

TUGAS AKHIR

PENGAJIAN MORTAR DAN PASTA GEOPOLIMER MATERIAL *POZZOLAN* SEBAGAI *SUPPLEMENTARY CEMENTITIOUS MATERIALS* (SCMs) DARI LIMBAH POTENSI AGRO DAN INDUSTRI DI INDONESIA

Diajukan guna melengkapi persyaratan untuk memenuhi gelar
Sarjana Teknik di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik,
Universitas Muhammadiyah Yogyakarta



Disusun oleh:

VALDA SALSABILA RATNADEWATI

20180110080

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH YOGYAKARTA

2022

HALAMAN PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Valda Salsabila Ratnadewati
NIM : 20180110080
Judul : Pengkajian Mortar dan Pasta Geopolimer Material
Pozzolan sebagai *Supplementary Cementitious
Materials* (SCMs) dari Limbah Potensi Agro dan
Industri di Indonesia

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa Tugas Akhir ini merupakan karya saya sendiri. Apabila terdapat karya orang lain yang saya kutip, maka saya akan mencantumkan sumber secara jelas. Jika dikemudian hari ditemukan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi dengan aturan yang berlaku. Demikian pernyataan ini saya buat tanpa ada paksaan dari pihak mana pun.

Yogyakarta, 07 April 2022

Yang membuat pernyataan



Valda Salsabila Ratnadewati

HALAMAN PERSEMBAHAN

Tugas akhir ini dipersembahkan untuk kedua orang tuaku dan adik adik saya Vania Azharia Putri dan Rafi Bhadrika Danniswara yang telah menjadi salah satu penyemangat saya selama ini. Kemudian tidak lupa kepada teman satu tim saya selama PKM, dan sahabat-sahabat saya yang selalu memberi dukungan kepada saya.

PRAKATA



Assalamu 'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Segala puji bagi Allah SWT Yang Menguasai segala sesuatu, Sholawat dan salam selalu tercurahkan kepada Rasulullah SAW beserta keluarga dan sahabat-sahabatnya.

Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Penelitian ini ditujukan untuk mengkaji mortar dan pasta menggunakan sistem geopolimer atau beton tanpa semen yang digantikan dengan limbah ramah lingkungan berupa material pozzolan yang nantinya dapat diterapkan sebagai salah satu beton pracetak pada dunia konstruksi sesuai dengan standarisasi.

Selama penyusunan Tugas Akhir ini penyusun mendapat bantuan, bimbingan, dan dorongan dari berbagai pihak sehingga dapat terselesaikan dengan baik. Penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih atas dukungan dari berbagai pihak yakni kepada:

1. Ir. Puji Harsanto, S.T., M.T., Ph.D.
2. Dr. Eng. Ir. Pinta Astuti, ST, M.Eng. yang telah membimbing tim PKM kami dari awal hingga akhir dan memberi semangat di setiap momen kami yang sedang berjuang mengikuti ajang PIMNAS hingga lolos.
3. Kedua Orang Tua, dan adik- adik saya yang selalu memberikan arahan selama belajar dan menyelesaikan tugas akhir ini.
4. Mas Rahmad Afriansya dan teman teman setim yang lainnya yakni Tito Yoga Ramadhona, Julian Randisyah, Evelyn Anabela Anisa yang telah membimbing serta kerja tim bersama selama pelaksanaan PKM.
5. Dan sahabat-sahabat saya Nadia Kumala Sari, Farah Salsabila, Azqia Dara Adam, Andi Nadya Milenia, Ataya Vini Argenta, dan Kharisma Vita Sari Terima kasih karena telah menjadi bagian dari perjalananku. Untuk berbagi cerita dengan saya dan memungkinkan saya untuk berbagi milik saya

dengan kalian. Kalian teman-teman yang mengajari saya betapa pentingnya ikatan dan persahabatan.

Akhirnya, setelah segala kemampuan dicurahkan serta diiringi dengan doa untuk menyelesaikan tugas akhir ini hanya kepada Allah SWT semua dikembalikan.

Wallahu a'lam bi Showab.

Wassalamu 'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Yogyakarta, 25 Maret 2022

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'E. Galda 3 SR'. The signature is stylized and enclosed within a circular flourish.

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR.....	i
HALAMAN PERNYATAAN.....	ii
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	iii
PRAKATA	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR LAMPIRAN.....	x
DAFTAR SINGKATAN	xi
DAFTAR ISTILAH.....	xii
ABSTRAK	xiii
<i>ABSTRACT</i>	xiv
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	2
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Lingkup Penelitian	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Tinjauan Pustaka.....	4
2.1.1 Geopolimer	4
2.1.2 Penelitian Terdahulu (State of the Art).....	5
BAB III. METODE PENELITIAN	7
3.1 Bahan.....	7
3.2 Alat.....	7
3.3 Tempat dan Waktu Penelitian.....	8
3.4 Tahapan Penelitian	8
3.5 Pengujian Material	9
3.6 Variabel Penelitian	9

3.7 Pengujian <i>Setting Time</i>	10
3.8 Pengujian <i>Flowability</i>	10
3.9 Perawatan (<i>Curing</i>)	11
3.10 Pengujian Kuat Tekan Geopolimer	11
BAB IV. HASIL YANG DICAPAI DAN POTENSI KHUSUS	12
4.1 Hasil Pengujian Agregat Halus	12
4.2 Hasil Pengujian Material <i>Pozzolan</i>	12
4.3 Hasil Pengujian <i>Flowability</i>	14
4.4 Hasil Pengujian <i>Setting Time</i>	14
4.5 Hasil Pengujian Kuat Tekan Geopolimer	15
4.6 Potensi Khusus.....	16
BAB V. PENUTUP	17
5.1 Kesimpulan	17
5.2 Saran.....	17
DAFTAR PUSTAKA	xv
LAMPIRAN	xvii

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 <i>State of the art</i>	5
Tabel 3.1 Komposisi pasta geopolimer	9
Tabel 3.2 Komposisi mortar geopolimer.....	10
Tabel 4.1 Hasil pengujian agregat halus (pasir)	12
Tabel 4.2 Hasil pengujian berat jenis bahan material <i>pozzolan</i>	12
Tabel 4.3 Hasil uji <i>x-ray fluorescence</i> (XRF) material <i>pozzolan</i>	13
Tabel 4.4 Hasil pengujian <i>flowability</i> geopolimer	14
Tabel 4.5 Hasil kuat tekan geopolimer.....	15

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur kimia geopolimer (Davidovits, 1994).....	4
Gambar 3.1 Bahan Penelitian	7
Gambar 3.2 Alat untuk Penelitian.....	7
Gambar 3.3 Diagram alir tahapan penelitian.....	8
Gambar 4.1 Hasil uji <i>x-ray diffraction</i> (XRD)	13
Gambar 4.2 Hasil uji <i>setting time</i>	15

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Foto Kegiatan.....	xvii
Lampiran 2. Analisis Data dan Pembahasan	xviii
Lampiran 3. Publikasi Ilmiah	xviii

DAFTAR SINGKATAN

SCMs : Supplementary Cementitious Materials

SDGs : Sustainable Development Governments

XRF : X-ray Fluorscence

XRD : X-ray Diffraction

FA : Fly Ash

AAT : Abu Ampas Tebu

ASP : Abu Sekam Padi

ACS : Abu Cangkang Sawit

BK : Bubuk Kaca

DAFTAR ISTILAH

1. Polimerisasi

proses bereaksi molekul monomer bersama dalam reaksi kimia untuk membentuk tiga dimensi jaringan atau rantai polimer.

2. Alkali Aktivator

aktivator yang akan mengikat oksida silika pada fly ash dan akan bereaksi secara kimia dan membentuk ikatan polimer

3. Amorf

merupakan jenis zat padat dengan struktur partikel yang tidak teratur.

ABSTRAK

Geopolimer merupakan pembaharuan material konstruksi ramah lingkungan yang dapat mengurangi dampak buruk dari manufaktur semen konvensional. Parameter utama pada pengkajian geopolimer adalah material *pozzolan* yang digunakan sebagai bahan pengikat pengganti semen dengan kandungan *aluminosilicate* (Si- Al) tinggi. Di Indonesia, material *pozzolan* memiliki potensi melimpah terutama pada limbah industri dan agrikultur seperti abu terbang batu bara, limbah kaca, sekam padi, ampas tebu, dan cangkang sawit apabila diolah menjadi *powder*. Oleh sebab itu, penelitian ini mengkaji berbagai potensi material *pozzolan* dari limbah industri dan agrikultur di Indonesia menggunakan 5 variasi kombinasi berupa FA100%, FA95%+AAT5%, FA90%+ASP10%, FA90%+ACS10%, dan FA90%+BK10% dengan penambahan NaOH/Na₂SiO₃ sebesar 1:2,5 yang dilakukan perawatan selama 28 hari. Penelitian ini juga menambahkan *superplasticizer* 2% dan *aquadest* 10% untuk meningkatkan *workability* pada geopolimer. Pengujian yang dilakukan berupa uji *setting time* pasta, *flowability*, dan kuat tekan mortar geopolimer. Pengujian *setting time* diperoleh hasil berupa waktu pengikatan awal rentang 25-75 menit dan waktu pengikatan akhir 40-115 menit. Pengujian *flowability* diperoleh nilai 180-250 mm dan pengujian kuat tekan diperoleh nilai 25-36 MPa. Berdasarkan pengujian *setting time*, disimpulkan bahwa waktu pengikatan tercepat terjadi pada FA95%+AAT5%, yaitu 40 menit karena kandungan CaO dan SiO₂ cukup tinggi. Pada pengujian *flowability*, FA100% memiliki nilai diameter *flow* paling tinggi, yaitu 250 mm karena berat jenis material tersebut paling besar. Selanjutnya, pengujian kuat tekan diperoleh nilai kuat tekan tertinggi pada FA90%+ASP10% sebesar 36,36 MPa karena kandungan SiO₂ material tersebut paling tinggi. Seluruh hasil kuat tekan memperoleh nilai >20 MPa sehingga dapat diaplikasikan dalam konstruksi struktural seperti gedung dan jembatan.

Kata kunci: geopolimer, *pozzolan*, *setting time*, *flowability*, kuat tekan

ABSTRACT

Geopolymer is a renewable construction material that reduces dependence on ordinary portland cement (OPC), where OPC manufacturing impacts carbon dioxide (CO₂) emissions. The main aspect of geopolymers being studied is the precursor of pozzolanic material, used as a cement substitute because it contains aluminosilicate (Si-Al). Polymerization occurs between the precursors, reacted by alkaline activator solution (AAS). Sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate (Na₂SiO₃) were used as AAS. In this study, local precursors from industrial waste and biomass were utilized. Fly ash was employed as a reference in the precursor by 5% - 10% substitution of glass powder, rice husk ash, bagasse ash, and palm shell ash. Moreover, 2% superplasticizer and 5% extra water were used to increase the flowability of fresh geopolymer. Tests were carried out on the setting time of paste, flow table, and compressive strength of geopolymer mortar. The tests were on the initial setting time of 25-75 minutes and the final setting time of 40-115 minutes. The setting time results revealed that the time of each substitution accelerated geopolymerization due to the substitution of precursors containing higher CaO and SiO₂. Setting time and flowability/workability had a linear regression correlation (R²) of 0.95, with the flow table ranging from 180-250 mm. The compressive strength ranged from 25.88 – 36.36 MPa through a curing temperature of 70°C for 24 hours, followed by curing at ambient temperature for up to 28 days.

Keywords: geopolymer, precursor, setting time, flowability, compressive strength

BAB I.

PENDAHULUAN

1.1 Pendahuluan

Pembangunan infrastruktur terus mengalami peningkatan, hal ini berdampak pada meningkatnya kebutuhan material konstruksi seperti beton. Peningkatan produksi beton akan berkorelasi dengan meningkatnya kebutuhan semen. Proses manufaktur semen dapat menjadi penyumbang utama emisi gas rumah kaca yang dilepaskan selama pembuatannya. Faktanya, setiap satu ton produksi semen menghasilkan 0,87 ton karbon dioksida (CO₂) yang menyumbang sekitar 6-7% dari emisi CO₂ bersamaan dengan adanya pengurangan sumber daya secara signifikan (Elahi dkk, 2020). Oleh sebab itu, berbagai ahli konstruksi terus berupaya menentukan material alternatif yang ramah lingkungan. Material tersebut diimplementasikan pada inovasi pasta dan mortar geopolimer. Material geopolimer dikatakan *eco-friendly* karena tidak menggunakan semen sebagai bahan pengikatnya sehingga digantikan dengan material *pozzolan*.

Pengkajian material *pozzolan* dari berbagai literatur mengacu pada beberapa sumber seperti limbah agrikultur dan industri. Salah satu sumber industri di Indonesia terdapat pada abu terbang batu bara (*fly ash*). Jumlah produksi batu bara tahun 2020 mencapai 7,8 juta ton, sedangkan pemanfaatan limbah batu bara berupa *fly ash* hanya 0,9 juta ton (Ekaputri dan Bari, 2020). Pemanfaatan limbah *fly ash* di Indonesia masih terbatas hingga tahun 2020 karena terkendala regulasi yang mengategorikan *fly ash* sebagai limbah bahan beracun berbahaya (B3). Namun, pada tahun 2021, *fly ash* dikeluarkan dari limbah B3 sehingga dapat dimanfaatkan dengan mudah. Selain itu, berdasarkan data resmi Sistem Informasi Pengolahan Sampah Nasional tahun 2021, jumlah limbah kaca di Indonesia mencapai 2,2% dari total sampah per tahun mencapai 28,5 juta ton. Limbah kaca juga berpotensi sebagai material *pozzolan* apabila diolah menjadi *powder*.

Di samping itu, Indonesia memiliki kekayaan alam berlimpah terutama pada agrikultur seperti padi, tebu, dan cangkang sawit. Berdasarkan data resmi dari Badan Pusat Statistik (2020), produksi padi di Indonesia berhasil mencapai 55,16 juta ton. Sementara hasil kajian Dirjen Perkebunan (2020) melaporkan, produksi kelapa sawit

mencapai 49,71 juta ton dan tebu 2,41 juta ton. Pada setiap produksi agrikultur akan berkorelasi dengan limbah yang dihasilkan seperti sekam padi, ampas tebu dan cangkang sawit. Ketiga limbah tersebut apabila diolah dengan baik dalam bentuk abu dapat berpotensi sebagai *material pozzolan*.

Berdasarkan potensi di atas, penelitian ini bertujuan mengkaji limbah *pozzolan* dari limbah agrikultur dan industri berupa *fly ash*, bubuk kaca, abu sekam padi, abu ampas tebu, serta abu cangkang sawit sebagai *supplementary cementitious materials* (SCMs). Metode penelitian tersebut menggunakan variasi substitusi potensi agrikultur dan industri sebesar 5%-10%. Sementara, pengujian yang dilakukan berupa uji kandungan senyawa kimia dan kristalisasi (XRF dan XRD), serta uji *setting time* pasta geopolimer. Sedangkan mortar geopolimer akan dilakukan uji kemampuan mengalir (*flowability*) dan uji kuat tekan.

1.2 Rumusan Masalah

- a. Bagaimana kandungan senyawa kimia *fly ash* (batu bara), bubuk kaca, abu sekam padi, abu ampas tebu dan abu cangkang sawit sebagai SCMs?
- b. Bagaimana potensi *fly ash* (batu bara), bubuk kaca, abu sekam padi, abu ampas tebu dan abu cangkang sawit berupa mortar dan pasta geopolimer?

1.3 Lingkup Penelitian

Ruang lingkup studi literatur ini adalah mengkaji mortar dan pasta geopolimer sebagai bahan pengganti semen konvensional atau *supplementary cementitious materials* dengan bahan dasar material *pozzolan* dari potensi limbah industri dan agro di Indonesia yang ramah lingkungan melalui reaksi dari unsur-unsur penyusunnya dan pengujian dilakukan.

1.4 Tujuan Penelitian

- a. Mengkaji potensi kandungan senyawa sebagai SCMs dari material *pozzolan* berupa *fly ash* (batu bara), bubuk kaca, abu sekam padi, abu ampas tebu dan abu cangkang sawit.

- b. Mengkaji potensi terbaik dari limbah *fly ash* (batu bara), bubuk kaca, abu sekam padi, abu ampas tebu dan abu cangkang sawit berdasarkan hasil pengujian *setting time*, *flow table* dan kuat tekan pada mortar dan pasta geopolimer

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini, antara lain:

- a. Sebagai bahan pertimbangan pelaku industri material-konstruksi dan *stakeholder* terkait dalam memanfaatkan material ramah lingkungan.
- b. Sebagai pengolahan terhadap lingkungan dengan memanfaatkan limbah limbah potensial sebagai semen masa depan.

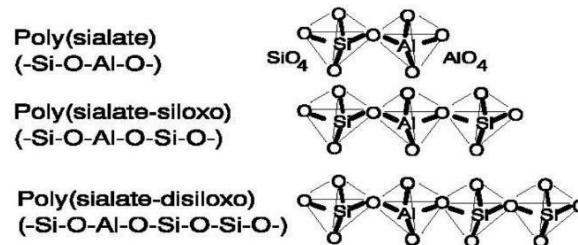
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

2.1.1 Geopolimer

Geopolimer pertama kali diperkenalkan oleh Davidovits pada tahun 1978 berupa polimer anorganik dengan kandungan *aluminasilicate* (Al-Si) yang membentuk ikatan polimerisasi berupa *polysialate* (Si-O-Al). Struktur ikatan kimia *polysialate* dapat dilihat pada Gambar 1. Reaksi polimerisasi terjadi antara material *pozzolan* dengan kandungan SiO₂ dan Al₂O₃ yang diaktifkan dengan alkali aktivator. Alkali aktivator yang digunakan berupa natrium hidroksida (NaOH) sebagai pengaktif reaksi dan natrium silikat (Na₂SiO₃) sebagai katalisatornya.



Gambar 2.1 Struktur kimia geopolimer (Davidovits, 1994)

Geopolimer membutuhkan perawatan suhu tinggi agar terjadi reaksi polimerisasi sempurna sehingga dapat meningkatkan kuat tekan yang optimum. Selain itu, geopolimer memiliki keunggulan dibandingkan beton konvensional. menjelaskan bahwa geopolimer memiliki ketahanan terhadap asam, api, dan memiliki susut rendah. Selain itu, proses produksi geopolimer lebih cepat, mudah, menghemat waktu dan tenaga. Geopolimer juga menghasilkan produk yang bersifat keras, kehalusan permukaan tinggi, dan kemampuan cetak yang presisi.

Parameter utama dalam pengkajian geopolimer adalah prekursor dari material *pozzolan* yang digunakan sebagai bahan pengikat (*binder*) untuk menggantikan semen. Salah satu material *pozzolan* dari industri ditemukan dalam abu terbang batu bara yang berasal dari pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), sedangkan bubuk kaca dapat dihasilkan dari limbah kaca yang dihaluskan. Selain itu, potensi material *pozzolan* dari

abu sekam padi, abu ampas tebu, dan abu cangkang sawit dapat terealisasi apabila diolah dengan baik pada temperatur tinggi. Para peneliti saat ini terus berupaya dalam mengkaji proporsi optimal supaya memperoleh hasil yang dapat diaplikasikan di lapangan.

2.1.2 Penelitian Terdahulu (*State of The Art*)

Geopolimer merupakan pembaharuan beton ramah lingkungan yang terus dikaji oleh para peneliti karena belum terdapat standar acuan yang ditetapkan. Oleh sebab itu, penelitian ini menggunakan rujukan penelitian terdahulu agar memperoleh proporsi optimum yang telah dirangkum dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1. *State of the art*

No	Peneliti	Kajian	Ruang Lingkup	Kesimpulan
1	Tchakoute dkk (2017)	Mengkaji pengolahan abu ampas tebu pada	Pengolahan abu limbah agrikultur	Berdasarkan ketiga peneliti, limbah agrikultur dapat bersifat pozolanik saat diolah dalam <i>furnace</i> menjadi abu pada suhu sekitar 600-1000°C.
	Mahdi dkk (2020)	Mengkaji pengolahan abu sekam padi pada		
	Tambunan dkk (2016)	Mengkaji pengolahan abu cangkang sawit pada suhu 800-1000°C.		
2	Huseien dkk (2018)	Mengkaji molaritas NaOH variasi 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, dan 16 M.	Alkali Aktivator	Proporsi optimum alkali aktivator berdasarkan ketiga penelitian menggunakan molaritas NaOH 12M dan perbandingan rasio Na ₂ SiO ₃ /NaOH sebesar 1:2.5.
	Venu dkk (2020)	Mengkaji perbandingan rasio Na ₂ SiO ₃ /NaOH sebesar 1.5, 2, 2.5, dan 3.		
	Malkawi dkk (2016)	Mengkaji molaritas NaOH (8, 10, 12 M) dan rasio Na ₂ SiO ₃ /NaOH (1,1.5, 2, 2.5).		

Tabel 2.1. *State of the art* (Lanjutan)

No	Peneliti	Kajian	Ruang Lingkup	Kesimpulan
3	Sondakh dan Gumalang (2020)	Mengkaji variasi <i>superplasticizer</i> dengan persentase 2.5, 3, 4, 5, dan 6%.	<i>Admixture</i>	Berdasarkan ketiga peneliti disimpulkan bahwa dengan penambahan <i>superplasticizer</i> dan air destilasi dapat meningkatkan <i>flowability</i> serta <i>workability</i> geopolimer.
	Degirmeci (2018)	Mengkaji mortar geopolimer dengan penambahan air 3-14 %		
	Jithendradan Elavenil (2021)	Mengkaji variasi <i>superplasticizer</i> dengan persentase 2, 4, 6% dan air destilasi 10, 12, 14%.		
4	Panigrahi dkk (2018)	Mengkaji <i>curing</i> geopolimer pada suhu 50, 60, 70, dan 80°C.	Perawatan (<i>curing</i>)	Metode <i>curing</i> optimum dari ketiga penelitian diperoleh pada suhu 70°C selama 24 jam yang dapat meningkatkan kuat tekan geopolimer.
	Alhaji dkk (2019)	Mengkaji <i>curing</i> geopolimer pada suhu		
	Patel dan Shah (2018)	Mengkaji <i>curing</i> geopolimer pada suhu 60°C dan 70°C.		

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Bahan

Beberapa bahan yang digunakan pada penelitian diantaranya:



Gambar 3.1 Bahan penelitian

3.2 Alat

Berbagai alat yang digunakan pada penelitian:



Gambar 3.2 Alat untuk penelitian

3.3 Tempat dan Waktu Penelitian

Kegiatan selama penelitian menggunakan *blended method* berupa kegiatan luring (luar jaringan) dan daring (dalam jaringan).

a. Kegiatan luring

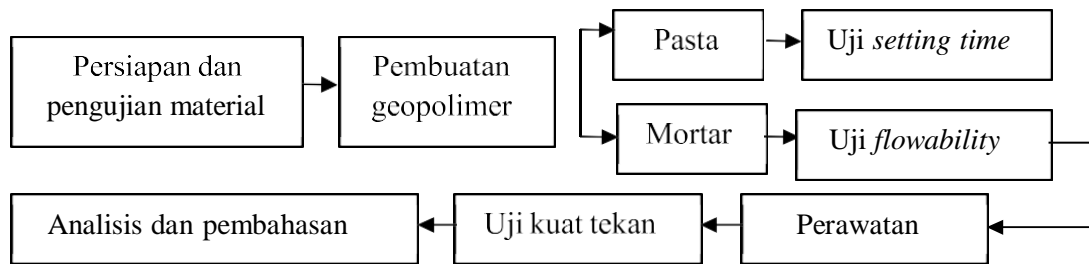
Kegiatan luring dilakukan di Laboratorium Material, Teknik Sipil, UMY dengan protokol kesehatan pencegahan Covid-19.

b. Kegiatan daring

Kegiatan daring dilakukan dengan konsultasi oleh dosen pembimbing dan diskusi hasil bersama anggota tim melalui platform *online*.

3.4 Tahapan Penelitian

Pelaksanaan kegiatan riset eksakta pengkajian pasta dan mortar geopolimer dilakukan selama 3 bulan di Laboratorium Material, Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.



Gambar 3.3 Diagram alir tahapan penelitian.

3.5 Pengujian Material

a. Agregat Halus

Beberapa pengujian agregat halus yang dilakukan berupa berat jenis, modulus halus butir (MHB), kadar air, dan kadar lumpur.

b. Material *Pozzolan*

Beberapa pengujian material *pozzolan* yang dilakukan berupa berat jenis material *pozzolan*, *x-ray fluorescence* (XRF) dan *x-ray diffraction* (XRD).

3.6 Variabel Penelitian

a. Pasta

Pembuatan proporsi pasta geopolimer mengacu pada SNI-03-6827-2002 mengenai metode pengujian vicat. Rasio NaOH/Na₂SiO₃ adalah 1:2,5 dan molaritas larutan NaOH sebesar 12M. Proporsi pasta geopolimer pada penelitian dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Komposisi pasta geopolimer

Variasi <i>Pozzolan</i>	<i>Pozzolan</i>		Alkali Aktivator (gram)	
	(gram)		NaOH	Na ₂ SiO ₃
FA 100%	300		34,29	85,71
FA95%+AAT5%	285	15	34,29	85,71
FA90%+ASP10%	270	30	34,29	85,71
FA90%+ACS10%	270	30	34,29	85,71
FA90%+BK10%	270	30	34,29	85,71

b. Mortar

Pada komposisi mortar menggunakan *superplasticizer* (SP) sebesar 2% dan aquadest 10% dari berat *pozzolan* untuk menambah kemudahan pengerjaan (*workability*). Komposisi mortar menggunakan campuran tambahan pasir, *superplasticizer*, dan *aquadest* telah dirangkum pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2. Komposisi mortar geopolimer

Variasi <i>Pozzolan</i>	<i>Pozzolan</i>		Pasir (kg/m ³)	Alkali Aktivator (kg/m ³)		SP (kg/m ³)	<i>Aquadest</i> (kg/m ³)
	(kg/m ³)			NaOH	Na ₂ SiO ₃		
FA100%	750		1200	85,71	214,29	15	75
FA95%+ AAT5%	712	37	1200	85,71	214,29	15	75
FA90%+ ASP10%	675	75	1200	85,71	214,29	15	75
FA90%+ ACS10%	675	75	1200	85,71	214,29	15	75
FA90%+ BK10%	675	75	1200	85,71	214,29	15	75

3.7 Pengujian *Setting Time*

Pengujian *setting time* (waktu pengikatan) berfungsi untuk mendapatkan nilai waktu ikat sebagai penentu variasi bahan pengikat yang akan digunakan. Pengujian ini mengacu pada SNI-03-6827-2002 menggunakan alat vicat. Waktu pengikatan awal terjadi pada penurunan ke 25 mm, yaitu saat peralihan pasta geopolimer dari keadaan cair ke plastis. Sementara waktu pengikatan akhir terjadi pada penurunan ke 0 mm, yaitu saat peralihan pasta dari keadaan plastis hingga mengeras.

3.8 Pengujian *Flowability*

Pengujian kemudahan dalam mengalir (*flowability*) bertujuan untuk mengetahui penyebaran mortar yang digunakan supaya tercapai kondisi optimum sesuai standar ASTM C1437-20 menggunakan alat uji *flow table*.

3.9 Perawatan (*Curing*)

Setiap benda uji dilakukan perawatan (*curing*) dalam oven dengan suhu 70°C selama 24 jam. Kemudian dilanjutkan perawatan suhu ruang dengan dilapisi *plastic wrapping* hingga mencapai waktu 28 hari.

3.10 Pengujian Kuat Tekan Geopolimer

Uji kuat tekan dilakukan pada benda uji umur 28 hari supaya memperoleh hasil yang optimal sesuai SNI 03-6468-2000. Penelitian ini menggunakan benda uji berupa kubus berukuran 5x5x5 cm.

BAB IV
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Agregat Halus

Pada pengujian ini didapatkan nilai karakteristik agregat halus yang telah memenuhi spesifikasi Standar Nasional Indonesia (SNI). Hasil pengujian karakteristik agregat halus dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil pengujian agregat halus (pasir)

No	Pengujian	Nilai	Rentang	Spesifikasi
1	Berat jenis	2,34	1,6 – 3,3	SNI 1970-2008
2	MHB	2,72%	2,2 – 3,1	SNI ASTM C136-2012
3	Kadar air	3,31%	2% - 5%	SNI 03-1971-1990
4	Kadar lumpur	2,88%	Maks. 5%	SNI 03-4142-1996

4.2 Hasil Pengujian Material *Pozzolan*

a. Hasil pengujian berat jenis

Pada pengujian ini dapat disimpulkan bahwa berat jenis dari abu terbang batu bara, bubuk kaca, abu sekam padi, abu ampas tebu dan abu cangkang sawit diperoleh nilai dengan rentang 1,94-2,53. Hasil pengujian berat jenis material *pozzolan* secara keseluruhan dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil pengujian berat jenis bahan material *pozzolan*

No	Material <i>Pozzolan</i>	Berat Jenis
1	Abu terbang batu bara	2,53
2	Bubuk kaca	2,34
3	Abu sekam padi	2,14
4	Abu cangkang sawit	2,0
5	Abu ampas tebu	1,94

b. Hasil pengujian *x-ray fluorescence* (XRF)

Hasil pengujian *x-ray fluorescence* (XRF) dapat disimpulkan bahwa seluruh material *pozzolan* memiliki kandungan kimia berupa silika (SiO₂), ferro oksida

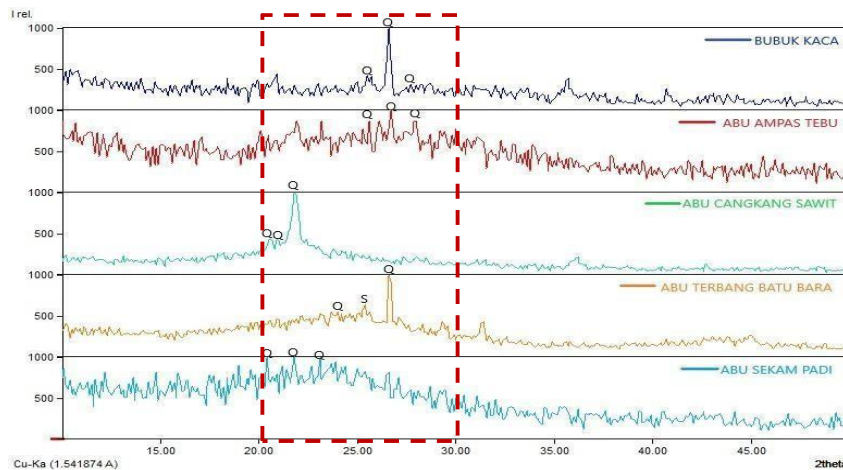
(Fe_2O_3), dan kalsium oksida (CaO). Sementara abu terbang batu bara dijadikan sebagai acuan utama pada penelitian karena memiliki kandungan alumina oksida (Al_2O_3). Hasil pengujian XRF dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil uji *x-ray fluorescence* (XRF) material *pozzolan*

No	Material <i>Pozzolan</i>	Komposisi Kimia (%)			
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO
1	Abu terbang batu bara	32	13	27	19,5
2	Bubuk kaca	42,6	-	1,23	8,39
3	Abu sekam padi	88,2	-	0,93	1,32
4	Abu cangkang sawit	11	-	19,1	38,3
5	Abu ampas tebu	47,3	-	14,7	18,6

c. Hasil pengujian *x-ray diffraction* (XRD)

Berdasarkan kajian dari grafik, puncak kristalisasi terjadi pada derajat $(20-30)^\circ 2\theta$ pada material *pozzolan*. Ketiga puncak amorf yang terkandung dalam material *pozzolan* berupa silimanite (S) dengan rumus kimia Al_2O_3 dan quartz (Q) dengan rumus kimia SiO_2 . Hasil uji XRD dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Hasil uji *x-ray diffraction* (XRD) material *pozzolan*

4.3 Hasil Pengujian *Flowability*

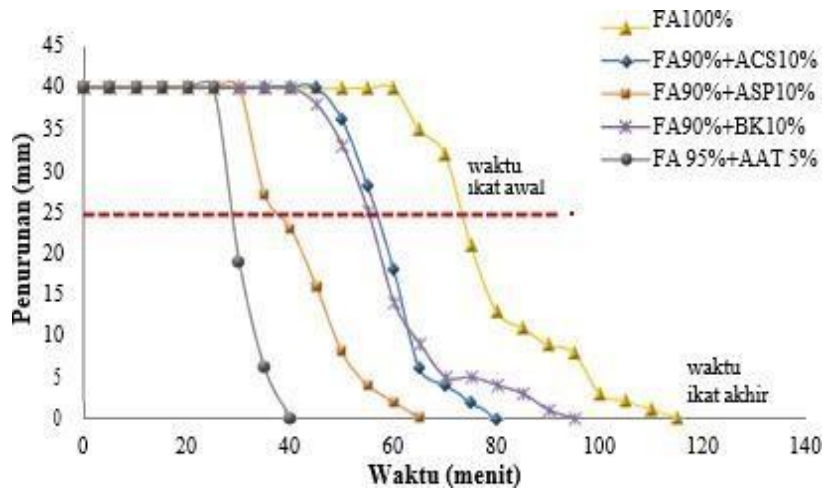
Hasil kemudahan dalam pengerjaan (*workability*) pada variasi *pozzolan* mortar geopolimer termasuk dalam kategori tinggi karena penambahan *superplasticizer* sebesar 2% dan *aquadest* 10%. Hasil didapat bahwa *flowability* tertinggi ada pada variasi FA100%. Setelah itu terjadi penurunan diameter *flow* pada mortar karena dipengaruhi oleh berat jenis material *pozzolan* yang semakin ringan. Hasil *flowability* dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil pengujian *flowability* geopolimer

No	Variasi <i>Pozzolan</i>	Diameter <i>flow</i> (mm)	<i>Workability</i>	Spesifikasi (ASTM C-124)
1	FA100%	250	Tinggi	1. Sangat tinggi (>250)
2	FA90%+BK10%	240	Tinggi	2. Tinggi (180-250)
3	FA90%+ACS10%	230	Tinggi	3. Sedang (150-180)
4	FA90%+ASP10%	200	Tinggi	4. Kaku (120-150)
5	FA95%+AAT5%	180	Tinggi	5. Sangat kaku (<120)

4.4 Hasil Pengujian *Setting Time*

Pengikatan polimerisasi dipengaruhi kandungan silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3) dan kalsium (CaO) dari material *pozzolan*. Variasi FA95%+AAT5% memiliki waktu pengikatan tercepat, yaitu 40 menit karena mengandung SiO_2 dan CaO tinggi. Variasi FA90%+ASP10% memiliki waktu pengikatan yang cepat setelah substitusi AAT5%, yaitu 65 menit karena mengandung SiO_2 paling tinggi. Pada variasi FA90%+ACS10% dan FA90%+BK10% memiliki waktu pengikatan tidak jauh berbeda, yaitu 80 menit dan 95 menit karena mengandung SiO_2 maupun CaO yang hampir sama. Waktu ikat terlama terjadi pada FA100%, yaitu 115 menit karena tidak adanya tambahan campuran lain pada material tersebut. Hasil pengujian *setting time* pasta geopolimer dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Hasil uji *setting time* pasta geopolimer

4.5 Hasil Pengujian Kuat Tekan Geopolimer

Variasi FA90%+ASP10% dan FA95%+AAT5% memiliki nilai kuat tekan di atas kuat tekan acuan (FA100%) karena material tersebut mengandung senyawa SiO_2 dan CaO yang tinggi. Sementara variasi FA90%+ACS10% dan FA90%+BK10% memiliki nilai kuat tekan di bawah kuat tekan acuan (FA100%) karena kandungan SiO_2 pada abu cangkang sawit dan CaO pada bubuk kaca cukup rendah. Selain itu, mortar geopolimer mampu menerima beban maksimum lebih dari 6,59 ton dengan kuat tekan terendah, sedangkan kuat tekan tertinggi dapat menerima beban maksimum sebesar 9,26 ton pada luasan benda uji 2500 mm^2 . Berdasarkan SNI 03-6468-2000, kuat tekan dengan nilai $>20 \text{ MPa}$ dapat diaplikasikan dalam konstruksi struktural seperti gedung dan jembatan.

Tabel 4.5 Hasil kuat tekan geopolimer

No	Variasi <i>Pozzolan</i>	Kuat Tekan (MPa)	Beban Maksimum (kg)
1	FA90%+ASP10%	36,36	9266,06
2	FA95%+AAT5%	32,95	8395,77
3	FA100%	31,35	7989,30
4	FA90%+ACS10%	28,91	7367,48
5	FA90%+BK10%	25,88	6594,04

4.6 Potensi Khusus

a. Keberlanjutan Penelitian Beton Geopolimer

Pengkajian pasta dan mortar geopolimer memiliki hasil pengujian sesuai standar acuan yang ditetapkan. Hal tersebut menjadi potensi berkelanjutan dalam penelitian beton dengan penambahan agregat kasar (kerikil). Geopolimer juga dapat digunakan dalam elemen struktur pracetak karena sifatnya cepat mengeras. Selain itu, seluruh variasi *pozzolan* merupakan material yang ramah lingkungan karena memanfaatkan limbah dari industri dan agrikultur.

b. Kebermanfaatan Material Konstruksi Ramah Lingkungan

Implementasi geopolimer dapat mewujudkan salah satu dari tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs) pada tujuan ke-9 (industri, inovasi dan infrastruktur) dan tujuan ke-13, yaitu mengatasi pemanasan global. Selain itu, pemanfaatan material konstruksi ramah lingkungan berguna bagi industri karena dapat mengurangi ketergantungan semen konvensional. Selain itu, material tersebut dapat menghemat biaya bahan pengikat karena didapatkan dari material limbah industri dan agrikultur. Di sisi lain, penggunaan limbah industri dan agrikultur dapat mendukung pemerintah dalam upaya *zero waste*.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian eksakta berupa pasta dan mortar geopolimer telah memenuhi standar acuan dengan hasil yang dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Hasil pengujian material *pozzolan* yang diantaranya pengujian berat jenis, *X-ray fluorescence* (XRF), dan *X-ray diffraction* (XRD) telah memenuhi spesifikasi berdasarkan standar acuan yang masih berlaku yang dimana disimpulkan dari pengujian tersebut bahwa material *pozzolan* memiliki nilai berat jenis yang dan persentase kandungan berupa SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO yang berbeda-beda. Maka dari itu dengan adanya substitusi material *pozzolan* dapat meningkatkan nilai kuat tekan yang optimum sebagai *supplementary cementitious materials*.
2. Hasil pengujian pasta berupa uji *setting time* diperoleh kesimpulan bahwa dengan adanya substitusi material *pozzolan* dapat meningkatkan waktu pengikatan. Kemudian peningkatan *flowability* pada mortar dipengaruhi oleh berat jenis material *pozzolan* yang semakin besar. Sementara, semakin tinggi hasil kuat tekan dipengaruhi oleh kandungan silika yang tinggi dari material *pozzolan*.

5.2 Saran

Berdasarkan pengkajian yang telah dilakukan, diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai beton geopolimer sehingga dapat diaplikasikan sebagai material konstruksi terutama di Indonesia.













DAFTAR PUSTAKA

- Alhaji, M.A., Tersoo, K.E., Aliyu, L.M., dan Almustapha, T. 2019. Study on Influence of Different Curing Regimes on The Mechanical Properties of Metakaolin Based Geopolymer. *West Africa Environment Research (WABER) Conference*. 5-7 Agustus 2019, Accra, Ghana. pp.973-986.
- Badan Pusat Statistik. 2020. *Luas Panen dan Produksi Padi Di Indonesia 2020*. Badan Pusat Statistik. Jakarta, Indonesia.
- Davidovits, J. 1994. Properties of Geopolymer Cements. *First International Conference On Alkaline Cements and Concretes*. 1 :131-149.
- Degirmeci, F.N. 2018. Utilization of Natural and Waste Pozzolans As an Alternative Resource of Geopolymer Mortar. *International Journal of Civil Engineering*, 16 (2):179-188.
- Direktorat Jenderal Perkebunan Kementerian Pertanian Republik Indonesia. 2020. *Statistik Perkebunan Unggulan Nasional 2019-2021*. Dirjen Perkebunan Kementerian Pertanian Republik Indonesia. Jakarta, Indonesia.
- Ekaputri, J.J., dan Al Bari, M.S. 2020. Perbandingan Regulasi Fly Ash sebagai Limbah B3 di Indonesia dan Beberapa Negara. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 26 (2):150-162.
- Elahi, M.M.A., Hossain, M.M., Karim, M.R., Zain, M.F.M., dan Shearer, C. 2020. A Review on Alkali-Activated Binders: Materials Composition and Fresh Properties of Concrete. *Construction and Building Materials*. 260 :1-18.
- Huseien, G.F., Ismail, M., Khalid, N.H.A., Hussin, M.W., dan Mirza, J. 2018. Compressive Strength and Microstructure of Assorted Wastes Incorporated Geopolymer Mortars: Effect of Solution Molarity. *Alexandria engineering journal*, 57 (4):3375-3386.
- Jithendra, C., dan Elavenil, S. 2021. Parametric Effects on Slump and Compressive Strength Properties of Geopolymer Concrete using Taguchi Method. *International Journal of Engineering*. 34 (3):629-635.
- Mahdi, S.N., Shashishankar, A., dan Arunraj, A. 2021. Influence of Brick Industrial Rice Husk Ash On Properties of Ambient Cured Geopolymer Mortar Matrix. *Materials Today: Proceedings*. 43 :1160-1166.
- Malkawi, A.B., Nuruddin, M.F., Fauzi, A., Almattarneh, H., dan Mohammed, B.S. 2016. Effects of Alkaline Solution on Properties of the HCFA Geopolymer Mortars. *Procedia engineering*. 148 :710-717.
- Panigrahi, M., Mohanty, S., Dash, R.R., dan Ganguly, R. I. 2018. Development of Novel Constructional Material from Industrial Solid Waste as Geopolymer. *Materials Science and Engineering*. 410 (1): 1-11.
- Patel, Y.J., dan Shah, N. 2018. Development of Self-Compacting Geopolymer Concrete As A Sustainable Construction Material. *Sustainable Environment Research*. 28 (6):412-421.


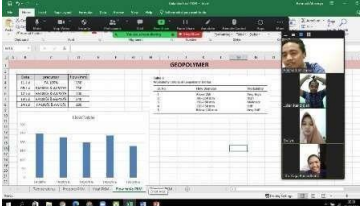

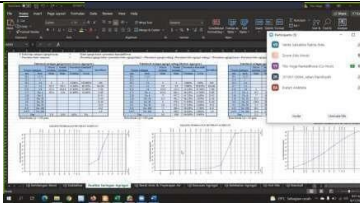



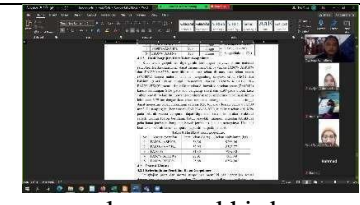
- Sistem Informasi Pengolahan Sampah Indonesia (SIPSN). 2021. *Komposisi Sampah Berdasarkan Jenis Sampah*. URL: <http://sipsn.menlhk.go.id/>. Diakses 1 Maret 2021.
- Sondakh, C., dan Gumalang, S. 2020. The Processing, Properties and Optimum Mix of Fly Ash Based-Self Compacting Geopolymer Concrete. *Earth and Environmental Science*. 419 (1):1-7.
- Tambunan, L.M. 2016. Kuat Tekan Mortar Geopolimer POFA yang Dirawat Pada Suhu Ruang. *FTEKNIK*. 3 (1): 1-9.
- Tchakoute, H.K., Ruscher, C.H., Hinsch, M., Djobo, J.N.Y., Kamseu, E., dan Leonelli, C. 2017. Utilization of Sodium Waterglass From Sugarcane Bagasse Ash As A New Alternative Hardener for Producing Metakaolin- Based Geopolymer Cement. *Geochemistry*. 77 (2):257-266.
- Venu, M., Rao, G.M., Kumar, Y.A., Madduru, S.R.C., dan Bellum, R.R. 2020. Influence of Alkaline Ratios on Strength Properties of Fly ash-Ground Granulated Blast Furnace Slag Based Geopolymer Mortars. *Materials Science and Engineering*. 998 (1):1-10.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Foto Kegiatan 1.1 Pengujian

			
Berat jenis material agregat halus	Karakteristik agregat halus	Berat jenis material pozzolan	Setting time
			
Flowability	Mortar	Perawatan oven (curing)	Uji kuat tekan
			
Proses pembungkusan dengan <i>plastic wrapped</i> untuk uji curing 28 hari	Persiapan pengiriman sampel material untuk uji XRD dan XRF	Proses penghalusan material pozzolan dengan mesin grinder	Proses pembakaran material pozzolan

Lampiran 2. Analisis Data dan Pembahasan

 <p>Pembahasan dan analisis data uji untuk agregat halus bersama tim via <i>online</i></p>	 <p>Pembahasan dan analisis data uji <i>flowability</i> dan <i>setting time</i> bersama tim via <i>online</i></p>
 <p>Pembahasan dan analisis data uji XRD dan XRF, kuat tekan, berat jenis, bersama tim via <i>online</i></p>	 <p>Pembahasan dan analisis data bersama tim via daring (<i>online</i>)</p>
 <p>Penyusunan dan pembahasan laporan kemajuan bersama dosen via <i>online</i></p>	 <p>Penyusunan powerpoint bersama tim via <i>online</i></p>
 <p>Penyusunan draft/naskah artikel ilmiah dan publikasi jurnal</p>	 <p>Penyusunan laporan akhir bersama tim melalui via <i>online</i></p>

Lampiran 3. Publikasi Ilmiah

Naskah publikasi ilmiah telah disubmit ke *International Journal of Geotechnique, Construction Materials and Environment (GEOMATE)*. Naskah publikasi ilmiah tersebut dapat dilihat pada halaman selanjutnya.