



PENGARUH ABU SEKAM PADI SEBAGAI SUBSTITUSI ABU TERBANG TERHADAP SIFAT MEKANIK BETON GEOPOLIMER

Alif Akbar Khalifah, Jafar*

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

*Corresponding author, email address: jafar@uii.ac.id

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<i>Article History:</i> Received 23 July 2024 Accepted 18 March 2025 Online 30 June 2025 <i>Keywords:</i> Geopolymer concrete Rice husk ash Mechanical properties Setting time Workability	This study investigates the effect of rice husk ash as a substitute for fly ash on the mechanical properties of geopolymer concrete, with implications for sustainable construction. Fly ash, commonly used as a binder in geopolymer concrete, was partially replaced with rice husk ash at varying percentages of 0%, 4%, 8%, and 12% by weight of the precursor. Tests were conducted to evaluate the impact of this substitution on the workability, setting time, compressive strength, modulus of elasticity, and splitting tensile strength of geopolymer concrete. The results showed that increasing the percentage of rice husk ash reduced workability and accelerated the setting times of the geopolymer paste. Substituting up to 8% rice husk ash improved the mechanical properties, with optimum values obtained at 8% substitution: a compressive strength of 35.98 MPa, a modulus of elasticity of 18,075.66 MPa, and a splitting tensile strength of 2.28 MPa. These findings indicate that rice husk ash can be effectively utilized in geopolymer concrete to enhance mechanical performance while reducing reliance on fly ash and promoting the utilization of agricultural waste. This advancement supports the development of more sustainable and environmentally friendly construction materials, offering a viable alternative to conventional cement-based concrete. ©2025 Magister Teknik Sipil USK. All rights reserved

1. PENDAHULUAN

Beton merupakan bahan bangunan yang umum digunakan pada suatu pembangunan konstruksi. Bahan penyusun beton terdiri dari agregat kasar, agregat halus, air, dan semen. Meningkatnya perkembangan sektor konstruksi di Indonesia, menyebabkan peningkatan produksi semen sebagai bahan pengikat beton. Menurut *Portland Cement Association*, penggunaan semen Portland akan terus meningkat dari tahun ke tahun, diperkirakan sampai tahun 2030, permintaan dan pasokan semen Portland di seluruh dunia hanya dapat memenuhi 67,42% dari kebutuhan. Di sisi lain, peningkatan penggunaan semen menimbulkan kerugian, khususnya terhadap lingkungan. Dalam proses produksi semen, karbon dioksida (CO₂) dalam jumlah besar dilepaskan ke atmosfer. Tingginya emisi karbon berdampak terhadap *global warming* dan perubahan iklim (Olivia, 2011). Bahan yang memiliki sifat seperti semen yaitu pozzolan dapat digunakan sebagai alternatif untuk mengurangi kebutuhan semen Portland sebesar 20-30% dari kebutuhan normal.

Geopolimer adalah salah satu jenis material ramah lingkungan yang dapat digunakan sebagai solusi pengganti semen dalam pengikatan beton, karena bahan penyusunnya tersusun dari sintesa bahan alam non-organik yang dipolimerisasi. Geopolimer dibentuk dari geosintesis yang menghasilkan kandungan senyawa polimer yang terkait secara tetrahedral (Davidovits, 1991). Bahan dasar pembuatan geopolimer yaitu bahan-bahan yang mengandung tinggi unsur silika (Si) dan alumina (Al) (Kusuma dkk., 2014). Material pengikat pengganti semen pada beton geopolimer biasanya menggunakan abu terbang (*fly ash*), abu sekam

padi (*risk hush ash*), abu tebu dan lain-lain (Salwatul Ais, 2017).

Abu terbang berasal dari limbah pembakaran batu bara yang bersifat pozzolan karena didalamnya terdapat unsur silika dan alumina yang tinggi seperti pada kandungan semen umumnya. Abu sekam padi dihasilkan dari sisa pembakaran sekam padi setelah proses penggilingan padi itu sendiri. Sama halnya dengan abu terbang, abu sekam padi memiliki kandungan unsur silika dan alumina yang tinggi sekitar 87-97% (Mehta dan Siddique, 2018), dan memiliki sifat penyerapan terhadap kadar air, sehingga abu sekam padi dapat memperbaiki kinerja pada beton geopolimer. Abu terbang dan abu sekam padi memiliki manfaat pada campuran beton yaitu menjadi solusi alternatif dalam menggantikan semen sebagai bahan pengikat agregat. Bahan pengganti tersebut membutuhkan aktivator yang mengandung alkali sebagai pengaktif reaksi polimerisasi pada prekursor untuk menghasilkan bahan pengikat (*binder*). (Hardjito, 2005) menyatakan alkali aktivator biasanya menggunakan natrium hidroksida (NaOH) 8M sampai 14 M dan natrium silikat (Na_2SiO_3) dengan perbandingan aktivator sebesar 0,5 sampai 2,5. Unsur silika (Si) dan alumina (Al) yang terdapat pada prekursor akan bereaksi dengan aktivator untuk mengikat krikil, pasir, air, dan bahan lainnya menjadi beton geopolimer (Kusuma dkk., 2014). Pemanfaatan bahan alternatif ini diharapkan dapat membantu mengurangi emisi karbon dioksida (CO_2) ke atmosfer dan menjaga lingkungan dari sisa limbah industri, sehingga dapat mencegah lingkungan dari pemanasan global dan perubahan iklim.

Penelitian ini memiliki beberapa tujuan yaitu mengetahui pengaruh abu sekam padi sebagai substitusi abu terbang terhadap sifat mekanik beton geopolimer. Kedua, mengetahui abu sekam padi yang berpengaruh pada waktu ikat (*setting time*) dan kelecakan (*workability*) pada beton geopolimer. Ketiga, mengetahui kadar optimum abu sekam padi yang digunakan terhadap nilai kuat tekan, modulus elastisitas, dan kuat tarik beton. Penelitian ini mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Setiawan dkk Wardhono (2019) dengan sedikit penyesuaian. Pada penelitian tersebut, persentase abu sekam yang digunakan adalah 0% - 12.5% dengan interval 2,5% untuk setiap variasinya sedangkan dalam penelitian ini persentase yang digunakan adalah 0% - 12% dengan interval 4% untuk setiap variasinya.

1.1 Abu Terbang dan Abu Sekam Padi

Menurut ASTM C618-12 abu terbang digolongkan menjadi dua kategori kelas, yaitu *Low Calcium Fly Ash* ($\text{CaO} < 10\%$) atau kelas F yang bersifat pozzolan dan *High Calcium Fly Ash* ($\text{CaO} > 10\%$) atau kelas C yang bersifat pozzolan sekaligus bersifat semen (*cementious*). Pada Tabel 1 di bawah ini disajikan detail persyaratan kandungan kimia abu terbang.

Tabel 1. Persyaratan kandungan kimia abu terbang

No.	Komponen Kimia	Kelas F	Kelas C
1	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, minimal, %	70,0	50,0
2	SO_3 , Maksimal, %	5,0	5,0
3	Kadar Air, Maksimal, %	3,0	3,0
4	Hilang Pijar / LOI, Maksimal, %	6,0	6,0

Sumber: ASTM C618-12

Abu sekam padi adalah hasil dari sisa pembakaran kulit padi atau biasa disebut dengan sekam padi. Abu sekam padi dapat digunakan sebagai material campuran beton, karena memiliki sifat sebagai pozzolan yang didalamnya terdapat kandungan silika tinggi mencapai 89.90% (Hadipramana dkk., 2016). Tabel 2 di bawah ini menyajikan kandungan kimia abu sekam padi.

Tabel 2. Kandungan kimia abu sekam padi

No.	Komponen Kimia	% Berat
1	CO_2	0.10
2	SiO_2	89.90

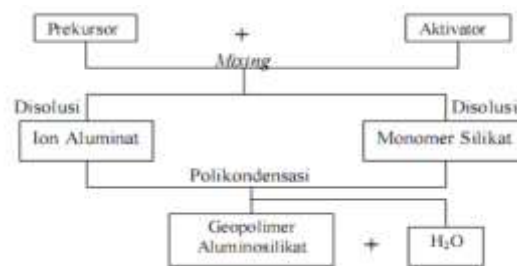
No.	Komponen Kimia	% Berat
3	K ₂ O	4.50
4	P ₂ O ₅	2.45
5	CaO	1.01
6	MgO	0.79
7	Fe ₂ O ₃	0.47
8	Al ₂ O ₃	0.46
9	MnO	0.14
10	S	0 < LLD

Sumber: (Hadipramana et al., 2016)

1.2 Alkali Aktivator dan Proses Pembentukan Geopolimer

Aktivator adalah zat kimia yang digunakan untuk mereaksikan pozzolan dalam prekursor. Aktivator yang digunakan pada beton geopolimer berupa Natrium Silikat (Na₂SiO₃) dan Natrium Hidroksida (NaOH). Natrium silikat digunakan sebagai mempercepat dari reaksi polimerisasi yang terjadi dan natrium hidroksida digunakan untuk mereaksikan senyawa silikat dan alumina yang terkandung dalam prekursor sehingga mendapatkan ikatan polimer yang kuat (Nugrahanto, 2017).

Geopolimerisasi melibatkan proses kimia di mana silika dan alumina bereaksi dengan alkali polisilikat untuk membentuk ikatan polimer Si–O–Al. Dari reaksi kimia tersebut pembentukan geopolimer menghasilkan air. Selama proses pengeringan dan *curing*, air dikeluarkan dari geopolimer untuk memberikan manfaat bagi kinerja beton geopolimer tersebut (Septia G, 2011). Gambar 1 di bawah ini adalah ilustrasi alur polimerisasi.



Gambar 1. Alur polimerisasi geopolimer

Sumber: Septia G (2011)

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental. Seluruh rangkaian pengujian laboratorium dilaksanakan di laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh abu sekam padi sebagai substitusi abu terbang terhadap sifat mekanis beton geopolimer. Persentase abu sekam padi yang digunakan 0%, 4%, 8% dan 12% dari berat prekursor. Pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi pengujian kuat tekan, modulus elastisitas, serta kuat tarik belah beton. Terdapat total 30 benda uji berupa silinder diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Pada Tabel 3 di bawah ini dirangkum rincian benda uji yang disiapkan. Kode BN merupakan kode untuk benda uji beton normal yang bahan penyusunnya merupakan agregat (kasar dan halus), semen, serta air. Adapun kode BG merupakan kode untuk benda uji beton geopolimer dimana bahan penyusunnya merupakan agregat dan geopolimer aluminosilikat. Kode angka di belakang BG menandakan persentase abu sekam padi terhadap pozzolan yang digunakan.

Tabel 3. Pengujian Sifat Mekanis dan Jumlah Benda Uji

Kode Benda Uji	Persentase Abu Sekam Padi	Uji Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas	Uji Kuat Tarik Belah
BN	-	3	3
BG-0	0%	3	3
BG-4	4%	3	3
BG-8	8%	3	3
BG-12	12%	3	3
Total		15	15

2.1 Pengujian Prekursor

Pengujian prekursor dilakukan terhadap material abu terbang dan Abu Sekam Padi untuk mengetahui kadar kandungan unsur silika (Si) dan alumina (Al) yang terkandung didalamnya. Pengujian abu terbang dan abu sekam padi berupa pengujian *X-Ray Flourescence* (XRF). Abu terbang yang digunakan pada penelitian ini berasal dari limbah PLTU 2 Labuan, Pandeglang, Banten. Tabel 4 menyajikan hasil uji XRF abu terbang dan abu sekam padi.

Tabel 4. Hasil uji XRF abu terbang dan abu sekam padi

Senyawa Oksida	Konsentrasi (%)	
	Abu Terbang	Abu Sekam Padi
SiO_2	23,98	86,87
Al_2O_3	5,10	-
Fe_2O_3	33,16	2,09
CaO	8,15	4,45
MnO	0,52	-
MgO	0,11	0,16
K_2O	0,82	2,11
P_2O_5	0,33	1,37
SO_3	0,25	0,51
TiO_2	1,09	-
Na_2O	-	0,58
ClO_2	-	0,87

Berdasarkan hasil pengujian XRF pada Tabel 4, abu terbang terbukti memiliki kandungan unsur silika (Si) dan alumina (Al). Pada pengujian ini abu terbang PLTU 2 Labuan mengandung total senyawa pada $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ sebesar 62,234%. Sehingga abu terbang PLTU 2 Labuan termasuk ke dalam abu terbang kelas C yang mengandung kadar $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 > 50\%$. Untuk abu sekam padi, berdasarkan hasil pengujian XRF yang dilakukan, abu sekam padi mengandung senyawa silika sebesar 86,873%. Berdasarkan kandungan senyawa silika yang terdapat pada abu sekam padi, maka abu sekam padi dapat digunakan sebagai bahan pozzolan pada pembuatan beton.

2.2 Mix Design

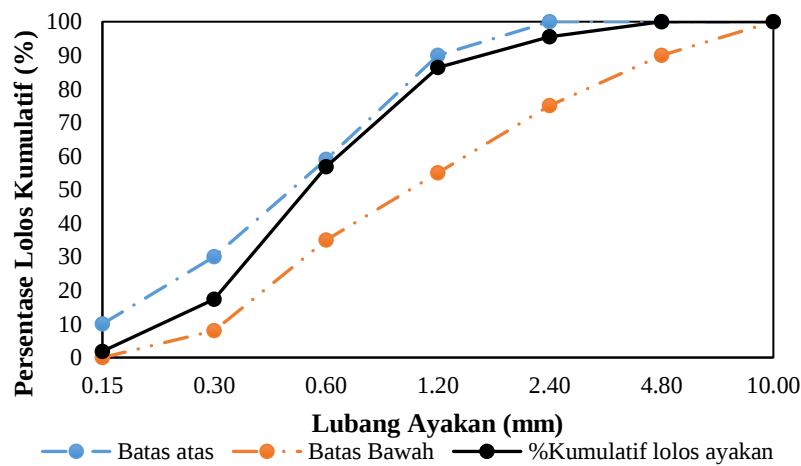
Sampai saat ini belum terdapat standar dalam metode *mix design* beton geopolimer di indonesia. Oleh karena itu, dalam penelitian ini metode perencanaan campuran beton (*mix design*) yang dilakukan berdasarkan perbandingan campuran aktivator dan pendekatan dari SNI 03-2834-2000 tentang tata cara pembuatan rencana campuran beton normal. Penentuan proporsi campuran diawali dengan melakukan pengujian sifat fisis agregat untuk mengetahui berat jenis, berat volume, dan gradasi agregat (kasar dan halus). Rincian hasil pengujian sifat fisis agregat penelitian ini disajikan pada Tabel 5. Setelah itu, dengan merujuk pada SNI 03-2834-2000, didapatkan proporsi campuran seperti disajikan dalam Tabel 6. Campuran tersebut adalah untuk setiap pembuatan 1 m³ beton dengan nilai f'_c rencana sebesar 25 MPa.

Tabel 5. Rincian hasil pengujian propertis agregat

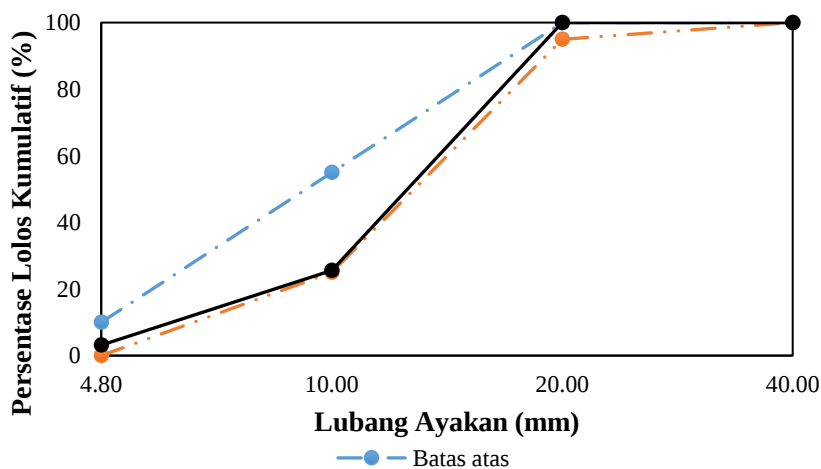
Jenis Pengujian	Agregat Kasar	Agregat Halus	Satuan
Berat Jenis Curah	2,49	2,47	
Berat Jenis SSD	2,54	2,53	
Berat Jenis Semu	2,63	2,61	
MHB	6,68	2,44	
Ukuran Butir/Gradasi	20 mm	Daerah II	
Berat Volume Gembur	1,34	1,49	gram/cm ³
Berat Volume Padat	1,47	1,74	gram/cm ³

Tabel 6. Proporsi Campuran Beton Normal

Material	Berat (kg)
Semen	410
Air	205
Agregat Halus	696,68
Agregat Kasar	982,07



Gambar 2. Grafik Gradasi Agregat Halus Daerah II



Gambar 3. Grafik Gradasi Agregat Kasar Maksimum 20 mm

Selanjutnya, hasil *mix design* tersebut digunakan sebagai acuan untuk membuat beton geopolimer dimana semen yang digunakan akan diganti dengan abu terbang sedangkan air akan diganti dengan alkali aktivator. Pada penelitian ini perencanaan campuran beton geopolimer menggunakan metode perbandingan campuran aktivator $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ yaitu 4 : 2. Konsetrasi molaritas yang digunakan pada Natrium Hidroksida (NaOH) adalah sebesar 10M. Massa molekul relatif (Mr) NaOH diketahui sebesar 40 dan dilarutkan dengan aquades. Rekapitulasi perencanaan proporsi campuran beton geopolimer per 1 m³ ditampilkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Proporsi campuran beton per 1 m³

Persentase Abu sekam padi	Abu terbang (kg)	Abu sekam padi (kg)	Agregat Halus (kg)	Agregat Kasar (kg)	Na_2SiO_3 (kg)	NaOH (kg)
0%	410	0	696,68	982,07	136,67	68,33
4%	393,6	16,4	696,68	982,07	136,67	68,33
8%	377,2	32,8	696,68	982,07	136,67	68,33
12%	360,8	49,2	696,68	982,07	136,67	68,33

2.3 Pengujian Sifat Fisis Beton Segar

Setelah selesai melakukan pencampuran material penyusun beton, berikutnya dilakukan pengujian sifat fisis beton segar. Pengujian sifat fisis beton segar dalam penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi karakteristik awal campuran sebelum mengalami pengerasan. Parameter yang diamati meliputi *workability* (kelecekan) dan *setting time* (waktu ikat) yang dipengaruhi oleh komposisi bahan, rasio alkali aktivator, serta jenis dan kadar sumber silika-alumina seperti abu sekam padi atau abu terbang. Kelecekan beton geopolimer diuji menggunakan uji slump. Pengujian *setting time* dilakukan untuk menentukan waktu yang dibutuhkan beton untuk mulai mengeras, yang dapat bervariasi tergantung pada reaktivitas bahan dan suhu curing. Alat yang digunakan dalam pengujian ini adalah Vicat Apparatus.

2.4 Pengujian Sifat Mekanis Beton Keras

Beton geopolimer yang sudah dimasukkan ke dalam cetakan silinder dirawat dengan metode *dry curing* yaitu dimasukkan ke dalam oven pada suhu 60°C selama 8 jam kemudian didiamkan pada suhu ruangan sampai waktu pengujian (Gambar 4). Setelah usia benda uji mencapai 28 hari, serangkaian pengujian dilakukan untuk mendapatkan nilai kuat tekan, modulus elastisitas, serta kuat tarik belah beton. Menurut SNI 1974-2011, kuat tekan adalah kemampuan beton keras dalam menerima beban tekan per-satuan luas, yang dapat menyebabkan benda uji beton hancur apabila dibebani dengan gaya tekan tertentu oleh mesin uji tekan. Nilai kuat tekan beton dapat dihitung dengan persamaan (1).



(a) Beton dioven selama 8 jam



(b) Beton didiamkan di suhu ruang setelah dioven

Gambar 4. Perawatan beton geopolimer dalam penelitian ini

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

dengan:

$f'c$: kuat tekan beton (MPa),
 P : beban maksimum (N), dan
 A : luas penampang benda uji silinder (mm²)

Menurut SNI 2826-2008, modulus elastisitas atau biasa disebut modulus Young adalah rasio antara tegangan dan regangan aksial yang terjadi pada deformasi elastis, sehingga menggambarkan kemampuan suatu bahan untuk mengalami perubahan bentuk dan kembali ke bentuk aslinya ketika diberi beban. Dalam penelitian ini, pengujian modulus elastisitas merujuk pada peraturan ASTM C469 (Persamaan 2). Selain itu, nilai modulus elastisitas juga dihitung dengan persamaan yang tertulis di SNI 2847-2019 (Persamaan 3).

$$Ec = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0.00005} \quad (2)$$

$$Ec = 4700 \times \sqrt{f'c} \quad (3)$$

dengan:

Ec : Modulus Elastisitas (MPa)
 S_2 : Tegangan pada saat 40% dari tegangan batas (MPa)
 S_1 : Tegangan pada saat regangan 0.00005 (MPa)
 ε_2 : Regangan longitudinal akibat tegangan sebesar S_2
 $f'c$: kuat tekan beton (MPa)

Pengujian selanjutnya adalah pengujian tarik belah beton. Menurut SNI 03-2491-2014, pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan nilai kekuatan tarik belah pada benda uji dengan cara meletakkan benda uji silinder secara horizontal/sejajar dengan permukaan meja penekan pada mesin uji tekan. Nilai kuat tarik belah beton dihitung dengan persamaan 4 (SNI 03-2491-2014) dan persamaan 5 (ACI 318).

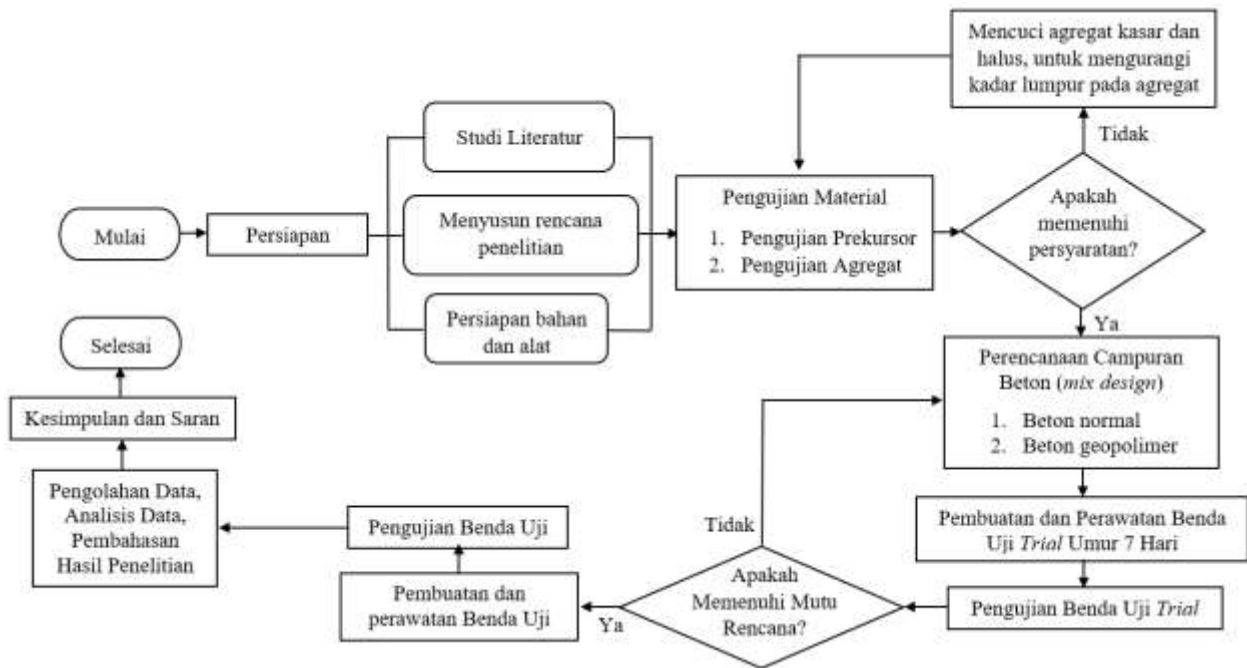
$$f_{ct} = \frac{2 \cdot P}{\pi LD} \quad (4)$$

$$f_{ct} = 0.56 \times \sqrt{f'c} \quad (5)$$

dengan:

f_{ct} : kuat tarik belah beton (MPa),
 $f'c$: Kuat tekan beton (MPa),
 P : beban maksimum (N),
 L : tinggi silinder beton (mm), dan
 D : diameter silinder beton (mm).

Secara ringkas, tahapan penelitian ini ditampilkan pada Gambar 55.



Gambar 5. Bagan alir tahapan penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Nilai *Slump*

Nilai *slump* menentukan kelecakan (*workability*) beton. Nilai *slump* yang tinggi menandakan beton segar mudah dikerjakan, begitu sebaliknya rendahnya nilai *slump* menandakan beton segar susah untuk dikerjakan. Hasil pengujian *slump* disajikan dalam Tabel 8.

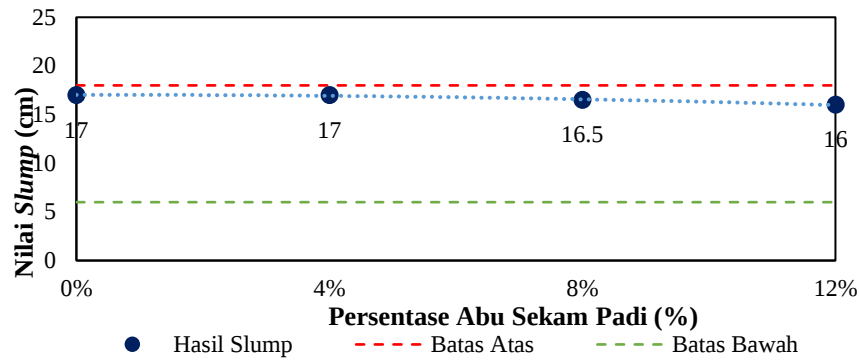
Tabel 8. Hasil uji *slump* beton geopolimer

Benda Uji	Persentase Abu Sekam Padi (%)	Tinggi <i>Slump</i> (cm)	Ketetapan <i>Slump</i> (cm)	Keterangan
BG-0	0%	17	6 – 18	Memenuhi
BG-4	4%	17	6 – 18	Memenuhi
BG-8	8%	16.5	6 – 18	Memenuhi
BG-12	12%	16	6 – 18	Memenuhi

Beton geopolimer memiliki karakteristik beton segar yang kental dan lengket yang disebabkan oleh reaksi NaOH dengan Na_2SiO_3 sebagai alkali aktivator. Hasil pengujian *slump* pada beton geopolimer menunjukkan bahwa substitusi abu sekam padi berpengaruh pada kelecakan beton. Nilai *slump* yang dihasilkan menurun seiring meningkatnya persentase abu sekam padi yang di substitusikan pada abu terbang. Penurunan ini terjadi karena sifat abu sekam padi yang dapat menyerap kadar air. Gambar 6 di bawah ini merupakan hubungan nilai *slump* dengan persentase substitusi abu sekam padi.

3.2 *Setting Time*

Dalam penelitian ini juga dilakukan pengujian waktu ikatan beton. *Setting time* atau waktu pengikatan pada beton merupakan waktu yang diperlukan pasta semen untuk mengalami perubahan sifatnya dari cair menjadi padat. Alat yang digunakan dalam pengujian ini adalah Vicat Apparatus (lihat Gambar 7). Terdapat dua jenis *setting time*, yaitu *initial setting time* (waktu ikatan awal) dan *final setting time* (waktu ikatan akhir).



Gambar 6. Grafik uji slump

Waktu ikat awal (*initial set*) yaitu dengan penurunan jarum penetrasi sebesar 25 mm pada alat jarum vicat, sedangkan waktu ikat akhir (*final sett*) yaitu jarum vicat tidak mengalami penurunan atau berada di angka 0 mm. Pengujian *setting time* bertujuan untuk melihat waktu ikat awal dan akhir pada pasta geopolimer. Hasil pengujian *setting time* ditampilkan pada Tabel 9.



Gambar 7. Pengujian dengan Vicat

Tabel 9. Hasil uji *setting time* beton geopolimer

No	Waktu (menit)	Penurunan Jarum Vicat (mm)			
		BG-0	BG-4	BG-8	BG-12
1	30	41	41	41	41
2	45	41	41	40	38
3	60	40	40	34	35
4	75	38	38	32	31
5	90	36	34	29	28
6	105	32	31	26	25
7	120	29	29	24	22
8	135	26	25	21	17
9	150	21	23	18	14
10	165	18	19	13	8
11	180	13	14	11	4
12	195	9	9	6	0
13	210	4	6	0	-
14	225	0	0	-	-

Berdasarkan hasil pengujian *setting time* dapat diketahui bahwa substitusi abu sekam padi terhadap abu terbang mempengaruhi waktu ikat (*setting time*) pada pasta geopolimer. Semakin tinggi persentase abu

sekam padi yang di substitusikan pada abu terbang, maka semakin cepat waktu pengikatan awal (*initial sett*) dan akhir (*final sett*) pasta geopolimer. Menurut Chindaprasirt dkk., (2012) peningkatan kadar SiO_2 akibat penambahan abu sekam padi pada campuran beton menjadi penyebab percepatan waktu ikat awal dan akhir. dapat Pada penelitian ini substitusi abu sekam padi mempercepat waktu ikat akhir (*final setting*) hingga 15 menit. Hal ini ditunjukkan oleh sampel BG-12 (sampel dengan persentase abu sekan padi sebesar 12%). Pada sampel BG-12, waktu ikat akhir dicapai pada menit ke-195 sedangkan pada sampel BG-0 (sampel dengan persentase abu sekam padi sebesar 0%) waktu ikat akhir dicapai di menit ke-225. Secara umum, pasta geopolimer memenuhi syarat waktu ikat (*setting time*) menurut SNI 15-2049-2004 baik waktu ikat awal (minimal 45 menit) dan waktu ikat akhir (maksimal 7 jam).

3.3 Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan beton geopolimer dilakukan pada beton umur 28 hari setelah dilakukan proses perawatan (*curing*). Pengujian kuat tekan dilakukan dengan menggunakan *compression machine*. Hasil uji kuat tekan beton geopolimer ditampilkan pada Tabel 10.

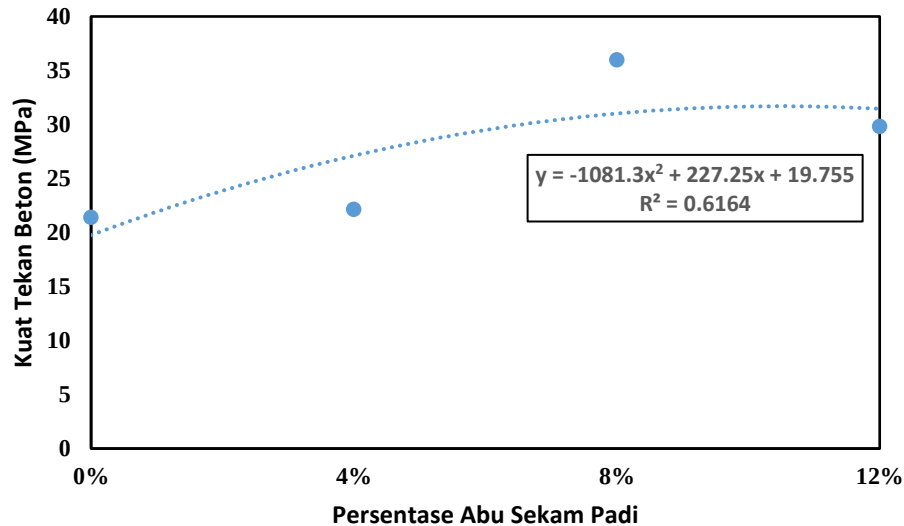
Tabel 10. Hasil uji kuat tekan beton geopolimer

Kode Benda Uji		Luas Penampang Silinder (mm^2)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rerata (MPa)
BG-0	1	17907.86	406.3	22.69	21.41
	2	17955.33	372.2	20.73	
	3	17884.15	372.4	20.82	
BG-4	1	17659.68	441.2	24.98	22.15
	2	17801.29	399.8	22.46	
	3	17765.83	337.8	19.01	
BG-8	1	17860.46	658.9	36.89	35.98
	2	17836.78	586.4	32.88	
	3	17754.02	677.5	38.16	
BG-12	1	17801.29	519.6	29.19	29.80
	2	17931.59	514.7	28.70	
	3	17919.72	564.8	31.52	

Hasil nilai kuat tekan beton geopolimer (f'_c) rata-rata pada variasi substitusi abu sekam padi sebanyak 0%, 4%, 8%, dan 12% dengan umur uji 28 hari secara berturut-turut sebesar 21,41 MPa, 22,15 MPa, 35,98 MPa, dan 29,80 MPa. Kuat tekan optimum didapatkan pada variasi abu sekam padi 8% sebesar 35,98 MPa. Peningkatan kuat tekan beton geopolimer dikarenakan terdapat penambahan silika (SiO_3) yang dimiliki oleh abu sekam padi terhadap abu terbang yang dapat membentuk kalsium silikat. Kalsium silikat yang terbentuk tersebut dapat meningkatkan kekuatan beton dan meningkatkan kekedapan (Riswati.B dkk., 2017). Hubungan kuat tekan dengan persentase abu sekam padi diperlihatkan pada Gambar 8. Pada beton geopolimer dengan 12% abu sekam padi, kuat tekan menurun karena kandungan Si yang terlalu tinggi. Sebagian Si tidak bereaksi dengan alkali aktivator, sehingga mengurangi kekuatan beton (Setiawan dan Wardhono, 2019). Grafik uji kuat tekan beton geopolimer dapat dilihat pada Gambar 8.

3.4 Modulus Elastisitas

Pengujian modulus elastisitas beton dilakukan bersamaan dengan pengujian kuat tekan beton pada saat umur 28 hari. Benda uji silinder dilengkapi *dial gauge* pada alat kompresometer untuk mendapatkan nilai perubahan panjang (ΔL) yang dicatat setiap kenaikan tekanan sebesar 10 kN. Dari hasil pembacaan *dial gauge* didapatkan nilai tegangan dan regangan pada benda uji.



Gambar 8. Grafik uji kuat tekan beton geopolimer

Kemudian dilakukan perhitungan menggunakan persamaan (2) di atas, sebagai contoh menggunakan benda uji BG-8 sampel 1.

Hasil modulus berdasarkan pengujian didapatkan sebesar 15277,048 Mpa.

Hasil modulus berdasarkan rumus empirik menurut persamaan (3) dihitung sebagai berikut.

$$Ec = 4700 \times \sqrt{36,89}$$

$$Ec = 28547,06 \text{ MPa}$$

Nilai modulus elastisitas hasil pengujian dan pendekatan persamaan (3) menunjukkan perbedaan sebesar 86.86% dimana hasil nilai modulus pengujian (persamaan 2) menunjukkan nilai yang lebih rendah. Hal ini disebabkan rumus yang terdapat pada SNI sebagaimana ditunjukkan dalam persamaan (3) merupakan rumus yang biasa digunakan untuk beton normal. Untuk mendapatkan perbandingan yang lebih akurat, penelitian ini merujuk pada rumus modulus elastisitas yang digunakan oleh Bellum (2019). Pada penelitian (Bellum dkk., 2019) persamaan untuk memprediksi nilai modulus elastisitas beton pada beton geopolimer ditulis seperti persamaan (6). Dengan menggunakan rumus ini, didapat nilai modulus elastisitas beton geopolimer sebagai berikut.

$$Ec = 3282 \times \sqrt{f'c} \quad (6)$$

$$Ec = 3282 \times \sqrt{36,89}$$

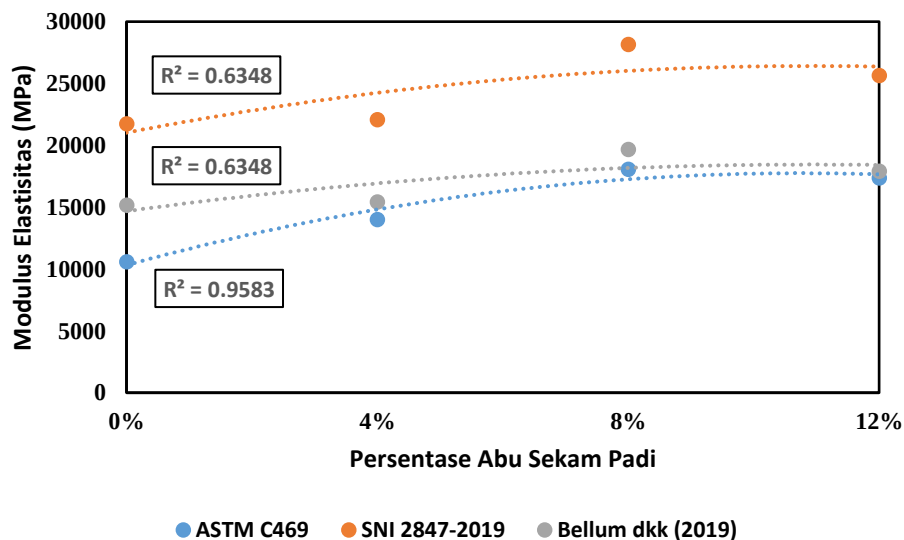
$$Ec = 19934,35 \text{ MPa}$$

Nilai ini memiliki selisih sebesar 30.48% dibandingkan dengan nilai pengujian ASTM dimana nilai pengujian laboratorium menunjukkan hasil yang lebih rendah. Rekapitulasi nilai modulus elastisitas beton geopolimer yang dihasilkan pada setiap percobaan dan perhitungan disajikan pada Tabel 11. Hasil perhitungan juga disajikan dalam Gambar 9.

Nilai modulus elastisitas maksimum diperoleh pada beton geopolimer dengan substitusi abu sekam padi 8% terhadap abu terbang. Nilai modulus elastisitas beton hasil pengujian laboratorium dengan nilai modulus elastisitas hasil perhitungan secara teoritis menggunakan pendekatan rumus SNI 2847-2019 menunjukkan perbedaan sebesar 86.86%. Adapun perbandingan nilai modulus elastisitas beton geopolimer hasil pengujian dengan rumus empiris menurut (Bellum dkk., 2019) menunjukkan perbedaan sebesar 30.48%.

Tabel 11. Hasil nilai modulus elastisitas beton geopolimer

Kode Benda Uji	f' _c (MPa)	Ec = Pengujian (ASTM C469)		Ec = $4700 \times \sqrt{f'_c}$ (SNI 2847-2019)		Ec = $3282 \times \sqrt{f'_c}$ (Bellum dkk, 2019)	
		Nilai Ec (MPa)	Rerata (MPa)	Nilai Ec (MPa)	Rerata (MPa)	Nilai Ec (MPa)	Rerata (MPa)
BG-0	1	22.69	12202.58	22387.18		15632.92	
	2	20.73	10874.72	21398.80	18127.55	14942.73	15184.04
	3	20.82	8712.76	10596.69		14976.46	
BG-4	1	24.98	15277.05	23492.23		16404.57	
	2	22.46	14855.60	22273.76	22086.79	15553.72	15423.16
	3	19.01	11869.51	20494.39		14311.19	
BG-8	1	36.89	19685.31	28547.06		19934.35	
	2	32.88	18660.93	26948.63	28176.50	18818.17	19675.59
	3	38.16	15880.76	29033.82		20274.25	
BG-12	1	29.19	18485.35	25392.57		17731.58	
	2	28.7	15862.70	25180.57	25653.17	17583.54	17913.55
	3	31.52	17792.06	26386.36		18425.54	



Gambar 9. Grafik nilai modulus elastisitas beton geopolimer

Setelah melakukan beberapa percobaan, nilai R^2 yang paling tinggi didapatkan pada persamaan polinomial pangkat 2. Oleh karena itu, persamaan ini dipilih untuk digunakan meskipun nilai R^2 pada rumus (3) dan rumus (6) hanya mendapatkan nilai R^2 sebesar 0.6348. Untuk rumus (2) nilai R^2 yang didapat sudah diatas 0.85 yang mengindikasikan bahwa model regresi memiliki tingkat kecocokan yang tinggi terhadap data.

3.5 Kuat Tarik Belah

Pengujian kuat tarik belah beton dilakukan menggunakan alat uji tekan dengan meletakkan benda uji secara horizontal hingga mendapatkan nilai maksimum pada benda uji. Hasil uji kuat tarik belah beton geopolimer ditampilkan pada Tabel 12. Gambar 10 merupakan dokumentasi sampel beton yang sudah diuji.

Tabel 12. Hasil uji kuat tarik belah beton geopolimer

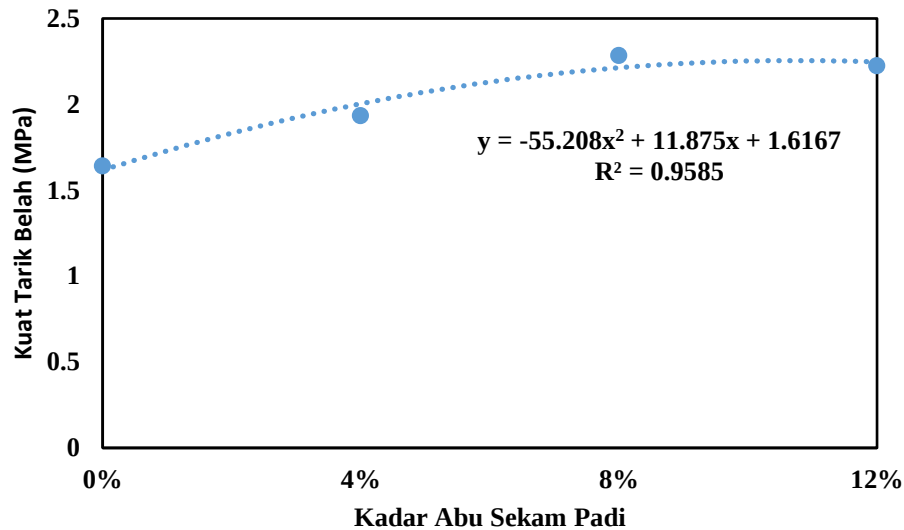
Kode Benda Uji		Luas Penampang (mm ²)	Beban Maksimum (N)	Kuat Tarik Belah (Persamaan 4)		Kuat Tarik Belah (Persamaan 5)		
				Nilai (MPa)	Rerata (MPa)	Kuat Tekan (MPa)	Nilai (MPa)	Rerata (MPa)
BG-0	1	142714.24	120000	1.68		22.69	2.67	
	2	143665.98	118000	1.64	1.64	20.73	2.55	2.59
	3	143879.79	115000	1.6		20.82	2.56	
BG-4	1	143185.94	142000	1.98		24.98	2.80	
	2	143680.74	135000	1.88	1.93	22.46	2.65	2.63
	3	143095.27	139000	1.94		19.01	2.44	
BG-8	1	142859.85	143000	2		36.89	3.40	
	2	143451.95	197000	2.75	2.28	32.88	3.21	3.36
	3	143069.68	150000	2.1		38.16	3.46	
BG-12	1	143924.28	134000	1.86		29.19	3.03	
	2	145237.74	176000	2.42	2.22	28.7	3.00	3.06
	3	143168.05	171000	2.39		31.52	3.14	



Gambar 10. Benda uji beton setelah uji tarik belah

Hasil nilai kuat tarik belah beton geopolimer, pada benda uji BG-8 memiliki nilai kuat tarik belah terbesar sebesar 2,28 MPa dan BG-0 memiliki nilai kuat tarik belah beton rata-rata terkecil sebesar 1,64 MPa. Grafik nilai kuat tarik beton geopolimer disajikan pada Gambar 11. Secara umum nilai kuat tarik belah empirik dengan menggunakan persamaan 5 menghasilkan nilai yang lebih rendah daripada nilai yang didapat dengan pengujian langsung (persamaan 4). Hal ini disebabkan oleh rumus persamaan 5 merupakan rumus yang biasa digunakan untuk beton normal bukan untuk beton geopolimer

Dari Gambar di bawah ini dapat diketahui bahwa BG-4 dan BG-8 mengalami kenaikan nilai kuat tarik belah dimana nilai optimum diperoleh pada BG-8. Hal ini disebabkan abu sekam padi yang halus dapat masuk kedalam rongga-rongga agregat beton sehingga membuat beton padat.



Gambar 11. Grafik nilai kuat tarik belah beton geopolimer

Dari Gambar di atas dapat diketahui bahwa BG-4 dan BG-8 mengalami kenaikan nilai kuat tarik belah dimana nilai optimum diperoleh pada BG-8. Hal ini disebabkan abu sekam padi yang halus dapat masuk kedalam rongga-rongga agregat beton sehingga membuat beton padat. Pada BG-12 nilai kuat tarik belah beton mengalami penurunan sebesar 2,5% dari BG-8 dikarenakan kadar silika (*Si*) yang terlalu tinggi pada abu sekam padi dan abu terbang tidak bereaksi terhadap alkali aktivator. Akibatnya, prekursor mengalami penurunan kerekatan pada agregat kasar dan halus. Hal ini mempengaruhi nilai kuat tarik belah beton pada beton geopolimer.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian pengaruh abu sekam padi sebagai substitusi abu terbang terhadap beton geopolimer dengan persentase substitusi sebesar 0%, 4%, 8%, dan 12% dari berat prekursor diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Penggunaan abu sekam padi sebagai substitusi abu terbang mempengaruhi tingkat kelecakan (*workability*) beton geopolimer segar dan juga memengaruhi waktu ikat (*setting time*) pasta geopolimer. Semakin tinggi persentase abu sekam padi dalam campuran, maka semakin menurunkan tingkat *workability* dan mempercepat waktu ikat awal dan akhir beton geopolimer.
2. Penggunaan abu sekam padi sebagai substitusi abu terbang pada campuran beton geopolimer mempengaruhi sifat mekanis beton, yaitu meningkatkan kuat tekan beton, modulus elastisitas, dan kuat tarik belah beton geopolimer.
3. Kadar optimum penggunaan abu sekam padi sebagai substitusi abu terbang terhadap sifat mekanik beton geopolimer adalah pada persentase abu sekam padi 8%. Penambahan abu sekam padi hingga 8% meningkatkan kadar silika (SiO_2) sehingga dapat membentuk kalsium silikat yang dapat meningkatkan kekuatan beton. Pada beton geopolimer dengan 12% abu sekam padi, kuat tekan menurun karena kandungan *Si* yang terlalu tinggi. Sebagian *Si* tidak bereaksi dengan alkali aktivator, sehingga mengurangi kekuatan beton.
4. Untuk penelitian lebih lanjut di masa mendatang, penulis memiliki beberapa usulan antara lain: perlu dilakukan uji properti abu sekam padi dan abu terbang untuk mengetahui karakteristiknya dengan lebih baik; perlu penelitian penggunaan beton geopolimer untuk elemen beton bertulang; serta perbandingan biaya penggunaan beton normal dan beton geopolimer.

DAFTAR PUSTAKA

- Bellum, R. R., Muniraj, K., dan Madduru, S. R. C. (2019). Empirical relationships on mechanical properties of class-F fly ash and GGBS based geopolymer concrete. *Annales de Chimie: Science Des Materiaux*, 43(3), 189–197. <https://doi.org/10.18280/acsm.430308>
- BSN. (2014). SNI 03-2491-2014: Metode uji kekuatan tarik belah spesimen beton silinder. Jakarta.
- BSN. (2004). SNI 15-2049-2004: Semen Portland. Jakarta.
- BSN. (2011). SNI 1974-2011: Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder. Jakarta.
- BSN. (2008). SNI 2826-2008: Cara Uji Modulus Elastisitas Batu dengan tekanan sumbu tunggal. Jakarta.
- BSN. (2000). SNI 2834-2000: Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal. Jakarta.
- BSN. (2019). SNI 2847-2019: Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan. Jakarta.
- Chindaprasirt, P., De Silva, P., Sagoe-Crentsil, K., dan Hanjitsuwan, S. (2012). Effect of SiO₂ and Al₂O₃ on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems. *Journal of Materials Science*, 47(12), 4876–4883. <https://doi.org/10.1007/s10853-012-6353-y>
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials. *Journal of Thermal Analysis*, 37(8), 1633–1656. <https://doi.org/10.1007/BF01912193>
- Hadipramana, J., Riza, F. V., Rahman, I. A., Loon, L. Y., Adnan, S. H., dan Zaidi, A. M. A. (2016). Pozzolanic Characterization Of Waste Rice Husk Ash (RHA) From Muar, Malaysia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 160(1), 12066. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/160/1/012066>
- Hardjito, D. (2005). Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. Curtin University of Technology.
- Houston, D. F. (1972). Rice: Chemistry and Technology: Vol. Vol. 4 (D. F. Houston, Ed.). American Association of Cereal Chemists.
- Kusuma, A., Steenie, P., Wallah, E., dan Dapas, S. O. (2014). Kuat Tarik Belah Beton Geopolimer Berbasis Abu Terbang (Fly Ash). *Jurnal Sipil Statik*, 2(7), 330–336.
- Mehta, A., dan Siddique, R. (2018). Sustainable geopolymer concrete using ground granulated blast furnace slag and rice husk ash: Strength and permeability properties. *Journal of Cleaner Production*, 205, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.313>
- Nugrahanto, B. (2017). Studi Kuat Tekan Beton dengan Pemanfaatan Abu Cangkang Telur Bebek Sebagai Bahan Dasar Pembuatan Beton Geopolimer. Universitas Negeri Jakarta.
- Olivia, M. (2011). School of Civil and Mechanical Engineering Department of Civil Engineering Durability Related Properties of Low Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete.
- Riswati, B., Nurhayati, dan Subaer. (2017). Pengembangan Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash Dan Abu Sekam Padi Untuk Aplikasi Struktural Bawah Laut. *Jurnal Sains Dan Pendidikan Fisika (JSPF)*, Vol. 3 No.3, 287–291. <http://ojs.unm.ac.id>
- Salwatul, A., N. (2017). Pengaruh Rasio Sodium Hidroksida Dengan Sodium Silikat Pada Mortar Geopolymer Berbahan Dasar Abu Terbang Terhadap Kuat Tekan Dan Kuat Geser Pada Aplikasi Spesi Batu Bata. *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil*, Vol. 02 Nomor 02(Vol 2 No 2/REKAT/17 (2017): Wisuda ke-89 Periode 2 Tahun 2017), 211–218.
- Septia, G., P. (2011). Literature Study Comparative Effect Of Concentration Of Naoh And Ratio Of Naoh:Na₂SiO₃, Ratio Of Water/Precursor, Curing Temperature, And Type Of Precursor To Compression Strength Of Geopolymer Concrete. University Of Indonesia .
- Setiawan, D. F., dan Wardhono, A. (2019). Penggunaan Abu Sekam Padi Sebagai Bahan Substitusi Fly Ash Pada Mortar Geopolimer Dengan NaOH 8 Molar Ditinjau Dari Kuat Tekan Dan Porositas. *Jurnal Rekats*, 7(3), 1–8.