

STUDI PARAMETRIK BETON CAMPURAN REMAH KARET DAN *FLY ASH BOTTOM ASH* (FABA) UNTUK PERKERASAN KAKU

Muhammad Rizky, Gunawan Wibisono dan Monita Olivia

Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Riau

Email: monita.olivia@lecturer.unri.ac.id

Abstrak: Penumpukan ban bekas di alam terus mengalami peningkatan karena pemanfaatan ban bekas yang masih sedikit sehingga potensi terjadinya pencemaran lingkungan sangat tinggi karena ban bekas tidak dapat terurai secara alami. Salah satu limbah industri hasil pembakaran batu bara yang termasuk berbahaya bagi lingkungan adalah abu terbang atau *fly ash bottom ash* (FABA) pada industri pembangkit listrik. Kedua limbah tersebut dapat digunakan untuk memperbaiki kinerja perkerasan kaku (*rigid pavement*) untuk jalan sehingga memiliki kekakuan dan durabilitas tinggi. Pada penelitian ini diteliti parameter yang berpengaruh terhadap kuat lentur optimum pada perkerasan kaku menggunakan campuran remah karet dan FABA sesuai spesifikasi pekerjaan jalan dan jembatan tahun 2018. Beberapa campuran beton dikaji dalam penelitian ini memiliki variasi faktor air semen (0,30; 0,32; 0,34), remah karet (0%, 5%, 10%), FABA (0%, 5%, 10%) dan perlakuan terhadap karet (disaring, tidak disaring dan serat). Campuran beton kontrol adalah campuran dengan menggunakan semen PCC. Persentase remah karet adalah berdasarkan berat agregat halus, dan persentase FABA sesuai dengan berat semen. Hasil pengujian pada umur 28 hari menunjukkan bahwa campuran dengan variasi faktor air semen = 0,30, remah karet = 5%, FABA = 10% menghasilkan kuat tekan dan kuat lentur optimum masing-masing 32,07 MPa dan 4,62 MPa. Kedua nilai tersebut telah memenuhi persyaratan dalam spesifikasi umum pekerjaan jalan dan jembatan. Berdasarkan studi parametrik dapat diperoleh campuran yang tepat antara remah karet dan FABA sehingga dapat meningkatkan sifat mekanik beton dan berpotensi sebagai bahan perkerasan kaku.

Kata kunci: kuat tekan, kuat lentur, remah karet, FABA, perkerasan kaku

PARAMETRIC STUDY OF CRUMB RUBBER AND FLY ASH BOTTOM ASH (FABA) MIXED CONCRETE FOR RIGID PAVEMENT

Abstract: The accumulation of used tires in nature continues to increase due to the use of used tires which is still small so that the potential for environmental pollution is very high because used tires cannot be decomposed naturally. One of the industrial wastes that are considered hazardous to the environment is the fine form of coal combustion from a steam power plant called fly ash bottom ash (FABA). Both of these wastes can be used to improve the performance of rigid pavement for roads, so they have high rigidity and durability. In this study, the parameters that influence the optimum flexural strength in the rigid pavement are examined using a mixture of crumb rubber and FABA, according to the 2018 general specifications for road and bridge work. Several concrete mixes were examined in this study with variations in the cement water factor (0.30; 0.32; 0.34), rubber crumb (0%, 5%, 10%), FABA (0%, 5%, 10%) and various treatment of rubber (filtered, not filtered, fibre). The control concrete mixture is a mixture using PCC cement. Rubber crumb as a substitute for fine aggregate and fly ash as a substitute for cement in a concrete mixture. The test results at 28 days showed that the mixture with a variation of cement water factor = 0.30, rubber crumbs = 5%, fly ash = 10% produced optimum compressive strength and flexural strength of 32,07 MPa and 4,62 MPa respectively. Both values meet the 2018 general specifications for road and bridge work. It can be concluded that the composition of the right mixture of crumb rubber and FABA in a concrete mixture can improve the mechanical properties of concrete and potentially used as a rigid pavement material.

Keywords: compressive strength, flexural strength, crumb rubber, fly ash, rigid pavement

PENDAHULUAN

Struktur perkerasan jalan dari pelat beton semen dengan atau tanpa tulangan yang menggunakan atau tidak lapis aspal dan terletak bagian atas lapisan pondasi bawah atau tanah dasar disebut perkerasan kaku (SNI, 2003). Keunggulan perkerasan kaku diantaranya adalah biaya pemeliharaan lebih murah, lebih baik dalam menahan beban besar dan dapat digunakan pada struktur tanah yang lemah. Konstruksi perkerasan kaku yang memiliki sifat kekakuan yang tinggi membutuhkan suatu bahan yang dapat meningkatkan kelenturan. Perkerasan kaku harus memiliki kekuatan lentur minimum yaitu 4,50 MPa (Bina Marga, 2018). Penambahan bahan yang memiliki sifat fleksibilitas tinggi seperti karet dapat menjadi alternatif untuk meningkatkan sifat elastis seperti kekuatan lentur pada perkerasan kaku.

Limbah ban bekas yang terbuat dari karet dari tahun ke tahun semakin meningkat. Ban bekas tersebut berasal dari industri otomotif yang sangat berkembang pesat. Hal ini dapat dilihat berdasarkan jumlah mobil penumpang di Indonesia pada tahun 2015-2017 adalah sebanyak 13.480.973, 14.580.666 dan 15.423.068 unit (BPS, 2018). Ban yang tidak terpakai akan menjadi limbah yang dapat mencemari lingkungan karena limbah ban bekas tidak dapat terurai secara alami. Limbah karet ban terbagi menjadi tiga jenis yaitu *chip rubber* (chip karet). Chip berukuran 25-30 mm dan menggantikan agregat kasar pada campuran beton. Kedua, *crumb rubber* (remah karet) berukuran sekitar 3-10 mm sebagai pengganti pasir pada campuran beton. Ketiga, *ash rubber* (karet abu), berukuran 1 mm untuk pengisi campuran beton (Sgobba, et al. 2015). Pembuatan ban bekas ke bentuk-bentuk partikel tersebut diperlukan proses penghancuran secara mekanis, maka dari itu biaya penghancuran akan meningkat seiring dengan bertambah kecilnya ukuran partikel ban yang dihasilkan (Mohammed, 2010). Beton mengandung remah karet mengalami penurunan kekuatan tekan dan lentur dengan penambahan persentase remah karet pada beton. Peningkatan persentase remah karet dalam campuran beton menurunkan kepadatan dan kemampuan kerja karena kurangnya ikatan antara semen dan remah karet (Kardos dan Durham, 2015). Selain itu beberapa penelitian yang dilakukan oleh Liu, et al. (2013), Thomas, et al. (2014) dan Li, et al.

(2014) juga menunjukkan bahwa beton dengan campuran remah karet berpotensi untuk aplikasi struktural. Penelitian beton dengan campuran remah karet dilakukan dengan rentang kekuatan dari 25 MPa hingga 40 MPa.

Penambahan remah karet pada campuran beton menurunkan kepadatan dikarenakan terdapat rongga-rongga seiring bertambahnya remah karet sehingga diperlukan suatu bahan yang bersifat pozzolanik seperti abu terbang agar membantu memperkecil pori-pori yang terjadi pada campuran beton dan remah karet. Abu terbang (*fly ash*) berbentuk partikel halus dihasilkan melalui pembakaran batu bara pada PLTU atau Pembangkit Listrik Tenaga Uap (ASTM, 2003). Sedangkan abu dasar (*bottom ash*) dihasilkan melalui pembakaran juga tetapi memiliki ukuran lebih besar daripada abu terbang dan mengendap di dasar boiler. Umumnya PLTU mencampur kedua limbah ini berdasarkan persentase tertentu yakni abu dasar sekitar 80% dan sebanyak 20% abu terbang, sehingga hasil campuran disebut *fly ash bottom ash* (FABA). Kemampuan mengikat seperti semen sebenarnya tidak dimiliki oleh abu terbang, akan tetapi ukuran yang halus seperti air mengakibatkan kandungan oksida silika yang terdapat pada abu batu bara menimbulkan reaksi kimia/reaksi pozzolanik dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ atau kalsium hidroksida hasil hidrasi semen sehingga menghasilkan sebuah zat baru serupa gel dengan kemampuan mengikat seperti semen (Hardjito, 2001). Gel pozzolanik yang terbentuk menurunkan porositas dan ukuran pori pada beton sehingga pada takaran yang tepat dapat langsung menaikkan kuat tekan beton (Mardiono, 2011). Sifat mekanik kuat tekan beton campuran abu terbang sebagai pengganti semen setelah perawatan 28 hari mengalami penurunan seiring dengan penambahan kadar abu terbang (Saha, 2017).

Oleh karena potensi ban bekas dan FABA yang cukup tinggi, maka perlu dilakukan penelitian dalam menentukan campuran beton optimum menggunakan remah karet dan FABA sehingga akan menghasilkan beton untuk perkerasan kaku dengan tingkat kelenturan dan durabilitas tinggi. Selanjutnya penelitian ini akan mengkaji sifat fisik dan mekanik beton dengan menganalisis kuat tekan dan kuat lentur yang memenuhi kekuatan persyaratan minimum untuk

perkerasan kaku sesuai Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Jalan dan Jembatan.

MATERI DAN METODE

Semen, remah karet, FABA, agregat kasar, agregat halus dan air adalah bahan penyusun beton dalam penelitian ini. Kedua tipe agregat diperoleh dari daerah Rimbo Panjang, Kabupaten Kampar, Provinsi Riau. Bahan penyusun beton dapat dilihat pada Gambar 1. Agregat kasar yang digunakan memiliki ukuran agregat maksimum 20 mm dengan berat jenis 2,56. Agregat halus memiliki modulus kehalusan 2,94 dan berat jenis 2,65. Penyerapan air agregat kasar dan halus masing-masing adalah 2,30% dan 0,20%. *Portland Composite Cement* (PCC) atau semen PCC berasal dari Padang, Sumatera Barat, Komposisi kimia semen PCC dapat dilihat pada Tabel 1. FABA berasal dari Sumatera Barat, Indonesia. Remah karet (*crumb rubber* atau CR) dalam penelitian ini berupa limbah ban bekas yang diiris secara

mekanis dengan rentang ukuran 3-10 mm berasal dari PT. Sejahtera Ban, Pekanbaru.

Penelitian ini dilakukan untuk menentukan komposisi yang optimal pada beton campuran remah karet dan FABA. Pada studi parametrik ini, berbagai macam variasi dilakukan untuk mengidentifikasi pengaruh parameter penyusun beton dengan menetapkan campuran kontrol memiliki variabel tetap dan campuran lain dengan variabel berubah-ubah. Tabel 2 memperlihatkan variasi parameter, berupa variasi faktor air semen, remah karet dan FABA. Variasi faktor air semen 0,30, 0,32, 0,34, remah karet memiliki variasi 0%, 5%, 10% volume agregat halus dan FABA 0%, 5%, 10% volume semen. Perlakuan remah karet dapat berupa digunakan setelah disaring, tidak disaring dan berupa serat yang tertahan dalam saringan. Nilai-nilai persentase tersebut ditentukan berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Abdurrahman, et al. (2019).



Gambar 1. Bahan penyusun benda uji (a) agregat kasar (b) agregat halus (c) semen PCC (d) remah karet (e) FABA

Tabel 1. Komposisi kimia semen PCC

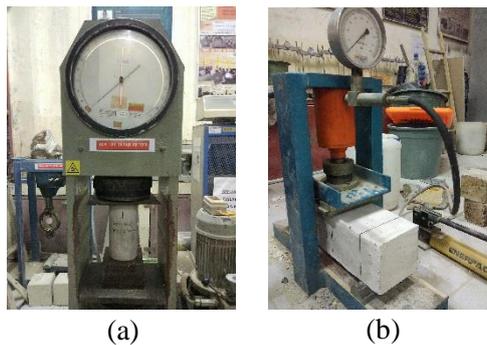
Karakteristik Kimia	<i>Portland Composite Cement</i> (PCC) (Salain, 2009)
SiO ₂	23.04
Al ₂ O ₃	7.40
Fe ₂ O ₃	3.36
MgO	0.63
CaO	57.38
Na ₂ O	-
K ₂ O	-
Na ₂ O+0.658K ₂ O	0.52
P ₂ O ₅	-
SO ₃	1.78
LOI	-
Lainnya	5.89

Sampel beton direncanakan dengan target kuat tekan 35 MPa dan kuat lentur 4,5 MPa. Penelitian diawali dengan menguji sifat properties dari bahan penyusun beton agregat kasar dan agregat halus seperti kadar air, kadar lumpur, berat jenis, dan analisa saringan. Setelah itu dilakukan perencanaan *mix design* antara semen, air, agregat kasar, agregat halus, remah karet dan abu terbang. Komposisi variasi mix campuran beton dapat dilihat pada Tabel 3. Beton kemudian dicampur dan dilakukan uji slump sebelum dimasukkan kedalam cetakan. Superplasticizer ditambahkan sebesar 1,25%

dari berat semen untuk meningkatkan kemampuan kerja campuran beton. Setelah itu benda uji dilakukan perawatan perendaman didalam air selama 28 hari pada suhu ruang. Benda uji kuat tekan adalah silinder 105x210 mm. Pengujian kuat lentur menggunakan balok dengan ukuran 150x150x600 mm. Sampel dibuat rangkap tiga yang digunakan untuk setiap variasi. Uji kuat tekan dan kuat lentur dilakukan sesuai SNI 1974:2011 dan SNI 4431:2011. Adapun set-up pengujian untuk kuat tekan dan kuat lentur dapat dilihat pada Gambar 2.

Tabel 2. Parameter penelitian

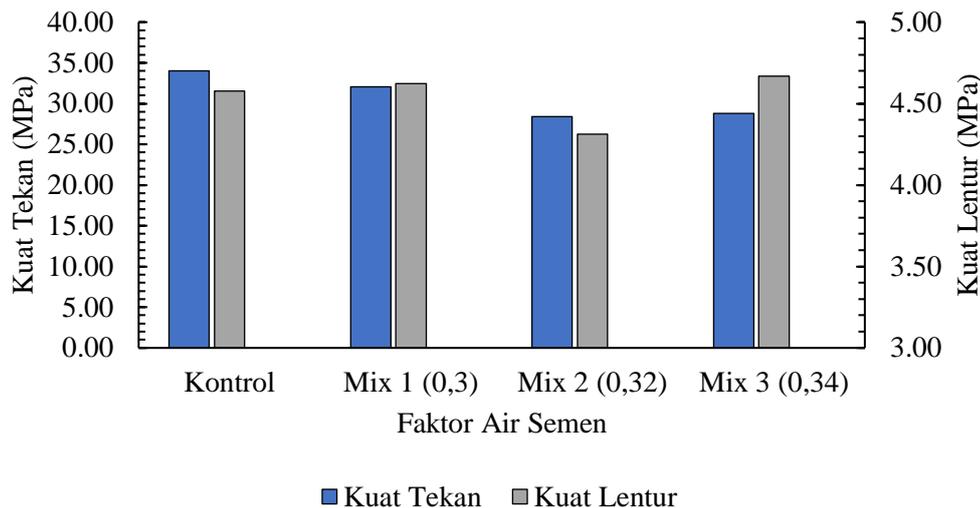
Mix	FAS	Remah Karet	FABA	Perlakuan
Kontrol	0.30	0%	0%	disaring
1	0.30	5%	10%	disaring
2	0.32	5%	10%	disaring
3	0.34	5%	10%	disaring
4	0.30	0%	10%	disaring
5	0.30	10%	10%	disaring
6	0.30	5%	0%	disaring
7	0.30	5%	5%	disaring
8	0.30	5%	10%	tidak disaring
9	0.30	5%	10%	serat



Gambar 2. Set-up pengujian (a) kuat tekan (b) kuat lentur

Tabel 3. Komposisi variasi mix campuran beton

Mix	Agregat Kasar (kg)	Agregat Halus (kg)	Semen PCC (kg)	Air (kg)	Remah Karet (kg)	FABA (kg)	Super-plasticizer (kg)	Slump (mm)
Kontrol	63,42	41,47	48,89	15,89	0,00	0,00	0,61	230
1	63,42	41,47	48,89	15,89	2,07	4,89	0,61	65
2	63,42	44,03	45,84	15,89	2,20	4,58	0,57	80
3	63,42	46,29	43,14	15,88	2,31	4,31	0,54	110
4	63,42	41,47	48,89	15,89	0,00	4,89	0,61	100
5	63,42	41,47	48,89	15,89	4,15	4,89	0,61	30
6	63,42	41,47	48,89	15,89	2,07	0,00	0,61	Flow
7	63,42	41,47	48,89	15,89	2,07	2,44	0,61	180
8	63,42	41,47	48,89	15,89	2,07	4,89	0,61	35
9	63,42	41,47	48,89	15,89	2,07	4,89	0,61	30



Gambar 3. Pengaruh faktor air semen terhadap kuat tekan dan kuat lentur.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Faktor Air Semen

Pada Gambar 3 dapat dilihat pengaruh faktor air semen terhadap hasil pengujian kuat tekan dan kuat lentur beton campuran remah karet dan FABA pada umur 28 hari.

Setiap mix menghasilkan nilai kuat tekan dan kuat lentur yang berbeda. Kuat tekan mix 1 lebih kecil 5,70% dari campuran kontrol. Sedangkan, kuat lentur mix 1 meningkat sebesar 0,97% dari mix kontrol. Mix 2 memperlihatkan penurunan nilai kuat tekan dan kuat lentur dari mix kontrol dan mix 1. Namun pada mix 3 kuat tekan dan kuat lentur mengalami peningkatan kembali dari mix 2, terutama pada kuat lentur yang memiliki nilai lebih tinggi daripada mix kontrol dan mix 1. Penurunan faktor air semen mengurangi porositas kapiler di *Interfacial Transition Zone* (ITZ) atau zona transisi antarmuka sehingga ikatan antara pasta dan butiran agregat lebih padat yang membuat kinerja beton mengalami peningkatan (Piasta dan Zarzycki, 2017). Berdasarkan hasil pengujian komposisi campuran remah karet dan FABA harus pada kadar yang tepat agar dapat menghasilkan campuran dengan ikatan yang baik. Beton mix 1 memiliki campuran yang paling proposional daripada mix 2 dan mix 3 dengan nilai faktor air semen sebesar 0,3. Nilai kuat lentur pada mix 1 telah memenuhi persyaratan spesifikasi umum 2018 untuk pekerjaan jalan dan jembatan dengan nilai minimum 4,50 MPa serta nilai kuat tekan memiliki nilai yang lebih kecil 5,70%

terhadap mix kontrol dibandingkan dengan mix 2 dan mix 3 yang masing-masing lebih kecil 16,39% dan 15,34%.

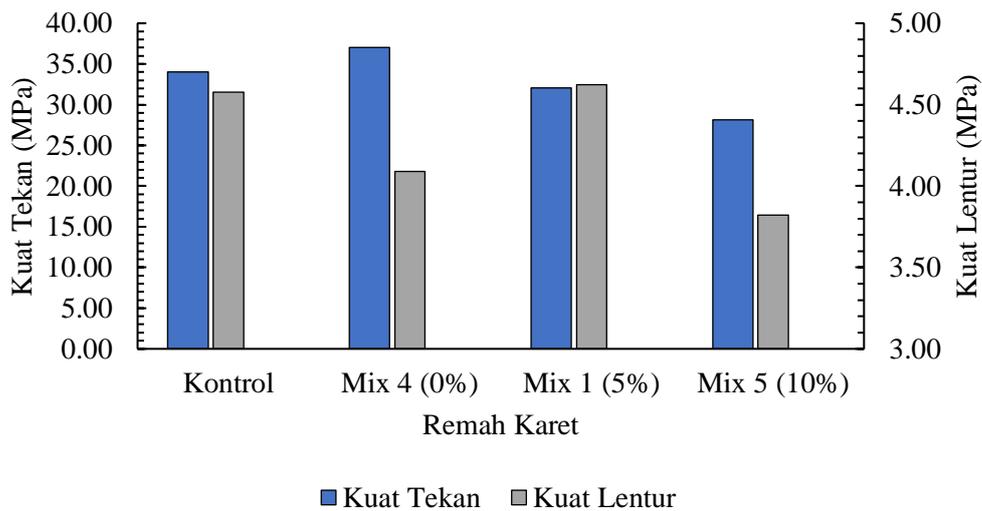
Pengaruh Remah Karet

Gambar 4 memperlihatkan pengaruh remah karet untuk kuat tekan dan kuat lentur beton campuran remah karet dan FABA. Secara umum kuat tekan mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya remah karet dalam campuran beton namun berbeda dengan kuat lentur mengalami fluktuasi nilai yang cukup signifikan terhadap penambahan remah karet. Pada mix 4 nilai kuat tekan mengalami peningkatan sebesar 8,85% dari campuran beton kontrol namun kuat lentur mengalami penurunan yang relatif besar yaitu 10,67%. Beton mix 1 dengan kadar remah karet sebesar 5% memiliki nilai kuat tekan dan kuat lentur dengan batas yang tidak terlalu jauh dari beton campuran kontrol sedangkan beton campuran mix 5 pada kadar remah karet 10% memiliki penurunan yang lebih besar daripada campuran kontrol, mix 4 dan mix 1. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan kadar remah karet pada campuran beton sangat berpengaruh terhadap kuat tekan terutama pada kuat lentur. Kadar remah karet yang semakin meningkat mengakibatkan adanya retakan dari ikatan yang lemah antara bahan penyusun campuran beton (Bisht dan Ramana, 2017). Namun dengan kadar yang tepat remah karet terbukti dapat meningkatkan kuat lentur beton, seperti pada mix 1 dengan kadar remah karet sebesar 5% terdapat peningkatan nilai kuat lentur sebesar 0,97% dari campuran kontrol.

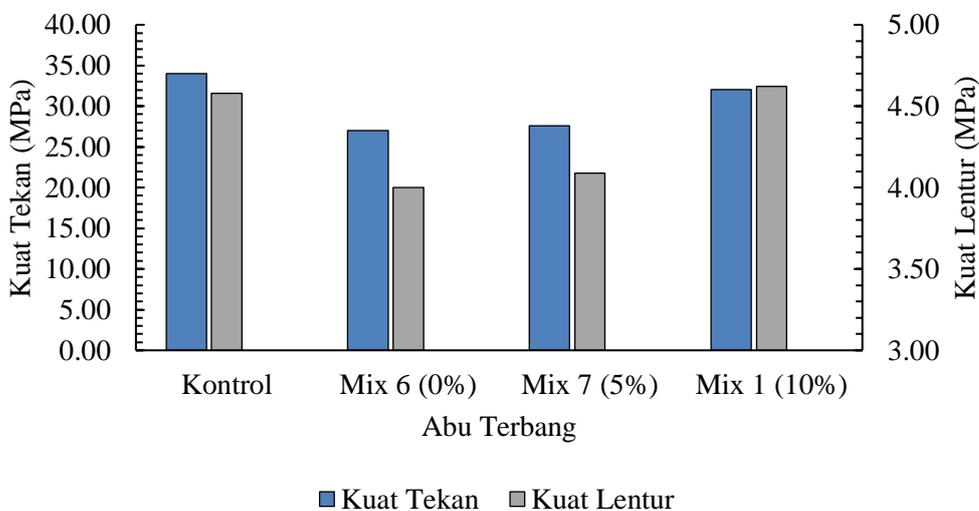
Pengaruh FABA

Hasil pengujian kuat tekan dan kuat lentur beton terhadap pengaruh FABA dapat dilihat pada Gambar 5. Hasil pengujian menunjukkan penambahan kadar FABA dalam campuran beton meningkatkan nilai kuat tekan dan kuat lentur. Pada campuran mix 6 dan 7 walaupun mengalami peningkatan tetapi nilai kuat tekan dan kuat lentur masih berada dibawah campuran kontrol dan mix 1. Selain itu campuran mix 6 dan 7 nilai kuat tekan dan kuat lentur belum memenuhi persyaratan sesuai dengan spesifikasi umum 2018 untuk pekerjaan jalan dan jembatan. Hal ini dikarenakan kadar FABA dalam campuran komposisi beton

belum mencapai optimal. FABA yang bersifat pozzolan bereaksi dengan kalsium hidroksida selama proses hidrasi semen membentuk kalsium silikat hidrat (CSH) dan kalsium aluminat hidrat (CAH) membuat matriks lebih solid sehingga kekuatan dan daya tahan lebih baik daripada campuran beton biasa (Shaikh dan Supit, 2015). Berdasarkan hasil penelitian pada mix 1 dengan kadar FABA 10% nilai kuat tekan dan nilai kuat lentur telah memenuhi nilai yang dipersyaratkan. Hal ini juga menunjukkan bahwa dengan kadar FABA 10% merupakan komposisi campuran yang optimum sebagai penambahan FABA dalam lekatan antara bahan penyusun beton.



Gambar 4. Pengaruh remah karet terhadap kuat tekan dan kuat lentur.



Gambar 5. Pengaruh FABA terhadap kuat tekan dan kuat lentur

Tabel 4. Rangkuman variabel dan nilai kuat tekan serta kuat lentur dibandingkan dengan spesifikasi Bina Marga 2018

Mix	FAS	Remah Karet	FABA	Perlakuan	Kuat Tekan	Kuat Lentur	Kuat Tekan Berdasarkan Bina Marga 2018	Kuat Lentur Berdasarkan Bina Marga 2018
Kontrol	0,30	0%	0%	Disaring	34,01	4,58	√	√
1	0,30	5%	10%	Disaring	32,07	4,62	√	√
2	0,32	5%	10%	Disaring	28,43	4,31	-	-
3	0,34	5%	10%	Disaring	28,79	4,67	-	√
4	0,30	0%	10%	Disaring	37,02	4,09	√	-
5	0,30	10%	10%	Disaring	28,12	3,82	-	-
6	0,30	5%	0%	Disaring	27,02	4,00	-	-
7	0,30	5%	5%	Disaring	27,58	4,09	-	-
8	0,30	5%	10%	Tidak Disaring	29,59	4,73	-	√
9	0,30	5%	10%	Serat	27,84	4,58	-	√

Campuran Beton Optimum

Beton campuran remah karet dan FABA harus memiliki campuran yang proposional agar dapat meningkatkan kinerja dan durabilitas beton. Karakteristik remah karet yang memiliki fleksibilitas yang tinggi berpotensi untuk meningkatkan kuat lentur beton akan tetapi remah karet mengakibatkan pori-pori dalam beton sehingga membutuhkan suatu bahan yang dapat memperbaiki kelemahan dari remah karet tersebut. FABA yang memiliki sifat pozzolan membuat campuran beton menjadi lebih padat sehingga berpotensi menutupi pori-pori yang disebabkan oleh remah karet. Untuk itu dilakukan berbagai macam variasi agar diperoleh beton campuran optimum remah karet dan FABA sehingga memperoleh hasil kuat tekan dan kuat lentur sesuai dengan spesifikasi umum 2018 untuk pekerjaan jalan dan jembatan.

Tabel 4 memperlihatkan kuat tekan dan kuat lentur dibandingkan persyaratan kuat lentur minimum harus mencapai 4,5 MPa pada umur 28 hari. Pada mix 8 dan 9 menunjukkan hasil pengujian kuat lentur memenuhi persyaratan namun nilai kuat tekan jauh lebih kecil dari nilai kuat tekan rencana 35 MPa. Mix 3 memiliki karakteristik yang sama dengan mix 8 dan 9 sedangkan pada mix 4 menghasilkan nilai kuat tekan diatas nilai kuat tekan rencana akan tetapi nilai kuat lentur tidak memenuhi persyaratan. Sehingga dari semua variasi, campuran yang paling optimum adalah campuran mix 1 dengan variasi faktor air semen 0,3, remah karet 5% dan FABA 10%. Pada campuran mix 1 nilai kuat tekan dan kuat lentur telah memenuhi

persyaratan dengan nilai masing-masing 32,07 MPa dan 4,62 MPa. Berdasarkan studi parametrik, mix 1 merupakan campuran yang proposional antara remah karet dan FABA sehingga bahan penyusun beton memiliki ikatan yang baik dalam proses pembuatan beton.

SIMPULAN

Pada penelitian ini dilakukan studi parametrik untuk mendapatkan beton dengan campuran remah karet dan FABA yang proporsional untuk material perkerasan kaku. Delapan campuran beton dengan berbagai variasi parameter, yaitu nilai faktor air semen, persentase remah karet untuk memperoleh campuran optimum agar dapat meningkatkan kinerja dan durabilitas beton dan memenuhi kekuatan lentur sebesar 4,50 MPa sesuai dengan spesifikasi umum 2018 untuk pekerjaan jalan dan jembatan pada umur 28 hari. Pada penelitian ini studi parameterik dilakukan pada sebanyak delapan campuran beton tanpa remah karet dan FABA dengan berbagai variasi. Parameter penelitian adalah faktor air semen, persentase remah karet, persentase FABA dan perlakuan remah karet. Berdasarkan studi parametrik dapat disimpulkan bahwa beton mix 1 dengan variasi faktor air semen 0,3, remah karet 5% dan FABA 10% dapat memenuhi persyaratan spesifikasi Jalan dan Jembatan Bina Marga 2018 karena memiliki kuat tekan dan kuat lentur sebesar 32,07 MPa dan 4,62 MPa.

DAFTAR PUSTAKA

Abdurrahman, H., Wibisono G., Qoryati M., Sitompul, I.R., dan Olivia, M. 2019.

- Mechanical Properties of Crumb Rubber-Rice Husk Ash Concrete as a Rigid Pavement Material. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 615, 012112.
- ASTM C618. 2003. *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. ASTM International. West Conshohocken, PA, USA.
- Badan Pusat Statistik. 2018. *Perkembangan Jumlah Kendaraan Bermotor Menurut Jenis*. Badan Pusat Statistik. Indonesia.
- Bina Marga 2018. 2018. *Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Jalan dan Jembatan*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. Jakarta.
- Bisht, K., dan Ramana, P.V. 2017. Evaluation of Mechanical and Durability Properties of Crumb Rubber Concrete. *Construction and Building Materials* 155, p. 811–817.
- Mohammed, B.S. 2010. Structural Behavior and m-k Value of Composite Slab Utilizing Concrete Containing Crumb Rubber. *Construction and Building Materials* 24, 7. p 1214-1221.
- Thomas, B.S., Gupta, R.C., Kalla, P., dan Cseteneyi, L. 2014. Strength, Abrasion and Permeation Characteristics of Cement Concrete Containing Discarded Rubber Fine Aggregates. *Construction and Building Materials* 59, p. 204–212.
- Liu F., Zheng, W., Li, L., Feng, W., dan Ning, G. 2013. Mechanical and Fatigue Performance of Rubber Concrete. *Construction and Building Materials* 47, p. 711–719.
- Hardjito, D. 2001. *Abu Terbang Solusi Pencemaran Semen*. Sinar Harapan No 3950. Jakarta.
- Kardos, A.J., dan Durham, S.A. 2015. Strength, Durability, and Environmental Properties of Concrete Utilizing Recycled Tire Particles for Pavement Applications. *Construction and Building Materials* 98, p. 832–845.
- Li, L., Ruan, S., dan Zeng, L. 2014. Mechanical Properties and Constitutive Equations of Concrete Containing a Low Volume of Tire Rubber Particles. *Construction and Building Materials* 70, p. 291–308.
- Mardiono. 2011. *Pengaruh Pemanfaatan Abu Terbang (Fly Ash) dalam Beton Mutu Tinggi*. Skripsi Sarjana Teknik Sipil. Universitas Gunadarma Jakarta.
- Piasta, W., dan Zarzycki, B. 2017. The Effect of Cement Paste Volume and w/c Ratio on Shrinkage Strain, Water Absorption and Compressive Strength of High Performance Concrete. *Construction and Building Materials* 140, p. 395–402.
- Saha, A.K. 2017. Effect of Class F Fly Ash on the Durability Properties of Concrete. *Sustainable Environment Research* 28, p. 25-31.
- Salain, I.M.A.K. 2009. Pengaruh Jenis Semen dan Jenis Agregat Kasar terhadap Kuat Tekan Beton. *Teknologi dan Kejuruan* 32, p. 63-70.
- Sgobba, S., Borsa, M., Molfetta, M., dan Marano, G.C. 2015. Mechanical Performance and Medium Term Degradation of Rubberised Concrete. *Construction and Building Materials* 98, p. 820–831.
- Shaikh, F.U.A., dan Supit S.W.M. 2015. Compressive Strength and Durability Properties of High Volume Fly Ash (HVFA) Concretes Containing Ultrafine Fly Ash (UFFA). *Construction and Building Materials* 82, p. 192–205.
- SNI Pd T-14-2003. 2003. *Perencanaan Perkerasan Jalan Beton Semen*. Badan Standarisasi Indonesia. Bandung.
- SNI 1974:2011. 2011. *Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- SNI 4431:2011. 2011. *Cara Uji Kuat Lentur Beton Normal dengan Dua Titik Pembebanan*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.