

PEMANFAATAN *FLY ASH* DAN *BOTTOM ASH* SEBAGAI MATERIAL KONSTRUKSI RAMAH LINGKUNGAN DALAM RANGKA Mendukung KRITERIA BANGUNAN HIJAU

Utari Ayuningtyas^{1, a)}, I Made Agus Dharma Susila¹, Adolf Leopold SM Sihombing¹, Nugroho Adi Sasongko¹, Putty Anggraeni², Teguh Pribadi Adi Nugroho², Nur Tjahyo Eka Darmayanti²

¹⁾ Pusat Riset Sistem Produksi Berkelanjutan dan Penilaian Daur Hidup, Badan Riset dan Inovasi Nasional Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan, 15314

²⁾ Pusat Riset Teknologi Pengujian dan Standar, Badan Riset dan Inovasi Nasional Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan, 15314

^{a)} email korespondensi: utari.ayuningtyas@brin.go.id

ABSTRAK

Fly Ash dan *Bottom Ash* (FABA) merupakan limbah padat hasil pembakaran batu bara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Kebutuhan batu bara untuk PLTU tiap tahun diprediksi akan terus meningkat sehingga akan meningkat pula jumlah FABA yang dihasilkan. FABA yang dihasilkan dari proses pembakaran batu bara pada PLTU digolongkan sebagai limbah non-bahan berbahaya dan beracun (non-B3). Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi komposisi campuran FABA, mengidentifikasi ketersediaan standar produk turunan FABA, dan mengidentifikasi pemenuhan persyaratan pada kriteria bangunan hijau. Penelitian ini menggunakan metode deskriptif dengan pendekatan *literature review*. Kriteria artikel yang digunakan memiliki waktu publikasi 10 tahun terakhir, membahas mengenai komposisi rasio campuran FABA yang optimum dan hasil pengujian produk. Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan komposisi yang tepat dapat menghasilkan mutu produk yang sesuai dengan SNI. FABA dikategorikan sebagai material konstruksi ramah lingkungan karena memenuhi sub-kriteria bangunan hijau yaitu material yang tidak mengandung bahan berbahaya dan beracun, merupakan material yang dapat diolah atau dimanfaatkan kembali dan produk turunan FABA merupakan produk ber-SNI. Diperlukan penelitian lanjutan mengenai perhitungan besaran dampak lingkungan dari produk turunan FABA di sepanjang daur hidupnya dengan menggunakan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA), sehingga dapat lebih memperkuat pernyataan bahwa produk tersebut merupakan produk ramah lingkungan yang berkelanjutan.

Kata kunci: *Fly Ash*, *Bottom Ash*, Material Konstruksi, Bangunan Hijau

PENDAHULUAN

Fly Ash dan *Bottom Ash* (FABA) merupakan limbah padat hasil pembakaran batu bara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Sekitar 55% - 85% abu yang dihasilkan dari proses pembakaran batu bara tersebut berupa *fly ash* dan sisanya berupa *bottom ash*. Kedua jenis abu batu bara tersebut memiliki perbedaan karakteristik dan pemanfaatannya (Haryanti, 2015). *Fly ash* yang tersusun oleh partikel-partikel serbuk halus merupakan salah satu material yang paling kompleks karena tersusun oleh mineral yang sangat bervariasi. Sifat fisik dan kimia *fly ash* tidak hanya tergantung pada jenis batu bara yang digunakan dalam proses pembakaran, namun juga pada teknik atau teknologi yang digunakan untuk membakar batu bara (Anggara dkk, 2021). Sedangkan, *bottom ash* merupakan material yang tidak terbakar dengan sempurna dari pembakaran batu bara dan biasanya menempel pada bagian bawah atau dinding dari tungku pembakaran tersebut. *Bottom ash* memiliki ukuran partikel yang lebih besar serta lebih berat dari *fly ash* (Dewi dan Prasetyo, 2021). Secara visual bentuk FABA dapat dilihat pada Gambar 1.

Kebutuhan batu bara untuk PLTU tiap tahun diprediksi akan terus meningkat, sehingga akan meningkat pula jumlah FABA yang dihasilkan. FABA yang dihasilkan dari proses pembakaran batu bara pada PLTU digolongkan sebagai limbah non-bahan

berbahaya dan beracun (non-B3). Oleh karena itu sebaiknya FABA dimanfaatkan sebagai material yang mempunyai nilai tambah ekonomi seperti material konstruksi. Di beberapa negara antara lain China, India dan Jepang, FABA dimanfaatkan sebagai keperluan bahan bangunan atau konstruksi seperti batako, *paving block* dan material semen (PJB, 2021; Anggara dkk, 2021).



Fly Ash (FA)



Bottom Ash (BA)

Gambar 1. Visualisasi Fly Ash dan Bottom Ash (FABA) hasil pembakaran batu bara pada PLTU

Untuk menghasilkan produk berbasis FABA, yang selanjutnya disebut sebagai produk turunan FABA, yang kuat dan tahan lama, dapat dilihat dari komposisi campuran FABA yang optimum dan didukung dengan hasil pengujian produk tersebut. Produk turunan FABA untuk material konstruksi meliputi semen, batako,

genteng, *paving block*, beton dan ubin keramik, serta lain sebagainya. Material konstruksi tersebut saat ini banyak digunakan sebagai bahan bangunan untuk bangunan hijau atau bangunan ramah lingkungan.

Tabel 1. Syarat fisis batako sesuai SNI 03-0349-1989

Syarat fisis	Satuan	Tingkat mutu bata beton berlubang			
		I	II	III	IV
Kuat tekan bruto rata-rata min.	Kg/cm ²	70	50	35	20
Kuat tekan bruto masing-masing benda uji min.	Kg/cm ²	65	40	30	17
Penyerapan air rata-rata maks.	%	25	35	-	-

Batako

Batako adalah salah satu bahan bangunan dengan bahan pembentuk berupa pasir dan agregat (campuran pasir, kerikil dan air). Batako dicetak melalui proses pemadatan menjadi bentuk balok-balok dengan ukuran dan persyaratan tertentu dan proses pengerasannya ditempatkan pada tempat yang lembab atau tidak terkena sinar matahari langsung atau hujan (Ristinah et al, 2012). Salah satu parameter penting pengujian produk batako adalah kuat tekan. Pengujian kuat tekan dilakukan untuk menilai ketahanan dan besar maksimum beban yang dapat di tahan, sehingga dapat tahan terhadap jenis goncangan berskala ringan hingga sedang. Persyaratan fisis dan tingkat mutu batako tercantum pada SNI 03-0349-1989, seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Genteng

Genteng merupakan salah satu unsur penting dalam bangunan yang berfungsi sebagai penutup atap, agar bangunan tidak terkena air hujan, panas matahari, dan lainnya. Ada beberapa macam genteng diantaranya genteng keramik dan genteng beton. Genteng beton adalah unsur bangunan yang terbuat dari campuran semen portland atau sejenisnya dengan agregat dan air dengan atau tanpa menggunakan pigmen. Genteng ini tidak memerlukan proses pembakaran seperti halnya pada genteng keramik (Zacoeb, 2013). Parameter pengujian produk genteng antara lain kuat tekan, kuat lentur, uji impermeabilitas, nilai porositas. Uji lentur dilakukan untuk mengetahui sifat mekanis yang menunjukkan ukuran kekakuan dari suatu material. Hasil uji lentur genteng beton yang syaratkan dalam SNI 0096:2007 yaitu 1200 N.

Paving block

Paving block adalah salah satu jenis dari bata ringan yang banyak diperlukan untuk kebutuhan konstruksi (Winarno, 2019). *Paving block* dapat dimanfaatkan untuk keperluan jalan, pelataran parkir, trotoar, taman, dan keperluan lainnya (Aman dan Amri, 2019).

Tabel 2. Persyaratan kuat tekan untuk *paving block*

Mutu	Kuat tekan (MPa)	
	Rata-rata	Min
A	40	35
B	20	17,0
C	15	12,5
D	10	8,5

Secara umum *paving block* dibuat dari semen portland dan agregat halus maupun kasar. Namun saat ini banyak penelitian yang telah menggunakan *bottom ash* sebagai material pembuatan *paving block*, dengan maksud agar mengurangi biaya material karena *bottom ash* merupakan limbah yang kemudian dimanfaatkan kembali, meningkatkan kualitas dan mencegah kerusakan lingkungan (Klarens et al, 2016). Salah satu parameter penting pengujian produk *paving block* adalah kuat tekan. Pengujian kuat tekan dilakukan untuk menilai ketahanan dan besar maksimum beban yang dapat di tahan. Persyaratan kuat tekan *paving block* tercantum pada SNI 03-0691-1996, seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Bangunan hijau

Bangunan hijau atau bangunan ramah lingkungan adalah salah satu wujud kepedulian terhadap kelestarian lingkungan dalam bidang konstruksi (Ratnaningsih dkk, 2019) dimana yang digunakan tidak membahayakan lingkungan. Dalam Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 8 Tahun 2010 tentang Kriteria dan Sertifikasi Bangunan Ramah Lingkungan serta kriteria *GreenShip* dari *Green Building Council Indonesia*, bangunan yang dapat dikategorikan sebagai bangunan ramah lingkungan apabila memenuhi salah satu kriteria yaitu menggunakan material bangunan yang ramah lingkungan. Sub-kriteria dari penggunaan material adalah menggunakan material yang bahan baku utamanya berasal dari sumber yang ramah lingkungan, menggunakan material bekas yang didaur ulang atau diolah atau dimanfaatkan kembali, serta produk tersebut memiliki Standar Nasional Indonesia (SNI) (Syahriyah, 2017; GBCI, 2014).

Berdasarkan pada besarnya potensi pemanfaatan FABA di Indonesia dan untuk mendukung FABA sebagai material konstruksi bangunan hijau, maka tujuan dari penelitian ini adalah mengidentifikasi komposisi campuran FABA yang optimum untuk material konstruksi, mengidentifikasi ketersediaan standar produk turunan FABA untuk menjamin kualitas dan meningkatkan daya saing, serta mengidentifikasi pemenuhan persyaratan pada kriteria bangunan hijau.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif dengan pendekatan *literature review*. Kriteria artikel yang digunakan memiliki waktu publikasi 10 tahun terakhir. Artikel tersebut membahas mengenai komposisi rasio campuran FABA yang optimum dan hasil pengujian produk. Hasil pengujian produk akan disandingkan dengan SNI. Artikel yang dipilih hanya artikel yang terkait dengan pemanfaatan FABA yang berasal dari PLTU di Indonesia, dengan asumsi bahwa semua batu bara yang digunakan untuk operasional pembangkitan listrik tersebut adalah batu bara yang berasal dari Indonesia. Produk turunan FABA merupakan objek

dalam penelitian ini, dibatasi pada produk batako, genteng dan *paving block*. Dari produk turunan FABA tersebut diidentifikasi ketersediaan SNI nya. Kemudian diidentifikasi pemenuhan persyaratan untuk kriteria bangunan hijau.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat sebagai informasi bagi masyarakat khususnya industri dan

konsumen, sehingga menjadi solusi dalam mengoptimalkan upaya pemanfaatan FABA menjadi produk atau material yang terjamin kualitasnya dan ramah lingkungan untuk mendukung kriteria bangunan hijau.

Tabel 3. Komposisi campuran FABA untuk material konstruksi dan Hasil Pengujian Produk Turunan FABA

No	Penelitian yang telah dilakukan	Produk hasil Pemanfaatan FABA	Asal FABA	Komposisi optimum (rasio perbandingan)	Hasil Pengujian
1	Mashuri et al (2012)	Batako	PLTU Mpanau Tavaeli, Kota Palu	0,75 zak Semen: 0,25 zak <i>fly ash</i> : 300 kg pasir	kuat tekan = 61,88 Kg/cm ² (6,07 MPa)
2	Ristinah et al (2012)	Batako	PLTU	Pencampuran <i>bottom ash</i> : semen sebesar 5% : 95%	kuat tekan = 66,64 Kg/cm ² (6,54 MPa)
3	Haryanti (2015)	Batako	PLTU Asam-asam, Kalimantan Selatan	<i>Fly ash</i> : semen sebesar 50% : 50 % dan dengan penambahan bahan pendukung sebesar masing-masing 0,5%	Kuat tekan = 39,99 Kg/cm ² (3,92 MPa)
4	Zacoeb et al (2013)	Genteng	PLTU di daerah Rembang, Jawa tengah	<i>Bottom ash</i> : semen sebesar 40% : 60% dan dengan adanya penambahan agregat	Kuat lentur = 857,88 N dan hasil uji impermeabilitas yaitu tidak ada rembesan air
5	Febriansyah et al (2013)	Genteng	PLTU	<i>fly ash</i> : campuran genteng sebesar 5% : 95% campuran genteng terdiri dari 5% air, 15% pasir dan 75% tanah lempung	kuat tekan = 11,042 kPa (0,011 MPa) dan nilai porositas = 17,2%
6	Winarno et al (2019)	<i>Paving block</i>	PLTU Sumsel-5	Semen : <i>fly ash</i> : <i>bottom ash</i> sebesar 1 : 2 : 2	Kuat tekan = 50,52 MPa
7	Klarens et al (2016)	<i>Paving block</i>	PLTU Paiton	<i>fly ash</i> dengan persentase sebesar 20% - 50% dan <i>bottom ash</i> (5 mm) dengan persentase sebesar 100%	kuat tekan = 22,87 - 27,42 Mpa
8	Aman dan Amri (2019)	<i>Paving block</i>	PLTU Tenayan Raya, Pekanbaru	<i>Fly ash</i> : pasir sebesar 1 : 3	Kuat tekan = 50,87 MPa
9	Kusdiyono (2017)	<i>Paving block</i>	PLTU Tanjungjati, Kabupaten Jepara	Penambahan <i>fly ash</i> dan <i>bottom ash</i> sebesar 5% dari berat total agregat	Kuat tekan = 221,2 Kg/cm ² (21,69 MPa)
10	Zakaria dan Juniarti (2020)	<i>Paving block</i>	PLTU Banten 3 lontar	Campuran FABA dengan agregat dan semen	Kuat tekan = 262,4 Kg/cm ² (25,7 MPa)

HASIL DAN PEMBAHASAN

FABA bukan hanya sekedar limbah semata, namun dapat dimanfaatkan untuk material konstruksi yang mempunyai nilai tambah ekonomi (PJB, 2021). Di Indonesia, FABA sangat berlimpah jumlahnya sehingga perlu dilakukan pemanfaatan yang optimal untuk mengurangi jumlah timbulan FABA. Untuk mendukung pemanfaatan tersebut dan untuk menjadikan FABA sebagai material konstruksi yang ramah lingkungan, perlu memenuhi salah satu kriteria material bangunan yang ramah lingkungan yang tercantum dalam *GreenShip* dari *Green Building Council Indonesia*. Kualitas dari produk hasil pemanfaatan FABA juga menjadi perhatian. Kualitas tersebut dapat dilihat dari

komposisi rasio perbandingan pencampuran FABA pada saat proses pembuatan produk tersebut, kemudian diperlukan beberapa pengujian antara lain kuat tekan, kuat lentur, uji jatuh, uji impermeabilitas, nilai porositas. Tabel 3 merupakan hasil dari literatur review terkait komposisi optimal dan hasil pengujian dari masing-masing produk turunan FABA.

Komposisi rasio campuran FABA yang optimum dan hasil pengujian produk

Batako

Penelitian terkait dengan pemanfaatan FABA di Indonesia untuk pembuatan batako dilakukan oleh Mashuri et al, Ristinah et al dan Haryanti. Penelitian

yang dilakukan oleh Mashuri et al adalah pembuatan batako dengan campuran *fly ash*. Campuran yang digunakan yaitu dengan komposisi yang optimum yaitu 0,75 zak semen, 0,25 zak *fly ash* dan penambahan 300 kg pasir. Pengujian yang dilakukan antara lain uji jatuh dan uji tekan. Metode uji jatuh dengan cara menjatuhkan batako ke permukaan tanah yang keras dari ketinggian 1 meter, hasilnya secara visual menunjukkan bahwa batako dengan campuran *fly ash* cenderung sedikit lebih kokoh dibandingkan dengan batako yang tidak menggunakan campuran *fly ash*. Kemudian terkait dengan uji tekan dilakukan pada batako dengan campuran *fly ash* berumur 28 hari, hasilnya yaitu sebesar 61,88kg/cm² (6,07 MPa) (Mashuri et al, 2012). Selanjutnya penelitian yang dilakukan oleh Ristinah et al, campuran *bottom ash* pada batako mempengaruhi kualitas produk batako tersebut, terutama pada sifat mekanik kuat tekan. Ristinah et al telah melakukan pengujian terhadap 13 jenis variasi komposisi *bottom ash* yaitu mulai dari 0% hingga 60%. Hasil uji tekan pada batako dengan campuran *bottom ash* adalah batako dengan komposisi pencampuran *bottom ash* 5% dan semen 95% sehingga memiliki kuat tekan terbesar 66,64 Kg/cm² (6,54 MPa) (Ristinah et al, 2012). Sedangkan penelitian yang dilakukan oleh Haryanti yaitu mencampurkan komposisi semen dan *fly ash* masing-masing 50% dan dengan penambahan bahan dukung seperti campuran

foam, polimer dan hardener masing-masing sebesar 0,5%. Dengan komposisi tersebut menghasilkan kuat tekan sebesar 39,99 Kg/cm² (3,92 MPa) (Haryanti, 2015).

Selanjutnya hasil dari ketiga penelitian tersebut disandingkan. Hasil pengujian dengan rumusan komposisi yang optimum dari masing-masing penelitian, menunjukkan hasil bahwa komposisi penambahan *bottom ash* sebesar 5% yang dilakukan oleh Ristinah et al memiliki hasil uji kuat tekan yang paling besar (tabel 4), sehingga dapat dikategorikan bahwa batako dengan rumusan komposisi tersebut merupakan batako yang memiliki spesifikasi produk grade I sesuai dengan ketentuan SNI 03-0349-1989. Batako dengan campuran *fly ash* dalam penelitian yang dilakukan oleh Mashuri et al memiliki nilai kuat tekan sedikit dibawah batako dari hasil penelitian Ristinah et al, hal ini kemungkinan disebabkan oleh pengaruh material tambahan yang lain seperti semen dan pasir. Semen diketahui memiliki senyawa penyusun berupa silika (pozzolan) dan kapur.

Dari hasil analisa kualitas batako pada penelitian-penelitian tersebut diketahui bahwa karakteristik FABA pada penelitian Ristinah et al dan FABA pada penelitian Mashuri et al memiliki karakteristik dan kualitas yang baik sehingga dapat menghasilkan produk batako yang memenuhi grade I dan grade II.

Tabel 4. Perbandingan kuat tekan produk batako

No	Penelitian yang telah dilakukan	Jenis Abu yang digunakan	Kuat tekan (Kg/cm ²)	Tingkat Mutu bata beton berlubang (batako) (SNI 03-0349-1989)
1	Mashuri et al (2012)	<i>Fly ash</i>	61,88	Grade II
2	Ristinah et al (2012)	<i>Bottom ash</i>	66,9	Grade I
3	Haryanti (2015)	<i>Fly ash</i>	39,99	Grade III

Genteng

Penelitian terkait pemanfaatan FABA di Indonesia untuk pembuatan genteng dilakukan oleh Zacoeb et al dan Febriansyah et al. Penelitian terhadap genteng beton berumur 28 hari yang dilakukan oleh Zacoeb et al menggunakan komposisi campuran bervariasi mulai dari persentase pencampuran *bottom ash* 0%, 10%, 20%, 30%, 40% dan 50%. Komposisi optimum yang dapat menghasilkan kuat tekan paling besar adalah dengan pencampuran *bottom ash* 40% dan semen 60%, hasil uji lenturnya sebesar 857,88 N. Hasil uji lentur pada variasi yg lainnya yaitu 0%, 10%, 30% dan 50% masing-masing adalah 809,12 N, 792,57 N, 856,81 N, 847,46 N, dan 812,57 N. Hal ini menunjukkan bahwa semua hasilnya tidak memenuhi SNI 0096:2007 karena kurang dari 1200 N. Sedangkan untuk hasil uji *impermeabilitas* (ketahanan terhadap rembesan air) pada genteng tersebut menunjukkan bahwa genteng dengan campuran *bottom ash* ataupun yang tidak, sama-sama tidak ada rembesan air sehingga penggunaan *bottom ash* dapat berpengaruh dalam pembuatan genteng karena hasil uji *impermeabilitas*nya telah memenuhi standar (Zacoeb et al., 2013).

Selanjutnya penelitian yang dilakukan oleh Febriansyah et al, dengan variasi pencampuran *fly ash* dalam pembuatan genteng adalah sebesar 0%, 2,5%, 5%

dan 7,5%. Dari beberapa variasi komposisi pencampuran tersebut, diketahui bahwa komposisi pencampuran 5% *fly ash* dan 95% campuran genteng merupakan komposisi yang optimum. Campuran genteng terdiri dari 5% air, 15% pasir dan 75% tanah lempung. Dengan komposisi pencampuran *fly ash* 5% tersebut menghasilkan uji kuat tekan yang paling besar yaitu sebesar 11,042 kPa. Untuk pengujian nilai porositas atau daya serap air diperoleh 17,2%. Dengan adanya penambahan campuran *fly ash* pada pembuatan genteng, maka akan terjadi perubahan kekuatan tekan dan nilai porositas (Febriansyah et al., 2013).

Paving block

Di Indonesia, penelitian terkait pemanfaatan FABA sebagai bahan campuran pembuatan *paving block* dilakukan oleh Winarno et al, Klarens et al, Aman dan Amri, Kusdiyono serta Zakaria dan Juniarti. *Fly ash* dan *Bottom ash* dapat dijadikan bahan campuran dalam pembuatan *paving block* sebagai bahan substitusi agregat pengganti pasir. Penelitian yang dilakukan oleh Winarno et al, menggunakan perbandingan komposisi semen, *fly ash* dan *bottom ash* sebesar 1:2:2, menghasilkan kuat tekan mencapai 50,52 MPa (Winarno et al (2019). Sedangkan penelitian yang dilakukan oleh Klarens et al, pembuatan *paving block*

dengan komposisi menggunakan *fly ash* sebesar 20% - 50% sebagai pengganti semen dan penambahan *bottom ash* lolos ayakan 5 mm sebagai 100% agregat adalah yang optimum. Hasil uji kuat tekan diperoleh sebesar 22,87 – 27,42 MPa (Klarens et al, 2016).

Selanjutnya penelitian yang dilakukan oleh Aman dan Amri, melakukan komposisi pencampuran *fly ash* dengan rasio pencampurannya yaitu *Fly ash* : pasir

sebesar 1 : 3 dan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sebesar 2,0 dan dengan penambahan konsentrasi larutan *activator* NaOH 12 M, serta larutan *activator/fly ash* (L/S) sebesar 0,5 dengan temperatur perawatan sebesar 60 °C selama 24 jam dan lama perawatan benda uji selama 28 hari. Dengan komposisi tersebut diperoleh hasil uji kuat tekan yang optimum sebesar 50,87 MPa (Aman dan Amri, 2019).

Tabel 5. Hasil pengujian kuat tekan produk *paving block*

No	Penelitian yang telah dilakukan	Kuat tekan (MPa)	Mutu (SNI 03-0691-1996)
1	Winarno et al. (2019)	50,52	Grade A
2	Klarens et al (2016)	22,87 - 27,42	Grade B
3	Aman dan Amri (2019)	50,87	Grade A
4	Kusdiyono (2017)	21,69	Grade B
5	Zakaria dan Juniarti (2020)	25,7	Grade B

Penelitian yang dilakukan oleh Kusdiyono et al, 2017, melakukan penambahan *fly ash* dan *bottom ash* pada pembuatan *paving block* dengan komposisi yang bervariasi, mulai dari penambahan 0% sampai 20%. Kemudian diperoleh hasil uji kuat tekan rata-rata pada umur 28 hari adalah sebesar 221,2 Kg/cm² (21,69 MPa) yang berasal dari komposisi penambahan FABA sebesar 5%, sehingga komposisi tersebut merupakan komposisi yang optimum untuk pembuatan *paving block* (Kusdiyono et al, 2017). Sedangkan penelitian yang dilakukan oleh Zakaria dan Juniarti menyatakan bahwa uji kuat tekan pada *paving block* dengan umur 28 hari menghasilkan kekuatan sebesar 262,4 Kg/cm² (25,7 MPa) dengan komposisi pencampuran terdiri dari FABA ditambahkan dengan agregat dan semen (Zakaria dan Juniarti, 2020).

Pada Tabel 5 menunjukkan bahwa pembuatan produk batako yang dilakukan oleh Winarno et al serta Aman dan Amri memiliki kualitas batako grade A sesuai dengan SNI 03-0691-1996, sedangkan produk batako dari penelitian yang lainnya masuk ke dalam grade B. Sesuai dengan SNI 03-0691-1996, peruntukkan produk batako disesuaikan dengan kualitas gradenya. Batako grade A dapat digunakan untuk jalan sedangkan batako grade B dapat digunakan untuk peralatan parkir atau area parkir. Dari hasil analisa kualitas *paving block* pada penelitian-penelitian tersebut diketahui bahwa karakteristik FABA dari PLTU Sumsel-5 dan PLTU Tenayan Raya memiliki karakteristik dan kualitas yang baik sehingga dapat menghasilkan produk *paving block* grade A dan karakteristik FABA dari PLTU Paiton, PLTU Tanjungjati dan PLTU Banten 3 Lontar dapat menghasilkan pembuatan *paving block* grade B.

Keunggulan *paving block* dari penelitian-penelitian tersebut adalah dapat menekan biaya produksi karena tidak menggunakan campuran semen dan perbaikan *paving block* dari FABA tidak memerlukan bahan tambahan yang banyak karena *paving block* merupakan bahan yang dapat digunakan kembali meskipun telah mengalami pembongkaran. Sedangkan kekurangannya adalah untuk melarutkan *fly ash* sebagai pengganti semen diperlukan tambahan larutan kimia seperti NaOH dan Na_2SiO_3 (Aman dan Amri, 2019).

Ketersediaan Standar Nasional Indonesia (SNI) produk batako, genteng dan *paving block*

Standar adalah spesifikasi teknis atau sesuatu yang dibakukan. Standar disusun sebagai pedoman. Manfaat dari penerapan SNI dapat membantu meningkatkan menjamin kualitas dan meningkatkan daya saing produk batako, genteng dan *paving block*.

Hasil identifikasi ketersediaan SNI terkait produk batako yaitu SNI 8308:2016 Spesifikasi bata beton TiO_2 sebagai pereduksi polutan udara, SNI 03-1570-1989 Bata beton karawang, SNI 03-0349-1989 Bata beton untuk pasangan dinding, SNI 03-0348-1989 Bata beton pejal, Mutu dan cara uji. Sedangkan, ketersediaan SNI terkait produk genteng yaitu SNI 03-6027-1999 Genteng beton ijuk, SNI 03-4255-1996 Genteng baja lapis paduan Al-Zn berlapis butir batu, SNI 03-2134-1996 Genteng keramik berglasir, SNI 03-1588-1989 Genteng baja berlapis butiran batu, SNI 0096:2007 Genteng beton. Selanjutnya ketersediaan SNI terkait produk *Paving block* yaitu SNI 03-0691-1996 Bata beton (*paving block*).

Pemenuhan persyaratan material konstruksi ramah lingkungan untuk kriteria bangunan hijau

FABA dapat dikategorikan sebagai material konstruksi ramah lingkungan karena memenuhi sub-kriteria bangunan hijau yaitu material yang tidak mengandung bahan berbahaya dan beracun sesuai yang tercantum di dalam Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan hidup, merupakan material yang dapat diolah atau dimanfaatkan kembali sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Aman dan Amri (2019) dan produk turunan FABA seperti batako, genteng dan *paving block* merupakan produk ber-SNI sesuai dengan pembahasan terkait ketersediaan SNI. Rekap pemenuhan persyaratan material konstruksi untuk kriteria bangunan hijau dapat dilihat pada tabel 6. Dengan demikian maka pemanfaatan FABA dapat terus ditingkatkan sehingga dapat mengurangi jumlah timbulan FABA.

Tabel 6. Pemenuhan persyaratan material konstruksi

Bahan Baku	Produk turunan FABA	Pemenuhan persyaratan material konstruksi untuk kriteria bangunan hijau		
		Material tidak berbahaya	Material yang dapat dimanfaatkan kembali	Produk ber-SNI
Fly Ash	Batako	√	√	√
Bottom Ash	Genteng	√	√	√
Bottom Ash	Paving block	√	√	√

KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini adalah:

1. Pemanfaatan *fly ash* dan *bottom ash* dapat digunakan sebagai material konstruksi pembuatan batako, genteng dan *paving block* untuk bangunan ramah lingkungan sebagai pengganti semen dengan menggunakan komposisi yang tepat dan didukung dengan hasil pengujian kuat tekan dan kuat lentur sesuai dengan yang disyaratkan dalam SNI.
2. *fly ash* dan *bottom ash* dapat dikategorikan sebagai material konstruksi ramah lingkungan karena memenuhi sub-kriteria bangunan hijau yaitu material yang tidak mengandung bahan berbahaya dan beracun, merupakan material yang dapat diolah atau dimanfaatkan kembali dan produk turunan FABA seperti batako, genteng dan *paving block* merupakan produk ber-SNI.

SARAN

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Dilakukan penelitian terkait review produk lainnya dari pemanfaatan FABA misalnya, semen, beton dan ubin keramik.
2. Dilakukan penelitian lanjutan mengenai perhitungan besaran dampak lingkungan dari produk turunan FABA di sepanjang daur hidupnya dengan menggunakan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA), sehingga dapat lebih memperkuat pernyataan bahwa produk tersebut merupakan produk ramah lingkungan yang berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Pusat Riset Sistem Produksi Berkelanjutan dan Penilaian Daur Hidup dan Pusat Riset Teknologi Pengujian dan Standar - Badan Riset dan Inovasi Nasional dan kepada pihak-pihak terkait yang telah mendukung dalam proses penyusunan karya tulis ilmiah ini.

REFERENSI

- Aman dan Amri, A., 2019. Pembuatan paving blok geopolimer dari limbah abu terbang batu bara (Fly Ash) di Kelurahan Pematang Kapau Tenayan Raya Pekanbaru. *Prosiding Seminar Nasional Pemberdayaan Masyarakat. Unri Conference Series: Community Engagement*, 1, pp. 223-227. ISSN 2685-9017
- Anggara, F., Petrus, H.T.B.M., Besari, D.A.A., Manurung, H., dan Saputra, F.Y.A., 2021. Tinjauan

Pustaka Karakteristik dan Potensi Pemanfaatan Fly Ash dan Bottom Ash (FABA). *Buletin Sumber Daya Geologi*, 16 (1), pp. 53-70.

- Dewi, S. U dan Prasetyo, F., 2021. Analisa Penambahan Bottom Ash terhadap Kuat Tekan dan Kuat Tarik Belah Beton. *Journal of Infrastructural in Civil Engineering*, 2(2), pp. 31-45.
- GBCI, 2014. *GreenShip Rating Tools untuk Rumah Tinggal Versi 1.0*. Jakarta: GBCI.
- Haryanti, N. H., 2015. Kuat Tekan Bata Ringan dengan Bahan Campuran Abu Terbang PLTU Asam-Asam Kalimantan Selatan. *Jurnal Fisika Flux*, 12(1), pp. 20-30.
- Klarens, K., Indranata, M., Antoni, dan Hardjito, D., 2016. Pemanfaatan Bottom Ash dan Fly Ash Tipe C sebagai Bahan Pengganti dalam Pembuatan Paving Block. *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil*, 5(2), pp. 1-8.
- Kusdiyono, Mulyono, T., dan Supriyadi, 2017. Pengaruh Penambahan Fly Ash dan Bottom Ash terhadap Mutu Pavng. *Jurnal Bangun Rekaprima*, 3(2), pp. 1-8.
- Mashuri, Adam, A.A., Rahman, R., dan Setiawan, A., 2012. Penggunaan Abu Terbang Batubara pada Pembuatan Batako di Kota Palu. *Majalah Ilmiah Mektek*, 14(3), pp. 85-92.
- Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 8 Tahun 2010 tentang Kriteria dan Sertifikasi Bangunan Ramah Lingkungan. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup.
- Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan hidup. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- PJB, 2021. *Lampu Hijau dari Pemerintah untuk FABA (edisi 120)*. Surabaya: PT. PJB.
- Ratnaningsih, A., Hasanuddin A., dan Hermansa, R., 2019. Penilaian Kriteria Green Building pada Pembangunan Gedung IsDB Project Berdasarkan Skala Indeks Menggunakan GreenShip Versi 1.2 (Studi Kasus: Gedung Engineering Biotechnology Universitas Jember). *Jurnal Berskala Sainstek*, 7(2), pp. 59-66. ISSN 2339-0069.
- Ristinah, Zacoeb, A., Soehardjono, A., dan Setyowulan, D, 2012. Pengaruh Penggunaan Bottom Ash sebagai Pengganti Semen pada Campuran Batako terhadap Kuat Tekan Batako. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 6(3), pp. 264-271. ISSN 1978-5658.
- Syahriyah, D.R., 2017. Penerapan Aspek Green Material Pada Kriteria Bangunan Rumah Lingkungan Di Indonesia. *Jurnal Lingkungan Binaan Indonesia*, 6(2), pp. 95-100.
- Winarno, H., Muhammad, D., Ashyar, R., dan Wibowo, Y.G., 2019. *Jurnal Teknika*, 11(1), pp. 1067-1070. ISSN 2085-0859.
- Zacoeb, A., Dewi, S.M., dan Jamaran, I., 2013. Pemanfaatan Limbah Bottom Ash sebagai Pengganti Semen pada Genteng Beton Ditinjau dari Segi Kuat Lentur dan Perembesan Air. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 7(1), pp. 81-87. ISSN 1978-5658.
- Zakaria, T., dan Juniarti, A.D., 2020. Studi Kelayakan Pemanfaatan Fly Ash dan Bottom Ash menjadi Paving Block di PLTU Banten 3 Lontar. *Journal Industrial Servicess*, 5(2), pp. 129-137.