

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan semen yang meningkat drastis sebagai material pengikat pada beton dalam dunia konstruksi telah mendorong lonjakan produksi di sektor industri semen. terbesar karbon dioksida (CO_2) dan bertanggung jawab atas sekitar 7 Peningkatan produksi ini membawa dampak signifikan bagi lingkungan. Dari segi pembuatan material konstruksi konvensional, dampak yang diberikan yaitu sebagai penyumbang 7-8% dari total emisi karbon dioksida global (Pratama & Desimaliana, 2024). Jumlah emisi yang sangat besar ini secara langsung mempercepat perubahan iklim. Di sisi lain, aktivitas penambangan bahan baku esensial untuk semen juga menyebabkan kerusakan lingkungan yang lebih cepat (Restu et al., 2025). Dengan demikian, ketergantungan kita pada semen dalam pembangunan tidak hanya menghasilkan emisi gas rumah kaca dalam skala masif, tetapi juga mempercepat degradasi alam melalui penambangan. Abu Ampas Tebu (SCBA) muncul sebagai bahan pozzolanik sekunder yang sangat potensial. SCBA, yang merupakan residu pembakaran ampas tebu, memiliki kandungan SiO_2 reaktif yang tinggi. Pemanfaatan kombinasi FA dan SCBA sebagai prekursor ganda tidak hanya menyelesaikan masalah penumpukan limbah dari dua sektor (industri dan agrikultur) tetapi juga berpotensi mengoptimalkan sifat mekanik (Latifuzzaman et al., 2026; Chuewangkam et al., 2022).

Salah satu inovasi yang kini tengah dikembangkan adalah material bernama geopolimer. Geopolimer merupakan material anorganik yang inovatif, yang dihasilkan dari proses geokimia menggunakan bahan dasar mineral yang kaya akan kandungan alumina dan silika. Material ini menjadi solusi menjanjikan karena memanfaatkan limbah industri yang selama ini kurang dimanfaatkan, seperti abu terbang (*fly ash*) dan abu ampas tebu. Keduanya memiliki kandungan oksida silika dan alumina yang tinggi, menjadikannya bahan baku ideal untuk sintesis geopolimer. Dengan demikian, pemanfaatan abu ampas tebu ini tidak hanya menciptakan material konstruksi baru, tetapi juga membantu mengurangi limbah agro-industri (Li et al., 2022).

Abu ampas tebu (SCBA) adalah produk sisa dari industri pengolahan gula. Bahan ini berasal dari ampas tebu, yaitu limbah berserat yang menyusun sekitar 30%–34% dari berat tebu yang baru dipanen. Setelah ampas tebu dibakar pada suhu tertentu di dalam ketel kogenerasi, ia menghasilkan abu dalam jumlah besar, biasanya sekitar 2%–3% dari massa ampas, yang kemudian dikenal sebagai abu ampas tebu atau SCBA. Abu ampas tebu mengandung silika (SiO_2), aluminium oksida (Al_2O_3), dan besi oksida (Fe_2O_3) dalam persentase tertentu. Pemanfaatan limbah ini sebagai pengganti semen menjadi solusi untuk masalah limbah padat di industri gula yang terus meningkat seiring dengan naiknya produksi gula nasional. Berbagai studi juga menunjukkan bahwa abu ampas tebu sering digunakan sebagai pengganti sebagian semen, dicampur dengan material pozzolan lain seperti fly ash,

atau slag. Abu ampas tebu (SCBA) memiliki sifat pozzolanik, yang memungkinkannya bereaksi dengan kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) yang dihasilkan selama proses hidrasi semen. Reaksi ini membentuk senyawa tambahan berupa Kalsium Silikat Hidrat (C-S-H), yang berperan dalam meningkatkan kekuatan dan daya tahan material. Keberhasilan reaksi ini sangat ditentukan oleh karakteristik fisik dan kimia dari SCBA, termasuk tingkat amorfisitas, luas permukaan spesifik, dan komposisi kimianya (Goyal & Murmu, 2024).

Kuat tekan merupakan properti mekanik krusial pada mortar. Penelitian mutakhir menunjukkan bahwa substitusi semen dengan abu ampas tebu (SCBA) tidak hanya dapat mempertahankan, tetapi juga meningkatkan kekuatan tekan material. Berbagai studi, termasuk yang dilakukan oleh (Goyal & Murmu, 2024), telah menemukan bahwa penggantian semen dalam kisaran 10% hingga 20% seringkali menghasilkan kuat tekan yang setara atau bahkan lebih tinggi dari mortar konvensional. Keberhasilan ini sangat bergantung pada kualitas SCBA dan formulasi campuran yang optimal.

Meskipun geopolimer terbukti superior dalam kuat tekan dan durabilitas (terutama ketahanan terhadap asam dan suhu tinggi), kinerja akhir sangat bergantung pada desain campuran yang presisi. Penelitian terbaru berfokus pada penentuan proporsi yang paling efektif antara prekursor dan aktivator alkali. Misalnya, kombinasi Na_2SiO_3 dan NaOH terbukti paling efektif dalam mempercepat reaksi dan meningkatkan kekuatan (Rihan et al., 2024). Namun, dosis substitusi SCBA terhadap FA harus dioptimalkan, karena kelebihan SCBA dapat meningkatkan porositas dan mengurangi kuat tekan maksimum. Oleh karena itu, penelitian eksperimental yang berfokus pada rasio substitusi SCBA yang optimal menjadi sangat relevan dan krusial untuk adopsi material ini dalam skala praktis.

Semakin halus partikel SCBA, semakin besar luas permukaan spesifiknya. Peningkatan luas permukaan ini memungkinkan SCBA bereaksi lebih cepat dan lebih menyeluruh dengan larutan alkali pengaktif. Hasilnya, pembentukan matriks geopolimer menjadi lebih padat dan homogen, yang pada akhirnya meningkatkan kuat tekan, kuat tarik belah, dan daya tahan material. Pemrosesan SCBA yang tepat, terutama melalui penggilingan, merupakan kunci untuk memaksimalkan kinerja mortar geopolimer dan memastikan material ini mencapai potensi penuhnya sebagai pengganti semen yang berkelanjutan (Rihan et al., 2024).

Secara keseluruhan, analisis mekanis dan mikrostruktur terhadap mortar geopolimer berbasis abu ampas tebu (SCBA) membuktikan bahwa material ini memiliki potensi besar sebagai alternatif semen yang berkelanjutan. Meskipun demikian, diperlukan riset lanjutan untuk mengoptimalkan desain campuran, memahami perilaku jangka panjang material, dan mengembangkan metode pemrosesan SCBA yang lebih efisien. Upaya ini sangat penting untuk memastikan material ini dapat diterapkan secara luas di industri konstruksi (Gupta et al., 2021).

Penelitian terdahulu telah mengkonfirmasi bahwa pemanfaatan limbah industri *Fly Ash* (FA) dan limbah agrikultur *Sugar Cane Bagasse Ash* (SCBA) memiliki potensi signifikan dalam menciptakan mortar geopolimer yang ramah lingkungan sebagai alternatif Semen Portland. Meskipun studi sebelumnya berhasil

mengoptimalkan dosis substitusi SCBA terhadap FA untuk meningkatkan kuat tekan material, riset tersebut cenderung berfokus pada sifat material umum atau aplikasi beton berskala besar, sehingga meninggalkan kekosongan (gap) literatur. Oleh karena itu, penelitian ini menjadi krusial karena secara spesifik berfokus pada aplikasi Mortar Geopolimer FA-SCBA untuk Material Perkuatan Struktur, di mana jenis aplikasi ini menuntut properti mekanis (seperti kuat lentur dan kuat ikat) yang berbeda dan perlu divalidasi. Selanjutnya, penelitian ini juga akan mengisi celah dengan melakukan korelasi mendalam antara kinerja mekanis makroskopis dengan analisis mikrostruktur (SEM dan XRD) untuk menjelaskan mekanisme pembentukan gel N-A-S-H dan densitas matriks, sehingga memberikan dasar ilmiah yang kuat bagi pengembangannya sebagai material perkuatan struktural yang efektif dan berkelanjutan.

Adapun judul yang diangkat oleh penulis adalah **“ANALISIS PROPERTI MEKANIS DAN MIKROSTRUKTUR MORTAR *GEOPOLYMER* BERBASIS *FLY ASH* DAN *SUGAR CANE BAGASSE ASH* SEBAGAI MATERIAL PERKUATAN STRUKTUR.”**

1.1.1 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini diantaranya yaitu:

1. Bagaimana perilaku mekanis dari mortar *geopolymer* berbasis *fly ash* dan *sugar cane bagasse ash* sebagai material perkuatan struktur
2. Bagaimana karakteristik mikrostruktur mortar *geopolymer* berbasis *fly ash* dan *sugar cane bagasse ash* sebagai material perkuatan struktur.

1.1.2 Tujuan Penelitian/Perancangan

Berdasarkan dari rumusan masalah, penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menganalisis perilaku mekanis dari mortar *geopolymer* berbasis *fly ash* dan *sugar cane bagasse ash* sebagai material perkuatan struktur.
2. Menganalisis karakteristik mikrostruktur mortar *geopolymer* berbasis *fly ash* dan *sugar cane bagasse ash* sebagai material perkuatan struktur.

1.1.3 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini diantaranya yaitu sebagai berikut:

1. Menjadi referensi ilmiah bagi pengembangan mortar *geopolymer* berbasis *fly ash* dan *sugar cane bagasse ash* sebagai material perkuatan struktur.
2. Menambah ilmu pengetahuan mengenai perilaku mekanik dan karakteristik mikrostruktur material penyusun mortar *geopolymer* berbasis *fly ash* dan *sugar cane bagasse ash* sebagai material perkuatan struktur

1.1.4 Batasan Masalah

Untuk membuat penelitian ini lebih fokus dan terarah, maka ditetapkan batasan-batasan sebagai berikut:

1. Serat penguat yang digunakan adalah Polyvinyl Alcohol (PVA) dengan komposisi tetap sebesar 0,6% terhadap volume binder.
2. Pengujian sifat mekanik mortar meliputi: kuat tekan dan kuat tarik belah, sesuai standar pengujian laboratorium.
3. Penelitian dilakukan dalam skala laboratorium dengan kondisi ambient curing (suhu ruang).
4. Pengujian dilaksanakan pada umur 3, 7, dan 28 hari pada kondisi curing (suhu ruang).

1.2 Teori

1.2.1 Penelitian Terdahulu

Industri semen konvensional saat ini diidentifikasi sebagai salah satu kontributor utama emisi karbon dioksida (CO₂) secara global, sehingga diperlukan inovasi material pengikat alternatif yang lebih berkelanjutan. Mortar geopolimer muncul sebagai solusi potensial melalui pemanfaatan limbah industri seperti abu terbang (*fly ash*) sebagai material dasar. (Rizaldi et al., 2020) menunjukkan bahwa optimasi parameter kimiawi, khususnya pada konsentrasi aktivator, mampu menghasilkan material dengan performa mekanis yang unggul sekaligus menekan dampak negatif terhadap lingkungan.

(Chuewangkam et al., 2022) dampak penambahan abu ampas tebu (SCBA) terhadap kinerja mekanik dan dielektrik pasta geopolimer berbasis *fly ash* (FA). Dalam studi ini, SCBA diuji dalam lima variasi persentase, yaitu 0%, 10%, 20%, 30%, dan 40% dari total massa FA dan SCBA. Hasil utamanya menunjukkan bahwa penambahan 10% SCBA menghasilkan kuat tekan sebesar 45,7 MPa, sebuah nilai yang justru lebih rendah dibandingkan dengan spesimen geopolimer murni (0% SCBA) yang mencapai 47,8 MPa. Penurunan kuat tekan ini diatribusikan pada kandungan kuarsa kristalin yang tinggi dalam SCBA. Meskipun kuarsa memiliki sifat stabil, ia tidak reaktif terhadap larutan alkali yang digunakan dalam proses geopolimerisasi, sehingga tidak memberikan kontribusi pada pembentukan matriks yang kuat. Akibatnya, kuat tekan cenderung terus menurun seiring peningkatan persentase SCBA. Lebih lanjut, penambahan SCBA juga ditemukan menurunkan konstanta dielektrik material, yang disebabkan oleh kandungan karbon yang tinggi di dalamnya yang bersifat konduktif.

(Rihan et al., 2024) menyelidiki properti mekanik dan mikrostruktur pada beton geopolimer (GPC) yang memanfaatkan abu ampas tebu (SCBA) sebagai pengganti parsial untuk *Fly Ash* (FA), dengan tujuan mengembangkan material konstruksi berkelanjutan. Dalam penelitian ini, SCBA diujikan sebagai pengganti FA dalam proporsi 5%, 10%, 15%, dan 20% dari total bahan pengikat. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan SCBA secara keseluruhan meningkatkan sifat mekanik GPC. Campuran optimal dengan penambahan 5% SCBA menghasilkan

kuat tekan tertinggi, yaitu sebesar 64 MPa, menjadikannya yang terbaik di antara semua variasi. Peningkatan kekuatan ini mengindikasikan bahwa SCBA berfungsi sebagai sumber silika aktif yang efektif dalam reaksi geopolimerisasi. Analisis mikrostruktur menggunakan SEM, EDS, dan XRD mengonfirmasi bahwa penambahan SCBA, terutama pada dosis 5%, membantu membentuk matriks geopolimer yang lebih padat dan homogen.

SCBA digunakan sebagai substitusi FA. Penelitian menguji kuat tekan pada mortar geopolimer pada umur 7, 14, dan 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa substitusi SCBA pada FA berpengaruh signifikan terhadap waktu pengerasan (*setting time*) dan kekuatan mortar. Kuat tekan mortar ditemukan terus meningkat dari umur 7 hari hingga 28 hari pada setiap persentase substitusi. Nilai kuat tekan tertinggi diperoleh pada persentase substitusi 15% SCBA, dengan nilai kuat tekan maksimum sebesar 10.4 MPa. Pada persentase 15%, waktu pengerasan awal (*initial setting time*) adalah 90 menit dan waktu pengerasan akhir (*final setting time*) adalah 135 menit, yang memenuhi standar untuk pengerasan awal.

(Fakhrudin, 2025) menganalisis sifat mekanik beton geopolimer berbasis *fly ash* Kelas C dengan variasi substitusi abu ampas tebu (AAT) sebesar 0%, 5%, dan 10% dari total *binder*, serta penambahan serat *polypropylene* (PP) pada dosis tetap 0,6 kg/m³. Larutan aktivator yang digunakan merupakan kombinasi NaOH 10 M dan Na₂SiO₃ dengan rasio 1,5. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan kadar AAT menurunkan tingkat *workability*, yang ditandai oleh penurunan nilai *slump*. Karakteristik AAT yang higroskopis dan berpori memengaruhi penyerapan air dalam campuran. Meskipun demikian, substitusi 10% AAT memberikan kontribusi optimal terhadap kinerja mekanik dengan menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 20,1 MPa pada umur 28 hari, atau meningkat 41,19% dibandingkan beton kontrol. Sementara itu, nilai kuat tarik belah optimum sebesar 2,2 MPa dicapai pada variasi 5% AAT, berkat mekanisme *fiber bridging* dari serat PP yang efektif menahan perambatan retak makro struktural.

(Fakhrudin et al., 2025) menguji efektivitas pemanfaatan abu ampas tebu dan abu daun tebu sebagai material pengikat alternatif untuk substitusi semen dalam pengembangan beton mutu tinggi (HSC). Penelitian ini menggunakan variasi 10%, 15% dan 20% yang di kombinasikan dengan penambahan serat polyethylene terephthalate (PET) dari limbah botol plastik industri sebesar 0,1% serta metode perawatan steam curing pada suhu 70-80°C. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa karakteristik silika aktif dan sifat pozolanik yang kuat dari abu ampas tebu dan abu daun tebu pada kadar substitusi 10% menghasilkan nilai kuat tekan 34,14 Mpa pada 28 hari. Selain itu, penambahan serat PET sebanyak 0,1% terbukti secara signifikan berkontribusi menahan gaya tarik pasca retak, yang tercermin dari peningkatan nilai kuat lentur menjadi 4,74 Mpa pada 28 hari.

1.2.2 Mortar Geopolymer

Inovasi mendasar dalam teknologi material konstruksi adalah mortar geopolimer, yang menyediakan pengganti yang lebih berkelanjutan untuk semen Portland (OPC). Abu terbang, terak, dan abu dari limbah pertanian adalah contoh sisa industri yang kaya akan silika dan alumina yang digunakan dalam material ini sebagai pengganti semen Portland. Joseph Davidovits menciptakan istilah "geopolimer" pada tahun 1970-an untuk menggambarkan proses kimia anorganik yang menghasilkan matriks pengikat yang sangat stabil, dan karyanya adalah tempat ide mendasar ini berasal. Mortar geopolimer adalah material yang fantastis untuk plesteran, pekerjaan batu, dan perbaikan struktural karena diproduksi dengan menggabungkan komponen prekursor dengan agregat halus (pasir).

Mekanisme geopolimerisasi di balik teknologi ini melibatkan interaksi kimia antara material prekursor (yang kaya akan SiO_2 dan Al_2O_3) dan larutan aktivator alkali yang sangat basa. Komponen silika dan alumina dari limbah dilarutkan dan diaktifkan oleh larutan ini, yang biasanya merupakan campuran natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_3). Proses ini menghasilkan struktur polimer anorganik tiga dimensi yang sangat padat yang dikenal sebagai gel N-A-S-H (Sodium-Aluminosilicate Hydrate). Mortar geopolimer memiliki kekuatan dan daya tahan yang luar biasa berkat struktur N-A-S-H-nya, menjadikannya bahan pengikat yang ampuh.

Mortar geopolimer memiliki beberapa keunggulan, terutama dalam hal ekonomi dan lingkungan. Produksi geopolimer ramah lingkungan karena tidak memerlukan pembakaran suhu tinggi, yang dapat secara signifikan menurunkan emisi gas rumah kaca (CO_2) dibandingkan dengan pembuatan semen konvensional. Selain itu, penggunaan limbah padat seperti abu terbang dan abu ampas tebu (SCBA) tidak hanya mengurangi limbah industri tetapi juga memberikan nilai ekonomi pada residu ini. Oleh karena itu, geopolimer menjunjung tinggi prinsip-prinsip ekonomi sirkular dalam industri bangunan.

Mortar geopolimer memiliki sifat kinerja yang sangat baik, seringkali mengungguli semen Portland di lingkungan yang keras, yang merupakan salah satu keunggulan terbesarnya. Mortar ini menunjukkan ketahanan yang unggul terhadap api dan suhu tinggi, serta kekuatan tekan yang besar dan ketahanan terhadap serangan asam dan sulfat. Karakteristik ini menjadikannya material yang diinginkan untuk proyek infrastruktur di lingkungan yang keras, seperti pembangunan pesisir atau bangunan yang berisiko terpapar bahan kimia. Karena kinerja termal dan ketahanan kimianya yang unggul, bangunan tersebut secara keseluruhan akan bertahan lebih lama.

Desain campuran mortar geopolimer sangat penting karena memiliki dua keunggulan: kinerja yang lebih baik dan manfaat lingkungan. Sifat akhir mortar dan kinetika reaksinya sangat dipengaruhi oleh jenis prekursor (seperti abu terbang Kelas F atau terak), rasio molaritas aktivator alkali, dan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$. Sebagai landasan masa depan material konstruksi berkelanjutan, penelitian yang sedang berlangsung berfokus pada pengoptimalan campuran untuk menjamin penggunaan

luas material baru ini dalam berbagai aplikasi bangunan, mulai dari pekerjaan perbaikan hingga proyek konstruksi skala besar.

1.2.3 Material Penyusun Mortar *Geopolymer*

1.2.3.1 Agregat Halus

Agregat halus merupakan komponen esensial dalam semua campuran mortar dan beton, termasuk geopolimer. Berdasarkan spesifikasi standar, seperti ASTM C33/C33M, agregat halus didefinisikan sebagai material granular yang mayoritas ukurannya mampu melewati saringan berukuran 4,75 mm (No. 4) tetapi harus tertahan pada saringan 75 mikron (No. 200). Agregat ini umumnya bersumber dari pasir alami atau material hasil pemecahan batuan yang telah diproses. Perannya dalam mortar geopolimer sama pentingnya dengan peran material pengikat, yaitu menyediakan volume, mengurangi penyusutan, dan berkontribusi pada stabilitas struktural material akhir.

Kualitas agregat halus diatur ketat oleh standar ASTM, yang menekankan kriteria spesifik mengenai sifat fisik dan gradasi butiran. Gradasi atau distribusi ukuran butir harus berada dalam batas yang telah ditetapkan untuk memastikan campuran mortar mencapai kepadatan (*density*) yang optimal dan workabilitas yang baik. Jika gradasi tidak proporsional, ini dapat mengganggu kestabilan campuran, menyebabkan pemisahan material (*segregation*), dan berdampak negatif pada kinerja kekuatan serta durabilitas struktur yang dihasilkan.

Selain gradasi, agregat halus juga harus memenuhi persyaratan kebersihan, berat jenis, dan daya serap air (*absorption*) yang memadai. Sifat-sifat fisik ini sangat memengaruhi interaksi agregat dengan pasta geopolimer. Agregat halus yang berkualitas berfungsi sebagai **filler** yang mengisi ruang kosong antara agregat kasar (dalam beton) atau antara pasta pengikat (dalam mortar), menghasilkan matriks yang padat dan homogen. Kepadatan dan homogenitas ini adalah kunci untuk mencapai kuat tekan dan ketahanan jangka panjang yang maksimal.

Tabel 1. Presentase Agregat Lolos Ayakan

Ukuran Lubang Ayakan (mm)	No. Saringan	Persen Lolos Kumulatif (%)
9,5	3/8"	100
4,75	No.4	95-100
2,36	No. 8	80-100
1,18	No. 16	50-85
0,6	No. 30	25-60
0,3	No. 50	5-30
0,15	No. 100	0-10

Sumber : (ASTM C33/C33M)

1.2.3.2 Fly Ash

Fly ash (abu terbang) adalah prekursor yang paling sering digunakan dan dipelajari dalam pembuatan mortar geopolimer. Material ini merupakan residu halus dari pembakaran batu bara dalam pembangkit listrik termal, yang secara kimiawi kaya akan senyawa silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3), menjadikannya sumber ideal untuk reaksi geopolimerisasi. Menurut standar ASTM C618, *fly ash* diklasifikasikan menjadi dua tipe utama yaitu Kelas F (rendah kalsium) dan Kelas C (tinggi kalsium). Klasifikasi ini sangat memengaruhi desain campuran geopolimer, di mana *fly ash* Kelas F membutuhkan aktivator alkali yang lebih kuat, sedangkan Kelas C, karena kandungan kalsiumnya, mungkin menunjukkan reaksi hidrasi tambahan, mirip dengan semen.

Penggunaan *fly ash* dalam mortar geopolimer bukan hanya solusi pemanfaatan limbah, tetapi juga memberikan keunggulan teknis. Partikel *fly ash* yang sangat halus dan berbentuk bulat (*spherical*) meningkatkan workabilitas campuran mortar. Oleh karena jumlahnya yang melimpah dan reaktivitasnya yang tinggi, *fly ash* tetap menjadi bahan baku utama yang mendorong adopsi teknologi geopolimer secara global.

Tabel 2. Komposisi Kimia *Fly ash* Berdasarkan Kelasnya

Senyawa Kimia	Kelas N	Kelas F	Kelas C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, minimal (%)	70	50	50
SO_3 , maksimum (%)	4	5	5
CaO(%)	-	18(maksimum)	>18
Kadar Kelembaban, maksimum (%)	3	3	3
Loss on Ignition (LOI), maksimum (%)	10	6	6

Sumber : (ASTM C618-19)

1.2.3.3 Abu Ampas Tebu (*Sugarcane Bagasse Ash*)

SCBA adalah produk sampingan dari pembakaran ampas tebu di pabrik gula, dan seperti *fly ash*, ia juga kaya akan senyawa silika (SiO_2). Komposisi kimia SCBA umumnya menunjukkan kandungan silika yang sangat tinggi, seringkali melebihi 70%, yang membuatnya dikategorikan sebagai bahan pozzolanik yang efektif. Untuk mencapai reaktivitas yang optimal dalam reaksi geopolimerisasi, SCBA seringkali memerlukan penggilingan yang lebih halus dan kontrol suhu pembakaran yang tepat.

Dalam aplikasi mortar geopolimer, SCBA sering digunakan sebagai substitusi parsial untuk *fly ash* atau *slag*. Tujuannya adalah untuk meningkatkan pemanfaatan limbah pertanian sekaligus menyesuaikan sifat mekanik mortar. Penelitian menunjukkan bahwa penambahan SCBA dalam dosis tertentu dapat mempercepat waktu pengerasan dan meningkatkan kuat tekan pada umur awal, berkat kandungan silika reaktifnya. Namun, persentase substitusi harus

dioptimalkan; jika terlalu banyak, SCBA dapat meningkatkan porositas dan mengurangi kuat tekan akhir. Keberadaan SCBA dalam campuran menunjukkan potensi besar geopolimer dalam memanfaatkan berbagai jenis limbah agrikultur secara berkelanjutan.

1.2.3.4 Alkali Aktivator

Aktivator alkali adalah komponen kimia yang krusial karena bertindak sebagai katalis untuk memulai dan mempertahankan proses geopolimerisasi. Aktivator yang paling umum digunakan meliputi Natrium Silikat (Na_2SiO_3), Natrium Hidroksida (NaOH), dan kadang-kadang Kalium Hidroksida (KOH). Dari semua kombinasi yang ada, campuran Na_2SiO_3 dan NaOH adalah yang paling sering diaplikasikan karena efektivitasnya dalam meningkatkan kekuatan dan mempercepat waktu pengerasan mortar geopolimer.

Masing-masing komponen aktivator memiliki fungsi yang berbeda. Natrium Silikat (sering disebut *waterglass*) berfungsi sebagai sumber silika terlarut yang esensial untuk pembentukan matriks N-A-S-H, serta memainkan peran penting dalam mempercepat reaksi dan mengendalikan rasio Si/Al dalam produk akhir. Sementara itu, Natrium Hidroksida (NaOH) bertugas menciptakan lingkungan pH yang sangat basa untuk melarutkan unsur silika dan alumina dari prekursor seperti *fly ash* dan SCBA, sehingga memungkinkan polimerisasi terjadi.

Pembuatan larutan NaOH harus dilakukan dengan hati-hati. Serpihan NaOH dilarutkan ke dalam air, yang memicu reaksi eksotermis (melepaskan panas) dan menghasilkan larutan yang korosif. Oleh karena itu, prosedur pelarutan harus dilakukan secara bertahap, dalam jumlah kecil, dan menggunakan tindakan pencegahan yang memadai. Setelah larutan NaOH siap, ia biasanya disimpan dalam wadah tertutup rapat untuk menjaga konsentrasi molaritasnya sebelum dicampur dengan Na_2SiO_3 dan prekursor.

1.2.3.5 Serat PVA

Serat Polyvinyl Alcohol (PVA) merupakan jenis serat sintetis yang telah terbukti efektif dalam meningkatkan sifat mekanik material semen. Serat PVA umumnya ditambahkan ke dalam campuran beton atau mortar untuk meningkatkan daktilitas, menurunkan kerapuhan, dan mengontrol retak mikro plastik dan struktural yang disebabkan oleh susut. Keunggulan serat PVA terletak pada sifatnya yang memiliki kuat tarik tinggi, modulus elastisitas rendah, dan kemampuan untuk berikatan kuat secara kimia dengan matriks semen atau geopolimer. Dalam konteks mortar geopolimer untuk perkuatan struktur, penambahan serat PVA sangat krusial karena membantu mendistribusikan tegangan secara merata, mencegah perambatan retak, dan oleh karena itu, secara signifikan meningkatkan ketahanan lentur dan kuat tarik tidak langsung mortar, menjadikannya material yang lebih handal dan tahan lama untuk aplikasi perkuatan.

Tabel 3. Spesifikasi Serat PVA

Spesifikasi Serat Polivinil Alkohol	
Panjang	8 mm
Diameter	38 μ m
Berat Jenis	1.3 gr/cm ³
Kuat Tarik	1600 MPa
Modulus Elastisitas	40000 MPa

1.2.3.6 Bahan Tambah (*Addmixture*)

Sika ViscoCrete-1003 adalah superplasticizer berkinerja tinggi yang sangat efektif dalam memproduksi beton dengan sifat mudah mengalir dan kemampuan memadat sendiri tanpa memerlukan getaran. Keunggulan utamanya meliputi peningkatan kekuatan awal beton yang signifikan, serta hasil akhir yang sangat baik dari segi kerapatan dan kedap air. Selain itu, produk ini meningkatkan durabilitas jangka panjang beton dengan memberikan ketahanan terhadap karbonasi yang lebih baik dan mengurangi susut serta rayap, menjamin hasil akhir permukaan beton yang unggul. Karena tidak mengandung klorida, ViscoCrete-1003 aman digunakan untuk semua jenis beton, termasuk beton bertulang dan pratekan. Aplikasi idealnya mencakup beton pracetak, *ready mix*, beton massa, pengerjaan dalam cuaca panas, dan proyek dengan waktu pengangkutan material yang lama, dengan dosis penggunaan yang fleksibel antara 0,2% hingga 2,0% dari berat bahan pengikat.

1.2.4 Pengujian Material Penyusun Beton Geopolimer

1.2.4.1 Karakteristik Agregat

Pemeriksaan karakteristik agregat adalah tahap dasar dalam proses *mix design* mortar geopolimer guna memastikan kualitas material memenuhi syarat teknis yang ditetapkan. Pengujian ini sangat penting untuk menjamin kinerja akhir beton yang optimal. Serangkaian pengujian standar wajib dilakukan, meliputi

1. Analisa Saringan (ASTM C136 – 06)
2. Berat jenis dan penyerapan air (SNI 1970 : 2016)
3. Berat volume dan rongga udara (SNI 03-4804-1998)
4. Kadar Organik (SNI 2816:2014)
5. Kadar lumpur (ASTM C117 – 23)
6. Keausan (SNI 2417 : 2008)

1.2.4.2 XRF (X-Ray Fluorescence)

X-ray Fluorescence (XRF) merupakan teknik analisis non-destruktif yang dirancang untuk mengidentifikasi dan menentukan komposisi unsur kimia dalam berbagai jenis material. Prinsip kerjanya cukup mendasar: ketika seberkas sinar-X

ditembakkan ke permukaan sampel, energi dari sinar tersebut akan mengganggu atom, menyebabkan elektron di kulit dalam terlempar keluar dari orbitnya.

Kekosongan yang tercipta ini segera diisi oleh elektron dari kulit terluar. Proses perpindahan energi inilah yang melepaskan sinar baru, yang dikenal sebagai fluoresensi. Energi yang terkandung dalam sinar fluoresensi ini bersifat unik bagi setiap unsur, memungkinkan instrumen XRF untuk secara spesifik mengidentifikasi unsur-unsur yang terkandung dalam sampel.

Keunggulan utama XRF terletak pada fleksibilitasnya; alat ini mampu menganalisis sampel dalam bentuk padat, cair, maupun serbuk. XRF memiliki kemampuan deteksi yang luas, meliputi unsur dari Natrium (Na) hingga Uranium (U), dengan akurasi yang luar biasa hingga konsentrasi serendah satu bagian per juta (ppm). Selain itu, kecepatan analisisnya sangat efisien, umumnya hanya memerlukan waktu dari beberapa detik hingga beberapa menit.

Dengan kemampuannya yang cepat, non-destruktif, dan pilihan ketersediaan alat portabel, XRF telah menjadi alat penting dalam berbagai bidang. Metode ini sering digunakan dalam pengujian bahan tambang, logam, limbah industri, bahan konstruksi, dan plastik daur ulang. Meskipun demikian, akurasi hasil dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti jenis bahan, ketebalan, dan kondisi permukaan sampel. Oleh karena itu, persiapan sampel yang teliti dan proses kalibrasi yang tepat sangat diperlukan untuk mendapatkan data yang andal (González et al., 2024).

1.2.4.3 XRD (X-Ray Diffraction)

Pengujian X-Ray Diffraction (XRD) merupakan metode analisis yang tidak merusak bertujuan untuk mengenali fase kristalin dan struktur atom dalam suatu bahan dengan menggunakan interaksi antara sinar-X dan kisi kristal. Cara kerjanya berlandaskan prinsip difraksi, di mana berkas sinar-X yang diarahkan ke sampel akan dipantulkan oleh bidang atom pada sudut tertentu yang sangat spesifik, sesuai dengan prinsip hukum Bragg. Proses ini menghasilkan pola difraksi yang khas, berupa puncak-puncak intensitas (difraktogram), yang berfungsi sebagai "sidik jari" untuk mengidentifikasi jenis mineral atau senyawa dalam bahan tersebut. Berbeda dengan analisis kimia biasa yang hanya menunjukkan komposisi unsur, XRD memiliki kemampuan untuk membedakan bentuk struktur dari unsur yang sama, seperti membedakan grafit dan intan, yang keduanya terbuat dari karbon namun memiliki susunan kristal yang berbeda.

Dalam penggunaan di lab, XRD sangat penting untuk menganalisis bahan kompleks seperti logam, polimer, keramik, serta bahan geologi. Hasil dari pengujian ini tidak hanya memberikan informasi tentang identitas fase material, tetapi juga memberikan wawasan mendalam mengenai derajat kristalinitas, ukuran butiran kristal (ukuran kristalit), hingga adanya regangan dalam kisi kristal akibat proses mekanis atau panas. Dengan kemampuan deteksi yang tinggi terhadap perubahan fase struktur, XRD menjadi alat utama dalam penelitian bahan baru dan pemantauan

kualitas industri untuk memastikan bahwa karakteristik fisik bahan memenuhi standar teknis yang diinginkan.

1.2.4.4 SEM (Scanning Electron Microscopy)

Scanning Electron Microscopy (SEM) adalah teknik karakterisasi mikroskopis yang esensial, digunakan untuk memvisualisasikan dan menganalisis struktur permukaan material dari skala mikro hingga nanometer. Instrumen ini menghasilkan citra beresolusi tinggi yang secara detail mengungkap topografi, morfologi, dan struktur mikro suatu bahan.

Prinsip operasional SEM berpusat pada penembakan berkas elektron yang terfokus ke permukaan sampel. Interaksi berkas elektron ini dengan sampel memicu pelepasan beberapa jenis sinyal, yaitu elektron sekunder, elektron pantul balik (*backscattered*), dan sinar-X karakteristik. Setiap sinyal ini ditangkap oleh detektor berbeda dan memberikan informasi unik, bergantung pada bagaimana interaksi elektron terjadi di dalam material.

Keunggulan utama SEM sangat signifikan yaitu menawarkan resolusi yang superior, kedalaman fokus yang luar biasa, dan kemampuan untuk membuat citra semu tiga dimensi. Dengan teknologi canggih seperti *field emission gun* (FEG), pengamatan dapat dilakukan hingga di bawah 5 nanometer. Selain visualisasi morfologi, SEM juga efektif untuk mengamati rekahan, pengikisan, dan identifikasi fasa material. Lebih lanjut, SEM sering dikombinasikan dengan alat seperti EDS (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*) atau WDS (*Wavelength Dispersive X-ray Spectroscopy*) untuk melakukan analisis kuantitatif dan kualitatif terhadap komposisi unsur kimia dalam sampel. Karena kemampuannya yang serbaguna, SEM banyak diimplementasikan dalam berbagai disiplin ilmu, mulai dari penelitian material, geologi, biologi, hingga forensik.

1.2.4.5 LOI (Loss On Ignition)

Loss On Ignition (LOI) adalah sebuah metode analisis laboratorium yang penting untuk mengukur jumlah senyawa yang bisa menguap atau bahan yang menguap dalam contoh material padat seperti semen, mineral, atau tanah. Dasar dari pengujian ini adalah dengan mengukur perbedaan berat sebelum dan sesudah contoh dipanaskan di dalam tanur pada suhu tinggi, biasanya sekitar 1000 derajat Celsius. Selama pemanasan, komponen non-logam seperti uap air, karbon dioksida dari penguraian senyawa karbonat, dan zat organik akan terbakar dan dilepaskan ke udara sebagai gas.

Hasil dari LOI sering dipakai sebagai penanda kemurnian dan kualitas bahan mentah di banyak industri. Misalnya, dalam bidang konstruksi, nilai LOI semen digunakan untuk mengetahui apakah ada penipuan atau penurunan kualitas karena penyerapan air dan karbonasi saat penyimpanan. Semakin tinggi persentase berat yang hilang, semakin besar pula jumlah komponen non-mineral dalam bahan tersebut. Secara teknis, penghitungan ini sangat berguna bagi para ilmuwan kimia

dan geologi untuk memeriksa data komposisi kimia keseluruhan dari suatu material, sehingga proses pengolahan berikutnya dapat berlangsung lebih tepat dan efisien.

1.2.5 Pengujian Pada Mortar *Geopolymer*

1.2.5.1 Flow Table Test

Untuk mengukur konsistensi pada mortar, metode yang standar dan lebih relevan dibandingkan *Slump Test* beton adalah *Flow Table Test* (Uji Meja Alir), karena konsistensi mortar yang lebih encer atau plastis akan menghasilkan *slump* total pada kerucut beton. Prinsip kerja pengujian ini melibatkan pengisian mortar ke dalam cetakan kerucut yang diletakkan di atas meja uji, yang kemudian diangkat. Meja selanjutnya diguncang berulang kali dari ketinggian standar, menyebabkan mortar menyebar. Diameter penyebaran (*flow*) yang diukur dalam dua arah tegak lurus dijadikan nilai untuk mengukur fluiditas mortar. Nilai *flow* ini sangat penting sebagai kontrol kualitas untuk menjamin konsistensi rasio air-semen dan dosis bahan tambah antar adukan, sekaligus berfungsi sebagai indikasi *workability* dan petunjuk potensi terjadinya segregasi dalam campuran.

1.2.5.2 Densitas

Densitas (atau berat volume) adalah ukuran penting yang merepresentasikan massa suatu material per satuan volume, umumnya dinyatakan dalam kg/m³. Dalam konteks konstruksi, pengujian densitas berfungsi untuk mengevaluasi seberapa padat campuran yang dibuat. Ini adalah data fundamental yang digunakan untuk menghitung volume hasil campuran (*yield*), menentukan kadar udara dalam material, dan memverifikasi takaran bahan penyusun, termasuk semen.

Menurut standar (ASTM C138/C138M), pengujian densitas dilakukan dengan menimbang secara akurat massa campuran segar yang dimasukkan ke dalam wadah ukur (bekisting) yang volumenya telah dikalibrasi. Nilai densitas diperoleh dari perhitungan sederhana: membagi total massa campuran mortar yang terisi penuh dengan volume wadah yang diketahui tersebut. Pengujian densitas ini krusial dalam pengendalian mutu mortar di lapangan. Densitas yang konsisten menunjukkan bahwa rasio pencampuran (air, semen, agregat) dan kadar udara tetap seragam dari satu *batch* adukan ke *batch* berikutnya.

- Densitas yang terlalu Rendah dapat mengindikasikan adanya rongga udara berlebihan (kadar udara tinggi) atau kekurangan bahan padat.
- Densitas yang terlalu Tinggi dapat menjadi petunjuk adanya segregasi atau rasio air yang tidak tepat, yang semuanya menunjukkan pencampuran yang tidak optimal.

Berdasarkan ASTM C 642-13, densitas dapat dihitung dengan

$$D = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

D = Densitas mortar (kg/m³)

m = Berat mortar (kg)

V = Volume mortar (kg)

1.2.5.3 Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) berfungsi sebagai teknik non-destruktif yang vital untuk mengevaluasi kualitas dan integritas internal material, dan prinsipnya berlaku sama untuk mortar seperti halnya pada beton. Sesuai standar ASTM C597, metode ini bekerja dengan merambatkan gelombang longitudinal yang dipancarkan oleh transduser melalui spesimen mortar.

Instrumen ini secara akurat mengukur waktu tempuh yang diperlukan gelombang tersebut untuk melintasi jarak yang diketahui. Kecepatan gelombang (V) yang dihitung dari jarak dibagi waktu dengan persamaan berikut

$$V = \frac{L}{T} \quad (1.2)$$

Dengan:

V = Kecepatan gelombang (m/s)

L = Panjang lintasan atau jarak antar transduser (m)

T = waktu tempuh (s)

Kecepatan yang tinggi pada mortar menunjukkan kepadatan dan homogenitas yang baik, sementara kecepatan yang rendah dapat mengindikasikan keberadaan rongga udara, retakan, atau porositas berlebihan. Dengan demikian, UPV adalah alat penting untuk mengontrol kualitas dan memprediksi kinerja struktural mortar tanpa merusak sampel.

Kecepatan gelombang ultrasonik yang dihitung berfungsi sebagai indikator penting yang mencerminkan sifat fisik internal mortar, termasuk kerapatan, homogenitas, dan keberadaan cacat. Secara prinsip, semakin tinggi kecepatan gelombang merambat, semakin baik kualitas internal mortar tersebut. Sebaliknya, penurunan kecepatan gelombang mengindikasikan adanya rongga, retakan, atau zona lemah yang memperlambat perambatan pulsa ultrasonik.

Metode UPV memiliki banyak keunggulan. Ia memungkinkan prediksi tidak langsung terhadap kekuatan tekan mortar, dan dalam studi yang lebih mendalam, dapat dimanfaatkan untuk mengestimasi modulus elastisitas dinamis serta menentukan kedalaman retakan yang mungkin terjadi. Secara operasional, UPV bersifat cepat, aman, non-destruktif, dan ekonomis. Dengan perangkat digital modern, UPV bahkan mampu memetakan zona kerusakan dan melacak degradasi struktural dari waktu ke waktu. Dalam implementasinya di lapangan, nilai kecepatan UPV digunakan untuk mengklasifikasikan mutu mortar secara umum, menggunakan tabel klasifikasi mutu yang setara dengan yang diterapkan pada beton, di mana

ambang batas kecepatan tertentu menentukan apakah mortar dikategorikan sebagai memiliki kualitas *excellent*, *good*, *doubtful*, atau *poor*.

1.2.5.4 Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan mortar adalah prosedur standar yang sangat penting untuk menentukan kemampuan mekanis adukan semen dan pasir dalam menahan beban tekan. Tujuan utamanya adalah mendapatkan nilai kekuatan tekan maksimum (f'_c) pada usia standar, umumnya 28 hari, yang merupakan indikator krusial dari kualitas dan daya tahan mortar. Prosesnya dimulai dengan mencetak mortar segar menjadi kubus uji standar, merawatnya di lingkungan terkontrol, dan kemudian membebaninya secara bertahap menggunakan mesin uji tekan hingga spesimen hancur. Hasil kuat tekan, yang dihitung dari perbandingan beban maksimum dengan luas penampang kubus, berfungsi sebagai alat kontrol kualitas yang memastikan konsistensi rasio campuran dan kesesuaian mortar untuk aplikasi struktural, seperti pada pekerjaan pasangan bata atau *grouting*.

Kuat tekan mortar dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$f'_c = \frac{P}{A} \quad (1.3)$$

Dengan:

f'_c = Kuat Tekan (MPa)

P = Beban maksimum saat keruntuhan (N)

A = Luas penampang benda uji (mm^2)

1.2.5.5 Kuat Tarik Belah

Kuat tarik belah mortar adalah nilai tegangan tarik maksimum yang dapat ditahan oleh mortar, dihitung melalui metode pengujian tidak langsung menggunakan benda uji berbentuk silinder. Dalam pengujian ini, yang sering merujuk pada prinsip yang diatur oleh standar seperti ASTM C496 benda uji silinder mortar diletakkan secara horizontal di antara pelat penekan mesin uji.

Beban tekan vertikal kemudian diaplikasikan secara terus-menerus di sepanjang garis diameternya. Meskipun beban yang diberikan adalah tekan, distribusi gaya tersebut menghasilkan tegangan tarik yang besar pada arah diameter melintang (tegak lurus terhadap arah beban). Tegangan tarik inilah yang akhirnya menyebabkan spesimen mortar membelah menjadi dua.

Metode ini sangat penting karena kuat tarik mortar sulit diukur secara langsung. Dengan cara ini, kekuatan tarik (f_t) dihitung menggunakan rumus yang menghubungkan beban tekan maksimum yang dicapai (P), diameter silinder (D), dan panjang silinder (L):

$$f_t = \frac{2P}{\pi LD} \quad (1.4)$$

Dengan:

f_t = Kuat tarik belah (MPa)

P = Beban Maksimum (N)

d = Diameter benda uji (mm)

L = Panjang benda uji (mm)

1.2.5.6 Pola Keretakan

Fenomena retak pada material, khususnya mortar, merupakan manifestasi fisik dari kegagalan internal matriks dalam mendistribusikan akumulasi energi regangan. Sebagai material yang bersifat heterogen dan getas (*brittle*), munculnya retakan awal (*crack initiation*) menandakan bahwa tegangan lokal telah melampaui kapasitas tarik sementisius, baik akibat pengaruh beban mekanis eksternal maupun fluktuasi volume internal seperti susut (*shrinkage*). Dalam konteks pengujian laboratorium, karakteristik pola retak yang terbentuk berfungsi sebagai indikator visual yang merepresentasikan respons spesimen terhadap arah tegangan dominan serta interaksi antara pasta semen dan agregat halus pada skala mikro.

1.2.6 Perawatan Mortar Geopolymer

Perawatan (*curing*) pada mortar memiliki tujuan fundamental yang sama dengan beton: mendorong hidrasi semen secara optimal dan memastikan pencapaian kekuatan yang direncanakan. Proses ini esensial untuk menjaga mortar tetap jenuh air atau mendekati jenuh, sekaligus mengendalikan suhu agar air pencampuran tidak menguap. Dengan mempertahankan kelembapan, proses hidrasi dapat berlanjut, memastikan produk hidrasi semen mengisi ruang-ruang pori yang tadinya diisi oleh air saat mortar masih segar.

Mengacu pada prinsip standar seperti (ASTM C192/C192M) (untuk persiapan sampel) dan standar terkait pengujian mortar (misalnya SNI 03-6825-2002), Perawatan awal (*initial curing*) dimulai segera setelah pencetakan benda uji (biasanya kubus 50 mm). Tujuannya adalah mencegah hilangnya kelembapan secara tiba-tiba dan cepat dari permukaan mortar yang masih sangat muda. Dalam konteks laboratorium, benda uji biasanya ditutup permukaannya menggunakan bahan kedap air seperti lembaran plastik atau diletakkan dalam ruangan yang memiliki kelembapan tinggi, segera setelah proses pemadatan selesai. Fase ini berlangsung selama 24 jam atau hingga benda uji cukup kuat untuk dilepaskan dari cetakan.

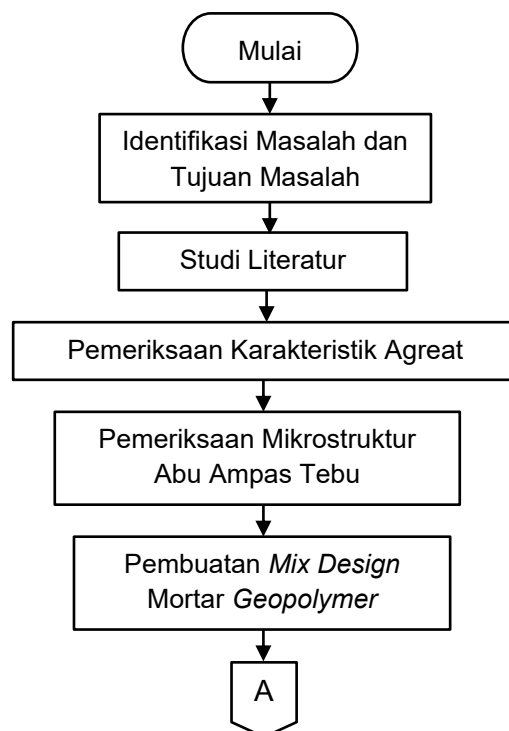
BAB II METODE PENELITIAN

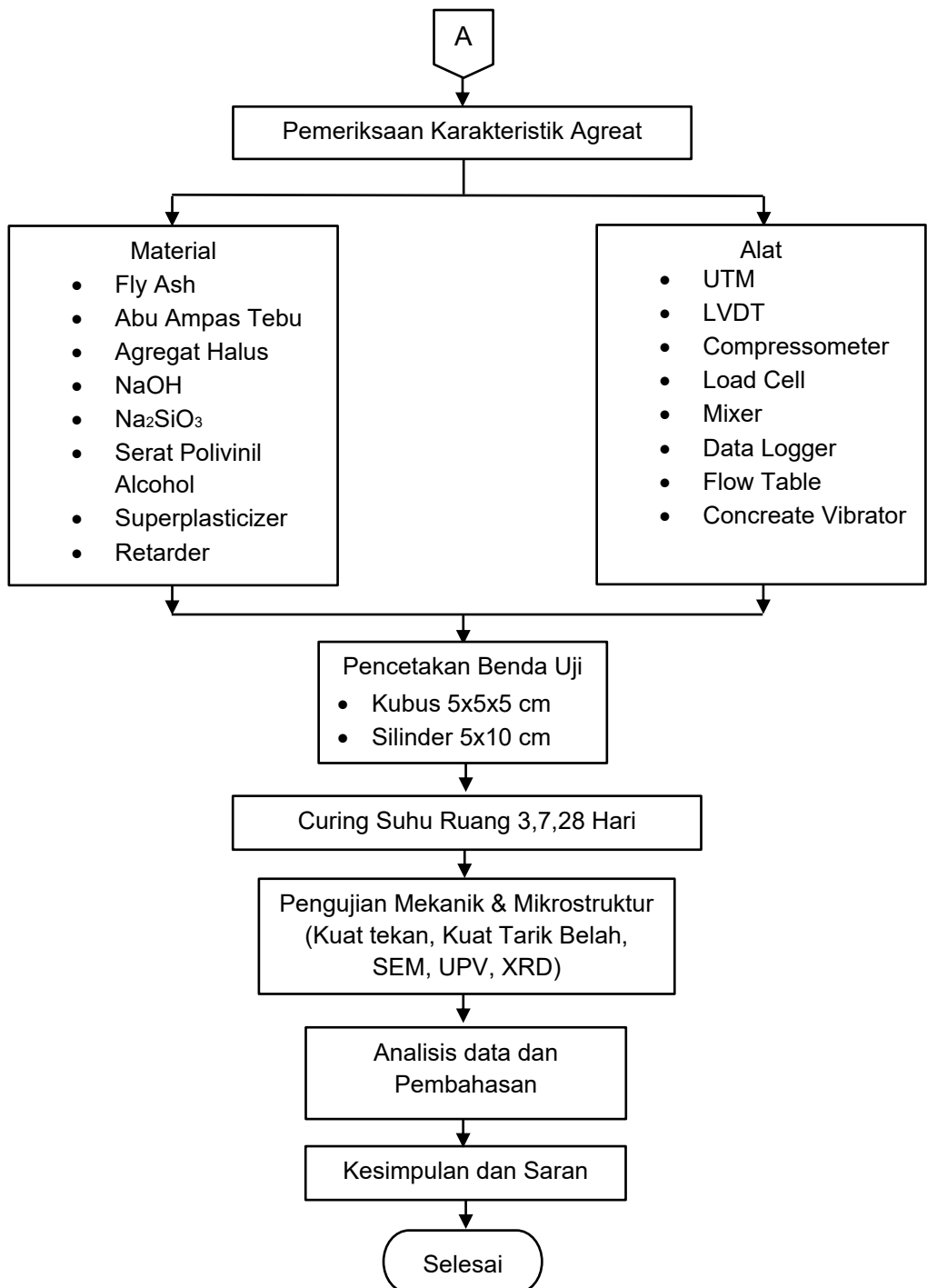
2.1 Lokasi Penelitian

Rangkaian Penelitian yang mencakup kegiatan persiapan, pemeriksaan karakteristik, pencampuran, curing, pengujian, dan pengolahan data dilakukan pada bulan November 2025 hingga Januari 2026, bertempat di laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

2.2 Tahapan Penelitian

Rangkaian penelitian ini meliputi tiga tahap utama yaitu Pengujian Karakteristik Material, Kegiatan Pencampuran Eksperimental di Laboratorium, dan Analisa Data. Berikut adalah Tahapan Rangkaian Penelitian dapat dilihat pada gambar berikut.





Gambar 1. Flowchart alur penelitian

2.3. Jenis Penelitian dan Sumber Data

Dalam penelitian ini digunakan dua sumber data yaitu data primer dimana metode eksperimental yang dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Sedangkan untuk data sekunder diambil dari kajian literature seperti artikel ilmiah, jurnal penelitian, buku, dan penelitian terdahulu.

2.4 Alat dan Bahan Pengujian

- a. Bahan yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut:
1. Abu Terbang (Fly Ash) yang lolos saringan No. 200
 2. Abu Ampas Tebu atau SCBA (Sugarcane Bagasse Ash) yang lolos saringan No. 200
 3. Agregat Halus, yaitu pasir dengan ukuran maksimum 4,75 mm
 4. Larutan activator berupa larutan Natrium Hidroksida (NaOH) 10M dan Sodium Silika (Na_2SiO_3)
 5. Superplasticizer, sebagai bahan adatif yang berfungsi meningkatkan workability
 6. Plastiment
 7. Serat PVA
 8. Larutan activator berupa larutan Natrium Hidroksida (NaOH) 10M dan Sodium Silika (Na_2SiO_3)

Adapun cara pembuatan alkali aktivator sebagai berikut.

- Persiapkan alat dan bahan yang akan digunakan.
- Menghitung jumlah padatan NaOH yang dibutuhkan untuk konsentrasi 10 M sebanyak 150 L.

$$\begin{array}{ll} \text{Mr} & \\ \text{NaOH} & 40 \\ \text{M NaOH} & 10 \quad \text{M} \end{array}$$

$$V \text{ NaOH} = \frac{1000}{1} \times \frac{\text{ml}}{v}$$

$$M = \frac{\text{gr}}{\text{Mr}} \times \frac{500}{v}$$

$$10 = \frac{\text{gr}}{40} \times \frac{150}{1000} = 60 \quad \text{gram}$$

- Larutkan padatan 60 gram NaOH yang sudah ditimbang kedalam gelas kimia, tambahkan aquades sebanyak 150 ml sedikit demi sedikit sampai larut, aduk menggunakan spatula.
- Setelah larut, pindahkan larutan kedalam wadah penyimpanan NaOH
- Setelah melarutkan NaOH 10 M, Kemudian timbang NaOH cair dan juga Na_2SiO_3 sesuai yang di perlukan.
- Larutkan NaOH dan Na_2SiO_3 sampai dengan homogen
- Alkali aktivator siap digunakan



a) *Fly Ash*
Ampas Tebu



b) Abu



c) Agregat Halus



d) NaOH



e) Na_2SiO_3



f) Serat Polivinil Alkohol



g) Retarder



h) *Superplasticizer*

Gambar 2. Material Penyusun Mortar Geopolymer

- b. Bahan yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut:
1. *Universal Testing Machine* (UTM) berkapasitas 1000 kN
 2. LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*) 25 mm untuk mengukur deformasi
 3. Load Cell berkapasitas 200 kN yang berfungsi untuk mengukur dan menguji beban tekan dan beban lentur
 4. High Speed Data Logger beserta satu set komputer untuk monitoring, dan pengolahan data
 5. Mesin Pencampur (Mixer)
 6. Cetakan Kubus berukuran 5x5x5 cm
 7. Cetakan Silinder berukuran 5x10 cm
 8. Alat Pemadat (Vibrator)
 9. Peralatan Pencampuran lainnya
 10. Timbangan digital
 11. Alat Scanning Electron Microscope
 12. Alat Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)
 13. Alat X-ray Diffraction (XRD)
 14. Alat X-Ray Fluorescence (XRF)

2.5 Pemeriksaan Karakteristik Agregat

2.5.1 Agregat Halus

Standar Pemeriksaan agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada standar yang berlaku sesuai SNI dan ASTM. Berikut tabel spesifikasi dan standar Pemeriksaan agregat halus.

Tabel 4. Standar Pemeriksaan Agregat Halus

Karakteristik Agregat	Spesifikasi	Satuan	Standar
Analisa Saringan Berat Jenis	2,2 -3,1	%	(ASTM C136 – 06)
Semu Kering SSD	1,6 – 3,2	-	(SNI 1970 : 2016)
Penyerapan air	0,2 – 3,0	%	(SNI 1970 : 2016)
Kadar Air	3,0 – 5,0	%	(SNI 2816:2014)
Kadar Lumpur	0,2 – 6,0	%	(ASTM C117 – 23)
Kadar Organik	< No. 3	No.	(SNI 2816 : 2014)

2.5.2 Pemeriksaan Mikrostruktur

Standar Pemeriksaan mikrostruktur berupa uji Scanning Electron Microscopy (SEM), Lossing On Ignition (LOI), X-ray Fluorescence (XRF), dan X-Ray Diffraction (XRD) terdapat pada tabel di bawah ini.

Tabel 5. Standar Pemeriksaan Mikrostruktur

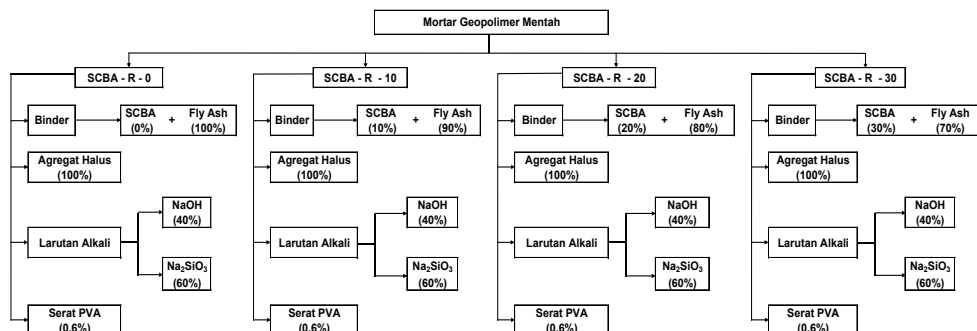
Jenis Pengujian	Tujuan	Standar
Scanning Electron Microscopy (SEM)	Melihat visualisasi permukaan sampel dengan perbesaran yang tinggi	ASTM E986
Lossing On Ignition (LOI)	Mengukur material yang menguap saat sampel di panaskan	ASTM C114-22
X-ray Fluorescence (XRF)	Mengetahui komposisi elemen kimia	ASTM E1621
X-Ray Diffraction (XRD)	Mengidentifikasi fasa mineral atau struktur kristal	ASTM E3294-22

2.6 Komposisi Campuran Mortar Geopolymer (Mix Design)

Pada penelitian ini, komposisi yang digunakan mengacu pada SNI 7656:2012. Terdapat dua bentuk benda uji sampel mortar geopolymer yaitu berbentuk kubus dengan ukuran 5x5x5 cm untuk pengujian kuat tekan mortar dan berbentuk silinder dengan ukuran 5x10 cm untuk pengujian kuat tarik belah mortar. Desain campuran mortar geopolymer mengacu pada variasi abu ampas tebu yang disubstitusikan sebesar 0%, 10%, 20%, dan 30% terhadap volume binder dan tambahan serat PVA sebesar 0,6% untuk 1m³ campuran beton. Larutan Aktivator dengan konsentrasi larutan NaOH 12 M.

Rancangan mix design pada penelitian ini ditentukan berdasarkan hasil dari trial mix yang sebelumnya di lakukan. Berikut merupakan rincian lengkap komposisi material mix design untuk masing – masing variasi campuran mortar geopolymer.

Tabel 6. Mix Design Mortar Geopolymer



Material	Kode Variasi			
	SCBA-R-0	SCBA-R-10	SCBA-R-20	SCBA-R-30
	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³
SCBA	0,00	84,87	169,73	254,60
Fly Ash	848,67	763,80	678,93	594,07
Pasir	1273,00	1273,00	1273,00	1273,00
NaOH 10 M	237,63	237,63	237,63	237,63
Na_2SiO_3	356,44	356,44	356,44	356,44
Viscocrete	1,70	1,70	1,70	1,70
Plastiment	2,55	2,55	2,55	2,55
PVA	5,09	5,09	5,09	5,09

2.7 Pembuatan Benda Uji

Terdapat dua bentuk benda uji pada penelitian ini, terdiri dari Kubus dengan ukuran 5x5x5 cm sebanyak 36 buah untuk Pengujian Kuat Tekan dan Silinder dengan ukuran 5x10 cm sebanyak 36 buah untuk Pengujian Kuat Tarik Belah. Benda uji ini akan di uji pada tiga variasi umur yaitu 3,7, dan 28 hari. Variasi bentuk, jumlah, dan umur pengujian dilihat pada tabel berikut.

Tabel 7. Jumlah Benda Uji

Jenis Variasi	Pengujian		Uji Kuat Tekan		Uji Kuat Tarik Belah	
	Kuat Tekan	Kuat Tarik Belah	Umur	Jumlah Benda Uji	Umur	Jumlah Benda Uji
SCBA 0%	3	3	3, 7, dan 28 Hari	9	3, 7, dan 28 Hari	9
SCBA 10%	3	3	3, 7, dan 28 Hari	9	3, 7, dan 28 Hari	9
SCBA 20%	3	3	3, 7, dan 28 Hari	9	3, 7, dan 28 Hari	9
SCBA 30%	3	3	3, 7, dan 28 Hari	9	3, 7, dan 28 Hari	9
				36		36
Jumlah				72		

Dalam percobaan ini, benda uji disiapkan dengan cara berikut:

1. Siapkan alat pelindung diri (APD).
2. Sesuai dengan komposisi campuran, timbang dan siapkan bahan-bahan, yang meliputi abu terbang, abu ampas tebu, agregat halus, agregat kasar, serat PVA, dan aditif (penghambat dan superplastisizer).
3. Pada konsentrasi NaOH 10 M, campurkan larutan aktivator (NaOH dan Na_2SiO_3) hingga larut.
4. Siapkan alat-alat yang Anda perlukan, termasuk mixer Hobart, yang sebelumnya dibasahi untuk mencegah larutan aktivator terganggu, yang dapat menyebabkan perubahan komposisi selama prosedur pencampuran.
5. Pastikan agregat halus dalam kondisi kering permukaan jenuh (SSD).
6. Pada 145 rpm, masukkan abu ampas tebu, abu terbang, dan agregat halus ke dalam mixer Hobart dan biarkan beroperasi selama 60 detik. Kemudian, jeda dan aduk secara manual selama 30 detik.
7. Dengan mixer beroperasi selama 60 detik, tuangkan larutan aktivator, superplastisizer, dan retarder ke dalam campuran secara merata. Kemudian, untuk memastikan campuran homogen, matikan mixer dan aduk dengan tangan selama 30 detik tambahan.
8. Saat menambahkan serat PVA, nyalakan kembali mixer selama 30 detik.
9. Kemudian, nyalakan kembali mixer dan atur kecepatan tinggi 285 rpm selama 120 detik untuk pencampuran cepat.
10. Segera keluarkan campuran dari mixer dan tuangkan ke dalam cetakan kubus dan silinder sebelum mematkannya.
11. Gunakan vibrator untuk menekan seluruh cetakan selama sekitar lima detik. Akibat kompresi ini, campuran mortar akan sepenuhnya mengisi cetakan tanpa meninggalkan kantong udara.
12. Gunakan sendok pemotong datar untuk meratakan permukaan hingga rata setelah pemadatan.
13. Biarkan cetakan yang telah diisi selama 24 jam setelah ditutup. Selanjutnya, keluarkan sampel uji yang sudah kering dari cetakan yang telah dibuka kembali. Metode pengeringan udara kemudian digunakan untuk mengeringkan mortar selama tiga hingga dua puluh delapan hari.

a) Persiapan material



b) Pencampuran NaOH dan Na_2SiO_3



c) Persiapan Alat



d) Pencampuran Material

e) Pengadukan dengan *mixer*

f) Pengadukan manual



g) Menuang alkali aktivaor



h) Penambahan serat PVA



i) Menuang ke dalam cetakan



j) Pemadatan dengan vibrator

**Gambar 3.** Tahapan *Mix Design* Mortar Geopolymer

2.8 Perawatan Benda Uji

Berdasarkan standar **SNI 2847:2019**, maka perawatan penelitian ini dilakukan dengan curing udara dengan menyimpan benda uji dengan suhu ruang 20°C untuk semua variasi sampel hingga pengujian tersebut dilakukan.



Gambar 4. *Curing Mortar Geopolymer*

2.9 Pengujian Benda Uji

2.9.1 Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)*

Tujuan Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) yaitu :

1. Mengetahui homogenitas campuran mortar dimana kepadatan campuran mortar dilihat seragam diseluruh bagian
2. Mengidentifikasi terdapat void (rongga), keropos ataupun retakan dalam mortar

Berdasarkan ASTM C597 berikut tahapan pengujian Ultrasonic Pulse Velocity:

1. Menyiapkan peralatan UPV
2. Menyiapkan benda uji dimana benda uji harus memiliki permukaan rata
3. Mengoleskan gel ultrasonic pada permukaan benda uji, Gel ini berfungsi untuk menghilangkan udara antara sensor dan benda uji agar gelombang suara bisa merambat dengan lancar
4. Alat UPV dikalibrasi dengan batang besi standar agar akurat
5. Menempelkan transduser pada benda uji untuk mengirim gelombang
6. Mencatat waktu gelombang dan ukuran jarak antar sensor

2.9.2 Pengujian Densitas

Pengujian Densitas merupakan komponen penting dalam menentukan kualitas mortar, khususnya dalam menentukan kepadatan, porositas, dan kemungkinan kekuatan mekaniknya. Kepadatan, yang sering dinyatakan dalam kilogram per meter kubik (kg/m^3), adalah jumlah mortar per satuan volume. Langkah pertama dalam pengujian ini melibatkan pembuatan sampel uji mortar, biasanya berupa silinder kecil atau kubus berukuran 50 mm yang telah diawetkan untuk mendorong hidrasi semen yang sempurna. Massa spesimen diukur menggunakan timbangan digital dengan presisi tinggi setelah mencapai usia pengujian yang dibutuhkan dan kelembaban permukaan kering oven atau kering permukaan jenuh.

Dimensi spesimen kemudian diukur secara tepat menggunakan jangka sorong, dan volumenya dihitung menggunakan persamaan geometris yang sesuai atau teknik penimbangan air berdasarkan prinsip Archimedes. Prosedur ini secara umum mengacu pada standar (ASTM C140/C140M-22), yang menjadi acuan dalam mengukur densitas, penyerapan air, dan volume rongga pada mortar yang telah mengeras.

Secara sederhana, densitas dihitung menggunakan rumus:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

ρ = densitas (kg/m^3)
 m = massa benda uji (kg)
 V = Volume benda uji (m^3)

2.9.3 Pengujian Kuat Tekan

Uji Kuat Tekan adalah Pengujian yang dilakukan untuk mengetahui seberapa besar beban maksimal yang dapat dipikul oleh suatu material sebelum material tersebut hancur dimana hasilnya dinyatakan dalam satuan MPa, memastikan material yang digunakan sesuai dengan spesifikasi rencana, dan yang terakhir penggunaan LVDT bertujuan mengukur seberapa kaku material tersebut melalui hubungan tegangan dan regangan. Pengujian kuat tekan mortar mengacu pada standar (ASTM C109/C109M).

Berikut tahapan pengujian Kuat Tekan:

1. Mempersiapkan alat dan bahan, dimana sampel memiliki permukaan yang rata
2. Menaruh Load Cell pada bagian atas sampel serta memasang LVDT yang sudah terhubung pada Data Logger
3. Meletakkan Load Cell tepat pada bagian tengah mesin UTM
4. Memulai pemberian beban dengan menekan start pada mesin UTM

5. Ketika benda uji mengalami keretakan dan penurunan drastis maka pengujian di hentikan



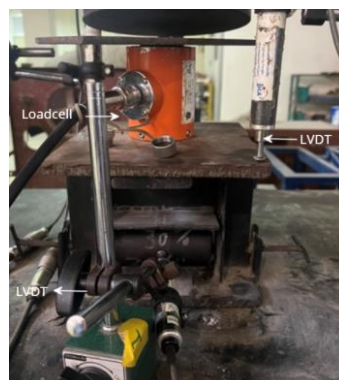
Gambar 5. Pengujian Kuat Tekan

2.9.4 Pengujian Kuat Tarik Belah

Uji Tarik Belah adalah Pengujian yang dilakukan untuk mengetahui seberapa besar kekuatan tarik dikarenakan mortar sangat kuat menahan tekan namun lemah menahan tarik, pengujian ini juga membantu melihat seberapa besar regangan sebelum benda uji benar – benar terbelah. Pengujian kuat tekan mortar mengacu pada standar (SNI 2491:2014).

Berikut tahapan pengujian Kuat Tarik Belah:

1. Mempersiapkan alat dan bahan, dimana sampel memiliki permukaan yang rata dan terdapat bracket khusus pada silinder
2. Menaruh Load Cell pada bagian atas sampel serta memasang LVDT secara horizontal yang sudah terhubung pada Data Logger
3. Meletakkan Load Cell tepat pada bagian tengah mesin UTM
4. Memulai pemberian beban dengan menekan start pada mesin UTM
5. Ketika benda uji mengalami keretakan dan penurunan drastis maka pengujian di hentikan



Gambar 6. Pengujian Kuat Tarik Belah

2.9.5 Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD)

Untuk menentukan fase kristalin pada abu terbang, abu ampas tebu dan mortar geopolimer berumur 28 hari, dilakukan uji Difraksi Sinar-X (XRD). Sampel abu terbang dan Abu ampas tebu awalnya dikeringkan, dihancurkan, dan diayak dan kemudian disaring dengan saringan No.200. Spesimen mortar diambil dari potongan yang telah dihancurkan selama uji kekuatan tekan 28 hari dan telah pecah di lingkungan alamnya untuk menciptakan permukaan patahan baru.

Pengujian sinar-X dengan sumber radiasi Cu-K α ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$), tegangan 40 kV, arus 30 mA, dan rentang pemindaian 2θ 5° hingga 70° digunakan untuk pengujian XRD. Untuk menjamin keakuratan posisi puncak, standar silikon digunakan untuk mengkalibrasi instrumen sesuai dengan ASTM E142-92. Program XRD digunakan untuk memeriksa pola difraksi yang diperoleh, yang diplot sebagai intensitas vs sudut 2θ .

Data ICDD Powder Diffraction File (PDF) digunakan untuk mencocokkan puncak difraksi guna mengidentifikasi mineral seperti kuarsa, mullit, dan hematit selama interpretasi data. Analisis mortar geopolimer digunakan untuk memastikan hubungan antara fase kristalin, struktur amorf, dan karakteristik mekanik material, sementara variasi intensitas puncak dan pola pada SCBA mentah vs SCBA yang dikalsinasi digunakan untuk mengevaluasi reaktivitas pozzolanik. Untuk menjamin validitas dan keandalan temuan, eksperimen ini dilakukan sesuai dengan persyaratan ASTM E3294-22 dan ISO 29581-2.

2.9.6 Pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF)

Tujuan utama pengujian XRF (X-Ray Fluorescence) adalah untuk memberikan penilaian kualitatif dan kuantitatif yang cepat dan tepat tentang susunan kimia suatu material. XRF digunakan dalam studi bahan bangunan, seperti beton dan mortar, untuk memastikan proporsi oksida penyusunnya, seperti Silika (SiO_2), Kalsium Oksida (CaO), dan Alumina (Al_2O_3). Karena proporsi kimia akan menentukan sifat fisik zat tersebut, seperti kekuatan tekan, laju pengerasan, dan ketahanan terhadap sulfat atau serangan kimia lainnya, hal ini sangat penting. Selain itu, XRF berfungsi sebagai mekanisme kontrol kualitas untuk mengidentifikasi potensi kontaminan atau logam berat berbahaya dalam bahan baku tanpa merusak susunan fisik sampel.

Langkah pertama dalam teknik pengujian XRF, fase persiapan sampel, memiliki dampak signifikan pada tingkat presisi temuan. Untuk mengurangi dampak ukuran partikel pada pembiasan cahaya, bahan keras seperti mortar maka harus dihancurkan dan digiling menjadi bubuk halus (biasanya berukuran kurang dari 75 mikron). Serbuk tersebut kemudian dilebur dengan fluks menjadi cakram kaca yang disebut manik-manik leburan untuk hasil yang lebih seragam, atau dikompresi menggunakan mesin pres menjadi tablet kecil yang disebut pelet pres. Setelah sampel siap, sampel tersebut dipaparkan pada sinar-X primer berenergi tinggi di ruang uji XRF. Ketika radiasi ini mengenai atom-atom dalam sampel, elektron di kulit

bagian dalam akan dikeluarkan. Elektron dari kulit bagian luar segera mengisi kekosongan ini, dan pergerakan ini menyebabkan pelepasan energi dalam bentuk sinar-X sekunder (fluoresensi) dengan sifat yang berbeda (panjang gelombang atau energi) untuk setiap unsur. Detektor instrumen akan mengumpulkan sinyal energi ini, menghitungnya, dan mengubahnya menjadi grafik spektrum dan tabel persentase massa unsur menggunakan perangkat lunak computer

2.9.7 Pengujian *Loss on Ignition* (LOI)

Menurut (Gaddam et al., 2021) Loss on Ignition (LoI) bukan hanya sekedar ukuran kehilangan massa, tetapi juga merupakan indikator penting untuk reaktivitas kimia dan efektivitas dalam membentuk matriks geopolimer. Dalam penelitiannya mengenai geopolimer yang menggunakan bahan dasar abu, Gaddam menunjukkan bahwa nilai LoI yang tinggi pada bahan awal seperti fly ash atau abu dari sektor agro-industri menunjukkan adanya jumlah karbon yang belum terbakar dalam jumlah besar. Keberadaan karbon tersebut dapat menimbulkan masalah karena memiliki struktur pori yang tinggi dan luas permukaan yang besar. Ini dapat menyebabkan karbon "mencuri" atau menyerap larutan aktivator alkali sebelum larutan tersebut dapat bereaksi dengan silika dan alumina. Akibatnya, rasio antara aktivator dan bahan awal menjadi kurang efisien, menghalangi proses polimerisasi dan akhirnya menghasilkan struktur mikro yang penuh dengan retakan serta pori-pori yang besar.

2.9.8 Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Tujuan utama pengujian SEM adalah untuk memeriksa topografi permukaan dan struktur mikro suatu material pada perbesaran yang sangat tinggi (hingga 100.000x atau lebih) dan dengan resolusi yang jauh melampaui mikroskop optik standar. SEM digunakan dalam teknologi mortar dan beton untuk memantau pembentukan kristal yang dihasilkan oleh hidrasi semen, seperti kristal etringit berbentuk jarum atau Kalsium Silikat Hidrat (C-S-H) berbentuk serat. Pengujian ini sangat penting untuk memeriksa porositas, menemukan retakan mikro, dan mengamati zona transisi antarmuka (ITC) antara pasta semen dan agregat, yang memiliki dampak besar pada kekuatan keseluruhan material.

Adapun tahapan pengujian SEM

1. Persiapan Sampel, dimana sampel harus benar-benar kering (biasanya dikeringkan menggunakan teknik pengeringan beku atau dalam oven). Dengan menggunakan pita karbon konduktif, sampel kecil diiris dan ditempelkan pada dudukan (pemegang sampel).
2. Karena SEM menggunakan elektron, sampel non-konduktif (seperti beton, mortar, atau keramik) harus dilapisi dengan lapisan tipis logam mulia, seringkali emas atau karbon, menggunakan alat yang dikenal sebagai sputter coater. Lapisan ini berfungsi untuk menghantarkan muatan listrik sehingga elektron tidak menumpuk di permukaan sampel, yang dapat mendistorsi gambar.

3. Udara di dalam ruang sampel dievakuasi hingga diperoleh vakum tinggi sebelum sampel ditempatkan di sana. Tujuannya adalah untuk mencegah berkas elektron berinteraksi dengan molekul udara dalam perjalanannya ke sampel.
4. Berkas elektron primer dipancarkan oleh sumber elektron (senjata elektron), yang difokuskan oleh lensa elektromagnetik menjadi berkas yang sangat kecil. Permukaan sampel secara sistematis dipindai oleh berkas elektron ini.
5. Banyak sinyal dihasilkan ketika elektron primer mengenai spesimen, termasuk Elektron Terhambur Balik (BSE) untuk mengidentifikasi variasi kepadatan massa/komposisi dan Elektron Sekunder (SE) untuk mengidentifikasi topografi permukaan.
6. Sinyal-sinyal ini ditangkap oleh detektor dan diubah menjadi gambar hitam putih pada monitor. Tingkat detail yang tinggi pada gambar 3D merupakan hasil dari kontras antara daerah yang menonjol lebih terang dan lubang atau pori-pori yang lebih gelap.

2.9.9 Pengujian Modulus Elastisitas

Pengujian modulus elastisitas merupakan langkah penting dalam menentukan kekakuan mortar dan kemampuannya untuk menahan deformasi elastis di bawah beban tekan. Rasio tegangan terhadap regangan di daerah elastis linier, biasanya diukur dalam Gigapascal (GPa) atau Megapascal (MPa), dikenal sebagai modulus elastisitas. Kekuatan yang representatif dipastikan dengan melakukan pengujian ini pada spesimen mortar silinder yang telah sepenuhnya mengeras. Spesimen ditempatkan dalam mesin uji tekan yang menggunakan sel beban untuk mengukur beban yang diterapkan secara terus menerus dan tepat. Pada saat yang sama, kompresometer digunakan untuk menghubungkan Linear Variable Differential Transformer (LVDT) ke sisi sampel untuk memantau setiap variasi panjang atau distorsi yang mungkin terjadi selama prosedur pembebanan. Modulus elastisitas kemudian ditentukan oleh kemiringan kurva tegangan-regangan, yang dihasilkan dengan mengkonversi data sinkron dari sel beban dan LVDT. Prosedur ini biasanya mengacu pada standar ASTM C469, yang menawarkan instruksi sistematis untuk menentukan modulus elastisitas statis dan rasio Poisson dari beton dan mortar yang telah mengeras.