

Pengaruh Abu Ampas Tebu Sebagai Substitusi Parsial Semen Terhadap Karakteristik Beton SCC

Margeritha Agustina Morib^{1*}, Ninik Ariyani¹, Andi Perlindungan Gea¹, Romanus Halawa¹

¹Jurusan Teknik Sipil, Universitas Kristen Immanuel, Yogyakarta

*e-mail: margerithaagustina@ukrimuniversity.ac.id

ABSTRAK

Abu Ampas Tebu (AAT) merupakan material limbah industri pabrik gula yang memiliki kandungan silika tinggi dan reaktif sehingga dapat dikategorikan sebagai pozzolan. Material ini jika digunakan sebagai pengganti sebagian semen dapat bereaksi dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang merupakan hasil sampingan dari reaksi hidrasi semen dan memberikan kekuatan akhir pada beton. Penggunaan AAT pada *Self Compacted Concrete* (SCC) diteliti untuk mengetahui pengaruhnya terhadap tingkat workabilitas pekerjaan beton. Rancangan campuran adukan beton diawali dengan penggunaan *particle packing* pada agregat untuk mendapatkan agregat dengan kepadatan optimum. Rancangan campuran dikerjakan dalam volume menggunakan koefisien absolut pasta 1,5 kemudian dikonversi menjadi berat. Komposisi AAT divariasi mulai dari 0%, 5%, 7,5%, 10%, 12,5% dan 15%. Reologi beton segar dihasilkan dari pengujian *slump flow*, *l-box*, *v-funnel* dan *sieve segregation*. Hanya beton *control* yang memenuhi syarat sebagai SCC sedangkan AAT justru meningkatkan kekentalan dan menghambat aliran dan laju pergerakan beton. Komposisi AAT berkontribusi dalam meningkatkan kuat tekan dengan kuat tekan optimum diperoleh pada AAT 5% yaitu sebesar 29,04 MPa. Kuat tarik dan tegangan retak beton berkisar antara 10,5% - 13,6% dari kuat tekan yang dihasilkan. Sedangkan modulus elastis terus mengalami penurunan seiring meningkatnya AAT.

Kata kunci: SCC, *particle packing*, abu ampas tebu, kuat tekan, modulus elastis

ABSTRACT

Bagasse Ash (BA) is a waste material from the sugar factory industry that can be categorized as a pozzolan because of high silica content and reactive. BA used as a partial replacement for cement, can react with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ which is a by-product of the cement hydration reaction and provides concrete final strength. The use of BA in Self Compacted Concrete (SCC) was studied to determine its effect on the workability level of concrete work. The concrete mix design begins with the use of particle packing on the aggregate to obtain aggregates with optimum density. The mixture design is carried out in volume using an absolute paste coefficient of 1.5 then converted to weight. The composition of BA is varied from 0%, 5%, 7.5%, 10%, 12.5% and 15%. The rheology of fresh concrete is produced from slump flow, l-box, v-funnel and sieve segregation tests. Only AAT 0% meets the requirements as SCC while BA increases viscosity and inhibits the flow and concrete movement rate. The composition of BA contributes to increasing compressive strength with optimum compressive strength obtained at 5% AAT which is 29.04 MPa. The tensile strength and cracking stress of concrete range from 10.5% - 13.6% from compressive strength. While the elastic modulus continues to decrease as AAT increases.

Keywords: SCC, *particle packing*, bagasse ash, compressive strength, elastic modulus

1. PENDAHULUAN

Metode pelaksanaan konstruksi beton yang cepat, mudah dikerjakan dan memberikan hasil kekuatan yang baik terus menjadi tantangan dalam industri konstruksi saat ini. Karakteristik beton selalu menarik untuk diteliti, baik saat beton masih segar maupun setelah beton mengeras. Kriteria penerimaan beton segar ataupun setelah mengeras sangat ditentukan oleh tujuan kinerja beton yang akan dicapai baik dari segi kekuatan, durabilitas, stabilitas dan workabilitas (Zulkarnain, 2021). Beton harus didesain dengan mempertimbangkan kondisi lingkungan agar memiliki durabilitas yang diperlukan (BSN, 2019). Durabilitas beton dipengaruhi ketahanan beton terhadap penetrasi fluida. Target mutu beton menjadi lebih tinggi, factor air semen (fas) rendah dengan jenis material sementius tertentu. Dari sisi workabilitas beton menjadi lebih sulit dikerjakan jika tanpa menggunakan bahan kimia tambahan *high range water reducer*. *Self Compacted Concrete* (SCC) dapat mengatasi permasalahan tersebut karena meskipun target mutu beton tinggi dengan fas rendah beton masih tetap mudah mengalir dan memenuhi ruang tanpa perlu alat penggetar.

Beton SCC dirancang dengan cara membatasi jumlah agregat dalam campuran dengan komposisi agregat halus dan agregat kasar harus ditentukan dengan tepat. Selain itu penggunaan fas rendah mengakibatkan kebutuhan semen menjadi besar. Untuk mengurangi penggunaan semen digunakan material pengganti berupa pozzolan yang dalam keadaannya sendiri tidak memiliki sifat seperti semen tetapi jika bereaksi dengan air dan kapur akan mengeras seperti

semen (Badan Standardisasi Nasional, 2002). Umumnya material pengganti menggunakan pozzolan alam dan pozzolan dari sisa pembakaran. Penggunaan pozzolan untuk menggantikan semen efektif mempertahankan kekuatan beton atau bahkan meningkatkan kinerja kekuatan beton (Waleleng et al., 2020). Penggunaan material pozzolan yaitu *fly ash*, semen slag, *silica fume* atau kombinasi material-material tersebut mampu meningkatkan ketahanan beton terhadap penetrasi fluida dan juga meningkatkan workabilitas beton. Abu ampas tebu/*bagasse ash* (AAT) merupakan salah satu material pozzolan hasil pembakaran yang juga dimanfaatkan untuk campuran beton. AAT adalah limbah padat yang dihasilkan dari pembakaran ampas tebu di pabrik gula pasir. AAT digunakan sebagai bahan bakar untuk *boiler* yang digunakan selama proses pengolahan tebu. Abu yang dihasilkan memiliki kadar silika tergantung pada suhu pembakaran (Bonardo & Siburian, 2021) dan alumina yang tinggi sehingga dapat digunakan sebagai pengganti semen dalam campuran beton. Tingkat kereaktifan AAT sebagai material pozzolan diuji berdasarkan luas area permukaan, micro struktur, komposisi kimia, *electric conductivity* dan pertumbuhan kekuatan yang terjadi (Figueiredo & Pavía, 2020).

Peningkatan karakteristik beton diharapkan juga diikuti dengan tingkat kemudahan saat dikerjakan (*workability*). Uji *slump* umumnya digunakan sebagai kriteria penerimaan workabilitas beton. Sedangkan pengujian yang lebih lengkap diterapkan pada SCC karena mengukur kemampuan beton untuk mengalir, melewati rintangan tulangan, kecepatan aliran dan juga ketahanan terhadap segregasi. SCC dikembangkan di Jepang dan kemudian berkembang ke banyak negara di dunia. Campuran SCC segar ini lebih cair, dapat mengalir dan memadat ke setiap sudut struktur bangunan yang sulit dijangkau oleh pekerja, mengisi permukaan yang diinginkan dengan rata (*self-leveling*) mampu mengalir melalui celah di antara besi tulangan tanpa *segregasi* dan *bleeding* (Morib, Zai, et al., 2024). Kesulitan dalam menghasilkan beton SCC adalah pada rancangan campurannya. Belum terdapat metode perancangan baku untuk SCC sehingga apapun metode perancangan yang digunakan selama hasilnya memenuhi kriteria sebagai beton SCC maka dapat dianggap memenuhi syarat. Penggunaan *superplasticizer* (SP) sangat umum digunakan untuk menghasilkan beton mudah mengalir dengan tetap menjaga kekuatannya. Nilai factor air semen ataupun *water powder ratio* bisa diambil seminimal mungkin dan kemampuan alirnya dikembangkan oleh kadar SP dalam campuran. Selain itu komposisi agregat yang tepat dengan membatasi jumlah agregat kasar dan meningkatkan jumlah agregat halus (Morib, Jacob, et al., 2024).

Kriteria penerimaan beton segar dikembangkan melalui penelitian (Okamura & Ouchi, 2003) yang kemudian diadaptasi dan dikembangkan dalam peraturan di Eropa yang tertuang dalam (ENFARC, 2005). Kriteria tersebut meliputi *filling ability*, *passing ability*, *viscosity* dan *segregation resistance*. *Filling ability* adalah kemampuan SCC untuk mengalir dan mengisi keseluruhan bagian cetakan melalui beratnya sendiri dan ditentukan berdasarkan *slump-flow test* menggunakan kerucut Abrams yang dinyatakan dengan besaran diameter yaitu antara 60-75 cm. *Passing ability* adalah kemampuan SCC untuk mengalir melalui celah-celah antar besi tulangan atau bagian celah yang sempit dari cetakan tanpa terjadi adanya segregasi atau *blocking*. *Passing ability* ditentukan menggunakan alat uji *L-Shape box* untuk mendapatkan nilai *blocking ratio* dan *passing ratio* yaitu nilai yang didapat dari perbandingan H_2/H_1 . Kriteria *passing ratio* SCC berkisar antara 0,8 – 1,0. *V-Funnel test* digunakan untuk mengukur viskositas SCC dan sekaligus mengetahui *segregation resistance*. Kemampuan beton segar untuk segera mengalir melalui mulut di ujung bawah alat ukur *V-funnel* diukur dengan besaran waktu antara 3 – 15 detik. *Segregation resistance* adalah kemampuan beton SCC untuk menjaga tetap dalam keadaan yang homogen selama waktu transportasi sampai pada pengecoran. *Segregation resistance* ditentukan berdasarkan persen *laitance* yang tertahan di atas saringan setelah SCC didiamkan selama 15 menit.

Karakteristik kekuatan beton diperoleh dari hasil pengujian kuat tekan, kuat tarik belah dan modulus elastisitas. Kuat tekan SCC lebih tinggi dari beton normal karena penggunaan semen yang cukup banyak dalam campuran. AAT digunakan sebagai material pengganti semen untuk beton normal, namun untuk menghasilkan beton SCC menggunakan AAT perlu dikaji lebih lanjut. (Ulitua & Gole, 2023) meneliti campuran mortar kering yang dapat digunakan sebagai *grouting* menggunakan AAT sebagai substitusi parsial semen. Mortar *grouting* harus mudah mengalir dan memiliki sifat seperti mortar SCC. Hasil penelitian menunjukkan penggunaan AAT 10% menghasilkan kuat tekan tertinggi yaitu sebesar 24,67 MPa.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental di laboratorium dengan prosedur sebagai berikut :

1. Pengujian karakteristik fisik dan mekanik dari material penyusun beton meliputi pengujian agregat halus, agregat kasar, AAT dan SP.
2. Perancangan campuran SCC.
3. Pengujian beton segar meliputi *slump flow*, *l-box*, *v-funnel* dan *sieve segregation*.
4. Pencetakan dan perawatan benda uji silinder beton.
5. Pengujian kuat tekan, kuat tarik belah dan modulus elastisitas pada beton umur 28 hari.

Material Penyusun *Self Compacting Concrete* (SCC)

Pada dasarnya beton terbentuk dari dua bagian utama yaitu pasta semen dan agregat. Pasta semen terdiri dari semen Portland, air dan bahan tambah (*admixture*). Sedangkan agregat terdiri dari agregat kasar (batu pecah dan kerikil) dan agregat halus (pasir). Material yang di gunakan adalah semen *Portland* tipe 1, AAT yang berasal dari pabrik gula madukismo, agregat halus asal kali kuning, agregat kasar asal Clereng, Kulon Progo dan *superplasticizer deltamix SP powder* dengan merek *deltacrete*. Pengujian yang dilakukan meliputi uji kadar lumpur, gradasi agregat, berat satuan dan berat jenis agregat serta pengujian berat jenis AAT dan SP.

Perencanaan *mix design Self Compacting Concrete* (SCC)

Mix design self compacting concrete dalam penelitian ini dilakukan secara bertahap. Tahap awal adalah merancang agregat campuran dengan kepadatan optimum. Agregat halus dan kasar dicampur dengan komposisi 20%:80% sampai dengan 80%:20% dengan peningkatan 5% untuk setiap variasi pencampuran. Setiap campuran dihitung kepadatan dan volume rongga sehingga diperoleh agregat dengan kepadatan maksimum dan porositas minimum. Parameter yang ditentukan dalam perancangan *mix design* SCC pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *Water powder ratio (w/p)* = 0,35
2. Agregat halus : agregat kasar = a% : b%
3. Variasi kadar abu ampas tebu = 0%, 5%, 7,5%, 10%, 12,5%, dan 15%
4. Kadar superplasticizer = 1,6%
5. Koefisien volume absolut pasta = 1,5

Kepadatan agregat halus dan agregat kasar ditentukan dengan membagi hasil berat satuan dan berat jenis dikali 100%. Volume rongga atau porositas dihitung dengan mengurangi 100% volume dengan kepadatannya. Kepadatan agregat dihitung sesuai persamaan 1 dan volume rongga dihitung dengan persamaan 2.

$$\text{Kepadatan} = \frac{\text{berat satuan}}{\text{berat jenis}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Volume rongga} = 100\% - \text{kepadatan} \quad (2)$$

Untuk menghitung kepadatan dan porositas agregat campuran, maka perlu dihitung berat jenis agregat campuran berdasarkan proporsi agregat halus dan agregat kasar. Proporsi agregat halus dinyatakan dalam a% dan proporsi agregat kasar dinyatakan dalam b%, maka berat jenis agregat campuran dihitung sesuai persamaan 3.

$$b_{j_{ac}} = a\% \cdot b_{j_{ah}} + b\% \cdot b_{j_{ak}} \quad (3)$$

Dengan $b_{j_{ac}}$ = berat jenis agregat campuran, $b_{j_{ah}}$ = berat jenis agregat halus, $b_{j_{ak}}$ = berat jenis agregat kasar campuran

Berat satuan agregat campuran dihitung dengan melakukan pengujian berat satuan baik cara *soveled* maupun cara *rodded* sesuai SNI 03-4804-1998 dan ditentukan hasil rata-rata untuk mendapatkan berat satuan setelah agregat dicampur sesuai proporsi yang direncanakan.

Setelah diperoleh agregat campuran dengan kepadatan maksimum maka proses perancangan SCC dapat dilanjutkan. Perhitungan rancangan campuran SCC dilakukan dengan menghitung volume masing-masing material penyusun pasta. Volume pasta harus mengisi penuh volume rongga antar agregat (volume pasta = volume rongga) sehingga diperoleh kepadatan optimum dalam beton. Untuk mendapatkan beton mudah mengalir maka jumlah pasta diperbesar dengan cara mengalikan semua material penyusun pasta dengan koefisien volume absolut pasta. Hasilnya adalah jumlah pasta cukup besar dan jumlah agregat akan berkurang. AAT digunakan sebagai pengganti semen, sehingga untuk setiap peningkatan variasi abu ampas tebu, maka jumlah semen akan semakin berkurang.

Perancangan awal dimulai dengan perancangan pasta. Karena proporsi abu ampas tebu dan *superplasticizer* dihitung dalam persen dalam berat semen, maka berat semen dihitung terlebih dahulu di awal perancangan. Berat semen dihitung dengan persamaan 4.

$$W_{pc} = \frac{BS_{pc}}{BJ_{pc}} \quad (4)$$

Dengan W_{pc} = Berat portland cement (kg), BS_{pc} = Berat satuan portland cement (kg/m^3), BJ_{pc} = Berat jenis portland cement

AAT dan SP dihitung dalam persentase terhadap berat semen. Berat semen dalam pasta adalah berat semen dikurangi dengan berat AAT sebagai pengganti sebagian semen. Total pasta dalam campuran SCC terdiri dari semen + AAT + SP. Setelah diperoleh berat masing-masing material penyusun pasta, maka hasil perhitungan kemudian dikonversi ke dalam volume untuk mengetahui total volume pasta. Konversi material penyusun pasta dari berat ke volume disajikan pada persamaan 5 sampai dengan persamaan 7.

$$V_{pc} = \frac{W_{pc}}{BJ_{pc}BS_a} \quad (5)$$

$$V_{aat} = \frac{W_{aat}}{BJ_{aat}BS_a} \quad (6)$$

$$V_{sp} = \frac{W_{sp}}{BJ_{sp}BS_a} \quad (7)$$

Dengan V_{pc} = volume portland cement (m^3), W_{pc} = berat portland cement (kg), BJ_{pc} = Berat jenis portland cement, BS_a = berat satuan air (1000 kg/m^3), V_{aat} = Volume AAT (m^3), W_{aat} = berat AAT (kg), BJ_{aat} = berat jenis AAT, V_{sp} = Volume SP (m^3), W_{sp} = berat SP (kg), BJ_{sp} = berat jenis SP

Total volume pasta dihitung sesuai persamaan 8.

$$V_p = V_{pc} + V_{aat} + V_{sp} \quad (8)$$

Volume pasta harus mengisi penuh seluruh rongga antar agregat yang dihitung dalam persamaan 2. Untuk memperoleh SCC yang mudah mengalir maka volume material penyusun pasta di kalikan dengan koefisien absolut pasta. Volume agregat campuran dalam SCC dihitung dengan persamaan 9.

$$V_a = 1 - V_p \quad (9)$$

Volume agregat yang diperoleh dibagi antara pasir dan kerikil dengan komposisi sesuai hasil *particle packing* untuk mendapatkan kepadatan maksimal. Hasil rancangan campuran dalam volume kemudian dikonversi menjadi berat dengan mengalikan volume masing-masing material dengan berat jenisnya dikali berat satuan air.

Pengujian beton segar

Pengujian beton segar meliputi pengujian *slump flow*, *l-box*, *v-funnel* dan *sieve segregation* untuk mengetahui kemampuan aliran beton, kemampuan beton melewati tulangan, kekentalan dan kecepatan aliran beton serta ketahanan terhadap segregasi.

Pencetakan dan perawatan silinder beton

Pengujian kuat tekan, kuat tarik belah dan modulus elastisitas menggunakan benda uji beton silinder dengan ukuran diameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Jumlah sampel untuk setiap pengujian adalah 3 buah dengan total 6 variasi komposisi AAT. Total silinder yang dibuat adalah 54 buah. Setelah selesai melakukan uji beton segar, dilanjutkan dengan pencetakan silinder beton pada cetakan silinder dan dilepas saat beton berumur 1 hari. Silinder beton dirawat dengan cara direndam dalam air sampai umur beton siap untuk diuji.

Pengujian kuat tekan, kuat tarik belah dan modulus elastisitas

Uji kuat tekan, kuat tarik belah dan modulus elastisitas dilaksanakan pada silinder beton umur 28 hari menggunakan alat uji *compression testing machine* berkapasitas 2000 KN. Untuk pengujian kuat Tarik belah digunakan alat bantu berupa *split tensile strength set* dan untuk pengujian modulus elastisitas menggunakan *compressometer*.

Kuat tekan beton diperoleh sesuai persamaan 10, kuat tarik belah dihitung sesuai persamaan 11 dan modulus elastisitas dihitung sesuai persamaan 12,13 dan 14.

$$f'_c = \frac{P}{A} \quad (10)$$

Dengan f'_c = kuat tekan (MPa), P = beban tekan maksimum (N), A = luas bidang tekan (mm^2)

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi DL} \quad (11)$$

Dengan f_{ct} = kuat tarik belah (MPa), P = beban tekan (N), D = diameter silinder (mm), L = panjang silinder (mm)

$$E_c = \frac{\sigma_2 - \sigma_{0,00005}}{\varepsilon_2 - \varepsilon_{0,00005}} \quad (12)$$

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad (13)$$

$$E_c = W_c^{1,5} 0,043\sqrt{f'_c} \quad (14)$$

Dengan σ_2 = tegangan saat 40% f'_c (MPa), $\sigma_{0,00005}$ = tegangan saat regangan 0,00005 (MPa), ε_2 = regangan saat 40% f'_c , $\varepsilon_{0,00005}$ = regangan 0,00005, f'_c = kuat tekan beton (MPa), W_c = berat satuan beton (kg/m^3)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Material Penyusun SCC

Pengujian karakteristik material penyusun beton SCC penting untuk memastikan kualitas dan kinerja beton sesuai dengan yang diharapkan. Pada agregat halus dan agregat kasar meliputi pengujian seperti berat satuan, berat jenis, penyerapan air pada agregat, MHB dan *packing density*. Selanjutnya pada semen, AAT dan *SP* dilakukan pengujian berat jenis. Hasil pengujian material penyusun beton SCC disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik Material Penyusun SCC

Material SCC	Berat satuan (kg/m ³)	Berat jenis	Modulus halus butir	Penyerapan air agregat (%)	<i>Packing density</i> (%)
Semen Portland	1250	2,87	-	-	-
Air	1000	1,00	-	-	-
Abu Ampas Tebu	-	0,83	-	-	-
Superplasticizer	-	2,31	-	-	-
Pasir	1395,72	2,78	2,14	1,01	0,50
Kerikil	1627,77	2,55	6,23	3,84	0,64

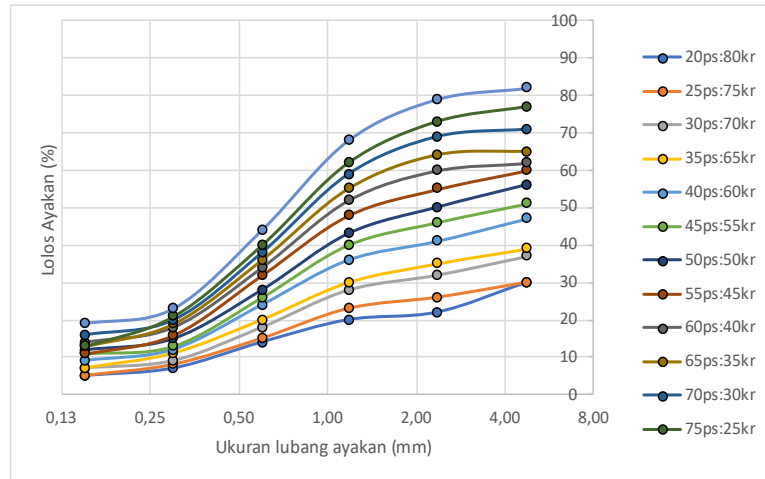
Hasil uji *particle packing*

Gradasi yang baik akan menghasilkan campuran yang memiliki kepadatan maksimum dengan rongga udara minimum diantara partikel-partikel agregat sehingga dapat memenuhi sifat-sifat yang diinginkan, seperti kekuatan, ketahanan dan *workability*. Gradasi campuran pada beton merujuk pada distribusi ukuran butiran agregat (agregat halus dan agregat kasar) dengan benda uji kerikil dan pasir SSD dengan berbagai variasi perbandingan pasir dan kerikil. Hasil pengujian gradasi agregat campuran ditampilkan pada Tabel 2 dan Gambar 1.

Tabel 2 menunjukkan berbagai variasi komposisi agregat halus dan agregat kasar dengan hasil kepadatan optimum 74,78% dan porositas minimum 25,22% dihasilkan oleh campuran 50% pasir dan 50% kerikil. Hasil ini spesifik untuk campuran pada penelitian ini dengan ukuran agregat maksimum 10 mm. Penggantian agregat dengan jenis material lainnya bisa memberikan hasil kepadatan dan porositas yang berbeda. Agregat dengan kepadatan optimum memberikan kontribusi besar dalam kekuatan beton yang dihasilkan (Wahyudi et al., 2017). Proporsi dengan kepadatan optimum ini yang digunakan sebagai komposisi agregat pada perancangan campuran SCC. Gambar 1 menunjukkan berbagai variasi gradasi agregat campuran. Semakin banyak pasir dalam campuran, gradasi menjadi semakin halus dan MHB semakin mengecil secara proporsional.

Tabel 2. Gradasi Agregat Campuran

Ps : Kr	Rasio ps/kr	MHB	Kepadatan	Porositas
0:100	0,00	6,23	63,91	36,09
20:80	0,25	5,02	66,97	33,03
25:75	0,33	4,93	69,32	30,68
30:70	0,43	4,69	69,43	30,57
35:65	0,54	4,58	73,23	26,77
40:60	0,67	4,31	72,85	27,15
45:55	0,82	4,13	72,71	27,29
50:50	1,00	3,96	74,78	25,22
55:45	1,22	3,78	74,57	25,43
60:40	1,50	3,60	73,85	26,15
65:35	1,86	3,48	72,66	27,34
70:30	2,33	3,27	71,64	28,36
75:25	3,00	3,14	70,69	29,31
80:20	4,00	2,85	70,24	29,76
100:0	-	2,14	50,25	49,75



Gambar 1. Gradasi agregat campuran

Hasil Rancangan Campuran Beton

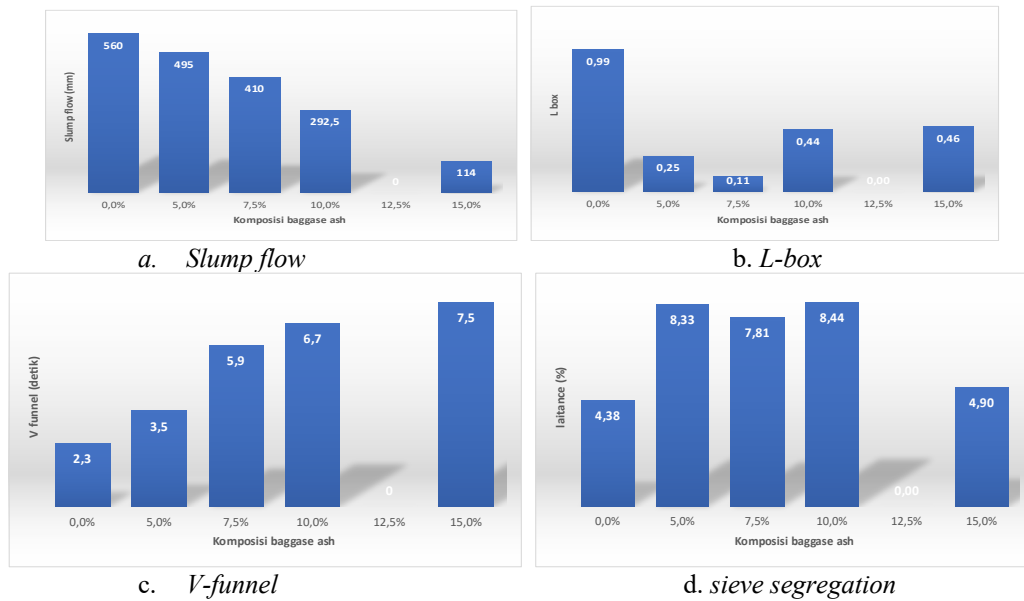
Rancangan campuran SCC dilakukan untuk berbagai variasi komposisi AAT. Kode PC-AAT X% menunjukkan bahwa Portland Cement (PC) diganti dengan AAT dengan komposisi X%. Hasil rancangan campuran SCC diperoleh dari perhitungan dalam volume masing-masing material sesuai persamaan 4 sampai dengan persamaan 9 kemudian dikonversi menjadi berat. Hasil rancangan campuran SCC dengan berbagai variasi AAT disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3 Hasil Rancangan Campuran Beton SCC

Kode Benda Uji	Berat Material Per 1 m ³ SCC (kg)					
	Semen	Air	AAT	SP	Pasir	Kerikil
PC-AAT 0%	653,31	266,02	0	7,84	696,17	638,36
PC-AAT 5%	620,64	279,09	32,66	7,84	676,45	620,28
PC-AAT 7,5%	604,31	285,62	48,99	7,84	666,59	611,24
PC-AAT 10%	587,97	292,16	65,33	7,84	656,73	602,19
PC-AAT 12,5%	571,64	298,69	81,66	7,84	646,87	593,15
PC-AAT 15%	555,31	305,22	97,99	7,84	637,01	584,11

Hasil Reologi Beton Segar

Campuran beton segar diuji menggunakan prosedur pengujian *slump flow*, *l-box*, *v-funnel* dan *sieve segregation* untuk menentukan kelas SCC yang dihasilkan. SCC yang baik dapat diketahui dengan melakukan pengujian reologi beton berdasarkan kriteria penerimaan sesuai (ENFARC, 2005). Hasil pengujian reologi beton segar dapat dilihat pada Gambar 2. Hasil dari empat pengujian reologi menunjukkan bahwa AAT tidak berkontribusi untuk meningkatkan kinerja beton segar justru menghasilkan campuran yang lebih kental dan sulit untuk mengalir. Penggunaan AAT 0% yang digunakan sebagai beton *control* memenuhi syarat sebagai SCC. AAT 12,5% tidak mengalir sama sekali sehingga tidak diperoleh hasil reologi beton segar dari campuran tersebut. Diameter aliran beton dari pengujian *slump flow* terus mengalami penurunan secara konsisten seiring bertambahnya komposisi AAT sebagai pengganti semen. Tidak ada campuran yang menggunakan AAT memenuhi syarat *passing ratio* hasil pengujian *L-box* kecuali beton kontrol yang digunakan. Kondisi sebaliknya terjadi pada pengujian ketahanan terhadap segregasi. Semakin banyak komposisi AAT menghasilkan campuran yang lebih kental dengan viskositas yang baik sehingga kecepatan aliran lebih terkontrol dan *laitance* yang tertahan di atas ayakan beton terkedali di bawah 20% sehingga tidak terjadi segregasi dalam campuran. Sedangkan beton kontrol yang digunakan dengan komposisi AAT 0% mengalir sangat cepat yaitu 2 detik berdasarkan hasil pengujian *v-funnel*. AAT tidak tepat digunakan untuk meningkatkan kinerja beton dan sebagai bahan pengganti untuk beton SCC, namun AAT tetap berkontribusi terhadap peningkatan karakteristik beton keras.



Gambar 2. Hasil Pengujian Reologi Beton Segar

Hasil uji kuat tekan, kuat tarik belah dan modulus elastisitas

Silinder beton diuji tekan saat berumur 28 hari. Untuk setiap satu hasil uji kuat tekan dan kuat tarik belah digunakan rata-rata dari hasil uji 3 buah silinder. Hasil pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah di tampilkan pada Tabel 4 dan Tabel 5. Berdasarkan hasil uji kuat tekan dan kuat tarik belah dapat ditentukan faktor λ menggunakan metode *least square approximation* yang akan digunakan untuk menentukan tegangan retak beton (f_{cr}). Faktor λ juga bisa dimanfaatkan untuk menentukan jenis beton apakah termasuk beton normal atau beton ringan. Hasil uji kuat tekan, kuat tarik belah dan tegangan retak beton ditampilkan pada Gambar 6.

Pengujian kuat tekan bertujuan untuk mengetahui kemampuan beton dalam menahan beban tekan untuk mengetahui mutu campuran SCC yang dirancang serta pengaruh bahan tambah AAT sebagai bahan pengganti sebagian semen terhadap kuat tekan. Tabel 4 menunjukkan kuat tekan beton maksimum diperoleh pada variasi PC-AAT 5% yaitu 29,05 Mpa lebih tinggi dari beton kontrol. AAT sebagai pengganti semen dapat meningkatkan kekuatan beton. Penggantian dengan komposisi sampai 10% masih memberikan hasil yang sama dengan kekuatan beton kontrolnya, sehingga AAT dapat dimanfaatkan untuk menggantikan semen pada campuran beton. Penggantian AAT lebih dari 10% tidak efektif lagi karena kekuatan tekan yang dihasilkan menurun. Pada pengujian tarik belah diketahui kemampuan bahan beton untuk menahan gaya tarik yang dapat menyebabkan terjadinya keretakan atau pecahan. Hasil pengujian menunjukkan nilai yang hampir sama pada komposisi 0%, 5%, 7,5%, 10% namun pada komposisi berikutnya mengalami penurunan. Berdasarkan hasil kuat tekan dan kuat tarik belah dapat dihitung tegangan retak beton berdasarkan nilai λ . Hasil λ berkisar antara 0,84 – 1,16 sehingga beton yang dihasilkan dapat dikategorikan sebagai beton ringan dan beton normal SNI 2847 : 2019 menetapkan nilai λ untuk beton normal adalah 1. Beton control SCC memiliki λ terbesar yaitu 1,16 lebih tinggi dari beton normal, sedangkan komposisi AAT 12,5% menghasilkan λ terkecil yaitu 0,84 dan dikategorikan sebagai beton ringgan. Hal ini disebabkan karena berat jenis AAT yang sangat ringan yaitu kurang dari 1 sehingga proporsi AAT semakin banyak menyebabkan beton yang dihasilkan menjadi lebih ringan. Tegangan retak yang dihasilkan memberikan nilai tertinggi pada komposisi AAT 10% mendekati tegangan retak beton *control*. Tegangan retak hasil pengujian berkisar antara 10,5% sampai dengan 13,6% dari kuat tekan (f'_c). Hasil ini mengkonfirmasi teori bahwa beton yang mengalami tarik akan retak pada saat tegangan mencapai 10% dari kuat tekannya. Komposisi AAT dapat mempengaruhi perubahan sifat mekanik beton SCC

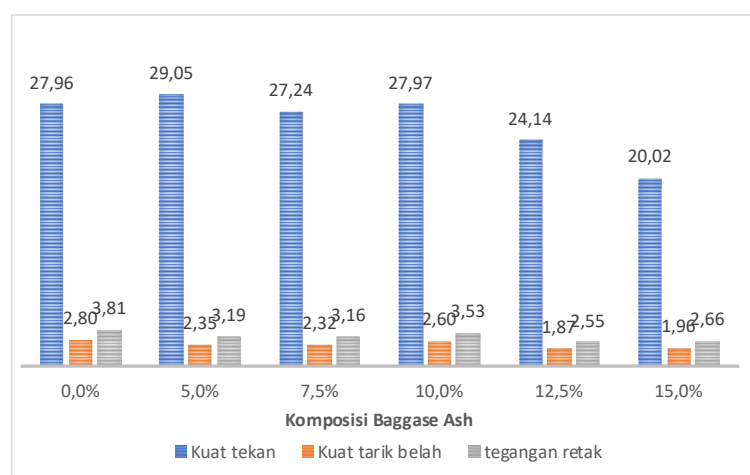
Tabel 4. Hasil Pengujian Kuat Tekan

No	Kode	Berat (kg)	Diameter (mm)	Beban Maks (kN)	f'_c per hasil uji (MPa)	f'_c (MPa)
1	PC-AAT 0%	11,755	145	423	25,616	27,956
		10,245	146	490	29,269	
		11,100	144	472	28,982	
		11,805	145	459	27,796	
2	PC-AAT 5%	11,785	144	501	30,763	29,046
		11,705	143	459	28,579	
3	PC-AAT 7,5%	11,330	142	412	26,015	27,239

No	Kode	Berat (kg)	Diameter (mm)	Beban Maks (kN)	f'_c per hasil uji (MPa)	f'_c (MPa)
4	PC-AAT 10%	11,410	143	490	30,509	27,968
		11,415	145	416	25,192	
		11,260	145	423	25,616	
		10,245	148	490	28,483	
		11,100	142	472	29,804	
5	PC-AAT 12,5%	11,035	145	378	22,891	24,142
		11,035	145	402	24,344	
		11,175	145	416	25,192	
6	PC-AAT 15%	11,130	145	302	18,289	20,015
		11,035	143	359	22,353	
		11,065	144	316	19,403	

Tabel 5. Hasil Pengujian kuat Tarik Belah

No	Variasi	Diameter D (cm)	Panjang L (cm)	Beban Max P (kN)	f_{ct} per hasil uji (MPa)	f_{ct} (Mpa)	λ	f_{cr} (MPa)
1	PC-AAT 0%	14,5	29,8	204	3,007	2,803	1,16	3,81
		14,6	29,4	167	2,478			
		14,5	29,3	195	2,923			
2	PC-AAT 5%	14,5	29,5	160	2,382	2,348	0,96	3,19
		14,5	29,4	123	1,838			
		14,5	29,4	189	2,824			
3	PC-AAT 7,5%	14,6	29,5	138	2,041	2,323	0,98	3,16
		14,3	29,5	183	2,763			
		14,7	29,4	147	2,166			
4	PC-AAT 10%	14,3	29,4	154	2,333	2,598	1,08	3,53
		14,6	29,3	167	2,487			
		14,2	29,4	195	2,975			
5	PC-AAT 12,5%	14,5	29,3	116	1,739	1,872	0,84	2,55
		14,3	29,3	118	1,794			
		14,2	29,3	136	2,082			
6	PC-AAT 15%	14,3	29,2	121	1,846	1,96	0,96	2,66
		14,2	29,3	151	2,312			
		14,4	29,3	114	1,721			



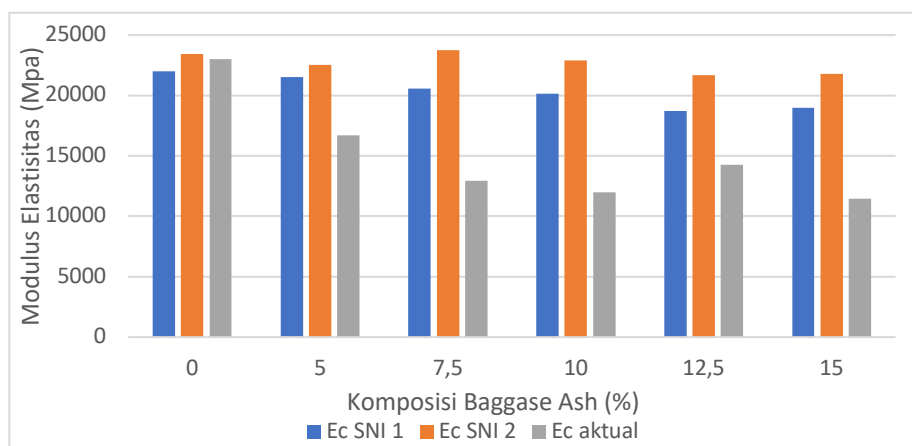
Gambar 6. Kuat tekan, kuat tarik belah dan tegangan retak beton

Modulus elastisitas adalah parameter kekakuan beton yang dapat dihitung berdasarkan kombinasi antara modulus secan dan tangent. Garis tangent yang ditarik diantara dua titik, yaitu titik bawah untuk meniadakan pengaruh retak awal pada regangan 0,00005 dan titik atas pada saat tegangan mencapai 40% dari regangan batas. Hasil pengujian yang dilakukan pada 6 variasi mulai dari AAT 0% sampai dengan 15% disajikan dalam bentuk diagram

tegangan regangan untuk kemudian dihitung nilai modulus elastisitas beton sesuai persamaan 12. Nilai tersebut dibandingkan dengan modulus elastis menggunakan rumus pendekatan berdasarkan SNI 2847:2019 sesuai persamaan 13 dan persamaan 14. Hasil pengujian modulus elastisitas ditampilkan pada Tabel 6 dan Gambar 7 hasil uji pada umur 28 hari yang diperoleh dari rata-rata tiga buah silinder beton untuk setiap variasi pengujian.

Tabel 6. Hasil Pengujian Modulus Elastisitas

REKAPITULASI MODULUS ELASTISITAS				
KODE	BA (%)	SNI 1	SNI 2	HASIL UJI
PC-AAT 0%	0	21984,01	23453,24	22988,23
PC-AAT 5%	5	21546,63	22553,65	16682,66
PC-AAT 7,5%	7,5	20553,77	23741,09	12962,78
PC-AAT 10%	10	20171,47	22898,67	11992,47
PC-AAT 12,5%	12,5	18725,54	21694,04	14289,17
PC-AAT 15%	15	18977,14	21800,16	11452,97



Gambar 7. Diagram Pengujian Modulus Elastisitas

Hasil pengujian menunjukkan bahwa modulus elastis beton SCC yang dihitung menggunakan rumus pendekatan SNI memberikan hasil yang hampir sama baik yang dihitung hanya berdasarkan kuat tekan ataupun kombinasi kuat tekan dan berat satuan beton. Hasil pengujian aktual di lab menunjukkan bahwa beton kontrol dengan komposisi AAT 0% memberikan hasil yang akurat mendekati hasil perhitungan dengan rumus pendekatan SNI. Sementara penggunaan AAT sebagai pengganti semen menunjukkan penurunan yang signifikan pada hasil modulus elastisnya. Berat jenis AAT yang sangat ringan menghasilkan beton dengan berat ringan yang linier dengan hasil kuat tekan, kuat tarik belah dan modulus elastis. AAT masih efektif digunakan sebagai material pengganti semen sampai komposisi 10%. Penggunaan AAT dalam jumlah banyak justru menurunkan kekuatan beton.

4. KESIMPULAN

Kesimpulan yang diperoleh berdasarkan hasil penelitian, disajikan sebagai berikut:

1. AAT tidak tepat jika digunakan untuk produksi beton SCC karena meningkatkan kekentalan dan menghambat aliran. Keseluruhan hasil pengujian reologi beton tidak memenuhi syarat SCC kecuali beton kontrol.
2. AAT dapat digunakan sebagai pengganti sebagian semen dan berkontribusi terhadap peningkatan kuat tekan dan kuat tarik belah. Komposisi optimum adalah pada komposisi 5% dengan kuat tekan sebesar 29,04 MPa lebih tinggi dari beton kontrol. AAT masih efektif digunakan sebagai pengganti semen sampai pada komposisi 10%.
3. Hasil uji kuat tarik belah sesuai dengan kuat tekannya. f_{ct} tertinggi tercapai pada variasi AAT 10% dengan nilai sebesar 2,6 MPa. Sedangkan hasil modulus elastis tertinggi tercapai pada beton kontrol yaitu sebesar 22988,23 MPa sesuai dengan perhitungan berdasarkan rumus pendekatan SNI
4. Nilai λ bervariasi antara 0,84 sampai dengan 1,16, Nilai terendah terjadi pada komposisi AAT 12,5% dan termasuk sebagai beton ringan. Nilai tersebut berkorelasi dengan tegangan retak beton, Tegangan retak berkisar antara 10,5% - 13,6% dari kuat tekan beton.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. (2002). Spesifikasi Abu Terbang dan Pozolan Lainnya Untuk Digunakan Dengan Kapur. In *Badan Standarisasi Nasional* (p. 10).
- Bonardo, D., & Siburian, R. (2021). Analisis Struktur Nano Partikel Silika Dari Abu Ampas Tebu Menggunakan Metode XRD. *Jurnal Einstein* 9, (1).
- BSN. (2019). *SNI-2847-2019-Persyaratan-Beton-Struktural-Untuk-Bangunan-Gedung-1*.
- ENFARC. (2005). *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use "The European Guidelines for Self Compacting Concrete."* www.efnarc.org
- Figueiredo, R. L., & Pavia, S. (2020). A study of the parameters that determine the reactivity of sugarcane bagasse ashes (SCBA) for use as a binder in construction. *SN Applied Sciences*, 2(9), 1515. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03224-w>
- Morib, M. A., Jacob, O., & Halawa, E. S. (2024). METODE PARTICLE PACKINGDAN REOLOGI BETON SEGAR SELF COMPACTED CONCRETE(SCC). *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil XIII*, 36–41.
- Morib, M. A., Zai, H. F., & Ariyani, N. (2024). Perancangan Campuran Self Compacted Concrete Berdasarkan Kuat Tekan dan Aliran Mortar Maksimum Menggunakan Agregat Kering Udara. *Jurnal Teknik Sipil*, 20(1), 75–93. <https://doi.org/10.28932/jts.v20i1.6401>
- Okamura, H., & Ouchi, M. (2003). Self-Compacting Concrete. In *Journal of Advanced Concrete Technology* (Vol. 1, Issue 1).
- Ulitua, L. D., & Gole, R. D. (2023). *Perancangan campuran mortar kering (dry mix) untuk grouting dengan abu ampas tebu sebagai substitusi parsial semen*. Universitas Kristen Immanuel.
- Wahyudi, W., Irwan, I., & Nurmaidah, N. (2017). Pengaruh Pemadatan Campuran Beton Terhadap Kuat Tekan K 175. *JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, BUILDING AND TRANSPORTATION*, 1(1). <https://doi.org/10.31289/jcebt.v1i1.372>
- Waleleng, J. M. B., Waani, J. E., & Jansen, F. (2020). Pengaruh substitusi pozolan alam terhadap sifat fisik dan kinerja dalam campuran ctb. *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 10(2).
- Zulkarnain, F. (2021). *TEKNOLOGI BETON* (I. Sulasmi & M. Arifin, Eds.; 1st ed., Vol. 1). UMSU Press. <http://umsupress.umsu.ac.id>