukan untuk memecahkan spesimen diukur dan kekuatan tarik tidak langsung dihitung menggunakan persamaan (1)

$$ITS = \frac{2000 P}{\pi D} \quad (1)$$

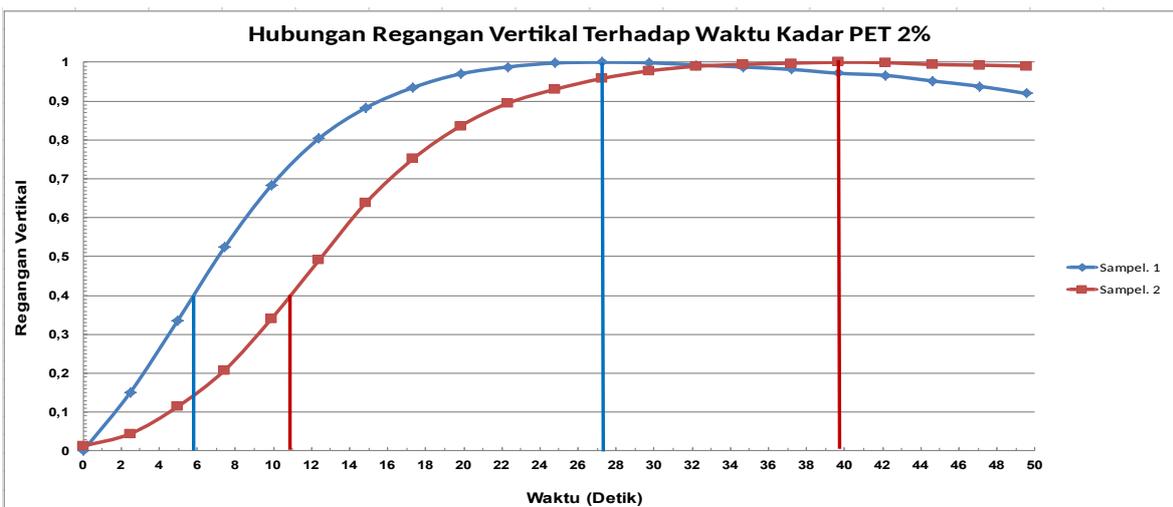
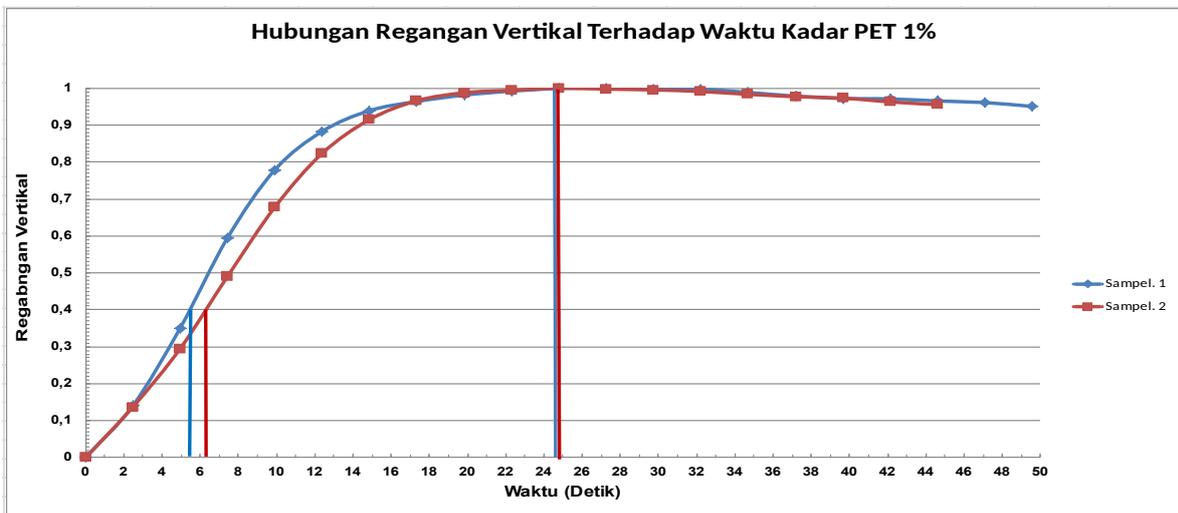
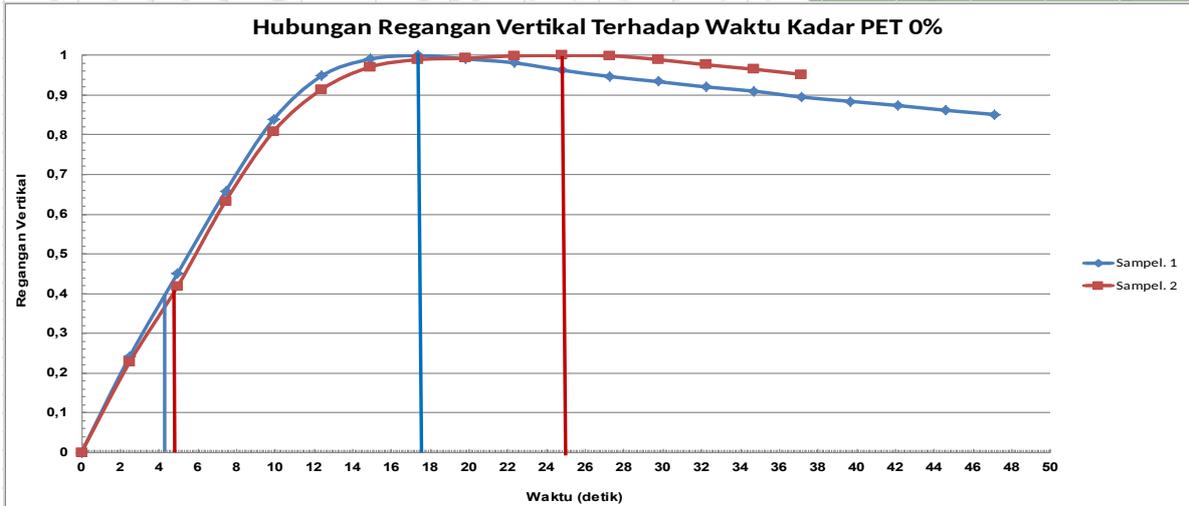
Dimana, ITS adalah kekuatan tarik tidak langsung dalam kPa, P adalah beban maksimum yang diterapkan untuk memecahkan spesimen dalam N, D adalah diameter spesimen dalam mm, dan t adalah ketebalan spesimen dalam mm. Rata-rata 3 spesimen dalam setiap variasi benda uji dan digunakan sebagai ITS campuran.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 3 menunjukkan hubungan regangan vertikal terhadap waktu dengan variasi kadar plastik PET masing-masing 0%, 1% dan 2 % menunjukkan bahwa untuk kadar plastis pet 0% regangan vertikal rata-rata pada 0,4 kPa didapat rata-rata waktu sebesar 4,8 detik, untuk kadar plastis PET 1% regangan vertikal rata-rata pada 0,4 kPa didapat rata-rata waktu sebesar 6,9 detik, untuk kadar plastis PET 2% regangan vertikal rata-rata pada 0,4 kPa didapat rata-rata waktu sebesar 14,23 detik. selanjutnya hubungan regangan maksimum vertikal terhadap waktu dengan variasi kadar plastik PET masing-masing 0%, 1% dan 2 % menunjukkan bahwa untuk kadar plastis pet 0% regangan maksimum vertikal rata-rata pada 1 kpa didapat rata-rata waktu sebesar 29,97 detik, untuk kadar plastik PET 1% regangan maksimum vertikal rata-rata pada 1 kPa didapat rata-rata waktu sebesar 33,31 detik dan untuk kadar plastik PET 2% regangan maksimum vertikal rata-rata pada 1 kPa didapat rata-rata waktu sebesar 21,3 detik.

Dari hasil hubungan regangan vertikal terhadap waktu dengan variasi kadar plastik PET yang divariasikan 0%, 1% dan 2% didapat bahwa :

- Dengan bertambahnya kadar Plastik PET maka campuran tersebut akan lebih cepat pecah atau getas.
- Dengan melihat hubungan Regangan vertikal terhadap waktu elastisnya maka bertambahnya kadar plastik PET tingkat elastisnya semakin tinggi.
- Semakin bertambah kadar PET maka waktu yang dibutuhkan juga akan semakin besar. Hal ini ditunjukkan dengan kadar plastik PET 2,0%.



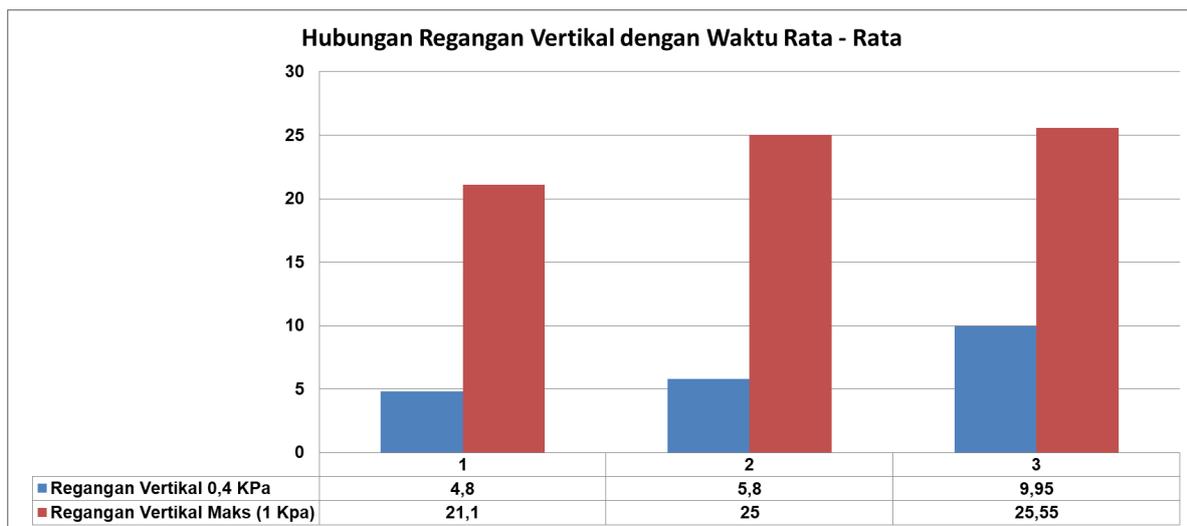
Gambar 3. Hubungan regangan vertikal terhadap waktu dengan variasi kadar PET

Tabel 3. Hubungan regangan vertikal terhadap waktu terhadap campuran plastik PET dengan beberapa variasi

No sampel	Kadar plastik PET (%)	Regangan vertikal	Waktu (detik)	Waktu rata-rata
1	0%	0,4	4,4	4,8
2	0%	0,4	5,2	
1	1%	0,4	5,4	5,8
2	1%	0,4	6,2	
1	2%	0,4	5,9	9,95
2	2%	0,4	11,0	

Tabel 4. Hubungan regangan vertikal maks terhadap waktu terhadap campuran plastik PET dengan beberapa variasi

No Sampel	Kadar Plastik PET (%)	Regangan Vertikal Maks	Waktu (detik)	Waktu rata-rata
1	0%	1	17,2	21,10
2	0%	1	25	
1	1%	1	24,9	25,00
2	1%	1	25,1	
1	2%	1	27,2	25,55
2	2%	1	23,9	



Gambar 4. Hubungan regangan vertikal terhadap waktu rata-rata

KESIMPULAN

Persentase berbeda dari limbah partikel PET ditambahkan ke dalam beton aspal yang terbuat dari aspal modifikasi plastik dan stabilitas Marshall, kekuatan tarik tidak langsung dan sifat dinamis dari campuran dievaluasi. Berikut ini adalah hasil secara singkat.

Stabilitas Marshall meningkat dengan meningkatnya kadar plastik PET, dengan nilai yang lebih tinggi untuk PET dengan gradasi halus daripada partikel PET dengan gradasi kasar.

Kekuatan tarik tidak langsung meningkat hingga penambahan 2% PET ke dalam campuran, di luar itu berkurang dengan meningkatnya kadar plastik PET. ITS yang lebih tinggi dapat diperoleh dengan menggunakan partikel PET bertingkat halus daripada partikel PET bertingkat kasar.



Perlawanan terhadap deformasi permanen berkurang dengan meningkatnya kadar plastik PET. Resistensi yang lebih tinggi dapat dicapai dengan menambahkan partikel bertingkat halus daripada partikel bertingkat kasar.

Membandingkan hasil dengan literatur dalam campuran konvensional menunjukkan bahwa penambahan PET ke dalam campuran aspal plastik yang dimodifikasi mengikuti tren yang berbeda, yang diduga disebabkan oleh interaksi antara polimer PET.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Hassani, H. Ganjidoust, and A. A. Maghanaki, "Use of plastic waste (poly-ethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregate replacement," *Waste Management & Research*, vol. 23, no. 4, pp. 322-327, 2005.
- A. Modarres and H. Hamed, "Developing laboratory fatigue and resilient modulus models for modified asphalt mixes with waste plastic bottles (PET)," *Construction and Building Materials*, vol. 68, pp. 259-267, 2014.
- A. Modarres and H. Hamed, "Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes," *Materials & Design*, vol. 61, pp. 8-15, 2014
- B. Hu and R. Davies, "Effect of crumb rubber modifiers (CRM) on performance related properties of asphalt binders," *Asphalt Paving Technol*, vol. 63, pp. 414-49, 1994.
- B. Huang and L. N. Mohammad, "Numerical analysis of crumb-rubber modified asphalt pavement at the Louisiana accelerated loading facility," *Int J Pavements*, vol. 1, no. 2, pp. 36-47, 2002.
- Chen J. S. et al. 2001. Evaluation of Geosynthetic Applied to Flexible Pavements. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation studies*, vol.4, No.1, 2001.
- Container Recycling Institute. [Online]. Available: <http://www.container-recycling.org/index.php/pet-Bottle-sales-and-wasting-in-the-us>.
- Croney, D. (1977). "The Design and Performance of Road Pavements. Transport and Road Research Laboratory", London.
- Departemen Perhubungan Direktorat Jenderal Perhubungan Udara. (2005). Persyaratan Teknik Bandar Udara. Petunjuk Pelaksanaan Pemeliharaan Konstruksi Landas Pacu (Runway), Landas Hubung (Taxiway) dan Landas Parkir (Apron) serta Fasilitas Penunjang Bandar Udara Nomor : SKEP/78/VI/2005.
- E. A. Hunt, "Crumb rubber modified asphalt concrete in Oregon," Final Report, SPR 335. Salem, Oregon: Oregon Department of Transportation, 2002.
- E. Ahmadiania, M. Zargar, M. R. Karim, M. Abdelaziz, and E. Ahmadiania, "Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt," *Construction and Building Materials*, vol. 36, pp. 984-989, 2012.
- E. Ahmadiania, M. Zargar, M. R. Karim, M. Abdelaziz, and P. Shafiqh. "Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt," *Materials & Design*, vol. 32, no. 10, pp. 4844-4849, 2011.
- G. D. Airey, T. M. Singleton, and A. C. Collop, "Properties of polymer modified bitumen after rubber-bitumen interaction," *J Mater Civ Eng*, vol. 14, no. 4, pp. 344-54, 2002.
- G. Hicks and J. Epps, "Life cycle costs for asphalt-rubber paving materials," in *Proc. Asphalt Rubber 2000 – The Pavement Material of 21st Century*, Vilamoura, Portugal, November 14-17, 2000.
- Hermadi M., Sjahdanulirwan M., 2008. Usulan spesifikasi campuran beraspal panas asbuton Lawele untuk perkerasan jalan. *Jurnal jalan-jembatan*, Vol. 25 No. 3, hal. 327 – 349.
- IHAP (Iran Highway Asphalt Paving) Code, "Publication No 234," Management and Planning Organization, Tehran, Iran, 2012.
- J. D. A. A. Silva et al., "Use of micronized polyethylene terephthalate (PET) waste in asphalt binder," *Petroleum Science and Technology*, vol. 33, no. 15, pp. 1508-1515, 2017.
- J. Karger-Kocsis, L. Meszaros, and T. Barany, "Ground tyre rubber (GTR) in thermoplastics, thermosets, and rubbers," *J Mater Sci*, vol. 48, no. 1, pp. 1-38, 2013.

- J. Sengul, A. Aksoy, E. Iskender, and H. Ozen, "Hydrated lime treatment of asphalt concrete to increase permanent deformation resistance," *Construction and Building Materials*, vol. 30, pp. 139-148, 2000.
- Kementerian Pekerjaan Umum. 2010. Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 Revisi 3. Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Bina Marga, Jakarta.
- L. N. Mohammad, B. Huang, F. L. Roberts, and M. Rasoulian, "Accelerated loading performance and laboratory characterization of crumb rubber asphalt pavements," *Int J Road Mater Pavement Des*, vol. 1, no. 4, pp. 467-93, March 2000.
- L. Zanzotto and G. J. Kennepohl, "Development of rubber and asphalt binders by depolymerization and devulcanization of scrap tires in asphalt," *Transport Res Rec: J Transport Res Board* 1996, vol. 1530, no. 1, pp. 51-8.
- M. A. Abdelrahman and S. H. Carpenter, "Mechanism of interaction of asphalt cement with crumb rubber modifier," *Transport Res Rec: J Transport Res Board*, vol. 1661, no. 1, pp. 06-13, 1999.
- M. Ameri, A. Mansourian, and A. H. Sheikhmotevali, "Laboratory evaluation of ethylene vinyl acetate modified bitumens and mixtures based upon performance related parameters," *Construction and Building Materials*, vol. 40, pp. 438-447, 2013.
- M. Blumenthal, "Producing ground scrap tire rubber: A comparison between ambient and cryogenic technologies," in *Proc. 17th Biennial Waste Processing Conf.*, New York: ASME, 1994.
- M. D. Earnest, "Performance Characteristics of Polyethylene Terephthalate (PET) Modified Asphalt," Master's thesis, Georgia Southern University, United States, 2015.
- M. Heitzman, "Design and construction of asphalt paving materials with crumb rubber modifier," *Transport Res Record: J Transport Res Board* 1992, vol. 1339, pp. 1-8.
- Malasyi, Syibril, dkk. 2014. Analisis Pengaruh Abu Jerami Terhadap Kuat Tekan Beton. *Teras Jurnal* Vol. 4 : 2088-0561.
- P. Frantzis, "Crumb rubber-bitumen interactions: cold-stage optical microscopy," *J Mater Civil Eng*, vol. 5, no. 5, pp. 19-26, 2003.
- Rosello J. et al. 2017. Rice straw ash : A Potential Pozzolan Supplementary Material for Cementing Systems. *Industrial Crops and Products* 103 (39 – 50).
- Rubber Manufacturers Association, *US Scrap Tire Management Summary 2005-2009*, Washington, DC, 2011.
- S. E. Zoorob and L. B. Suparma, "Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (plastiphalt)," *Cement Concrete Composites*, vol. 22, pp. 233-42, 2000.
- S. Tayfur, H. Ozen, and A. Aksoy, "Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers," *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 2, pp. 328-337, 2007.
- Shu X., Huang B., Vukosavljevic D., 2008. Laboratory evaluation of fatigue characteristics of recycled asphalt mixture. *Science Direct, Construction and Building Materials*, 22, hal. 1323 -1330.
- Somna K. et al. 2011. NaOH-Activated Ground Fly Ash Geopolymer Cured at Ambient Temperature. *Fuel* 90 : 2118-2124.
- Spesifikasi Umum Bina marga Divisi 6. (2010). *Perkerasan Aspal*. Direktorat Jendral Bina marga.
- Stephen B., the *Shell Bitumen Handbook*, University of Nottingham, July 2015.
- T. B. Moghaddam, M. R. Karim, and M. Abdelaziz, "A review on fatigue and rutting performance of asphalt mixes," *Scientific Research and Essays*, vol. 6, no. 4, pp. 670-682, 2011.
- T. B. Moghaddam, M. R. Karim, and T. Syammaun, "Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles," *Construction and Building Materials*, vol. 34, pp. 236-242, 2012.
- T. B. Moghaddam, M. Soltani, and M. R. Karim, "Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test," *Materials & Design*, vol. 53, pp. 317-324, 2014.



T. B. Moghaddam, M. Soltani, and M. R. Karim, "Experimental characterization of rutting performance of polyethylene terephthalate modified asphalt mixtures under static and dynamic loads," *Construction and Building Materials*, vol. 65, pp. 487-494, 2014.

Walubita, Lubinda F., Ven, Martin F C van de, 2000. *Stresses and Strains in Asphalt-Surfacing Pavements*.