

POTENSI PEMANFAATAN BAHAN LIMBAH *FLY ASH* DAN *BOTTOM ASH* UNTUK LAPISAN FONDASI JALAN SEMEN (*POTENTIAL FOR UTILIZATION OF FLY ASH AND BOTTOM ASH WASTE MATERIALS FOR CEMENT ROAD FOUNDATION*)

Gugun Gunawan¹⁾, Nono²⁾

^{1), 2)} Pusat Litbang Jalan dan Jembatan

^{1), 2)} Jl. A.H. Nasution No. 264, Bandung, 40294

e-mail¹⁾ gunawan3140@gmail.com; ²⁾ nono.bbpj@pusjatan.go.id

Diterima: 10 April 2019; direvisi: 10 Juni 2019; disetujui: 20 Juni 2019

ABSTRAK

Keberadaan infrastruktur jalan memiliki fungsi yang sangat penting dalam menunjang aktivitas, baik ekonomi, sosial, pendidikan maupun pariwisata. Pembangunan infrastruktur jalan di Indonesia terutama 4 tahun terakhir semakin meningkat. Dalam pelaksanaannya ditemukan kendala, diantaranya ketersediaan material standar semakin berkurang, sedangkan kebutuhan pada setiap tahunnya untuk diseluruh wilayah Indonesia terus meningkat. Ketersediaan material limbah merupakan permasalahan lain, yang selama ini belum dapat digunakan sebagai solusi untuk mengatasi keterbatasan bahan jalan tersebut karena belum adanya acuan yang telah dibakukan. Makalah ini menjelaskan potensi pemanfaatan bahan limbah FABA untuk lapis fondasi jalan semen. Penelitian dilakukan di laboratorium dengan sumber FABA dari PLTU Pangkal Pinang, Ombilin (unit 1 dan unit 2) dan Sibolga. Hasil pengujian FABA dari Sibolga termasuk Tipe F dengan CaO <10% dan LoI = 4,27%, bila distabilisasi semen memberikan kontribusi terhadap kekuatan atau nilai kuat tekan sebesar 33 kg/cm². Adapun FABA dari Pangkal Pinang dengan tipe C dengan CaO < 10%, LoI = 0,68% memiliki nilai kuat tekan= 19 kg/cm² dan FABA dari Ombilin, baik Ombilin Unit 1 maupun Unit 2 termasuk tipe F dengan CaO < 10% dan LoI = 13,64%, hasil pengujian kuat tekannya sekitar 8 kg/cm² dengan stabilisasi masing masing 8% semen. Dengan demikian campuran FABA dengan komposisi 20% FA, dan 80% BA, tipe F, dan LoI < 12%, jika ditambah semen 8% dapat digunakan sebagai lapis fondasi jalan semen yang memenuhi persyaratan spesifikasi khusus lapis fondasi jalan semen, dengan nilai kuat tekan minimal 25 kg/cm².

Kata Kunci: Pemanfaatan limbah, FA, BA, lapis fondasi, jalan semen

ABSTRACT

The road infrastructure has an important role in economic, social, educational and tourism activities. The construction of road infrastructure in Indonesia since the last 4 years has increased. In its implementation, problems were found, including the availability of standard materials and decrease of asphalt import, while the need for regional development in Indonesia is increasing. The availability of waste material is another problem, which has not been able to be used as a solution to overcome the limitations of road materials due to the absence of standardized reference. This paper describes a study of the potential utilization of FABA for foundation layers. Research was carried out at the laboratory with FABA sources from the Pangkal Pinang, Ombilin (units 1 and unit 2) and Sibolga PLTU. The FABA test results from Sibolga include Type F with CaO <10%, LoI=4,27% so that when cement stabilization contributes to the strength or the value of compressive strength 33 kg/cm². As for FABA from Pangkal Pinang type C with CaO <10%, LoI=0,68% and compressive strength value of 19 kg/cm² and FABA from Ombilin, both Unit 1 and Unit 2 Ombilin including type F with CaO <10% and LoI=13,64%, the compressive strength test results were around 8 kg/cm² in each stabilization with 8% cement. The mixture of FABA with a composition of 20% FA, 80% BA, type F, and LoI <12%, with 8% cement can be used as foundation layer that meets the requirements of special specifications with a minimum compressive strength value of 25 kg/cm².

Keywords: waste utilization, FA, BA, foundation layer, cement road

PENDAHULUAN

Dalam bidang jalan kebutuhan akan kegiatan rehabilitasi semakin meningkat, seiring dengan meningkatnya kerusakan jalan akibat beban lalu lintas. Dengan bertambahnya kebutuhan terhadap rehabilitasi berdampak terhadap kebutuhan ketersediaan sumber daya alam yang semakin menipis, maka metode rehabilitasi jalan yang lebih efektif dan efisien harus didapatkan. Salah satu kegiatan pemanfaatan limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) sebagai material jalan menjadi salah satu alternatif yang perlu dikembangkan dengan tetap memperhatikan aspek keselamatan dan keamanan lingkungan hidup.

Pemanfaatan limbah B3 dalam bidang perkerasan jalan sangat didorong oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) sejak berlakunya Peraturan Pemerintah No.101 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah B3. Pengkajian dari aspek lingkungan hidup sudah dilakukan khususnya dalam skala laboratorium terhadap kandungan logam B3 dan karakteristik sifat racunnya pada lingkungan.

Pemanfaatan bahan limbah yang merupakan sisa hasil dari produksi, diharapkan dapat dipergunakan sebagai bahan material perkerasan jalan. Pengujian terhadap material-material tersebut perlu dilakukan agar dapat digunakan sebagai material jalan yang tidak hanya memenuhi persyaratan, akan tetapi juga memiliki kinerja yang baik, sebagai usaha pemanfaatan dari bahan limbah atau bahan sisa dalam bidang jalan.

Salah satu bahan limbah yang berupa *FA* (*FA*) dan *BA* (*BA*), memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan jalan. Material *FA* umumnya bersifat pozzolan, adapun yang dimaksud dengan bahan pozzolan adalah bahan yang mempunyai kadar CaO rendah, sehingga tidak mempunyai kemampuan pengikat. Tetapi bila campuran untuk stabilisasi dicampur dengan semen portland kemudian ditambahkan air bahan akan bersifat *pozzolanic* (Ratmayana 2003 dan Pangestuti 2011) sebagai lapisan fondasi semen untuk jalan. Dalam aplikasinya bahan *FA* dapat menggantikan atau mengurangi penggunaan sebagian dari semen portland dalam campuran (Yamin dan Haliema 2017). Material *BA* yang mempunyai gradasi lebih kasar dari *FA* dan punya sifat fisik keras yang merupakan hasil pembakaran sekitar 1400 °C,

diperkirakan bila digunakan dengan *FA*, akan memberikan kemampuan menambah daya dukung campuran *FABA*.

Sementara itu diperkirakan limbah *FA* dan *BA* tahun 2019 mencapai 9,7 juta ton dari PLTU di Indonesia dan tahun 2024 dengan program 35 MW akan dihasilkan 13,7 juta ton pertahun (ESDM 2018). Sementara data yang dikeluarkan oleh KLHK diketahui bahwa setiap harinya dihasilkan limbah *FA* sekitar 1.505.008 Ton dan *BA* 464.965 Ton. KLHK dalam rangka pengelolaan limbah B3, mendorong pemanfaatan limbah B3 khususnya dalam aspek infrastruktur ke PU-an (KLHK 2018).

Persyaratan spesifikasi khusus interim lapis fondasi jalan semen dengan material alam local, SKh-1.5.12, telah diberlakukan di lingkungan Bina Marga. Pada makalah ini akan disampaikan hasil kajian lapis fondasi jalan semen dengan memanfaatkan material limbah B3 *FABA*, sehingga diharapkan dapat mengurangi ketergantungan terhadap material standar jalan, dan pencemaran lingkungan dapat dikurangi.

KAJIAN PUSTAKA

Sifat *FABA*

Bahan bakar batu bara di Indonesia banyak digunakan oleh industri dan Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Hal ini disebabkan adanya kecenderungan kenaikan harga minyak diesel industri, sehingga perusahaan-perusahaan beralih menggunakan batu bara sebagai bahan bakar dalam menghasilkan steam (uap). Hasil Kajian yang dilakukan oleh PJB Paiton menyebutkan bahwa hasil pembakaran batu bara, menghasilkan limbah abu yang disebut dengan *FA* dan *BA* (5-10%). Persentase abu (*FA* dan *BA*) yang dihasilkan adalah *FA* (80-90%) dan *BA* (10-20%) (Sumber PJB Paiton).

Sesuai ASTM C-618 dan SNI S-15-1990-F bahwa untuk *FA* dibagi menjadi 3 tipe, yaitu:

1. Tipe N: Pozzolan alam atau hasil pembakaran pozzolan alam (tanah diatomic, opaline cherts dan shales, tuff dan abu vulkanik atau pumicite).
2. Tipe C: *FA* yang mengandung CaO (Calcium Oxide) di atas 10% (pembakaran lignit atau sub-bitumen batu bara).

3. Tipe F: *FA* yang mengandung CaO kurang dari 10% (pembakaran anthacite atau bitumen batu bara).

FA memiliki sifat pozzolan yang terdiri dari unsur-unsur silikat dan atau aluminat yang reaktif. Komponen masing-masing jenis *FA* sedikit berbeda dengan komposisi kimia semen. Tabel 1 berikut ini menjelaskan komposisi kimia *FA* dan semen hasil kajian yang dilakukan oleh Andoyo (2006).

Tabel 1. Komposisi Kimia *FA*

No	Komposisi Kimia	Jenis <i>FA</i>			semen
		F	C	N	
1	SiO ₂	51,90	50,90	58,20	22,60
2	Al ₂ O ₃	25,80	15,70	18,40	4,30
3	Fe ₂ O ₃	6,98	5,80	9,30	2,40
4	CaO	8,70	24,30	3,30	64,40
5	MgO	1,80	4,60	3,90	2,10
6	SO ₂	0,60	3,30	1,10	2,30
7	N ₂ O dan K ₂ O	0,60	1,30	1,10	0,60

Sumber: Andoyo (2006)

Sementara itu menurut Joseph Davidovits (2011), rentang kandungan komposisi kimia dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Rentang komposisi kimia *FA*

No	Komposisi Kimia	Jenis F	Jenis C
1	SiO ₂	47,2 - 54	18 -24,8
2	Al ₂ O ₃	27,7-34,9	12,1 - 14,9
3	Fe ₂ O ₃	3,6 - 11,5	6,3 - 7,8
4	CaO	1,3 - 10	13,9 - 49
5	MgO	1,4 - 2,5	1,9 -2,8
6	SO ₂	0,1 - 0,9	5,5 - 9,1
7	Na ₂ O	0,2 - 1,6	0,5 - 2
8	K ₂ O	0,7 - 5,7	1 - 3

Adapun menurut ASTM C618 penggolongan type F atau type C disamping kandungan CaO adalah jumlah kandungan mineral oksida (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) untuk type F minimum 70% dan type C minimum 50%. Djiwantoro (2001) menjelaskan, sebenarnya *FA* tidak memiliki kemampuan mengikat seperti halnya semen, namun dengan kehadiran air dan ukurannya yang halus, oksida silikat yang dikandung di dalam *FA* akan bereaksi secara kimia dengan kalsium hidroksida yang terbentuk dari proses hidrasi semen dan akan menghasilkan zat yang memiliki kemampuan yang mengikat. Faktor-faktor utama yang mempengaruhi dalam

kandungan mineral *FA* dari batu bara (Universitas Mulawarman, 2018) adalah:

1. kandungan kimia batu bara
2. sistem pembakaran batu bara
3. campuran yang digunakan seperti minyak untuk stabilisasi nyala api dan bahan untuk pengendalian korosi.
4. mineral-mineral pengotor bawaan yang terdapat pada batu bara.

Proses pembakaran batu bara, secara umum menghasilkan 55%-85% berupa *FA* dan sisanya berupa *BA*. *FA* dan *BA* memiliki perbedaan karakteristik serta pemanfaatannya. Biasanya untuk *FA* banyak dimanfaatkan dalam perusahaan industri karena *FA* ini mempunyai sifat *pozzolanic*, sedangkan untuk *BA* sangat sedikit pemanfaatannya dan biasanya digunakan sebagai material pengisi.

Salah satu contoh *BA* limbah dari PLTU Paiton adalah memiliki kandungan kimia, disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Sifat Kimia rata-rata *BA* PLTU Paiton

Parameter	Proporsi (% w)
Si	24,10
Al	6,80
Fe	33,59
Ca	26,30

Sumber: Faridah (2012)

Karakteristik *FA* yang paling relevan untuk digunakan khususnya untuk campuran beton adalah:

- ✓ Kehilangan pengapian (*LoI*),
- ✓ Kehalusan,
- ✓ Komposisi kimia dan
- ✓ Keseragaman

Selain itu sesuai ASTM C-618 sifat *FA* dibedakan berdasarkan persyaratan sifat fisik dan sifat kimia.

Pemanfaatan *FABA* untuk Bahan Perkerasan Jalan

Berdasarkan FHWA (2003) bahwa *FA* dapat dimanfaatkan diantaranya adalah untuk beton semen, stabilisasi lapis fondasi agregat, timbunan struktural, stabilisasi tanah dan sebagai bahan pengisi campuran beraspal. Penelitian pemanfaatan *FA* untuk beton dilakukan juga oleh Yatti S Hidayat (1993) mutu beton abu terbang pada lingkungan pantai dan laut, dan Endah (2011).

FA digunakan dalam campuran beton untuk meningkatkan kinerja beton. Semen Portland mengandung sekitar 60% sampai 65 % kapur (Wuryati dan Candra 2001) . Kapur ini menjadi bebas dan tersedia selama proses hidrasi. Bila menggunakan abu terbang dengan kapur maka akan bereaksi secara kimia untuk membentuk bahan tambahan semen dan memperbaiki sifat beton. Selain itu *FA* dinilai dapat meningkatkan kualitas bangunan dalam hal kekuatan, kekedapan air, ketahanan terhadap sulfat dan kemudahan dalam pengerjaan (Sofwan Hadi 2000).

Manfaat penggunaan *FA* pada campuran beton adalah:

1. Meningkatkan kekuatan dan workabilitas serta daya tahan
2. Mengurangi panas hidrasi dan permeabilitas serta susut
3. Meningkatnya ketahanan terhadap efek sulfat dan reaktivitas alkali-silika (ASR)
4. Menurunkan biaya

Penggunaan *FA* untuk stabilisasi lapis fondasi agregat bilamana *FA* dan kapur dapat dikombinasikan dengan agregat untuk menghasilkan lapis fondasi yang stabil. Lapis fondasi jalan ini disebut sebagai *pozzolanic-stabilized mixture* (PSMs). Tipikal penggunaan *FA* dapat bervariasi dari 12% sampai 14% dengan kandungan kapur antara 3% sampai 5%. Semen Portland juga bisa digunakan sebagai pengganti kapur untuk meningkatkan kekuatan awal. Manfaat penggunaan *FA* untuk stabilisasi fondasi antara lain adalah:

1. Penggunaan bahan lokal
2. Menyediakan campuran kuat dan tahan lama
3. Menurunkan biaya
4. Meningkatkan efisiensi energi
5. Cocok untuk menggunakan bahan dasar daur ulang
6. Dapat menggunakan peralatan konvensional

FA dapat digunakan sebagai bahan timbunan pilihan. Bila *FA* dipadatkan bertahap maka merupakan timbunan struktural yang mampu mendukung bangunan jalan raya atau bangunan lainnya. Manfaat penggunaan *FA* untuk timbunan struktural adalah:

1. Menghemat biaya
2. Menghilangkan kebutuhan untuk pengadaan bahan
3. Dapat ditempatkan di atas tanah dengan kekuatan rendah

4. Kemudahan penanganan dan pemadatan mengurangi waktu konstruksi dan biaya peralatan.

Upaya lain dalam pemanfaatan *FA* adalah untuk stabilisasi tanah. Manfaat penggunaan *FA* untuk perbaikan tanah antara lain adalah:

1. Menghilangkan kebutuhan akan bahan dari luar
2. Mempercepat konstruksi dengan memperbaiki tanah dasar yang terlalu basah atau tidak stabil
3. Dengan memperbaiki kondisi tanah dasar, meningkatkan penghematan biaya melalui pengurangan ketebalan perkerasan yang dibutuhkan
4. Dapat mengurangi atau menghilangkan kebutuhan akan agregat alami yang lebih mahal.

Adapun pemanfaatan *FA* untuk campuran beraspal yaitu digunakan sebagai bahan pengisi dalam aplikasi campuran beraspal. Bahan pengisi meningkatkan kekakuan campuran beraspal, ketahanan *rutting* pada perkerasan, dan durabilitas campuran beraspal dan manfaatnya adalah:

1. Mengurangi potensi pengelupasan aspal karena sifat *FA* yang hidrofobik
2. Dapat menghasilkan biaya yang lebih rendah daripada menggunakan bahan pengisi lainnya

Pemanfaatan *BA* sesuai FHWA (2003) dapat digunakan sebagai bahan pengisi pada campuran beton, seperti untuk mengurangi penggunaan material pasir. Untuk itu, penggunaan *BA* dapat dikombinasikan dengan *FA* dalam pembuatan campuran beton (beton struktur dan beton perkerasan jalan), lapis fondasi agregat, stabilisasi tanah dasar serta untuk perbaikan tanah.

Pemanfaatan limbah *BA* dalam campuran beton telah diteliti, salah satunya oleh Darwis, Soelarso, dan Hidayat (2015), menyatakan bahwa limbah *BA* dapat difungsikan sebagai substitusi agregat halus dalam pembuatan beton, dengan dibersihkan terlebih dahulu untuk menghilangkan kotoran-kotoran organik dan menurunkan kadar karbon. Nilai hasil pengujian pada umur 56 hari menunjukkan hasil rata-rata kuat tekan beton normal (tipe A) sebesar 23,64 MPa. Tipe B mengalami penurunan nilai kuat tekan dari beton normal yaitu sebesar 20,35% dengan nilai kuat tekan

sebesar 18,83 MPa. Beton tipe C menghasilkan peningkatan kuat tekan sebesar 5,09% dari beton normal dengan nilai kuat tekan yang lebih besar diantara tipe lainnya, yaitu sebesar 24,84 MPa. Beton tipe D mengalami penurunan kuat tekan sebesar 3,59% dari beton normal dengan nilai kuat tekan sebesar 22,79 MPa.

Berdasarkan data di atas, maka pemanfaatan *BA* dapat lebih dikembangkan untuk teknologi bahan jalan lainnya.

Kebutuhan Mutu Tanah Timbunan dan Fondasi Agregat Semen

Dalam devisi 3, seksi 3.3 buku spesifikasi umum bidang jalan, yang dimaksud dengan timbunan adalah timbunan biasa, timbunan pilihan dan timbunan pilihan berbutir di atas tanah rawa. Adapun yang dimaksud dengan timbunan pilihan umumnya berupa tanah atau batu atau material lain yang memiliki sifat seperti timbunan biasa dan memiliki sifat-sifat spesifik yang diperlukan sesuai dengan kebutuhan dan peruntukannya. Bila dilakukan pengujian sesuai dengan SNI 03-1744-1989, memiliki *CBR* minimal 10% setelah 4 hari peredaman bila dipadatkan sampai 100% kepadatan kering maksimum sesuai dengan SNI 1742:2008. Pelaksanaan timbunan pada tanah lunak minimal mempunyai daya dukung *CBR* lapangan lebih dari 2% dan apabila memiliki daya dukung < 2%, maka tanah lunak tersebut harus dilakukan stabilisasi atau dipindahkan seluruhnya.

Dalam seksi 5.5 devisi 5 spesifikasi umum 2018 (Bina Marga 2018a) disebutkan lapisan fondasi yang terbuat dari agregat yang distabilisasi dengan semen, di atas tanah dasar yang telah disiapkan. Pelaksanaan pekerjaan tidak boleh dikerjakan pada waktu turun hujan atau ketika kondisi lapangan sedang basah atau becek, baik untuk lapis fondasi agregat semen kelas A (*cement treated base/CTB*) dan lapis fondasi agregat semen kelas B (*cement treated sub-base/CTSB*). Bahan yang digunakan untuk pengerjaan *CTB* dan *CTSB* antara lain semen sesuai SNI 15-2049-2004, Air sesuai SNI 03-6817-2002, agregat sesuai Spesifikasi Umum Bidang Jalan seksi 5.1.

Adapun persyaratan dari kuat tekan (*compressive strength*) untuk *CTB* dan *CTSB*, masing-masing 55 kg/cm² dan 35-45 kg/cm² dalam umur 7 hari. Adapun bila digunakan untuk jalan yang melayani lalu lintas rencana

yang rendah sampai dengan sedang dapat mengacu Spesifikasi Khusus Interim Lapis Fondasi Semen dengan Material Alam Lokal atau SKh-1.5.12 (Bina Marga 2018b). Pada spesifikasi khusus tersebut persyaratan kuat tekan (*compressive strength*) dalam umur 7 hari 25-40 kg/cm².

Prosedur pelaksanaan pembuatan rancangan campuran (*mix design*) *CTB* dan *CTSB* dapat melalui tahapan sebagai berikut :

1. Penentuan kadar air dan kepadatan untuk bahan yang bersangkutan dengan menggunakan paling sedikit empat macam kadar semen (SNI 03-6886-2002), kemudian lakukan penggambaran hasil dari pengujian ini dalam bentuk grafik. Nilai puncak yang terjadi pada setiap kurva menggambarkan hubungan kadar air – kepadatan, dinyatakan sebagai kepadatan kering maksimum (*Maximum Dry Density, MDD*) dan kadar air optimum (*Optimum Moisture Content, OMC*) untuk kadar semen yang digunakan.
2. Data dari *MDD* dan *OMC* yang berupa angka-angka untuk setiap komposisi kadar semen pada Grafik, lalu hubungkan titik-titik pengujian menjadi kurva yang luwes untuk mendapatkan variasi dari *MDD* dan *OMC* dengan bermacam-macam kadar semen.
3. Lakukan pembuatan benda uji untuk pengujian kuat tekan, pada kepadatan dan kadar air atau *MDD* dan *OMC* yang dihasilkan dari tahap (a) di atas.
4. Lakukan perawatan selama 7 hari dan lakukan pengujian benda-benda uji sesuai prosedur dalam SNI 03-6887-2002.
5. Data hasil pengujian benda-benda uji berupa data-data kekuatan dimasukkan pada Grafik.

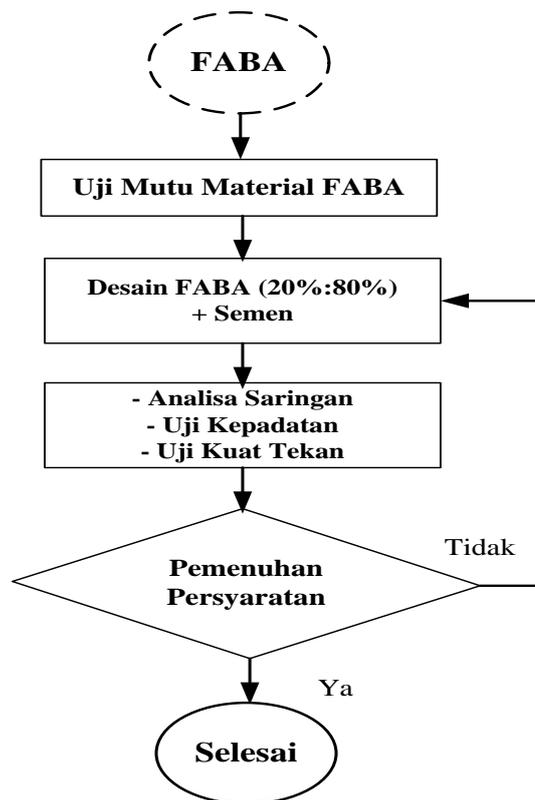
HIPOTESIS

Stabilisasi Limbah B3 *FA* dan *BA* dengan semen dapat digunakan sebagai bahan lapis fondasi jalan semen.

METODOLOGI

Kajian ini dilakukan di laboratorium mencakup pembuatan stabilisasi untuk lapis fondasi jalan menggunakan *FA* dan *BA* dengan semen. Sumber bahan *FA* dan *BA*, dari PLTU, yaitu dari: Sibolga, Pangkal Pinang dan Ombilin PLTU (Unit-1 dan Unit-2)

Adapun tahapan kegiatan pelaksanaan penelitian bahan limbah seperti disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian Pemanfaatan FABA

HASIL DAN ANALISIS

Dalam kajian pemanfaatan FABA sebagai bahan fondasi jalan, terlebih dahulu dilakukan pencampuran FA : BA dengan komposisi perbandingan 20% FA dan 80% BA. Komposisi FA lebih rendah dengan pertimbangan di lapangan penggunaan FA, dibutuhkan untuk campuran semen sesuai SNI 2460:2014. FA dalam kajian ini diharapkan dapat mengurangi penggunaan semen sebagai bahan stabilisasinya, dikarenakan FA mempunyai sifat *pozzolanic*. Pemanfaatan di lapangan limbah FA relatif lebih banyak alternatifnya. Sementara itu pemanfaatan BA di lapangan masih sangat terbatas dan tidak bisa digunakan untuk bahan tambah semen karena tidak punya sifat *pozzolanic*, tetapi BA mempunyai sifat fisik sebagai butiran relatif keras.

Secara umum sifat fisik FABA dari Sibolga, Pangkal Pinang dan Ombilin (unit 1 dan unit 2) disajikan pada Tabel 3, sedangkan sifat kimianya disajikan pada Tabel 4.

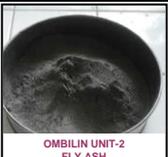
Dari Tabel 3 diketahui dari hasil uji butiran diketahui FA-BA sebagai material halus dengan berat jenis sekitar 2,009 s.d. 2,846 gr/cm³, dan bersifat non plastis. Untuk FA hasil analisa saringan secara umum lolos saringan No.200 diatas 55%, dengan kata lain butirannya sangat halus. Sementara BA cukup bervariasi untuk masing-masing BA dari PLTU Sibolga lolos No.200 sekitar 0,54%, PLTU Pangkal Pinang 0,36%, Ombilin unit 1 dan unit 2 sekitar 15,9%. Adapun untuk berat jenis BA Sibolga sekitar 2,771 gr/cm³ Pangkal Pinang 2,630 gr/cm³ tetapi untuk berat jenis BA dari Ombilin unit 1 dan unit 2 sekitar 2,009 gr/cm³.

Perbedaan berat jenis baik FA atau BA dari PLTU Sibolga dan Pangkal Pinang dengan PLTU Ombilin cukup tinggi lebih dari 0,2 atau sekitar >0,6 umumnya berat jenis yang lebih tinggi secara sifat fisik mempunyai sifat fisik yang lebih keras dibanding dengan yang berat jenisnya lebih rendah. Perbedaan berat jenis dimungkinkan, karena sumber batu bara yang berbeda juga aspek proses pembakaran yang

berbeda. Hal ini sesuai dengan yang disampaikan oleh Syamsudin (2019) dimana

jenis limbah *FABA* sangat tergantung jenis batu bara yang digunakan dan tipe pembangkit.

Tabel 3. Sifat Fisik *FA-BA*

Sumber	<i>FA</i>	<i>BA</i>
1. Sibolga		
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Butiran Lolos No. 80 = 100% No. 100 = 98,3% No. 200 = 61,2% ✓ Berat Jenis = 2,636 ✓ Non Plastis 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Butiran Lolos 3/8 in = 100% No.4 = 99,3% No.200 = 0,54% ✓ Berat Jenis = 2,771 ✓ Non Plastis
2. Pangkal Pinang		
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Butiran Lolos No. 80 = 100% No. 100 = 98,9% No. 200 = 68,9% ✓ Berat Jenis = 2,849 ✓ Non Plastis 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Butiran Lolos 1 in = 100% No.4 = 75,6% No.200 = 0,36% ✓ Berat Jenis = 2,630 ✓ Non Plastis
3. Ombilin Unit 1		
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Butiran Lolos No. 40 = 100% No. 100 = 80,8% No. 200 = 55,8% ✓ Berat Jenis = 2,096 ✓ Non Plastis 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Butiran Lolos 1/2 in = 100% No.4 = 92,8% No.200 = 15,9% ✓ Berat Jenis = 2,009 ✓ Non Plastis
4. Ombilin unit 2		
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Butiran Lolos No. 40 = 100% No. 100 = 90,5% No. 200 = 62,3% ✓ Berat Jenis = 2,012 ✓ Non Plastis 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Butiran Lolos 1/2 in = 100% No.4 = 92,8% No.200 = 15,9% ✓ Berat Jenis = 2,009 ✓ Non Plastis

Tabel 4. Sifat Kimia *FA-BA*

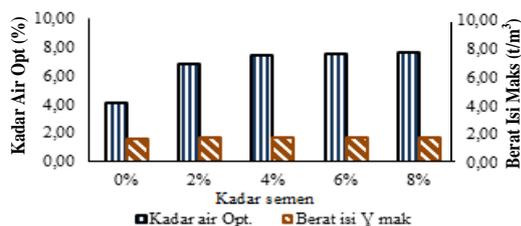
Parameter Kimia	Sibolga		Pangkal Pinang		Ombilin unit 1	Ombilin unit 2	Metode uji
	<i>FA</i> (%)	<i>BA</i> (%)	<i>FA</i> (%)	<i>BA</i> (%)	<i>FA</i> (%)	<i>FA</i> (%)	
SiO_2	61,63	45,59	35,74	50,93	55,32	50,29	Dipijarkan pada 800°C ASTM D 3682-13
Al_2O_3	17,71	27,06	12,01	7,90	22,43	24,66	
Fe_2O_3	9,3	6,87	19,32	4,41	5,12	6,41	
CaO	4,24	6,87	8,49	8,22	1,67	0,78	
MgO	1,98	1,94	1,75	0,56	0,49	0,78	
Na_2O	1,31	4,97	0,25	0,60	-	-	
K_2O	1,28	0,78	0,69	0,52	-	-	
SO_3	2,83	1,73	3,13	1,41	0,24	0,45	ASTM D 5016-08
<i>LoI</i>	4,27	3,35	0,68	0,50	12,96	13,64	ASTM D 7348-13
H_2O	-	-	-	-	26,01	28,90	

Dari Tabel 4. diketahui *FA* yang dihasilkan dari PLTU:

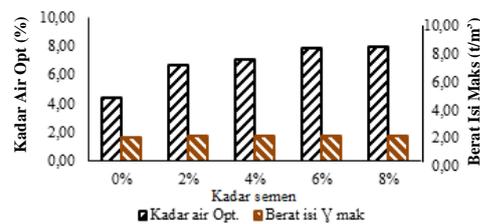
1. Sesuai ASTM C-618 dan SNI S-15-1990-F, maka Tipe *FA* PLTU Sibolga termasuk Tipe F karena mengandung $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$, $\text{CaO} < 10\%$, $\text{SO}_3 < 6\%$ dan *LoI* $< 6\%$;
2. *FA* dari PLTU Pangkal Pinang mengandung $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 < 70\%$, $\text{CaO} < 10\%$ dan $\text{SO}_3 < 5\%$ sehingga sesuai data tersebut termasuk Tipe C;
3. Sifat kimia *FA* dari PLTU Ombilin Unit-1 mengandung mengandung $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$, $\text{CaO} < 10\%$ dan $\text{SO}_3 < 5\%$ sehingga sesuai data tersebut termasuk Tipe F, namun demikian memiliki *LoI* = 12,96% ($\geq 10\%$);

4. Sifat kimia *FA* dari PLTU Ombilin Unit-2 mengandung mengandung $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$, $\text{CaO} = 0,78\%$ ($< 10\%$) dan $\text{SO}_3 < 5\%$, yaitu termasuk Tipe F, namun memiliki *LoI* = 13,64% ($\geq 10\%$);
5. Catatan: Nilai *LoI* maksimum 10% adalah merupakan kebijakan internal yang diterapkan oleh KLHK, sementara menurut Spesifikasi Umum Bidang Jalan 2010 adalah 6% atau 12 % dengan seijin direksi pekerjaan.

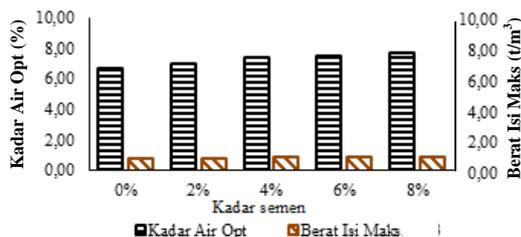
Hasil Pengujian *Proctor* dan kuat tekan *FABA* Sibolga, Pangkal Pinang, Ombilin unit 1 dan unit 2 dengan variasi semen, disajikan pada Gambar 2 dan Gambar 3.



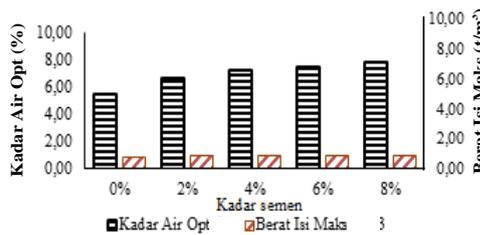
a) Sibolga



b) Pangkal Pinang

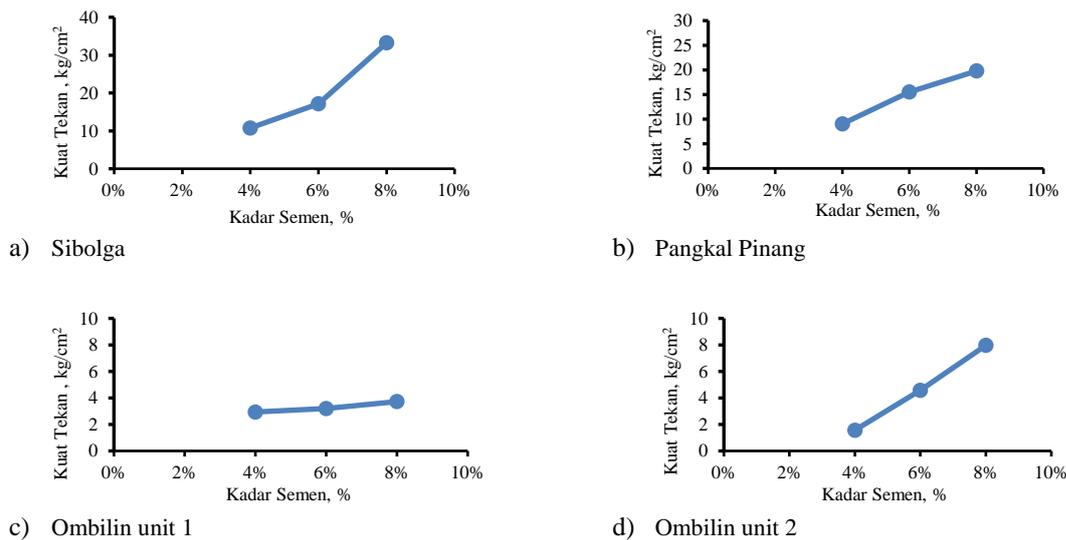


c) Ombilin unit 1



d) Ombilin unit 2

Gambar 2. Hubungan variasi semen dengan kadar air dan kepadatan *FABA*



Gambar 3. Kuat tekan *FABA* setelah di stabilisasi semen

Pada Gambar 2, dari hasil uji Proctor untuk *FABA* Sibolga, Pangkal Pinang, Ombilin unit 1 dan unit 2, dengan penambahan proporsi air peningkatan berat isi maksimum relatif kecil.

Dari Gambar 3, Hasil uji kuat tekan untuk *FABA* Sibolga (a) dengan kadar semen sebanyak 8% dapat memiliki nilai kuat tekan sebesar 33 kg/cm². Sedangkan untuk *FABA* Pangkal Pinang (b) pada kadar semen sebanyak 8% hanya memiliki nilai kuat tekan sebesar 19 kg/cm², sehingga untuk target kuat tekan sebesar 24 kg/cm² diperkirakan semen yang diperlukan sekitar 10%.

Sedangkan untuk *FABA* Ombilin unit 1 (c) meskipun kadar semen sudah sebanyak 8% namun nilai kuat tekan yang diperoleh hanya sebesar 3,75 kg/cm². Hal ini kemungkinan dipengaruhi karena *BA* dan *FA* meskipun masuk Tipe F sesuai ASTM C-618 namun *LoI* dan H₂O yang cukup tinggi. Untuk *FABA* Ombilin unit 2 (d), meskipun kadar semen sudah sebanyak 8% namun nilai kuat tekan yang diperoleh hanya sebesar 8,00 kg/cm².

PEMBAHASAN

Sesuai hasil pengujian Tahap awal, diperoleh bahwa *FABA* dari ketiga sumber Sibolga (S), Pangkal Pinang (PP) dan Ombilin (O) memiliki kontribusi kekuatan campuran yang distabilisasi semen (Gambar 3.), tetapi kecenderungan kekuatan campuran peningkatannya berbeda yaitu untuk masing

masing campuran *FABA* dengan campuran semen 8% nilai kuat tekannya adalah 33 kg/cm² (S), 19 kg/cm² (PP) dan 3,75 kg/cm² (O unit 1) serta 8,00 kg/cm² (O unit 2).

Perbedaan jenis kandungan mineral *FA* untuk sumber dari Sibolga dan Pangkal Pinang dimungkinkan menjadi penyebab perbedaan kekuatan campuran. Dimana mineral SiO₂, Al₂O₃ dan Fe₂O₃ untuk sumber Sibolga >70% sedangkan untuk Pangkal Pinang <70%, yang secara reaksi kimia pozzolan mineral tersebut berperan terjadinya reaksi cementasi atau pematatan. Hal ini menurut Soejono Tjitro dan Hendri dapat disebabkan karena reaksi *pozzolanic* berlangsung sempurna. Reaksi *pozzolanic* adalah reaksi yang terjadi antara kalsium dengan silikat atau aluminat membentuk *cementing agent* (CaSiO₂H₂O dan CaAl₂O₃H₂O). *Cementing agent* ini sifat keras dan kaku. Selain waktu, sempurna tidaknya reaksi *pozzolanic* ditentukan oleh konsentrasi karbonat yang dihasilkan dari reaksi karbonasi. Reaksi karbonasi adalah reaksi antara lempung (CaO) dengan gas karbondioksida CO₂, yang ditunjukkan oleh reaksi berikut:



Kalsium karbonat ini memberikan efek yang lemah dan menghalangi terjadinya reaksi *pozzolanic* yang optimal. Semakin sedikit jumlah CaO berdampak pada kalsium karbonat yang dihasilkan dari reaksi karbonasi semakin sedikit. Hal ini mengakibatkan reaksi *pozzolanic* dapat berlangsung dengan sempurna

dan menghasilkan *cementing agent* dalam jumlah yang cukup. Bila diperhatikan kandungan CaO dari FA Sibolga lebih rendah dari FA Pangkal Pinang.

Perbedaan kekuatan nilai kuat tekan dari stabilisasi FABA dengan semen dari FABA Sibolga dengan FABA dari Ombilin (unit 1 dan unit 2) pada kadar semen yang sama diatas >20 kg/cm² (pada kadar semen 8%). Hal ini dapat dipastikan dikarenakan perbedaan nilai *LoI* dimana *LoI* FABA Sibolga berkisar 4% sementara untuk FABA Ombilin lebih dari 12%, hal ini juga ditunjukkan dengan nilai berat jenis yang cukup jauh sekitar 2,6 untuk Sibolga, dan 2,0 untuk Ombilin.

LoI adalah kandungan karbon dalam abu terbang, diukur dengan menggunakan *Loss Of Ignition Method (LoI)*, yaitu suatu keadaan hilangnya potensi nyala dari abu terbang batu bara. Bila kita hubungkan dengan sifat fisik maka semakin tinggi nilai *LoI* atau kandungan karbon yang berlum terbakar semakin tinggi, maka ikatan yang terjadi antara mineral dalam FABA dengan semen akan semakin lemah karena adanya penghalang karbon, yang menyebabkan campuran yang distabilisasi dengan semen dengan kandungan *LoI* semakin tinggi semakin lemah ikatannya. Dalam SE Menteri PU No.1 2010, disampaikan persyaratan spesifikasi FA adalah maksimum nilai *LoI* adalah 6%.

Memperhatikan nilai kuat tekan yang dicapai dengan penambahan bahan stabilisasi semen 8% maka untuk FABA PLTU Sibolga dengan nilai kuat tekan sebesar 33 kg/cm², menurut spesifikasi khusus interim nomor SKh-1.5.12 tahun 2018, yang ditujukan untuk spesifikasi lapis fondasi semen di lingkungan Bina Marga, memenuhi batas kekuatan yang dipersyaratkan yaitu kekuatan setelah perawatan 7 hari minimum 25 kg/cm² dan maksimum 40 kg/cm². Sementara untuk FABA PLTU Pangkal Pinang bila memperhatikan Gambar 3, maka dengan asumsi penambahan semen akan meningkat secara linier maka akan dicapai pada kadar semen diatas 10%. Adapun untuk FABA dari PLTU Ombilin cukup besar kebutuhan semen ($>20\%$) untuk mencapai nilai kuat tekan yang dipersyaratkan sehingga relatif tidak ekonomis.

Dari hasil kajian FABA yang distabilisasi dengan semen dapat dimanfaatkan sebagai material lapis pondasi jalan. Diharapkan dengan

termanfaatkannya FABA dapat mengurangi ketergantungan terhadap material standar jalan dan pencemaran lingkungan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Hasil pengujian campuran FABA dengan stabilisasi 8% kadar semen dapat disimpulkan:

1. FABA Sibolga dengan FA tipe F, CaO $<10\%$, dan *LoI*=4,27% memberikan kontribusi terhadap kuat tekan bebas sebesar 33 kg/cm².
2. FABA dari Pangkal Pinang dengan FA tipe C, CaO $<10\%$, dan *LoI*=0,68% memiliki nilai kuat tekan 19 kg/cm².
3. Ombilin Unit 1 maupun Unit 2 dengan FA tipe F, CaO $<10\%$, dan *LoI*=13,64%, memberikan kuat tekan sekitar 8 kg/cm².

Dengan demikian, campuran FABA berkomposisi 20% FA dan 80% BA, tipe F, dan *LoI* $<12\%$, jika ditambah semen 8%, maka dapat memenuhi persyaratan SKh-1.5.12 dengan minimal nilai kuat tekan sebesar 25 kg/cm².

FABA PLTU Pangkal Pinang memerlukan kadar semen diatas 10%. Adapun untuk FABA dari PLTU Ombilin dibutuhkan kadar semen yang cukup besar ($>20\%$) sehingga relatif tidak ekonomis.

Saran

Pemanfaatan FA dan BA sebagai lapis fondasi jalan, khususnya yang bersumber dari PLTU Sibolga, untuk mengetahui keandalan terhadap pengaruh lingkungan dan lalu lintas disarankan dilakukan uji coba di lapangan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih diucapkan kepada, Kepala Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan, serta Kepala Balai Perkerasan Jalan yang telah mendukung penelitian pemanfaatan Limbah B3.

DAFTAR PUSTAKA

American Association of State Highway Transportation Officials Standard (AASHTO). 2012. *Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder (AASHTO M320-12)*. Washington DC: AASHTO.

- _____. 2012. *Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design* (AASHTO M323-12). Washington DC: AASHTO.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). 2015. *Standard Specification for Coal FA and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete* (ASTM C618-15). Washington DC: ASTM.
- Andoyo. 2006. "Pengaruh Penggunaan Abu Terbang/Fly Ash Terhadap Kuat Tekan Dan Serapan Air Pada Mortar". Skripsi. Universitas Negeri Semarang.
- Badan Standar Nasional Indonesia (BSN). 2014. *Spesifikasi Abu Terbang Batubara dan Pozolan Alam Mentah atau yang Telah Dikalsinasi untuk Digunakan Dalam Beton* (SNI 2460:2014). Jakarta: BSN.
- Darwis, Z., Soelarso, dan Hidayat H. 2015. "Pemanfaatan Limbah BA Sebagai Substitusi Agregat Halus Dalam Pembuatan Beton". *Jurnal Fondasi*, 4(1): 52-57.
- Syamsudin, Deded P. 2019. Isu dan rencana Pemanfaatan FABA untuk infrastruktur (bahan presentasi), Jakarta 5 maret 2019.
- Direktorat Jenderal Bina Marga (DJBM). 2010. *Spesifikasi Umum Bidang Jalan dan Jembatan, Jakarta*
- _____. 2018a. *Spesifikasi Umum Bidang Jalan dan Jembatan*. Jakarta
- _____. 2018b. *Spesifikasi Khusus Interim Lapis Fondasi Semen dengan Material Alam Lokal (SKh-1.5.12)*. Jakarta
- Pangestuti, Endah Kanti. 2011. *Penambahan Limbah Abu Batu Bara pada Batako Ditinjau Terhadap Kuat Tekan dan Serapan Air*. *Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan* 13(2):161-168.
- Faridah. 2012. Karakterisasi Abu Dasar PLTU Paiton: Pengaruh Perlakuan Magnet, HCl, dan Fusi dengan NaOH. Prosiding Seminar Nasional Kimia. Unesa.
- Federal Highway Administration (FHWA). 2003. *FA Facts for Highway Engineers-Fourth Edition*. Federal Highway Administration FHWA-IF-63-019. Washington DC: FHWA
- Yamin, A. dan Haliema Armela. 2017. *Buku Pintar Bidang Jalan dan Jembatan*. Bandung: Puslitbang Jalan dan Jembatan.
- Hidayat, S.Y. 1986. *Penelitian Pendahuluan Pemanfaatan Abu Terbang (Fly Ash) untuk Campuran Beton di Indonesia*. *Jurnal Litbang III*(4-5).
- Indonesia, Kementerian Pekerjaan Umum. 2010. Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum No 01/SE/M/2010 *Tentang Pemberlakuan Pedoman Pelaksanaan Stabilisasi Bahan Jalan Langsung di Tempat dengan Bahan Serbuk Pengikat*. Jakarta: Kementerian PU.
- Indonesia. 2014. Peraturan Pemerintah Nomor 101 Tahun 2014. *Tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan beracun*. Jakarta: Sekretariat Negara
- Josep, Davidovits. 2011. *Geopolimer Chemistry and Applications*, 3rd edition. Kota?: Institut Geopolimere.
- Pusat Penelitian Universitas Mulawarman. 2018. *Kajian Pemanfaatan Fly Ash dan Bottom Ash untuk Stabilisasi Tanah di Lingkungan PT. Pupuk Kalimantan Timur*. Samarinda: Universitas Mulawarman.
- Ratmayana Urip. 2003. *Teknologi Semen dan Beton: Fly Ash, mengapa seharusnya dipakai pada beton gresik: PT. Semen Gresik Indonesia dan PT Varia usaha Beton*.
- Sofwan Hadi. 2000. *Pengaruh Ukuran Butiran dan Komposisi Abu Terbang PLTU Suralaya sebagai bahan pengisi dan Pozzolan*.
- Wuryati dan Candra. 2001. *Teknologi Beton*. Yogyakarta: Kanisius.