

Pengembangan Teknologi Bahan Mendukung Pembangunan Berkelanjutan Bidang Teknik Sipil (High Volume Fly Ash Self Compacting Concrete/Hvfa-Scc)

Much. Suranto

Teknik Sipil, Universitas Widya Dharma Klaten

Darupratomo

Teknik Sipil, Universitas Widya Dharma Klaten

Hendro Saputro

Teknik Sipil, Universitas Widya Dharma Klaten

Alamat: Jl. KI Hajar Dewantoro 168 Karanganom, Klaten Utara, Jawa Tengah
Korespondensi penulis: surantomuch@gmail.com

Abstract

The aim of this literature study is to conclude that the use of fly ash as a replacement material for most of the functions of cement in concrete mixes meets the standards for using concrete mixes as environmentally friendly building construction materials in the context of sustainable development, reducing the risk of the greenhouse effect caused by carbon dioxide. The conclusion is that Fly ash, as waste from burning coal for power plants, can be used as a substitute for most of the functions of Portland cement, so that the waste material becomes an economic value and an effort to save the environment. And the mechanism for using HVFA-SCC concrete provides a work productivity solution in the construction sector in reducing the use of labor more efficiently and economically, as well as reducing the use of a large proportion of cement in the concrete composition. Fly ash contains physical and chemical elements with an equivalent composition that is similar to Portland cement. The softness of the fly ash grains is beneficial for filling empty spaces, making the concrete denser and more compact. The equivalent physical and chemical properties mean that fly ash can replace Portland cement.

Keywords: Semen, Fly ash, HVFA SCC

Abstrak

Tujuan penelitian studi literatur ini untuk menghasilkan kesimpulan bahwa penggunaan fly ash sebagai bahan pengganti sebagian besar fungsi semen dalam campuran adukan beton memenuhi standar pemakaian campuran adukan beton bahan konstruksi bangunan yang ramah lingkungan dalam rangka pembangunan berkelanjutan mengurangi dampak resiko efek rumah kaca yang disebabkan karbon dioksida. Kesimpulannya bahwa *Fly ash* sebagai limbah dari pembakaran batu bara untuk pembangkit listrik, dapat dimanfaatkan sebagai bahan pengganti sebagian besar fungsi semen portland, sehingga bahan limbah menjadi nilai ekonomis dan upaya penyelamatan lingkungan. Dan mekanisme pemakaian beton HVFA-SCC memberikan solusi produktivitas kerja di bidang konstruksi dalam mereduksi penggunaan tenaga kerja lebih efisien dan ekonomis, serta mengurangi penggunaan proporsi sebagian besar dari semen dalam komposisi beton. *Fly ash* memiliki kandungan unsur fisik dan kimia dengan komposisi yang setara yang mirip dengan semen portland. Tingkat kelembutan butir fly ash menguntungkan untuk mengisi ruang yang kosong menjadikan beton lebih padat dan kompak. Sifat fisik dan kimia yang setara menjadikan fungsi *fly ash* bisa menggantikan semen Portland.

Kata kunci: Semen, Fly ash, HVFA SCC

LATAR BELAKANG

Peningkatan jumlah pemakaian semen yang sangat besar menunjukkan bahwa beton merupakan bahan utama konstruksi bangunan dimana beton memiliki beberapa kelebihan dan kerugian. Kelebihan beton sebagai bahan bangunan yang tersedia hampir disemua tempat dan

beton memiliki sifat tahan terhadap air yang lebih baik dibandingkan dengan besi dan kayu sehingga beton memiliki sifat durabilitas (keawetan) yang baik (Mochamad Solikin, B. S, 2014). Kerugian yang ditimbulkan adalah dengan peningkatan jumlah pemakaian beton, jumlah emisi gas CO₂ ke atmosfer juga meningkat. Dengan kata lain, memproduksi 1 ton semen sama dengan menghasilkan 1 ton CO₂ ke dalam udara (Davidovits, J, 1994).

Untuk mengurangi efek buruk terhadap lingkungan dari pemakaian semen, maka upaya penggantian semen sebagai bahan pengikat beton baik seluruhnya maupun sebagian perlu didukung. Bahan pengganti semen yang saat ini sering digunakan adalah silica fume, copper slag dan Fly ash, dimana Fly ash merupakan bahan pengganti yang paling luas dipakai saat ini (Mehta, K, 2011).

Pengurangan CO₂ bisa didapatkan dari hasil aktivitas produksi sampingan industri, seperti Fly ash dan terak abu tanur tinggi, dengan alkali tersebut sebagai pengganti bahan isian semen Portland dalam beton dan produk yang dihasilkan pada umumnya dikenal sebagai beton aktif alkali atau beton geopolimer (Douglas, E. et al, 1991). Hal inilah yang merupakan salah satu faktor pendorong untuk ditemukannya bahan alternatif lain yang bisa menggantikan posisi semen dalam campuran beton. Fly ash dari hasil pembakaran batubara digunakan sebagai sumber material untuk membuat binder yang dibutuhkan dalam campuran beton. Beton Geopolimer ini terbentuk dari reaksi kimia dan bukan dari reaksi hidrasi seperti pada beton biasa. Dengan adanya penelitian ini diharapkan akan diperoleh suatu jenis beton baru yang ramah lingkungan, untuk mendukung pembangunan berkelanjutan karena: a) memanfaatkan fly ash sebagai material sisa (buangan) juga mengurangi limbah yang mencemari lingkungan; b) mengurangi kadar emisi CO₂ yang dihasilkan oleh produksi semen (Davidovits, J, 1991).

Perkembangan pembangunan konstruksi beton membutuhkan bahan dasar semen yang semakin meningkat setiap waktu, disisi lain terjadinya pemanasan global dampak pembuatan bahan dasar semen perlu ditekan agar keberlangsungan kehidupan terjaga. Proses pembakaran batu bara untuk pembangkit listrik menghasilkan limbah abu terbang (*fly ash*) yang mana sebagian fungsinya menggantikan semen sebagai bahan perekat konstruksi beton. Perkembangan lebih lanjut penggunaan bahan *fly ash* meningkat melebihi dari batasan yang diperkenankan pada beton konvensional, komposisi ini dinamakan *High Volume Fly Ash* (HVFA) yang mana penggunaan bahan *fly ash* mendominasi komposisi volume semen dalam beton. Untuk mendapatkan konstruksi beton konvensional membutuhkan pekerjaan pemadatan dan perataan saat menuangkan beton dalam cetakan. Teknologi pelaksanaan pekerjaan konstruksi beton mengalami efisiensi penggunaan tenaga manusia dan alat bantu pemadatan

beton dalam cetakannya, ketika menggunakan cara pengelolaan beton dengan metode *Self Compacting Concrete* (SCC).

Perkembangan beton *Self Compacting Concrete* (SCC) merupakan solusi efisiensi atas beban tenaga dan alat yang terlibat dalam pembuatan konstruksi beton. Beton SCC merupakan komposisi unsur agregat dan penyusun beton lainnya yang mampu memadat dan merata dengan sendirinya tanpa bantuan tenaga dan alat. Beton segar yang mempunyai kemampuan untuk mengalir di bawah beratnya sendiri, memenuhi kebutuhan ruang atau bekisting secara lengkap dan menghasilkan bahan yang padat dan homogen tanpa perlu pemadatan. Salah satu upaya untuk mendapatkan beton yang berkelanjutan adalah dengan menggunakan beton SCC (Okamura, H. and Ouchi, M, 2003). Dengan menerapkan beton memadat sendiri akan didapat beberapa keuntungan diantaranya akan mengurangi waktu pengerjaan dan juga mengurangi penggunaan sumber daya manusia pada proses konstruksi. Keuntungan tersebut diperoleh karena beton SCC mempunyai kemampuan untuk memadat dengan sendirinya tanpa pengaruh energi eksternal, dapat mengisi rongga cetakan serta dapat melewati tulangan tanpa dilakukan penggetaran. Flowability dari beton SCC disebabkan karena tingkat viskositasnya yang moderat. Hal tersebut dapat dicapai karena penggunaan superplasticizer dan penggunaan proporsi yang lebih besar material agregat yang lebih halus dibandingkan dengan beton konvensional. Penggabungan konsep HVFA dan SCC adalah salah satu upaya untuk mendapat beton yang berkelanjutan dan lebih ekonomis dari segi pembiayaan (Alghazali, H. and Myers, J, 2019).

Dalam penelitian ini untuk mengungkap beberapa karakteristik dari bahan-bahan yang digunakan secara spesifik untuk mengetahui sifat-sifat dan karakteristik bahan yang akan digunakan sebagai bahan bangunan yang menguntungkan untuk menjaga keberlangsungan pembangunan. Dengan menggunakan bahan *fly ash* sebagai salah satu bahan baku pembangunan akan mengurangi produksi/penggunaan semen portland dan menambah penggunaan *fly ash* sebagai limbah pembakaran batu bara. Pembuatan beton yang menggunakan konsep HVFA-SCC untuk mendapatkan konstruksi beton yang lebih efisien dan ekonomis dalam menggunakan tenaga manusia.

KAJIAN TEORITIS

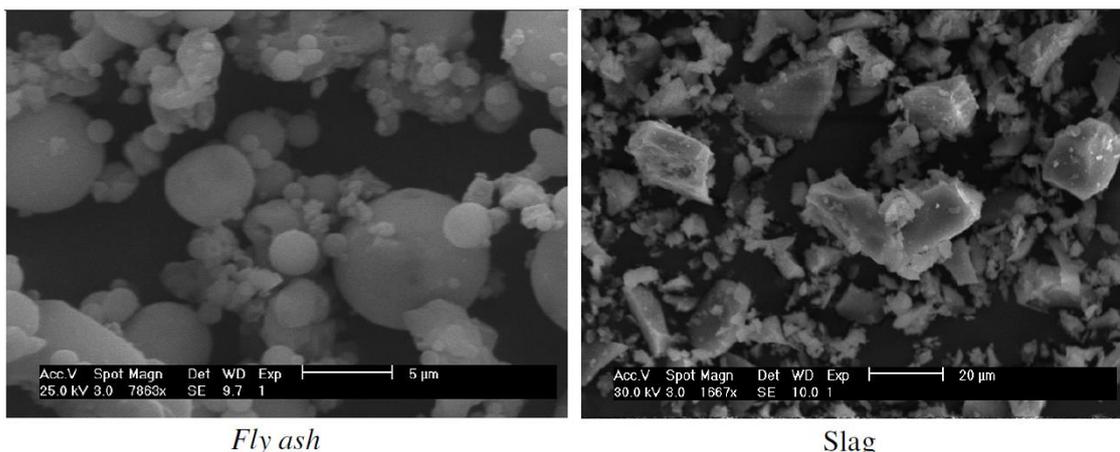
Fly ash digunakan untuk pengganti portland cement pada beton karena mempunyai sifat pozzolanic. Sebagai pozzolanic sangat besar meningkatkan strength, durabilitas dari beton. Penggunaan *Fly ash* dapat dikatakan sebagai faktor kunci pada pemeliharaan beton tersebut. Penggunaan *Fly ash* sebagai pengganti sebagian berat semen pada umumnya terbatas pada *Fly ash* kelas F. *Fly ash* tersebut dapat menggantikan semen sampai 30% berat semen yang

dipergunakan dan dapat menambah daya tahan dan ketahanan terhadap bahan kimia. Perkembangan penggunaan penggantian portland cement dengan prosentase volume Fly ash yang tinggi (50%) pada perencanaan campuran beton, bahkan untuk "Roller Compacted Concrete Dam" penggantian tersebut mencapai 70 % telah dicapai dengan Pozzocrete (Fly ash yang diproses) pada "The Ghatghar Dam Project" di Maharashtra India. Fly ash juga dapat meningkatkan workability dari semen dengan berkurangnya pemakaian air. Produksi semen dunia pada tahun 2010 diperkirakan mencapai 2 milyar ton, di mana penggantian dengan Fly ash dapat mengurangi emisi gas carbon secara dramatis (Hendriks C. A. et al., 1999). Fly ash merupakan material yang memiliki ukuran butiran yang halus, berwarna keabu-abuan dan diperoleh dari hasil pembakaran batu bara.



Gambar 1. Fly Ash Powder

Fly ash adalah produk sampingan terutama dari pembangkit listrik tenaga batubara yang dikumpulkan dari sistem pembuangan debu hasil pembakaran batu bara (Mochamad Solikin, B. S, 2014).. Fly ash pada umumnya merupakan partikel yang sangat halus dengan diameter antara 1 – 150 mikron meter dan berbentuk butiran bulat Gambar 2.



Gambar 2. Bentuk Partikel Fly Ash dan Slag

Limbah batu bara seperti Fly ash dan bottom ash dapat dimanfaatkan untuk stabilitas tanah dan keperluan teknik sipil lainnya dalam mengurangi pencemaran lingkungan (Mehta, K, 2011). Beberapa ilmuwan mengembangkan metode pengalihfungsian limbah ini seperti

yang telah dilakukan sebelumnya oleh Jepang, dengan pemanfaatan limbah batubara bottom ash yang dipakai untuk menggantikan pasir sedangkan fly ash digunakan untuk menggantikan semen. Adapun kekurangan komponen ini adalah Fly ash memiliki karakter yang tidak pernah konstan dan mix desain tidak stabil. Hal ini dikarenakan kandungan kimia yang dihasilkan antara pabrik industri satu dengan lainnya berbeda. Sedangkan bottom ash penggunaannya minim diperhatikan dan kurang difungsikan.

Pozolan dapat dipakai sebagai bahan tambah atau sebagai bahan pengganti semen Portland. Bila dipakai sebagai pengganti sebagian semen Portland umumnya berkisar antara 10 sampai 35 persen berat semen. Bahan tambahan ini dapat membuat beton lebih tahan terhadap garam, sulfat, dan air asam (Kardiyono, Tjokrodinuljo, 1996). Fly ash merupakan limbah pembakaran batu bara yang butirannya lebih halus daripada semen Portland, yang mempunyai sifat-sifat hidrolik. Pada awalnya Fly ash digunakan sebagai bahan penambah semen dengan kadar 5 – 20 % dengan maksud untuk menambah plastisitas adukan beton dan menambah kekedapan beton (Suhud, 1993). Kehalusan dan bentuk bulat butirannya Fly ash pada adukan beton dapat menambah kelecakan pada adukan beton. Penggunaan Fly ash 10-15 % sebagai bahan pengganti semen dapat menambah kekuatan beton (Surya, 2002, Udin, 1994). Secara mekanik Fly ash akan mengisi rongga antara butiran semen dan secara kimiawi akan memberikan sifat hidrolik pada kapur mati yang dihasilkan proses hidrasi. Penggunaan fly ash dalam pembuatan beton dengan proporsi minimal 50% menggantikan semen dikenal dengan istilah beton *High Volume Fly Ash* (HVFA).

Menurut ASTM C618-08a Fly ash dibagi menjadi dua kelas yaitu Fly ash kelas F dan kelas C. Perbedaan utama dari kedua ash tersebut adalah banyaknya calcium, silika, aluminium dan kadar besi di Fly ash tersebut. Walaupun kelas F dan kelas C sangat ketat ditandai untuk digunakan Fly ash yang memenuhi spesifikasi ASTM C618, namun istilah ini lebih umum digunakan berdasarkan asal produksi batubara atau kadar CaO. Yang penting diketahui, bahwa tidak semua Fly ash dapat memenuhi persyaratan ASTM C618-08a, kecuali pada aplikasi untuk beton, persyaratan tersebut harus dipenuhi. Fly ash kelas F: merupakan Fly ash yang diproduksi dari pembakaran batubara anthracite atau bituminous, mempunyai sifat pozzolanic dan untuk mendapatkan sifat cementitious harus diberi penambahan quick lime, hydrated lime, atau semen. Fly ash kelas F ini kadar kapurnya rendah ($\text{CaO} < 10\%$).

Fly ash kelas C: diproduksi dari pembakaran batubara lignite atau sub-bituminous selain mempunyai sifat pozzolanic juga mempunyai sifat self-cementing (kemampuan untuk mengeras dan menambah strength apabila bereaksi dengan air) dan sifat ini timbul tanpa penambahan kapur. Biasanya mengandung kapur ($\text{CaO} > 20\%$) [14][18].

Sejumlah penelitian telah mencatat pengaruh penggunaan *Fly ash* pada beton. *Fly ash* sebagai pengganti semen berdampak positif pada daya tahan dan workability beton (Schneider, M. et. al, 2011). Penggunaan *Fly ash* meningkatkan kemampuan kerja beton, sedangkan laju perkembangan kekuatan dipengaruhi oleh faktor air semen (w/c ratio) dan persentase *Fly ash* dalam campuran beton. Selain itu, *Fly ash* beton dapat mengurangi susut pengeringan pada beton dengan kelas yang sama jika perbandingan air dan pengikat (water-to-binder ratio) disesuaikan. Pemanfaatan *Fly ash* sebagai bahan pengganti semen dapat mengurangi emisi CO₂ dari produksi semen, sehingga memberikan kontribusi dalam mendukung penciptaan pembangunan yang berkelanjutan.

Fly ash sebagai material silika adalah material pozzolan yang paling banyak digunakan sebagai bahan tambah material semen. Dalam industri konstruksi pengembangan dan penggunaan semen campuran semakin meningkat dan *Fly ash* mendapat perhatian lebih karena penggunaannya dapat meningkatkan properti dari semen, menghemat biaya, dan mengurangi dampak negatif pada lingkungan. Penggunaan *Fly ash* juga mengurangi rata-rata ukuran pori pada beton sehingga diperoleh permeabilitas beton yang lebih kecil. Selain itu, nilai permeabilitas menjadi lebih rendah, panas hidrasi juga mengalami penurunan karena kenaikan temperatur terutama pada beton massa juga menjadi sangat rendah. Pemakaian *Fly ash* juga merupakan tindakan peduli lingkungan karena dapat memanfaatkan limbah dan membuat limbah menjadi sesuatu yang bernilai ekonomis.

Untuk mengatasi permasalahan yang berkaitan dengan pemakaian *Fly ash* di dalam beton maka yang perlu dilakukan diseminasi hasil-hasil penelitian terbaru yang berkaitan dengan komposisi kimia *Fly ash* sehingga kategori B3 terhadap *Fly ash* dapat diperbaiki. Menurut Malhotra dan Mehta (2005) *Fly ash* aman digunakan untuk bahan pembuat beton karena hanya mengandung prosentase kecil logam beracun di bawah ambang batas yang ditetapkan. Demikian juga hasil penelitian Trihadiningrum dan Sari (2004) juga menunjukkan bahwa *Fly ash* memiliki kandungan logam berat yang sangat kecil meskipun terjadi peningkatan kadar sulfat di areal penimbunan *Fly ash* [23].

Sifat Fisik Fly Ash

Fly ash mengandung unsur kimia antara lain silika (SiO₂), alumina (Al₂O₃), fero oksida (Fe₂O₃) dan kalsium oksida (CaO), juga mengandung unsur tambahan lain yaitu magnesium oksida (MgO), titanium oksida (TiO₂), alkalin (Na₂O dan K₂O), sulfur trioksida (SO₃), pospor oksida (P₂O₅) dan carbon. Faktor-faktor yang mempengaruhi sifat fisik, kimia dan teknis dari *Fly ash* adalah tipe batubara, kemurnian batubara, tingkat penghancuran, tipe pemanasan dan

operasi, metoda penyimpanan dan penimbunan. Adapun komposisi kimia dan klasifikasinya seperti dapat dilihat pada Tabel 1.

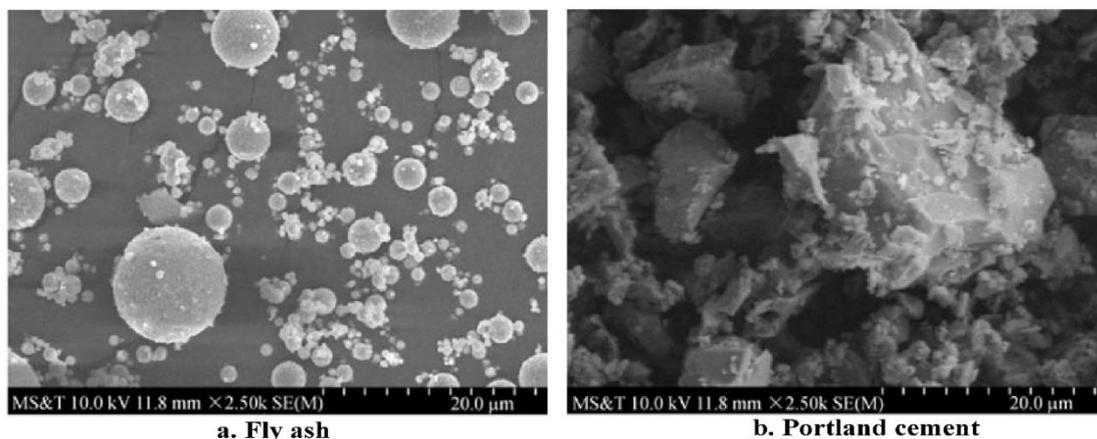
Tabel 1. Komposisi dan Klasifikasi Fly Ash

Komponen (%)	Bituminus	Subbituminus	Lignit
SiO ₂	20 - 60	40 - 60	15 - 45
Al ₂ O ₃	5 - 35	20 - 30	20 - 25
Fe ₂ O ₃	10 - 40	4 - 10	4 - 15
CaO	1 - 12	5 - 30	15 - 40
MgO	0 - 5	1 - 6	3 - 10
SO ₃	0 - 4	0 - 2	0 - 10
Na ₂ O	0 - 4	0 - 2	0 - 6
K ₂ O	0 - 3	0 - 4	0 - 4
LOI	0 - 15	0 - 3	0 - 5

Fly ash dan semen mempunyai kemiripan jika ditinjau dari sifat fisik. Kemiripan sifat fisik ke duanya dapat ditinjau dari beberapa variabel. Perbandingan sifat fisik *Fly ash* dan semen Portland dapat dilihat pada tabel 2 berikut.

Tabel 2. Perbandingan Sifat Fisik Fly Ash dan Semen Portland

Variabel pembanding	<i>Fly ash</i>	Semen Portland
Kehalusan butir	5-27% lolos saringan 45 mili	80% lolos saringan 44
Berat jenis	micron 2,15 – 2,8 g/cm ³	mikron 3,15 g/cm ³
Waktu pengikatan awal	423 menit	60-120 menit
Specific gravity	2,15-2,6	3,15
Suhu pengikatan	24-27 ⁰ C	35 ⁰ C



Gambar 1. Bentuk Partikel Semen Portland dan Fly Ash

Studi Literatur

Dalam upaya memperbaiki kelemahan pemakaian abu terbang di dalam beton apalagi dalam jumlah yang cukup besar atau high volume fly ash (HVFA) concrete, maka telah dilakukan beberapa penelitian seperti:

Pada tahun 1937, Davis dkk. melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh penggunaan fly ash sebagai pengganti semen Portland pada sifat-sifat mortar dan beton. Ini studi termasuk abu terbang dari lima belas sumber yang berbeda dan semen Portland dari tujuh komposisi. Dalam penelitian ini, abu terbang dalam persentase hingga 50% dicampur dengan semen portland. Sifat-sifat yang diselidiki meliputi kekuatan, elastisitas, volume perubahan, aliran plastik, panas hidrasi, dan daya tahan yang ditunjukkan oleh resistensi terhadap pembekuan dan pencairan, dan dengan resistensi terhadap aksi natrium sulfat. Para penulis menyimpulkan bahwa abu terbang dengan kandungan karbon yang cukup rendah dan kehalusan yang cukup tinggi menunjukkan tingkat aktivitas pozzolan yang tinggi dibandingkan dengan kebanyakan pozzolan alami. Mereka melaporkan bahwa ketika abu terbang tersebut digunakan dalam persentase sedang (antara 30% dan 50%) sebagai pengganti semen portland, dimungkinkan untuk memproduksi beton dengan kualitas yang sama dan terkadang lebih unggul dari beton yang terbuat dari semen Portland saja. Bahkan, Davis et al. melaporkan bahwa campuran beton yang mengandung fly ash memiliki nilai yang lebih rendah kuat tekan pada usia dini tetapi kekuatan tekan yang jauh lebih tinggi di kemudian hari, serta panas hidrasi yang lebih rendah dan ketahanan yang lebih besar terhadap serangan sulfat.

Pada tahun 1985, Pusat Teknologi Mineral dan Energi Kanada (CANMET) mengembangkan beton HVFA yang menggabungkan abu terbang rendah kalsium (Kelas F) volume tinggi. Banyak penyelidikan yang dilakukan di CANMET menunjukkan bahwa beton HVFA memiliki sifat mekanik yang sangat baik dan karakteristik daya tahan.

Pada tahun 1989, Langley dkk. menyelidiki beton yang menggabungkan volume tinggi Kelas F abu terbang. Campuran beton ini mengandung 56% pengganti fly ash menurut beratnya bahan semen total. Beton yang diselidiki menyajikan beberapa rasio bahan air-semen yang berbeda. Karena kandungan air yang sangat rendah yang digunakan dalam penelitian ini, campuran peredam air jarak tinggi (High Rang Water Reducing: HRWR) digunakan untuk mencapai kemerosotan tinggi. Penulis menyimpulkan bahwa penggunaan volume tinggi fly ash Kelas F dalam beton memberikan bahan yang ekonomis untuk kekuatan pada urutan 9.000 psi pada 120 hari. Mereka juga melaporkan bahwa data laboratorium yang luas menunjukkan bahwa persentase optimum fly ash harus dalam kisaran 55% sampai 60% dari total kandungan bahan semen dalam istilah kesimpulan yang signifikan, mereka melaporkan bahwa data uji pada sifat kekuatan, modulus elastisitas, susut kering, mulur, dan daya tahan beku-cair

menunjukkan bahwa beton menggabungkan kandungan semen Portland yang rendah dan volume abu terbang yang tinggi dibandingkan menguntungkan untuk beton semen Portland konvensional.

Pada tahun 1990, CANMET (Okamura, H. and Ozawa, K, 1996) melakukan proyek untuk mengembangkan basis data teknik pada Beton HVFA yang menggunakan abu terbang dan semen pilihan dari A.S investigasi dilakukan oleh Electric Power Research Institute (EPRI) di Palo Alto, CA. Delapan fly ash, meliputi berbagai mineralogi dan komposisi kimia, dan dua semen Portland ASTM Tipe I dari dua sumber berbeda digunakan dalam penelitian ini. Sebanyak 16 campuran beton air-entrained dipertimbangkan. Rasio bahan air-untuk-semen dipertahankan pada nilai konstan 0,33 untuk semua campuran. Proporsi fly ash dalam total kandungan bahan semen adalah 58% dari berat.

METODE PENELITIAN

Beberapa literatur yang dipakai sebagai bahan informasi untuk mendapatkan materi penelitian bersumberkan dari textbook, artikel ilmiah, journal penelitian yang mengulas mengenai bahan baku fly ash, teknologi pemanfaatan *fly ash* dengan volume dominan terhadap semen (HVFA), metode pembuatan beton dengan cara self compacting concrete (SCC) dan kombinasi antara penggunaan *fly ash* dengan volume lebih banyak dari semen dan cara pembuatan beton dengan HVFASCC.

Literature yang digunakan dalam penelitian ini dikelompokkan sesuai dengan rencana tema pembahasan yakni unsur utama bahan penyusun beton (*fly ash*), dasar argumentasi yang mendukung teori bahwa fly ash bisa menggantikan semen sebagai bahan perekat beton, mekanisme menyusun adukan beton metode SCC dan kombinasi teknik pembuatan beton HVFA-SCC.

Mengumpulkan dan mengurutkan literatur sesuai dengan kelompok bahasan dari rumusan masalah yang ditetapkan. Membuat indikator dan parameter untuk masing-masing bahasan yang akan diuraikan dalam bentuk matrik, sehingga memudahkan untuk menemukan perbedaan satu dengan yang lainnya materi bahasan dari setiap hasil penelitian.

Analisa dan pencermatan setiap pokok bahasan dari masing-masing literatur diuraikan dalam bentuk matriks sehingga memudahkan dalam mengidentifikasi setiap literatur yang berisi teori yang dikembangkan untuk menjawab atas rumusan masalah dan tujuan dari penelitian ini. Analisa dari literatur ini dilakukan untuk membangun dan mengembangkan landasan teori, kerangka berpikir dan menentukan dugaan sementara (hipotesis penelitian), sehingga didapatkan upaya mengelompokkan, mengorganisasikan dan menggunakan variasi

pustaka untuk penelitian yang berkaitan penggunaan *fly ash* untuk pembangunan berkelanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Fly ash sebagai material produk sampingan dari proses pembakaran batu bara untuk pembangkit listrik mempunyai sifat pozzolanic, dimana sebagai pozzolanic mempunyai peran yang sangat besar meningkatkan kekuatan, durabilitas dari beton. *Fly ash* sebagai limbah pembakaran batu bara bisa dimanfaatkan sebagai pengganti sebagian besar >50% semen dalam pembuatan beton yang lazim disebut dengan istilah beton High Volume Fly Ash.

Dalam perkembangannya teknologi beton menetapkan metode desain campuran yang rasional dengan metode Self Compacting Concrete (SCC) dimana beton segar yang dapat memadat sendiri. Beton SCC mampu menjangkau tempat-tempat yang sulit dijangkau dengan sifat beton yang bisa mengalir mengisi dan menjangkau tempat yang sulit dilakukan oleh tenaga manusia. Juga metode SCC menjawab atas efisiensi penggunaan tenaga kerja manusia yang terlibat dalam proses pengecoran beton segar, karena beton segar saat dituangkan dalam cetakan akan mengalir menuju seluruh struktur dalam begisting dengan merata sendiri dengan sangat padat dan merata.

Hasil penelitian yang telah dilakukan memberikan harapan baik atas penggunaan limbah hasil pembakaran batu bara (*fly ash*) dalam porsi yang lebih terhadap penggunaan semen, yakni lebih besar dari 50% untuk mendapatkan beton segar HVFA (High Volume Fly Ash). Penelitian yang lain dalam mendapatkan beton segar dengan variable lain menghasilkan produk yang membuat kinerja bidang konstruksi beton menjadi lebih efisien dan ekonomis dengan metode pembuatan beton SCC (Self Compacting Concrete). Para peneliti menggabungkan dua metode pembuatan beton segar dengan variable yang berbeda menjadi satu kesatuan teknik membuat beton segar, yakni menggabungkan antara metode HFVA dengan metode SCC, lahirlah teknik pembuatan beton segar dengan metode HFVA-SCC.

1. Hasil Penelitian

Beberapa penelitian yang sudah dilakukan dirangkum dalam tabel 4.1 dimana semua variabel yang dibahas dalam penelitian sebelumnya seperti: persentase penggantian semen Portland dengan *fly ash*, sifat-sifat yang diselidiki serta indikator yang dihasilkan dalam penelitian, dan pengujian model dalam skala penuh.

Tabel 3. Ringkasan Hasil Penelitian Terkait HFVA/SCC

**PENGEMBANGAN TEKNOLOGI BAHAN Mendukung Pembangunan Berkelanjutan
Bidang Teknik Sipil (HIGH VOLUME FLY ASH SELF COMPACTING CONCRETE/HVFA-SCC)**

Peneliti	Tahun	HFVA	SCC	HVFA-SCC	Variabel Penelitian								Benda uji skala penuh	
					Kuat desak	Modulus	Kuat Lekatan	Durabilitas	Panas hidrasi	Plastisitas	Penyusutan	Rayapan		
Davis et al.	1937	■			■	■		■	■	■				
Langley et al.	1989	■			■	■		■			■	■		
Hansen	1990	■			■									
Carette et al.	1993	■			■	■		■				■		
Berry et al.	1994	■						■						
Bilodeau et al.	1994	■					■							
Galeota et al.	1995	■			■	■		■			■			
Swamy & Hung	1998	■			■	■					■			
Cabrera & Atis	1999	■			■				■					
Jiang et al.	1999	■						■						
Copeland	2001	■						■						
Mehta	2001	■					■			■	■			
Okamura & Ouchi	2002		■		■				■					
Li	2004	■			■			■						
Cross et al.	2005	■			■	■	■			■			■	
Bouzouba et al.	2007	■			■		■							
Koyama et al.	2008	■			■								■	
Wardani	2008	■												
Elsageer	2009	■			■									
Namagga & Atadero	2009	■				■	■							
Bentz	2010	■			■			■						
Mohan Rao et al.	2011	■			■								■	
Wolf	2011	■			■	■								
Solikhin et al.	2011	■												
Ortega	2012			■	■	■		■	■	■	■	■	■	■
Arizoumandi & Volv	2013	■										■		
Arizoumandi & Volv	2013	■			■	■					■	■		
Arizoumandi et al.	2013	■			■	■					■	■		
Arizoumandi, et al.	2014	■			■	■		■	■	■	■	■	■	■
Arizoumandi, et al.	2015	■			■	■		■	■	■	■	■	■	■
Alghazali & Meyer	2017			■	■	■		■	■	■	■	■	■	■
Lisantonno et al.	2017	■			■	■		■	■	■	■	■		
Attar	2018			■			■		■	■	■			
Dragas et al.	2021	■			■	■	■		■	■	■			
Budi et al.	2021			■	■	■		■	■	■	■	■	■	■
Sen Du et al.	2021	■					■					■		
Kristiawan	2022			■	■	■						■	■	■
Rohman	2022			■	■	■						■	■	■

a. Penggunaan Bahan Fly Ash

Dari hasil penelitian terdahulu yang telah dilakukan dan dijadikan rujukan untuk penelitian studi literature ini dikelompokkan dalam jenis penelitian yang membahas penggunaan material fly ash. Penggunaan fly ash sebagai bahan campuran ataupun sebagai bahan pengganti fungsi semen Portland didapatkan rekomendasi hasilnya sama dan terkadang lebih baik dibanding dengan menggunakan semen Portland biasa.

Penelitian tersebut dalam sub-bab 2.5 Studi Literatur yakni Penelitian Davis, 1937; Pusat Teknologi Mineral dan Energi Kanada [(The Canada Centre for Mineral and Energy Technology (*CANMET*)), 1985 & 1990; Langley, 1989; Hansen, 1990, Sivasundaram et al., 1990; Berry, 1994; Bilodeau dkk. 1994; Jiang, dkk., 1999; Copeland et al., 2001; Wardani, 2008; Bentz, 2010; Solikhin et al., 2011;

b. Metode High Volume Fly Ash (HVFA)

Penelitian terdahulu yang dijadikan rujukan dalam penelitian ini pokok bahasannya meneliti benda uji dari aspek fisik dan mekanik baik serta ketahanan dalam bentuk uji sampel standar maupun model (skala penuh) yang menggunakan metode mix disain HVFA.

Kelompok hasil penelitian yang digunakan sebagai rujukan dalam penelitian ini tersebut dalam sub-bab 2.5 Studi Literatur yakni Penelitian Langley, 1989; Carette et al., 1993; Bilodeau dkk., 1994; Galeota dkk., 1995; Swamy dan Hung, 1998; Cabrera dan Atis, 1999; Jiang dkk., 1999; Mehta, 2001; Li, 2004; Croo et al., 2005; Bouzoubaa dkk., 2007; Koyama dkk., 2008; Elsageer et al., 2009; Namagga dan Atadero, 2009; Bentz, 2010; Mohan Rao dkk., 2011; Wolf, 2011; Solikin et al., 2011; U.S. Department of Transportation, 2012; Arizoumandi, Volv, 2013; M. Arezoumandi, J.S. Volv, 2013; Arezoumandi et al., 2013; Arezoumandi, Looney, Volvz, 2014; M. Arezoumandi, J.S. Volv, C.A. Ortega, J.J. Meyer, 2015; A. Lisantono, H.Y. Wigroho, R.A. Purba, 2017; Dragas J. et. al., 2021; Sen Du, et. al., 2021;

c. Metode Self Compacting Concrete (SCC)

Pada tahun 1988 di Jepang dikembangkan beton yang memadat sendiri Self Compacting Concrete (SCC). Peneliti yang menginisiasi tersebut adalah Hajime Okamura dan Masahiro Ouchi. Metode disain campuran dan metode pengujian syarat beton memadat sendiri telah ditetapkan sebagai beton standar mix-design.

Penelitian tersebut dalam sub-bab 2.5 Studi Literatur yakni Okamura, Ouchi, 2002 dalam literature ini menetapkan tata cara dan spesifikasi teknis dalam mendapatkan adukan metode SCC.

d. Metode High Volume Fly Ash-Self Compacting Concrete (HVFA-SCC)

Dari hasil pengembangan metode HVFA dan metode SCC masing-masing menghasilkan campuran beton segar maupun beton mengeras yang memenuhi kualitas mutu untuk pekerjaan konstruksi bangunan dan ditinjau dari aspek lingkungan sangat menguntungkan sebagai bangunan konstruksi yang ramah terhadap lingkungan.

Dari penelitian yang telah dilakukan dalam rujukan sub-bab 2.5 Studi Literatur bahwa beberapa tema yang menggunakan metode perencanaan pencampuran beton (mix design) HVFA-SCC sebagai berikut : Ortega, 2012; H.H. Alghazali, J.J. Meyer, 2017; T. S. al-Attar, 2018; Budi, A.S. et. al., 2021; Kristiawan S.A., at. al., 2022; Rohman, R.K., at. al., 2022.

2. Pembahasan

Penelitian ini mengangkat tema penggunaan bahan untuk pembangunan yang berkelanjutan dalam rangka menyelamatkan bumi atas eksploitasi alam untuk mendapatkan bahan dasar dan pencemaran udara serta limbah yang dihasilkan dari proses produksi untuk pembangkit tenaga listrik dari pembakaran batu bara yang semuanya menjadi ancaman kerusakan lingkungan baik bumi dan udara. Penggunaan fly ash dalam skala besar (>50%) terhadap perbandingan penggunaan bahan semen Portland untuk membuat beton segar menjadi salah satu solusi pemanfaatan bahan baku konstruksi dari limbah untuk mendukung pembangunan berkelanjutan.

Fly ash secara material sebagai bahan limbah ternyata bisa dimanfaatkan sebagai bahan pengganti semen Portland untuk penyusun beton, yang berarti fly ash mempunyai nilai ekonomis sebagai pengganti bahan semen yang harus diproduksi yang memerlukan proses panjang dengan biaya yang tinggi dan juga menghasilkan gas CO₂ yang merugikan terhadap lingkungan. Proses pembuatan semen Portland disamping memerlukan proses panjang dan biaya tinggi juga kebutuhan bahan baku batu gamping (kalsium karbonat/calcareous) yang harus ditambang dari alam sekitar kita, juga bisa menimbulkan kerusakan terhadap lingkungan dampak penambangan bahan baku.

a. Penggunaan Bahan Fly Ash

Indikator yang diteliti atas penggunaan bahan baku fly ash sebagai pengganti semen Portland meliputi sifat fisik, kimia dan mekanika serta karakteristik daya tahan yang baik. Fly ash dan semen mempunyai kemiripan dalam hal tingkat kehalusan butir, berat jenis, waktu pengikatan awal, spesifik gravity, suhu pengikatan awal. Fly ash mempunyai bentuk yang relatif bulat dengan dimensi butir yang lebih kecil dibandingkan dengan diameter butir semen Portland. Dengan butir yang lebih halus dibanding dengan semen Portland, fly ash dalam adukan beton segar mempunyai sifat kelecakan (workability/flow ability) yang lebih

baik. Secara mekanik fly ash akan mengisi rongga antara butiran semen, karena dimensi fly ash lebih kecil/halus dengan demikian komposisi kepadatan adukan beton menjadi lebih mampat/padat/kompak, juga fly ash mempunyai sifat kimiawi memberikan sifat hidrolik pada kapur mati yang dihasilkan dari proses hidrasi. Fly ash sebagai bagian dari komposisi pembentuk beton yang mempunyai diameter butiran yang halus dalam beton segar, saat terjadi pengeringan pada beton bisa mengurangi susut. Ukuran diameter fly ash yang kecil bisa mengurangi rata-rata ukuran pori pada beton, sehingga tercapai tingkat kepadatan beton yang lebih kompak/mampat dengan nilai permeabilitas beton yang lebih kecil. Disamping nilai permeabilitas yang kecil, panas hidrasi juga mengalami penurunan karena kenaikan temperatur pada beton (massa) menjadi rendah.

Fly ash dan semen Portland mempunyai sifat kimia yang sama, mengandung kapur, silica, alumina dan oksida besi, yang merupakan unsur pokok terhadap fungsi material. Unsur dominan ini yang memberikan sifat dasar dari fly ash/semen portland, bila terkena air segera terhidrasi dan menghasilkan panas, juga akan terjadi pengerasan terhadap campuran tersebut. Pada dasarnya keempat unsur utama tersebut adalah Trikalium silikat (C_3S , $3CaO.SiO_2$), Dikalium silikat (C_2S , $2CaO.SiO_2$), Trikalium aluminat (C_3A , $3Ca.Al_2O_3$), Tetraalkalium aluminoforit (C_4AF , $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$). Unsur C_3S merupakan unsur pengaruh besar terhadap sifat bahan terhadap pengerasan sebelum berumur 7 hari dan memberikan kekuatan akhir. Sedangkan unsur C_2S membuat bahan tahan terhadap serangan kimia dan juga mengurangi besarnya susutan pengeringan beton. C_3A merupakan unsur berhidrasi secara eksotermik, bereaksi sangat cepat, memberikan kekakuan awal sesudah 24 jam, bereaksi dengan air sebanyak 40% dari beratnya, sangat berpengaruh pada panas hidrasi tertinggi, dengan unsur kandungan lebih dari 10% bersifat kurang tahan terhadap serangan sulfat, direkomendasikan unsur ini tidak lebih dari 5% agar tahan terhadap sulfat. C_4AF mempunyai sifat yang kurang begitu besar terhadap kekerasan beton.

b. Perkembangan High Volume Fly Ash (HFVA)

Penggunaan bahan fly ash dengan komposisi lebih dari 50 % disebut dengan metode High Volume Fly Ash sudah tidak asing lagi di dunia konstruksi beton. Penelitian yang dilakukan dengan terus menerus dengan tinjauan variabel dan indikator beragam sesuai dengan tujuan dari penelitian senantiasa terus dikembangkan. Pemakaian metode HFVA memberikan beberapa keuntungan terhadap beton segar maupun beton yang sudah mengeras. Diantara keuntungan yang diperoleh metode HFVA memberikan peningkatan kelecakan beton segar,

kemudahan finishing permukaan beton, penurunan dalam penyusutan dan rayapan serta peningkatan durabilitas beton yang mengering. Namun dalam perkembangannya masih didapat beberapa hambatan pemakaian yakni peraturan penggunaan HFVA, lambatnya kekuatan tekan beton keras/kering, umur perawatan yang relative lama. Laporan dari beberapa penelitian yang menunjukkan hasil yang memuaskan di lapangan, diperkirakan penggunaan beton HFVA akan meningkat dengan cepat, dan penggunaan bahan fly ash yang ramah terhadap lingkungan. Dengan demikian perlu dukungan hasil penelitian lanjutan untuk mendukung penggunaan metode ini dan memberikan kasanah penelitian yang bisa mengurangi atau menghilangkan faktor-faktor yang menjadi hambatan tersebut.

Teknologi HFVA yang digunakan dalam beberapa penelitian yang telah dilakukan para peneliti sub-bab 4.1.2 memberikan hasil yang memuaskan dalam perilaku mekanik, mengurangi jumlah energi yang diperlukan untuk membuat beton karena penggunaan jumlah semen yang berkurang, lebih awet, tahan terhadap durabilitas dan ekonomis dan yang tidak kalah penting secara global penggunaan fly ash ramah terhadap lingkungan.

c. Perkembangan Teknologi Self Compacting Concrete (SCC)

Inovasi dalam teknologi beton dalam rangka mendapatkan hasil yang efisien dan ekonomis menuntut para ahli di bidang teknologi beton memutar otak untuk mendapatkan cara dan mekanisme yang rasional. Tuntutan pekerjaan beton dengan menggunakan tenaga terampil menjadi beban tersendiri dalam mendapatkan pekerjaan struktur yang padat dan serta adukan beton bisa mengisi dan memenuhi setiap sudut begisting dengan sempurna. Dari keadaan yang demikian ini maka diciptakan beton yang bisa memadat sendiri tanpa diperlukan alat pemadatan getar. Okamura pada tahun 1986 mengembangkan metode pembuatan adukan beton dengan Self Compacting Concrete (SCC).

Beton SCC disebut sebagai beton kinerja tinggi yang mempunyai karakteristik bahwa beton segar dapat memadat sendiri, terhindar dari cacat awal pada saat terjadi pengerasan, protektif terhadap pengaruh luar setelah terjadi pengerasan. Untuk mendapatkan beton SCC perlu dibuat standarisasi produk dan kontrol yang baku dengan melakukan serangkaian tes-tes untuk mendapatkan hasil yang seragam. Okamura menggunakan metode membatasi konten agregat, menempatkan ratio yang rendah air dengan semen serta penggunaan plasticizer agar didapatkan mortar tahan terhadap segregasi, mudah mengalir pada zona yang terhalang oleh tulangan. Pengujian untuk mendapatkan standarisasi metode SCC dengan uji-U, Uji Flow dalam kotak yang diberi penghalang tulangan untuk mendapatkan kekompakan beton segar yang dialirkan melalui rintangan. Uji Slump Flow tes untuk mengetahui deformabilitas dan viskositas

Pengujian workability Self Compacting Concrete dengan menggunakan Slump Cone, untuk mengetahui kemampuan campuran beton mengisi ruangan (Filling ability). Pengujian slump cone juga untuk menguji konsistensi adukan beton agar tidak terjadi segregasi. Pengujian V-Funnel untuk mengukur flowabilitas campuran beton segar, juga bisa untuk mengetahui kemampuan campuran beton menahan segregasi (Segregation resistance). Pengujian L-Shaped Box, untuk mengetahui passingability yang baik.

d. High Volume Fly Ash dan Self Compacting Concrete (HVFA-SCC)

Penelitian yang telah dilakukan dengan membuat adukan beton metode High Volume Fly Ash menghasilkan kinerja mekanika dan karakteristik beton yang memuaskan. Metode Self Compacting Concrete (SCC) juga menghasilkan konstruksi beton yang menguntungkan dari tinjauan ekonomis dari hasil kerja yang tinggi dari adukan tersebut. Penggabungan dua metode pembuatan beton dengan masing-masing karakteristik lebih baik hasilnya dari beton konvensional, maka dilakukan penggabungan dua metode tersebut High Volume Fly Ash (HVFA) dengan metode Self Compacting Concrete (SCC) menjadi satu model dalam pengadukan beton yakni HVFA-SCC.

Beton dengan jumlah *fly ash* yang tinggi mungkin tidak akan bekerja sebaik beton dengan 100% semen. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengatasi kekhawatiran ini. Ortega (2012) menyelidiki kinerja geser balok beton bertulang yang dibangun dengan HVFA beton untuk menentukan potensi penggunaannya di lapangan. Abu terbang 70% penggantian campuran semen dan campuran semen Portland 100% digunakan untuk membangun balok. Hasilnya dibandingkan dengan pendekatan desain berbeda yang umum di Utara Amerika dan Eropa. Dia menyimpulkan bahwa ketentuan kode desain yang ada untuk beton konvensional dapat diterima untuk desain HVFAC. Dalam karya ini, tercatat bahwa bukannya sangat rapuh mode kegagalan mendadak dengan pelepasan energi yang signifikan (mis kebisingan, yang biasanya diamati pada beton konvensional), mode kegagalan geser HVFAC tidak menunjukkan getas yang keras kegagalan dengan pelepasan energi signifikan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Dapat ditarik beberapa kesimpulan bahwa pemenuhan kebutuhan listrik berbahan bakar dari batu bara menyisakan limbah fly ash yang menjadi masalah pencemaran lingkungan terjawab dari hasil penelitian menunjukkan bahwa limbah fly ash dapat dimanfaatkan dan mempunyai nilai ekonomis untuk bahan pengganti semen Portland. Pemakaian fly ash sebagai bahan konstruksi mendukung upaya penurunan jumlah emisi gas CO₂ ke atmosfer, mengatasi masalah limbah batu bara dari pembangkit tenaga listrik dan mendukung upaya pemakaian green concrete dalam industri konstruksi.

Fly ash memiliki kandungan unsur fisik dan kimia dengan komposisi yang setara yang mirip dengan semen portland. Tingkat kelembutan butir *fly ash* menguntungkan untuk mengisi ruang yang kosong menjadikan beton lebih padat dan kompak. Sifat fisik dan kimia yang setara menjadikan fungsi *fly ash* bisa menggantikan semen Portland sebagai bahan pengikat sekaligus bahan pengisi beton menjadi lebih baik. Pemakaian High Volume Fly ash concrete dengan teknik yang tepat tidak hanya dapat menghasilkan beton yang memiliki sifat mekanik yang sama dengan beton normal namun juga menghasilkan beton yang memiliki sifat durabilitas yang lebih baik dibandingkan beton normal. Pemakaian Mortar High Volume Fly ash menunjukkan pengaruh efisiensi secara ekonomis dibanding dengan mortar tanpa fly ash. Metode pengadukan beton dengan cara Self Compacting Concrete (SCC) memberikan hasil adukan yang lebih baik dan lebih ekonomis dalam membentuk beton keras. Parameter beton SCC diukur dengan menggunakan standarisasi alat L-Shaped Box, Slump Cone dan pengujian V-Funnel. Penggabungan dua metode pencampuran beton High Volume Fly ash dengan Self Compacting Concrete menghasilkan metode HVFA-SCC yang dari kedua metode tersebut menghasilkan produk yang lebih baik dan efisien. Dari hasil penelitian menunjukkan nilai parameter masing-masing indikator setara dengan beton konvensional bahkan lebih baik dalam beberapa indikator, sehingga metode HVFA-SCC mempunyai potensi dari produk beton yang lebih baik karakteristiknya dan menjadi produk beton ramah lingkungan dan berkelanjutan sebagai unsur konstruksi.

Penelitian dengan menggunakan fly ash dengan kadar yang lebih tinggi lagi dari 50% untuk mengetahui efektivitas dan efisiensinya dalam berbagai manfaat sebagai pengganti portland cement telah dilakukan oleh para peneliti, perlu dikumpulkan lagi penelitian-penelitian HVFA-SCC yang belum dikumpulkan dalam penelitian ini karena keterbatasan waktu dan literature. Pengumpulan dari penelitian serupa dari referensi yang ada untuk memberikan dasar dan latar belakang untuk penelitian selanjutnya.

Penelitian dengan variable dan indikator yang lain perlu dilakukan dalam bentuk eksperimental untuk mendukung dan melengkapi pustaka penggunaan metode HVFA-SCC dijadikan kode dan standarisasi dalam implementasi, sehingga eksploitasi sumber alam dan pengurangan dampak pemanasan global dalam mereduksi CO₂ bisa tercapai, pembangunan berkelanjutan dan green concrete dalam bidang konstruksi.

DAFTAR REFERENSI

Alghazali, H. and Myers, J. (2019). Bond performance of high-volume fly ash self-

- consolidating concrete in full-scale beams,” *ACI Struct. J.* vol. 116, no. 1, DOI: 10.14359/51706920.
- Davidovits, J. (1994). Global warming impact on the cement and aggregates industries. *World Resour. Rev.*, vol. 6, no. 2, pp. 263–278,
- Douglas, E. Bilodeau, A. Brandstetr, J. and Malhotra, V. M. (1991). Alkali activated ground granulated blast-furnace slag concrete: Preliminary investigation. *Cem. Concr. Res.* DOI: 10.1016/0008-8846(91)90036-H.
- Hendriks C. A. et al., (1999). Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry in Greenhouse Gas Control Technologies 4.
- Kardiyono, Tjokrodimuljo. (1996). *Teknologi Beton. Ke-2*. Yogyakarta: NAFIRI,.
- Mehta, K. (2011). Reducing the Environmental Impact of Concrete. *Concr. Int.*
- Mochamad Solikin, B. S. (2014). Pemanfaatan Abu Terbang untuk Mengurangi Limbah Terbuang PLTU dengan Teknologi HVFA. no. 0617127201,
- Okamura, H. and Ouchi, M. (2003). Self-Compacting Concrete. *J. Adv. Concr. Technol*, vol. 1, no. 1, pp. 5–15,
- Okamura, H. and Ozawa, K. (1996). Self-compacting high performance concrete. *Struct. Eng. Int. J. Int. Assoc. Bridg. Struct. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 269–270. DOI: 10.2749/101686696780496292.
- Peraturan, P. (1999). PP No. 85 Th 1999 Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun. no. 85, pp. 1–10,