

HIGH STRENGTH SELF COMPACTING CONCRETE MEMANFAATKAN LIMBAH ABU TERBANG, METAKAOLIN, SERBUK KACA YANG RAMAH LINGKUNGAN

***Rycho Manggala Ariyanto¹, Ir. Dian Arumningsih DP¹, Gunarso¹**

¹Fakultas Teknik, Universitas Tunas Pembangunan, Surakarta (UTP), Surakarta

^{*} Email : rycho.manggala@gmail.com

ABSTRACT

Indonesia is the fourth most populous country in the world, so infrastructure development is intensifying. With the rapid pace of development, concrete has been widely used as the main material for building structures. High quality concrete has a cylinder compressive strength of more than 6000 psi (41.4 MPa) at 28 days. Self-compacting concrete is fresh concrete that flows easily under its own weight, fills the entire mold, and has the ability to compact itself without a vibrator. In this study, the authors combined the strength of high-strength concrete with the properties of SCC, using innovative materials from fly ash waste and metakaolin as cement substitutes and glass powder as fine aggregate substitute. The purpose of this study is to determine the effect of using these three wastes as an innovative concrete mix of High Strength Self Compacting Concrete that is environmentally friendly. The concrete was produced using the ACI (American Concrete Institute) method. The results of the research can be seen that the use of fly ash as much as 20% and metakaolin as much as 12% of the weight of cement can reduce the use of excess cement. The use of glass powder innovation as much as 10% of the weight of sand can reduce sand mining activities. The test results of concrete samples of cylinder size 10 x 20 cm with fly ash, metakaolin and glass powder innovation obtained a compressive strength of 47 Mpa at the age of 28 days.

Keyword: High Strength Self Compacting Concrete, Fly Ash, Metakaolin, Glass Powder, Compressive Strength

ABSTRAK

Indonesia menjadi negara peringkat keempat populasi penduduk terbanyak didunia, oleh sebab itu banyak digencarkannya pembangunan infrastruktur. Seiring laju pembangunan yang semakin pesat, beton telah banyak dipakai sebagai bahan utama pembuatan struktur. Beton mutu tinggi mempunyai kuat tekan silinder melebihi 6000 psi (41,4 MPa) pada umur 28 hari. *Self Compacting Concrete* adalah beton segar yang mudah mengalir karena berat sendirinya, mengisi keseluruhan cetakan dan memiliki sifat untuk memadatkan sendiri tanpa alat penggetar (*vibrator*). Penelitian ini penulis mengkombinasikan kekuatan beton mutu tinggi dengan karakteristik beton *Self Compacting Concrete*, memanfaatkan material inovasi dari limbah abu terbang dan metakaolin sebagai *substitusi* semen, serta serbuk kaca sebagai *substitusi* agregat halus. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penggunaan ketiga limbah tersebut sebagai inovasi campuran beton *High Strength Self Compacting Concrete* yang ramah lingkungan. Metode yang digunakan dalam pembuatan beton menggunakan metode ACI (*American Concrete Institute*). Hasil penelitian yang telah dilakukan dapat diketahui penggunaan abu terbang sebanyak 20% dan metakaolin sebanyak 12% dari berat semen dapat mengurangi penggunaan semen berlebih. Penggunaan inovasi serbuk kaca sebanyak 10% dari berat pasir dapat mengurangi aktifitas pertambangan pasir. Hasil pengujian sampel beton ukuran silinder 10 x 20 cm dengan inovasi abu terbang, metakaolin, dan serbuk kaca memperoleh kuat tekan 47 Mpa pada umur 28 hari.

Kata kunci: High Strength Self Compacting Concrete, Abu Terbang, Metakaolin, Serbuk Kaca, Kuat Tekan

1. PENDAHULUAN

Indonesia menjadi negara peringkat keempat dengan populasi penduduk terbanyak didunia, oleh sebab itu banyak digencarkannya pembangunan infrastruktur ditengah air. Pada tahun 2021 anggaran pembangunan infrastruktur di Indonesia mencapai 417,4 triliun (sumber: Kemenkeu 2021). Salah satu bahan yang penting dalam pembangunan yaitu beton. Hal ini dikarenakan kelebihan yang dimiliki, yaitu beton relatif murah serta mudah dalam pengerjaan dan perawatannya. Beton mutu tinggi dapat dikatakan sebagai beton dengan kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan beton normal biasa. Keuntungan beton mutu tinggi selain nilai kuat tekannya yang tinggi, masih banyak aspek dan sifat-sifat lain yang tidak ditemukan pada beton mutu normal seperti kekuatan awal tinggi, beton segar yang lebih praktis, lebih encer, lebih mudah dikerjakan, lebih tahan terhadap segregasi, kurang *bleeding*, lebih tahan terhadap abrasi, lebih padat, lebih tahan panas, lebih tahan terhadap korosi, kerapatan lebih tinggi, susut rangkai yang kecil, keawetan lebih tinggi dan homogen. Metode pengecoran untuk beton konvensional dilakukan dengan menggunakan alat bantu *vibrator* namun tidak menjamin kepadatan secara optimal serta memakan waktu dan tenaga yang banyak.

Penggunaan *Self Compacting Concrete* (SCC) adalah salah satu solusi untuk mengatasi masalah ini. Penggunaan beton *Self Compacting Concrete* (SCC) menghasilkan struktur beton yang tahan lama, menghemat tenaga kerja dan kebisingan konsolidasi (Brouwers & Radix, 2005). Beton *Self Compacting Concrete* (SCC) memiliki tingkat kohesif tertentu, sehingga walaupun sifatnya mudah mengalir namun campuran yang dihasilkan tidak terjadi *segregasi* dan *bleeding*. Beton *Self Compacting Concrete* (SCC) dengan semen yang rendah tidak hanya akan menjadi campuran yang murah, tetapi juga akan mengurangi dampak buruknya terhadap lingkungan. Berdasarkan Data Asosiasi Semen Indonesia (ASI) mendata total penjualan semen pada tahun 2021 yaitu 77 juta ton. Industri semen menyumbang emisi karbondioksida (CO₂) ke atmosfer yang sangat besar. Oleh karena itu, salah satu solusi praktis untuk menghemat

penggunaan semen adalah mencoba memanfaatkan material-material sisa (limbah) yang mengandung silika oksida seperti: *fly ash*, *silica fume*, metakaolin, abu sekam padi, abu bonggol jagung, dan sebagainya.

Indonesia menduduki peringkat ketiga sebagai negara terbesar penghasil batu bara setelah Tiongkok dan India. Hal ini menjadi suatu permasalahan karena limbahnya dapat mencemari udara. *Fly ash* adalah hasil dari pembakaran batu bara yang pada umumnya terdapat pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Fungsi dari *fly ash* sendiri adalah sebagai bahan pengganti semen. *Fly ash* bisa meminimalkan pori pada beton sehingga membuat beton memiliki nilai kuat tekan yang tinggi. Metakaolin adalah *pozzolan* yang terbentuk dari bahan dasar kaolin, yaitu salah satu jenis lempung dari sisa limbah penambangan batu kapur yang juga dapat digunakan sebagai *adsorben* logam berat pada limbah cair yang kemudian dipanaskan pada suhu 650°C-900°C selama 6-7 jam sehingga kaolin tersebut mengalami proses *dehidroksilasi*. Menurut data Sumber Statistik Pertambangan Bahan Galian Indonesia di tahun 2015, jumlah usaha tambang kapur yang tersebar di wilayah Indonesia mencapai 17,425 usaha yang tersebar di Indonesia. Hal ini menyebabkan limbah sisa produksi kapur terus bertambah di setiap tahunnya.

Selain material semen, pasir merupakan salah satu material penyusun beton, penggunaan jumlah pasir yang meningkat menyebabkan tingginya angka industri dan pertambangan ilegal menyebabkan kerusakan pada lingkungan. Untuk menyelesaikan permasalahan yang ada, perlu dilakukan substitusi agregat halus (pasir) dengan material inovasi seperti serbuk kaca. Serbuk kaca berasal dari limbah sisa pembuatan kaca dari pabrik yang sebagian besar didaur ulang menjadi barang jadi dan sebagian lagi tidak dimanfaatkan atau dibuang. Hasil dari limbah pecahan kaca yang tidak dimanfaatkan lagi kemudian dihaluskan menjadi butiran seperti pasir dan disaring, sehingga dapat digunakan sebagai substitusi agregat halus. Serbuk kaca secara efisien dapat digunakan untuk membuat beton *Self Compacting Concrete* (SCC) yang memiliki nilai *slump* waktu setting yang baik, serta pengganti sebagian agregat halus (pasir) dalam pembuatan beton SCC dengan serbuk kaca dapat meningkatkan nilai kuat tekan pada beton. Dengan pemanfaatan material limbah ini sebagai alternatif pengganti sebagian semen yaitu menggunakan abu terbang (*fly ash*) dan metakaolin, sedangkan untuk substitusi pada agregat halus menggunakan serbuk kaca pada campuran *High Strength Self Compacting Concrete* Yang Ramah Lingkungan.

Rumusan Masalah

Dari uraian latar belakang diatas, maka rumusan yang akan diteliti sebagai berikut :

1. Apakah limbah abu terbang dan metakaolin dapat dijadikan sebagai bahan alternatif pengganti sebagian semen ?
2. Apakah serbuk kaca dapat dijadikan sebagai substitusi pada agregat halus ?
3. Bagaimana pengaruh pemakaian limbah abu terbang, metakaolin dan serbuk kaca pada *high strength self compacting concrete* yang ramah lingkungan, serta hasil terhadap kuat tekan beton ?
4. Apakah penggunaan ketiga inovasi tersebut dapat lebih hemat biaya dibandingkan beton tanpa menggunakan inovasi ?

Tujuan

Adapun tujuan penulis untuk penelitian ini yaitu sebagai berikut :

1. Mengetahui limbah abu terbang dan metakaolin dapat menjadi bahan alternatif pengganti sebagian semen.
2. Mengetahui serbuk kaca dapat dijadikan sebagai substitusi pada agregat halus.
3. Dapat mengetahui bagaimana pengaruh pemakaian limbah abu terbang, metakaolin, dan serbuk kaca pada *high strength self compacting concrete* yang ramah lingkungan, serta hasil kuat tekan beton.
4. Mengetahui pemanfaatan ketiga inovasi tersebut dapat menghemat biaya pembuatan beton.

Beton Mutu Tinggi (*High Strength Concrete*)

Sesuai dengan perkembangan teknologi beton yang demikian pesat, ternyata kriteria beton mutu tinggi juga selalu berubah sesuai dengan kemajuan tingkat mutu yang berhasil dicapai. Beton mutu tinggi dapat dikatakan sebagai beton dengan kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan beton normal biasa. Menurut (SNI 03-6468, 2000), yang disebut beton mutu tinggi menurut adalah yang mempunyai kuat tekan silinder melebihi 6000 psi (41,4 MPa) pada umur 28 hari. Ada beberapa cara untuk menghasilkan beton mutu tinggi, antara lain pemberian tekanan yang tinggi, *autolavage*, penggunaan semen alumunium dan metode penambahan/*substitusi*. Namun metode yang paling populer digunakan akhir-akhir ini adalah metode penambahan atau *substitusi*. Keunggulan beton mutu tinggi selain nilai kuat tekannya yang tinggi, masih banyak aspek dan sifat-sifat lain yang tidak ditemukan pada beton mutu normal seperti kekuatan awal tinggi, beton segar yang lebih praktis, lebih encer, lebih mudah dikerjakan, lebih tahan terhadap segregasi, kurang bleeding, lebih tahan terhadap abrasi, lebih padat, lebih tahan panas, lebih tahan terhadap korosi, kerapatan lebih tinggi, susut dan rangkai yang kecil, keawetan lebih tinggi dan homogen. Dengan adanya beton mutu tinggi, memungkinkan terciptanya optimalisasi struktur yang berarti minimalisasi bahan konstruksi baik dari betonnya sendiri maupun baja tulangan yang digunakan. Aplikasi beton mutu tinggi antara lain untuk bangunan bertingkat banyak, jembatan, terowongan dan lain sebagainya.

Beton Memadat Sendiri (*Self Compacting Concrete*)

Self compacting concrete (SCC) adalah beton segar yang sangat plastis dan mudah mengalir karena berat sendirinya, mengisi keseluruhan cetakan karena beton tersebut memiliki sifat-sifat untuk memadatkan sendiri tanpa adanya bantuan alat penggetar (*vibrator*) untuk pemadatan. Menurut (Okamura, H; Ouchi, 2003) ada 3 metode dalam pembuatan beton *Self Compacting Concrete*, yaitu :

- a. Menggunakan agregat yang terbatas
- b. Minimum *ratio w/binder*
- c. Penggunaan bahan aditif (*superplasticizer*)

Pembatasan ukuran agregat juga diperlukan, yakni di bawah 20 mm. Selain itu penggunaan *superplasticizer* juga dibutuhkan untuk mendapatkan kelecakan yang tetap tinggi dengan w/c rendah, dengan *slump flow test* adalah 65-80 cm sesuai dengan standar EFNARC atau *European Federation of Specialist Chemicals and Concrete Constructions Systems*. Karakteristik beton memadat sendiri, berdasarkan spesifikasi *self compacting concrete* dari (EFNARC, 2005) apabila memenuhi kriteria sebagai berikut, yaitu : *Filling Ability*, *Passing Ability*, dan *Segregation Resistance*.

Beton Ramah Lingkungan (*Green Concrete*)

Green concrete adalah jenis beton yang menyerupai beton konvensional tetapi produksi atau penggunaan beton tersebut memerlukan jumlah minimal energi dan tidak membahayakan lingkungan. *Green Concrete* sedang banyak digunakan dalam praktek *Green Building* (Worrell et al., 2001). Menurut (*The Institution of Structural Engineers/ISE*, 1999), pembuatan material penyusun beton yang ramah lingkungan ini dapat dilakukan dengan mewujudkan 3 usaha kelangsungan dan konservasi lingkungan, yaitu :

1. Pengurangan emisi gas rumah kaca (terbesar adalah CO₂).
2. Efisiensi energi dan material dasar.
3. Penggunaan material buangan/*waste*, dan pengurangan efek yang mengganggu kesehatan/keselamatan pada pengguna konstruksi, baik timbul selama proses konstruksi ataupun yang timbul selama operasi bangunan, dengan menggunakan Konsep 4R (*Reduce, Refurbish, Reuse and Recycle*).

2. METODOLOGI PENELITIAN

Waktu dan Tempat Pelaksanaan

Waktu pelaksanaan penelitian ini dimulai pada bulan Februari 2023 – Juli 2023. Tempat pelaksanaan penelitian dilakukan di Laboratorium Bahan, Fakultas Teknik, Universitas Tunas Pembangunan Surakarta.

Peralatan yang digunakan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu : Oven, Satu Set Saringan, Mesin Penggetar Saringan, Timbangan Material, *Mixer Concrete*, Kerucut *Abrams*, Cetok Semen, Gelas Ukur, Ember Plastik, Plat *Slump Test*, Meteran atau Penggaris Besi, Alat Penumbuk, dan Alat Bantu Pengujian Material.

Material Penyusun Beton HSSCC (*High Strength Self Compacting Concrete*)

1. Agregat Halus (Pasir)
Pasir adalah sebagian hasil dari batuan besar menjadi butiran batuan yang berukuran kecil. Pasir berfungsi sebagai bahan pengisi yang berasal dari pasir alam. Ukuran butiran pasir umumnya berkisar antara 0,15 mm sampai 4,8 mm. Agregat halus yang digunakan berjenis pasir merapi yang lolos ayakan 4,76 mm No. 4.
2. Serbuk Kaca
Serbuk kaca terbuat dari limbah pecahan kaca yang tidak dimanfaatkan kembali sehingga dijadikan bahan inovasi pengganti sebagian pasir. Serbuk kaca mempunyai kelebihan dibandingkan dengan bahan pengisi pori yang lainnya (Wibowo, 2013), yaitu :
 - a. Mempunyai sifat tidak menyerap air (*zero water absorption*)
 - b. Menjadikan beton tahan terhadap abrasi yang hanya dapat dicapai oleh sedikit agregat alami
 - c. Serbuk kaca memperbaiki kandungan dari beton segar sehingga kekuatan yang tinggi dapat dicapai tanpa penggunaan *superplasticizer*
 - d. Serbuk kaca yang baik mempunyai sifat *pozzolan* sehingga dapat berfungsi sebagai pengganti semen dan *filler*. Serbuk kaca yang digunakan lolos ayakan no. 20. Serbuk kaca yang didapat berasal dari TPA Putri Cempo, Kota Surakarta, Jawa Tengah.

3. Agregat Kasar (*Split*)

Agregat kasar atau *split* dan bisa disebut dengan kerikil ini adalah hasil dari desintegrasi batuan alami atau berupa batu pecah yang dihasilkan dari industri pemecah batu, dengan bentuk diameter ukurannya antara 100 mm-300 mm. Agregat kasar (*Split*) yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini berasal dari Ampel, Kabupaten Boyolali, Jawa Tengah. Agregat kasar (*Split*) ini berukuran 1-2 cm serta tertahan pada saringan No. 4 (4,76 mm).

4. Semen PCC Merek Gresik

Semen adalah pengikat, zat yang digunakan dalam konstruksi yang mengeras dan mengeras serta dapat mengikat bahan lain menjadi satu. Semen yang digunakan tipe PCC merek Gresik dengan berat jenis 3150 kg/m^3 Unsur terpenting dalam semen adalah :

- a. Trikalsium Silikat (C_3S)
- b. Dicalcium Silikat (C_2S)
- c. Tricalcium Aluminate (C_3A)
- d. Tetracalcium Aluminoferrite (C_4AF)

5. Abu Terbang (*Fly Ash*)

Menurut (ACI *Committee 232*), dijelaskan bahwa *fly ash* memiliki ukuran partikel berkisar 1-200 mikrometer dan densitas masing-masing partikel dapat bervariasi antara 1 g/cm^3 - 3 g/cm^3 serta umumnya berbentuk bola padat atau berongga. *Fly ash* memiliki *sfecific gravity* antara $2,15 \text{ gr/cm}^3$ - $2,8 \text{ gr/cm}^3$ dan berwarna coklat muda. Dalam penelitian ini menggunakan abu terbang (*fly ash*) tipe C yang telah disaring dengan lolos saringan No. 200. *Fly ash* ini berasal dari PLTU Paiton Jawa Power, Probolinggo, Jawa Timur.

6. Metakaolin

Metakaolin dapat mengurangi tingkat porositas beton, mempercepat proses hidrasi semen, lebih tahan terhadap serangan asam dan sulfat, serta meningkatkan kepadatan dan mengurangi permeabilitas beton (Sambowo, 2002). Metakaolin mempunyai *sfecific gravity* antara $2,6 \text{ gr/cm}^3$ - $2,63 \text{ gr/cm}^3$ (Ramadhy et al., 2020). Metakaolin ini berasal dari hasil kalsinasi kaolin yang berasal dari limbah tambang kapur di Gunung Kidul, Daerah Istimewa Yogyakarta dan telah lolos saringan No. 200.

7. *Superplasticizer* (Sika ViscoCrete 1003)

Sika ViscoCrete 1003 adalah *superplasticizer* generasi ketiga untuk beton dan mortar. Pemanfaatan Sika ViscoCrete 1003 dapat mengurangi pemakaian air yang ekstrim, *flowabilitas* luar biasa dengan kohesi optimal dan perilaku *self compacting* yang kuat. Penggunaan *Superplasticizer* dapat mengurangi kebutuhan air 12-25% tanpa mempengaruhi pengerjaan sehingga beton berkekuatan tinggi dan permeabilitas rendah dapat diproduksi (Ramachandran et al., 2011).

8. Air PDAM

Air merupakan bahan dasar yang penting untuk pembuatan beton. Air diperlukan untuk bereaksi dengan semen dan sebagai pelumas antar butir agregat agar mudah dikerjakan dan dipadatkan. Air yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan Air PDAM Laboratorium Bahan, Fakultas Teknik, Universitas Tunas Pembangunan Surakarta dan telah sesuai standar (SK SNI 03-2847-2002) yang dapat digunakan dalam proses pencampuran beton

Perencanaan Kadar Campuran Beton

Pada tahapan ini direncanakan pembuatan benda uji berupa 20 buah sampel beton dimana terdiri dari masing-masing 5 *mix design* rencana. *Mix design* kode sampel SB 1 untuk beton normal, *mix design* kode sampel SB 2 untuk beton inovasi *fly ash* (20%), *mix design* kode sampel SB 3 untuk beton inovasi metakaolin (12%), *mix design* kode sampel SB 4 untuk beton inovasi serbuk kaca (10%), *mix design* kode sampel SB 5 untuk beton 3 campuran inovasi.

Tabel 1. Perencanaan Kadar Campuran Beton

No.	Kode Sampel	Semen (%)	<i>Fly Ash</i> (%)	Metakaolin (%)	Pasir (%)	<i>Split</i> (%)	Serbuk Kaca (%)	Jumlah Sampel
1.	SB 1	100	-	-	100	100	-	4
2.	SB 2	80	20	-	100	100	-	4
3.	SB 3	88	-	12	100	100	-	4
4.	SB 4	100	-	-	85	100	10	4
5.	SB 5	68	20	12	85	100	10	4

Sumber : Penelitian,2023

Perencanaan *Mix Design*

Metode perhitungan *mix design* dalam pembuatan uji sampel beton *high strength self compacting* pada penelitian tugas akhir ini menggunakan metode (ACI 211.4R-93, 1998).

Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian nilai kuat tekan beton dilakukan di laboratorium dengan menggunakan benda uji silinder dengan diameter 100 mm dan tinggi 200 mm. Pengujian kuat tekan pada penelitian ini menggunakan Mesin UTM (*Universal Testing Machine*) yaitu mesin atau alat pengujian yang berfungsi untuk menguji tegangan tarik dan kekuatan tekan beton. Sebelum dilakukan pengujian, permukaan benda uji terlebih dahulu diberikan lapisan belerang agar permukaan benda uji menjadi rata (proses *capping*). Rumus untuk mendapatkan nilai kuat tekan beton berdasarkan percobaan dilaboratorium sebagai berikut:

$$f'c = \frac{P}{A}$$

Keterangan :

$f'c$ = Kuat tekan beton (MPa)

P = Beban tekan maksimum (N)

A = luas penampang silinder beton

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Agregat Halus (Pasir)

Tabel 2. Hasil Pemeriksaan Agregat Halus

Uraian	Hasil Pengujian (%)	Persyaratan	Standar	Keterangan
Kadar Lumpur	3,600	<5%	SNI ASTM C117 : 2012	Memenuhi
Kadar Air	4,200	3-5%	SNI 1971 : 2011	Memenuhi
Berat Jenis SSD	2,597	1,6-3,3%	SNI 1970 : 2008	Memenuhi
Penyerapan Air	3,520	3-5%	SNI 1970 : 2008	Memenuhi
Gradasi (Mhb)	3,678	1,5-3,8%	SNI ASTM C136 : 2012	Memenuhi

Sumber : Penelitian,2023

Tabel 2. Menunjukkan hasil dari pengujian agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini telah memenuhi persyaratan sesuai dengan standarisasi agregat halus.

Hasil Pengujian Serbuk Kaca

Tabel 3. Hasil Pemeriksaan Serbuk Kaca

Uraian	Hasil Pengujian (%)	Persyaratan	Standar	Keterangan
Berat Jenis SSD	2,447	1,6-3,3%	SNI 1970 : 2008	Memenuhi
Penyerapan Air	2,669	3-5%	SNI 1970 : 2008	Memenuhi

Sumber : Penelitian,2023

Tabel 3. Menunjukkan hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air serbuk kaca telah memenuhi syarat agregat halus.

Hasil Pengujian Agregat Kasar (*Split*)

Tabel 4. Hasil Pemeriksaan Agregat Kasar

Uraian	Hasil Pengujian (%)	Persyaratan	Standar	Keterangan
Kadar Lumpur	0,8	<1%	SNI ASTM C117 : 2012	Memenuhi
Kadar Air	0,7	3-5%	SNI 1971 : 2011	Memenuhi
Berat Jenis SSD	2,650	1,6-3,3%	SNI 1969 : 2016	Memenuhi
Penyerapan Air	2,249	0,2-2%	SNI 1969 : 2016	Tidak Memenuhi
Gradasi (Mhb)	6,780	6,0-7,1%	SNI ASTM C136 : 2012	Memenuhi
Abrasi Tes	15,6	<40%	SNI 2417 : 2008	Memenuhi

Sumber : Penelitian,2023

Tabel 4. Menunjukkan hasil dari pengujian agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini telah memenuhi persyaratan kecuali untuk kadar penyerapan air melebihi standar dari 0,2-2% dan nilai yang didapatkan 2,249%.

Hasil Pengujian Abu Terbang (*Fly Ash*) dengan Metode XRF

Tabel 5. Hasil Pengujian XRF Abu Terbang (*Fly Ash*)

Unsur Senyawa	Persentase
SiO ₂	48,06 %
Al ₂ O ₃	34,76 %
Fe ₂ O ₃	3,91 %
Total	86,73 %

Sumber : Penelitian,2023

Tabel 5. Menunjukkan hasil pengujian abu terbang (*fly ash*) dengan metode *X-Ray Fluorescence* (XRF). Kandungan senyawa dari abu terbang (*fly ash*) telah memenuhi syarat sebagai bahan *pozzolan* karena total senyawa SiO₂+ Al₂O₃+ Fe₂O₃ < 70% (ASTM C618-19).

Hasil Pengujian Metakaolin dengan Metode XRF

Tabel 6. Hasil Pengujian XRF Metakaolin

Unsur Senyawa	Persentase
SiO ₂	68,09 %
Al ₂ O ₃	14,89 %
Fe ₂ O ₃	5,41 %
Total	88,39 %

Sumber : Penelitian,2023

Tabel 6. Menunjukkan hasil pengujian metakaolin dengan metode *X-Ray Fluorescence* (XRF). Kandungan senyawa dari metakaolin telah memenuhi syarat sebagai bahan *pozzolan* karena total senyawa SiO₂+ Al₂O₃+ Fe₂O₃ < 70% (ASTM C618-19).

Hasil Pengujian Slump Flow Test

Tabel 7. Hasil Pengujian Slump Flow Test

Vareasi Campuran	Kode Sampel	Lebar Slump Flow (cm)		Slump Rata-Rata (cm)
		Arah X	Arah Y	
HSSCC Normal	SB 1	67	66.5	66.75
HSSCC <i>Fly Ash</i>	SB 2	70	71	70.5
HSSCC Metakaolin	SB 3	66	65.5	65.75
HSSCC Serbuk Kaca	SB 4	66	65	65.5
HSSCC 3 Inovasi	SB 5	70.5	72.5	71.5

Sumber : Penelitian,2023

Tabel 7. Berdasarkan data hasil pengujian diatas, nilai rata-rata *slump* campuran HSSCC Normal, HSSCC *Fly Ash*, HSSCC Metakaolin, HSSCC Serbuk Kaca, dan HSSCC 3 Inovasi yaitu : 66,75 cm, 70,5 cm, 65,75 cm, 65,5 cm, dan 71,5 cm. Didapat bahwa nilai *slump* seluruh campuran telah memenuhi standar antara 65-80 cm (EFNARC, 2005).

Hasil Pengujian Kuat Tekan Sampel Beton

Tabel 8. Hasil Kuat Tekan Sampel Beton

Umur Sampel Beton (Hari)	Rekapitulasi Hasil Kuat Tekan Sampel Beton (Mpa)				
	HSSCC Normal	HSSCC <i>Fly Ash</i>	HSSCC Metakaolin	HSSCC Serbuk Kaca	HSSCC 3 Inovasi
7	29,27	31,18	31,82	29,91	32,46
14	40,73	42,00	43,91	43,27	45,18
21	43,27	43,91	44,55	42,64	45,82
28	45,18	45,82	44,55	47,09	47,73

Sumber : Penelitian,2023

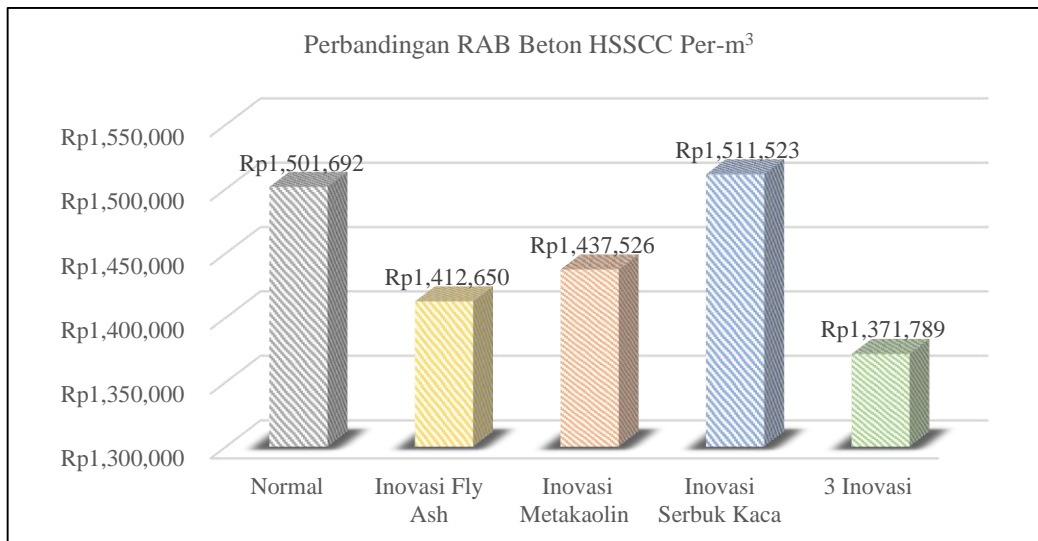
Tabel 8. Dari hasil pengujian sampel beton pada umur 7,14,21,dan 28 hari. Sampel beton 3 inovasi menunjukkan hasil cukup tinggi jika dibandingkan dengan sampel beton normal. Hal ini bisa terjadi karena pengaruh kandungan senyawa didalam bahan inovasi yang saling melengkapi komposisi pada sampel beton sehingga dapat mencapai kekuatan tertinggi sesuai dengan umur pengujian.



(Sumber : Dokumentasi Pribadi 2023)

Gambar 1. Hasil Pengujian Sampel Beton Umur 28 hari

Perbandingan RAB Beton HSSCC Per-m³



Sumber : Penelitian,2023

Gambar 2. Perbandingan RAB Beton HSSCC Per-m³

Kesimpulan dari hasil perbandingan RAB beton per-m³nya, dengan membandingkan selisih antara beton HSSCC normal tanpa inovasi dan HSSCC 3 inovasi (*fly ash*, metakaolin, dan serbuk kaca) sebagai *substitusi* semen dan agregat halus dapat menghemat biaya sebesar Rp. 129,901,00/m³.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan penggunaan limbah abu terbang (*fly ash*) dan metakaolin sebagai pengganti alternatif sebagian semen sangatlah tepat, karena kedua bahan inovasi tersebut mengandung senyawa $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 < 70\%$ sehingga dapat memenuhi syarat sebagai bahan *pozzolan*. Penggunaan serbuk kaca sebagai bahan inovasi alternatif pengganti sebagian agregat halus terbukti dapat memperbaiki campuran beton karena berdasarkan keunggulannya jika dibandingkan bahan pengisi pori alami. Dari hasil pengujian sampel beton pada umur 28 hari diperoleh hasil kuat tekan tertinggi adalah sampel beton HSSCC 3 inovasi campuran sebesar 47,73 Mpa. Hasil perolehan kuat tekan pada sampel beton HSSCC 3 inovasi telah memenuhi syarat sebagai beton mutu tinggi. Perbandingan Rencana Anggaran Biaya (RAB) pada beton HSSCC normal dan beton HSSCC 3 inovasi diperoleh selisih harga sebesar Rp. 129,901,00/m³, sehingga beton HSSCC 3 inovasi lebih menghemat biaya. Dari segi klasifikasi sebagai beton ramah lingkungan penggunaan inovasi abu terbang (*fly ash*), metakaolin, dan serbuk kaca dalam komposisi beton, dapat mengurangi efek rumah kaca karena penggunaan semen berlebih serta dapat mengurangi efek buruk dari tambang pasir terhadap lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 211.4R-93 (1998). *Guide for Selecting Proportional for High-Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash*, ACI Manual of Concrete Practice, Part I, Michigan, Detroit
- ACI Committee 232. (2018). 232.2 R-18: Report for the Use of Fly Ash in Concrete. Farmington Hills, MI, USA: *American Concrete Institute*. [https://doi.org/10.1016/s0001-4079\(19\)32507-5](https://doi.org/10.1016/s0001-4079(19)32507-5)
- ASTM. (2010). ASTM C618-19 *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use*. *Annual Book of ASTM Standards*, i(C), 3–6. <https://doi.org/10.1520/C0618-19.2>
- Brouwers, H. J. H., & Radix, H. J. (2005). *Self-compacting concrete: Theoretical and experimental study*. *Cement and Concrete Research*, 35(11), 2116–2136. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.06.002>
- EFNARC. (2005). *Specification & Guidelines for Self-Compacting Concrete*, Surrey, UK: EFNARC Association House.
- Okamura, H; Ouchi, M. (2003). *Self Compacting Concrete-research paper*. In *Journal of Advanced Concrete Technology* (Vol. 1, Issue 1, pp. 5–15).
- Ramachandran, D., Vishwakarma, V., & Samal, S. S. (2011). *Nanophase modification of concrete for enhancement of microbial properties and durability: Present status and future scope*. *Proceedings of the International Conference on Nanoscience, Engineering and Technology*, ICONSET 2011, October 2015, 636–638. <https://doi.org/10.1109/ICONSET.2011.6167889>
- Ramadhya, W. F., Rahmalia, W., Rahmalia, W., Usman, T., & Usman, T. (2020). Preparasi dan Karakterisasi Komposit TiO₂/Metakaolin Teraktivasi KOH dalam Upaya Menurunkan Energi Celah Pita pada Anoda TiO₂. *Positron*, 10(1), 19. <https://doi.org/10.26418/positron.v10i1.36703>
- Sambowo, I. K. A. (2002). *Engineering properties and durability performance of metakaolin and metakaolin-PFA concrete*. University of Sheffield.
- SNI 03-6468. (2000) Tata Cara Perencanaan Campuran Tinggi dengan Semen Portland dengan Abu Terbang.
- SNI, S. K. (2002). SNI 03-2847-2002. *Perhitungan struktur beton untuk bangunan gedung*. *The Institution of Structural Engineers/ISE*. (1999). Pembuatan material penyusun beton yang ramah lingkungan.
- Wibowo, Levin. (2013) Pengaruh Penambahan Serbuk Kaca dan *Water Reducing High Range Admixtures* terhadap Kuat Desak dan Modulus Elastisitas pada Beton, Tugas Akhir Program Studi Teknik Sipil Universitas Atma Jaya Yogyakarta. Yogyakarta: UAJY.
- Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. O. (2001). *Missions from * the*. *Carbon*, 26, 303–329. <http://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.energy.26.1.303>