

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tuntutan global terhadap pembangunan berkelanjutan mengharuskan industri konstruksi mencari material pengganti *Portland Composite Cement* (PCC) yang tinggi emisi (CO₂) (Harahap & Setiawan, 2024). Secara spesifik di Indonesia, isu ini diperparah dengan masalah pengelolaan limbah industri. Provinsi Riau merupakan wilayah penghasil kelapa sawit terbesar di Indonesia, menyumbang volume produksi yang signifikan (PASPI, 2025). Besarnya produksi ini berbanding lurus dengan timbulan limbah padat, salah satunya adalah Abu Sawit (*Palm Oil Fuel Ash* / POFA). POFA, yang kaya akan *silika* dan *alumina*, seringkali hanya ditimbun, menimbulkan masalah lingkungan dan estetika di daerah sekitar pabrik (Dewi, 2022).

Oleh karena itu, mengubah limbah POFA Riau menjadi material konstruksi ramah lingkungan, seperti mortar *geopolimer*, menjadi langkah strategis untuk mitigasi emisi dan pengelolaan limbah (Pangaribuan, 2022). Mortar *geopolimer* berbasis POFA Riau telah teruji memiliki potensi kuat tekan yang baik (Syarif dkk., 2023). *Geopolimer* memanfaatkan reaksi *poli-kondensasi* antara prekursor (POFA) dengan larutan *aktivator alkali*. Namun, Mortar geopolimer berbasis abu sawit (POFA) umumnya memerlukan perlakuan panas (*heat curing*) untuk mempercepat reaksi geopolimerisasi, karena pada suhu ruang proses pelarutan aluminosilikat berlangsung lebih lambat sehingga kekuatan awal rendah (Hartono dkk., 2022).

Substitusi *Portland Composite Cement* (PCC) dalam pembuatan mortar *geopolimer* sangat penting untuk mengatasi keterbatasan teknis yang ada pada sistem geopolimer murni, khususnya yang berbasis pada material aluminosilikat berkalsium rendah seperti abu sawit (Nurwidayati dkk., 2025). Secara teori, mortar *geopolimer* dirancang sebagai bahan tanpa semen Portland untuk mengurangi emisi karbon dan memanfaatkan limbah industri (Hartono dkk., 2022). Namun, dalam praktiknya, geopolimer murni seringkali menunjukkan kekuatan tekan awal yang rendah dan proses pengerasan yang lambat pada suhu ruang, sehingga dibutuhkan perlakuan panas (*heat curing*), agar reaksi

geopolimerisasi dapat berlangsung dengan baik (Chindaprasirt & Rattanasak, 2023). Hal ini menjadi kendala besar dalam penerapan mortar geopolimer di lapangan, terutama untuk konstruksi konvensional yang mengandalkan curing alami.

Substitusi PCC sangat penting sebagai sumber kalsium (CaO) yang dapat mempercepat proses pengerasan melalui mekanisme hidrasi semen, sekaligus berinteraksi dengan produk reaksi geopolimer untuk membentuk struktur matriks yang lebih padat dan stabil. Kehadiran kalsium memungkinkan terbentuknya gel hibrida seperti C-(N)-A-S-H, yang memberikan kontribusi besar terhadap peningkatan kekuatan tekan awal dan kemampuan mortar untuk mengeras pada suhu ruang (*ambient curing*). Oleh karena itu, substitusi PCC membuat mortar geopolimer menjadi lebih praktis, aplikatif, dan sesuai dengan kondisi lapangan, tanpa sepenuhnya menghilangkan manfaat lingkungan dari pemanfaatan material limbah.

Selain meningkatkan performa mekanis awal, substitusi PCC juga diperlukan untuk memastikan keandalan dan ketahanan mortar geopolimer dalam jangka panjang. Dalam lingkungan tropis dengan kelembapan tinggi dan potensi serangan kimia, mortar yang bisa mengeras dengan baik dan memiliki struktur mikro yang rapat sangat dibutuhkan. Substitusi PCC yang terkontrol membantu meningkatkan densitas matriks dan mengurangi risiko cacat mikro akibat reaksi yang tidak sempurna. Dengan demikian, substitusi PCC tidak dimaksudkan untuk menggantikan konsep geopolimer, tetapi sebagai strategi modifikasi material agar mortar geopolimer dapat memenuhi tuntutan kinerja teknis, kepraktisan pelaksanaan, dan keberlanjutan secara seimbang.

Kinerja *durabilitas* material konstruksi di Riau juga sangat penting, mengingat adanya potensi serangan lingkungan yang spesifik, seperti iklim tropis dengan kelembapan tinggi dan potensi serangan sulfat atau asam dari tanah gambut (Priastiwi dkk., 2023). *Durabilitas* ini diukur salah satunya melalui Nilai *Sorptivity* (*ASTM C 1585*), yaitu koefisien penyerapan air kapiler. Nilai *sorptivity* yang rendah menunjukkan matriks yang rapat, mengurangi laju penetrasi air, dan meningkatkan umur kelayakan struktur (Hasanah dkk., 2024).

Sampai saat ini, perbandingan sistematis dan optimalisasi pengaruh berbagai tingkat substitusi PCC terhadap Nilai *Sorptivity* sebagai indikator durabilitas antara Mortar PCC standar dan Mortar *Geopolimer* POFA. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk secara komprehensif mengoptimalkan persentase substitusi PCC untuk menghasilkan Mortar *Geopolimer* abu sawit yang tidak hanya ramah lingkungan tetapi juga memiliki durabilitas terbaik (*sorptivity* terendah).

1.2 Rumusan Masalah

1. Berapa nilai *sorptivity* ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$) mortar PCC pada rentang waktu perawatan 28, 56 hari?
2. Berapa nilai *sorptivity* ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$) mortar geopolimer dengan variasi PCC 10%, 20%, 30%, 40%, 50% pada rentang waktu perawatan 28, 56 hari?
3. Bagaimana pengaruh nilai *sorptivity* terhadap persentase substitusi PCC pada mortar *geopolimer* pada rentang waktu perawatan 28, 56 hari?

1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Untuk mengetahui nilai *sorptivity* ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$) mortar PCC pada rentang waktu perawatan 28, 56 hari.
2. Untuk mengetahui nilai *sorptivity* ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$) mortar geopolimer dengan variasi PCC 10%, 20%, 30%, 40%, 50% pada rentang waktu perawatan 28, 56 hari.
3. Untuk mengetahui pengaruh nilai *sorptivity* persentase substitusi PCC pada mortar *geopolimer* pada rentang waktu perawatan 28, 56 hari

Manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Dapat mengetahui nilai *sorptivity* ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$) mortar PCC pada rentang waktu perawatan 28, 56 hari.
2. Dapat mengetahui nilai *sorptivity* ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$) mortar geopolimer dengan variasi PCC 10%, 20%, 30%, 40%, 50% pada rentang waktu perawatan 28, 56 hari.
3. Dapat mengetahui pengaruh nilai *sorptivity* persentase substitusi PCC pada mortar *geopolimer* pada rentang waktu perawatan 28, 56 hari

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah :

1. Abu sawit/*palm oil fuel ash* berasal dari PT. Rambah Sawit Mandiri Rokan Hulu.
2. Pengujian *Sorptivity* menggunakan sampel dengan ukuran 5x5x20 cm
3. Umur pengujian yaitu 28, dan 56 hari.
4. Larutan *activator* yang di gunakan adalah gabungan dari larutan *sodium hidroksida* dengan (NaOH) 14 Molar dan larutan *sodium silika* (Na_2SiO_3) 2,3 Mol
5. Abu sawit yang di gunakan adalah abu sawit yang lolos no.200
6. Variasi substitusi PCC yang di gunakan yaitu 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50%

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian terdahulu

Penelitian Sebelumnya Penelitian sebelumnya mencakup penelitian atau kajian yang telah dilakukan sebelumnya sebagai usaha peneliti untuk melakukan perbandingan dan sebagai bahan referensi dalam menjalankan penelitian baru. Dengan mempelajari penelitian yang sudah ada, peneliti dapat mengembangkan dan memperdalam teori yang akan diterapkan serta menemukan ide untuk penelitian selanjutnya. Selain itu, penelitian sebelumnya juga membantu peneliti memahami kelebihan dan kekurangan studi yang telah dibuat sebelumnya, sehingga memungkinkan untuk menciptakan penelitian yang baru dan unik. Di bagian ini, peneliti menyajikan berbagai hasil studi yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan dan merangkum baik yang sudah dipublikasikan maupun yang belum. Berikut ini adalah penelitian sebelumnya yang relevan dengan topik yang sedang dikaji oleh penulis. Beberapa contoh studi yang juga meneliti tentang "Perbandingan Nilai Sorptivitas Mortar PCC dengan Mortar Geopolimer Abu Sawit Berdasarkan Pengaruh Substitusi PCC" adalah sebagai berikut:

1. (Carolina dkk., 2025) dengan judul “Studi Pemanfaatan Abu Boiler Kelapa Sawit (Palm Oil Fuel Ash) dan Limbah Karbit Sebagai Campuran Beton” Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui komposisi optimum beton dari campuran semen, palm oil fuel ash (POFA), dan limbah karbit berdasarkan nilai kuat tekan dan ketahanannya dalam media asam dan media garam. Metode penelitian meliputi preparasi beton dimana 30% semen diganti dengan campuran POFA dan limbah karbit. Komposisi campuran POFA dan limbah karbit divariasikan sesuai dengan persentase (%) POFA:limbah karbit 70:30; 60:40; 50:50 dan 40:60. Komposisi terbaik yang ditetapkan adalah beton dengan nilai kuat tekan tertinggi. Terhadap beton terbaik tersebut (disebut beton campuran) dianalisis komposisi unsur, diuji ketahanannya dalam media asam dan garam kemudian dibandingkan dengan beton tanpa campuran POFA dan limbah karbit. Metode untuk menguji ketahanan dalam

media asam dan garam dilakukan dengan cara perendaman beton dalam media selama 28 hari kemudian diuji kuat tekannya. Berdasarkan hasil uji kuat tekan beton, diketahui bahwa komposisi terbaik pengganti 30% semen adalah campuran dari 60% POFA dan 40% limbah karbit, dengan nilai kuat tekan 40,49 MPa. Nilai ini memenuhi standar beton mutu normal (SNI 03-6468:2000, ACI 318) namun lebih rendah daripada beton tanpa penggantian semen (disebut beton kontrol). Hasil pengamatan terhadap ketahanan beton dalam media asam maupun garam menunjukkan bahwa nilai kuat tekan beton campuran relatif bertahan setelah mengalami perlakuan dalam kondisi asam maupun garam. Dibandingkan dengan beton kontrol, beton campuran lebih tahan dalam kondisi tersebut, mengimplikasikan potensi campuran POFA dan limbah karbit sebagai pengganti sebagian semen dalam beton.

2. (Siregar dkk., 2024) dengan judul “Abu Bahan Bakar Kelapa Sawit dan Abu Terbang untuk Penggantian Sebagian Semen pada Mortar Berkualitas Tinggi Ramah Lingkungan sebagai Solusi Limbah Industri”. Penelitian ini mengeksplorasi dampak dari penambahan abu bahan bakar kelapa sawit (*POFA*) dan abu terbang (*FA*) sebagai substitusi sebagian semen terhadap karakteristik dan sifat mekanik mortar berkualitas tinggi, terutama dalam komposit semen rekayasa (*ECC*). Mortar *ECC* dibuat dengan menggiling limbah *POFA* dan *FA* dengan metode top-down menggunakan ball mill. Material yang dihasilkan kemudian diuji untuk laju alir slump, penyerapan air, serta kuat tekan, dan dikarakterisasi melalui analisis *XRF*, *FTIR*, *SEM/EDX*, dan *XRD*. Analisis *FTIR* mengonfirmasi adanya gugus SiO_2 dan Al_2O_3 dalam komposit *POFA-FA ECC*. Analisis *XRF* pada *FA* dan *POFA* menunjukkan sifat sementisius, dengan total $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ melebihi 50% dan CaO melebihi 10%. Hasil dari *SEM* dan *XRD* mengindikasikan terbentuknya rongga minimal, yang menunjukkan adanya kuat tekan yang tinggi pada mortar. Analisis distribusi ukuran partikel mengungkapkan bahwa partikel yang dominan berada pada rentang $1,5 \times 10^{-1}$ hingga $2,0 \times 10^{-1} \mu m$. Uji terhadap kuat tekan setelah 28 hari dengan penambahan 15% *FA* dan 10% *POFA* menghasilkan kekuatan paling tinggi sebesar 59,30 MPa. Nilai penyerapan air berkisar antara 1,25% hingga 2,67%, yang menunjukkan

bahwa *POFA-FA* berperan dalam proses hidrasi semen dan juga berfungsi sebagai pengisi. Hal ini mengakibatkan densitas material sangat tinggi, sehingga mengurangi rongga yang terbentuk dan mengurangi jumlah air yang terperangkap, yang secara signifikan berdampak pada kekuatan mortar.

3. (Nasir dkk., 2024) dengan judul “Analisis Kuat Tekan Batako Geopolimer Abu Sawit (Palm Oil Fuel Ash) Dengan Substitusi Pcc (Portland Composite Cemen” dengan Substitusi Semen”. Pengujian dilakukan meliputi pengujian karakteristik bahan dasar material campuran yang akan digunakan dalam perhitungan perencanaan campuran (mix design). Penelitian dilanjutkan dengan pembuatan benda uji sesuai dengan data-data yang telah diperoleh hasil perhitungan perencanaan campuran (mix design). Benda uji dibuat sesuai dengan variasi dari faktor- faktor yang mempengaruhi geopolimer. Benda uji yang telah dibuat selanjutnya dirawat pada suhu ruang selama 28 hari. Pengujian akhir yang dilakukan adalah Pengujian Kuat Tekan dan Absorpsi (penyerapan air). Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan yang telah dilakukan, Nilai kuat tekan pada variasi semen 0% sebesar 4 kg/cm². Variasi semen 10% sebesar 8 kg/cm². Untuk variasi semen 20% adalah 12 kg/cm². Dan untuk variasi semen 30% adalah sebesar 10 kg/cm². Nilai absorpsi variasi semen 0% sebesar 9,9% (Mutu I), variasi semen 10% sebesar 3,94% (Mutu I) variasi semen 20% adalah 4,7% (Mutu I), dan variasi semen 30% sebesar 6,17%(Mutu I).
4. (Harriad Akbar Syarif, 2023) menulis sebuah penelitian berjudul “Analisis Gugus Fungsi Pada Senyawa Mikrostruktur Mortar Geopolimer Abu Sawit Dengan Penambahan *Portland Composite Cement (PCC)*”. Dalam penelitian ini, metode eksperimen digunakan yang menghasilkan kesimpulan bahwa: “Pengujian FTIR mengungkapkan keberadaan gugus fungsi dengan intensitas pada 1450 cm⁻¹, yang menunjukkan adanya senyawa natrium karbonat (*O-C-O*) yang terbentuk dari reaksi unsur Na dalam larutan alkali dengan *CO*₂. Selain itu, peningkatan intensitas band pada 2351 cm⁻¹ teramati sejalan dengan peningkatan rasio *SiO*₂/*Al*₂*O*₃, yang menandakan pembentukan struktur zeolit dalam mortar geopolimer. Penurunan intensitas band di sekitar 1000 cm⁻¹ menunjukkan *vibrasi Si-O* dan *Al-O*, yang menjadi karakteristik

dari struktur zeolit yang terbentuk selama proses pengolahan. Temuan ini mendukung potensi penggunaan abu sawit sebagai alternatif untuk semen Portland dalam konstruksi, dengan memperhatikan sifat kimia dan mikrostrukturnya yang menguntungkan. ”

5. (Alahmari dkk., 2023) dengan judul “Tinjauan Perkembangan Terbaru Mengenai Kinerja Daya Tahan Beton Geopolimer Ramah Lingkungan”. Penelitian ini menunjukkan bahwa pada tahun ke-21, terjadi lonjakan signifikan dalam kebutuhan bahan bangunan, yang terutama dipicu oleh pertumbuhan populasi. Kenaikan kebutuhan ini menyebabkan harga bahan menjadi lebih mahal dan menambah tekanan pada sumber daya alam, sehingga mendorong pencarian alternatif yang lebih ramah lingkungan dan ekonomis, seperti geopolimer, untuk menggantikan bahan konvensional seperti semen. Kelebihan geopolimer sebagai alternatif semen dalam beton tidak hanya terbatas pada daya tahannya yang luar biasa. Awalnya, geopolimer diperkenalkan untuk mengurangi dampak lingkungan yang disebabkan oleh emisi karbon dioksida dan penggunaan bahan bakar fosil yang tinggi dalam produksi semen. Tinjauan ini mengeksplorasi perkembangan terbaru mengenai sifat daya tahan dari bahan geopolimer. Ini mencakup berbagai aspek, termasuk penyerapan air, ketahanan terhadap suhu, daya tahan terhadap siklus beku-cair, asam sulfat, serta penetrasi ion klorida, antara lain. Temuan dari tinjauan ini menegaskan bahwa beton geopolimer memiliki daya tahan yang lebih baik dibandingkan dengan beton tradisional berbasis semen. Di samping itu, tinjauan ini juga memberikan rekomendasi serta menjelaskan potensi jalur penelitian untuk studi lebih lanjut tentang beton geopolimer.
6. (Olivia dkk., 2023) dengan judul “Kekuatan Tekan, Porositas, Dan Daya Serap Beton Campuran Abu Bahan Bakar Minyak Sawit (POFA) Yang Mengandung Silika Fume Dalam Air Gambut”. Beton yang menggunakan Abu Bakar Minyak Sawit (POFA) memiliki potensi untuk diaplikasikan di lingkungan asam organik seperti lahan gambut. Namun, diperlukan upaya untuk meningkatkan ketahanan beton POFA dengan menambahkan silika fume sebagai bahan pozzolan. Studi tentang campuran POFA yang diberi

silika untuk penggunaan dalam kondisi asam organik masih terbatas. Penelitian ini menganalisis kekuatan tekan, porositas, dan daya serap dari beton campuran POFA dengan penambahan silika fume yang diekspos dalam air gambut. Sebagai acuan, digunakan Beton Semen Komposit Portland (PCC) dengan target kekuatan yang sama. Campuran beton POFA mengandung 0%, 20%, dan 40% POFA sebagai pengganti semen, dengan penambahan mikrosilika atau silika fume sebanyak 10% dalam setiap campuran. Beton PCC yang memiliki kekuatan target yang setara juga digunakan sebagai campuran kontrol. Ketahanan beton POFA terhadap serangan asam organik dievaluasi melalui perubahan dalam kekuatan tekan, porositas, serta daya serap pada hari ke-7, 28, dan 91. Kekuatan tekan campuran kontrol menunjukkan penurunan, sementara kekuatan tekan untuk PCC dan PCC-POFA yang mengandung silika fume mengalami peningkatan pada usia 91 hari. Porositas dan daya serap dari beton PCC serta campuran OFA menunjukkan pola yang serupa dengan kekuatan tekan. Dengan demikian, beton campuran POFA yang mengandung silika fume menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap air gambut dibandingkan dengan campuran kontrol.

7. (Syarif dkk, 2022) dengan judul “Kuat Tekan dan Absorpsi Mortar Geopolimer Abu Sawit Portland Composite Cement dengan Variasi Suhu Tinggi” Penggunaan beton dan mortar yang semakin meningkat menuntut kekuatan material tersebut dalam serangan terhadap suhu tinggi. Beberapa upaya yang dilakukan untuk memperbaiki sifat material agar tahan terhadap suhu tinggi diantaranya menggunakan bahan tambah sebagai pengganti semen. Penelitian ini bertujuan menganalisis campuran geopolimer abu sawit yang ditambahkan Portland Composite Cement (PCC) pada mortar. Penelitian diawali dengan pengujian karakteristik material campuran seperti, abu sawit, pasir, PCC. Persentase PCC adalah 30% dari berat abu sawit. Sampel uji berukuran 5x5x5 cm dengan variasi pengujian terdiri dari 100°, 200°, 300°C. Jenis pengujian yang dilakukan adalah kuat tekan dan absorpsi pada umur 28 hari. Setelah umur 28 hari, sampel dimasukkan ke dalam oven selama 3 jam dan kemudian diuji berdasarkan variasi sampel yang ditentukan. Dari hasil

yang didapat, kuat tekan variasi suhu 200° memiliki kuat tekan tertinggi 17,5 MPa sedangkan variasi suhu 300° memiliki kuat tekan terendah 11,5 MPa. Pada pengujian absorpsi variasi suhu 300° memiliki nilai absorpsi terbesar 5,77%, sedangkan variasi suhu 200° memiliki absorpsi terkecil sebesar 2,28%. Dari data hasil pengujian dapat disimpulkan adanya pengaruh suhu pada mortar geopolimer. Pengaruh tersebut didasari dari jumlah kandungan Si dan Al pada ikatan CSH yang terdapat pada PCC. Paparan suhu tinggi banyak mengubah komposisi kimia dan struktur fisik dari Mortar dan menyebabkan penambahan pori pada mortar.

8. (Prayoga dkk., 2021) menulis sebuah karya berjudul "Pengaruh Konsentrasi Rasio Naoh Terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer Abu Cangkang Sawit ". Penelitian ini membahas mengenai pemanfaatan abu cangkang sawit sebagai bahan penyusun mortar geopolimer bertujuan mengetahui pengaruh konsentrasi rasio NaOH terhadap kuat tekan mortar geopolimer abu cangkang sawit. Abu cangkang sawit digunakan sebagai prekursor karena mengandung alumina dan silika yang dapat bereaksi membentuk bahan semen dan menggunakan aktivator sebagai pengikat seperti, NaOH (natrium hidroksida) dan Na₂SiO₃ (natrium silikat). Metode yang digunakan-dalam-penelitian ini-adalah metode eksperimen yaitu melakukan pengujian langsung di-laboratorium. Rasio aktivator Na₂SiO₃ : NaOH yang digunakan pada penelitian ini adalah 1:2 dan konsentrasi yang digunakan adalah 8 M, 10 M, 12 M, 14 M, dan 16 M. kuat tekan maksimum adalah pada umur 28 hari dengan komposisi rasio perbandingan Na₂SiO₃ : NaOH, 1:2 sebesar 15,74 Mpa. Semakin besar molaritas yang digunakan maka kuat tekan-mortar-geopolimer akan semakin meningkat.
9. (Amran dkk., 2021) menerbitkan sebuah artikel berjudul "Komposit Beton Ramah Lingkungan Berbasis Abu Bahan Bakar Minyak Sawit: Tinjauan Kritis terhadap Sifat Jangka Panjang". Dalam penelitian ini, dibahas tentang pesatnya perkembangan infrastruktur di seluruh dunia serta kemajuan dalam ilmu material, yang di antara faktor lainnya telah meningkatkan kebutuhan akan beton. Semen, yang merupakan elemen vital dalam beton, berfungsi untuk mengikat berbagai material padat menjadi satu kesatuan yang kokoh.

Namun, proses produksinya mengeluarkan sejumlah besar gas rumah kaca, dengan hampir 10% emisi karbon dioksida (CO₂) berasal dari produksi semen. Hal ini, ditambah dengan dorongan untuk keberlanjutan lingkungan, telah mendorong lahirnya solusi kreatif dan bahan alternatif semen. Tujuannya adalah untuk secara signifikan mengecilkan total volume semen yang dibutuhkan dalam beton dan untuk memenuhi permintaan yang terus meningkat seiring dengan tren pembangunan dan infrastruktur yang pesat. Abu Bahan Bakar Minyak Sawit (POFA) merupakan hasil samping industri dari pembakaran limbah minyak sawit dalam pembangkit listrik dan memiliki sifat yang unik, ditandai oleh reaktivitas tinggi serta kecenderungan pozzolanik yang kuat, serta kemampuan pengisian mikro yang memadai. Dalam penelitian ini, berbagai sumber material diperiksa secara mendalam bersama dengan faktor-faktor yang berpengaruh dan karakteristik ketahanan POFA. Selain itu, penelitian ini juga menyajikan tinjauan literatur yang luas mengenai potensi penggunaan komposit beton yang ramah lingkungan berbasis POFA sebagai bahan hijau untuk pembangunan modern saat ini.

10. (Yanuari dkk., 2020) dalam karya mereka yang berjudul “Studi Parametrik Mortar Geopolimer Hybrid Abu Sawit (Palm Oil Fuel Ash/Pofa)”. Riset ini menerapkan metode percobaan yang memungkinkan untuk menyimpulkan bahwa: “Data yang diperoleh dari penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi terbaik terdiri dari NaOH 14M, rasio modulus aktivator (Ms) 2,5, suhu pemeliharaan 100°C, dan periode istirahat selama 5 hari. Proses pengolahan partikel POFA dilakukan dengan pengeringan dalam oven serta penyaringan menggunakan saringan #200, dengan jumlah PCC sebesar 15%. Mortar geopolimer dengan komposisi tersebut dapat mencapai kuat tekan tertinggi yaitu 6,6 MPa setelah 28 hari. Riset ini menunjukkan peluang pemanfaatan POFA sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan dalam bidang konstruksi, yang dapat mengurangi ketergantungan pada semen Portland konvensional serta memberikan solusi untuk pengelolaan limbah dari kelapa sawit.”

2.2 Keaslian Penelitian

Dari segi keaslian penelitian sebelumnya yang di jadikan perbandingan pada penelitian antara lain:

1. Lokasi penelitian ini dilakukan di laboratorium Teknologi Bahan Konstruksi Teknik Sipil Universitas Pasir Pengaraian
2. Pengambilan sampel abu sawit diperoleh dari PT. Rambah Sawit Mandiri Rokan Hulu.
3. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis nilai *sorptivity* mortar *geopolymer* abu sawit dengan umur pengujian 28 dan 56 hari menggunakan penambahan dengan persentase PCC 10%, 20%, 30%, 40%, 50%.
4. Larutan *activator* yang di gunakan adalah gabungan dari larutan *natrium hidroksida* (NaOH) 14 Molar dan larutan *natrium silika* (Na_2SiO_3) 2,3 Mol.

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Deskripsi Mortar

Mortar merupakan bahan komposit penting dalam bidang teknik sipil yang berfungsi sebagai pengikat dan pengisi untuk elemen-elemen bangunan. Secara umum, mortar dapat diartikan sebagai campuran yang terdiri dari bahan pengikat, agregat halus, dan air (Tjokrodinuljo, 2007).

3.2 Komponen Utama Mortar

Berdasarkan definisinya, mortar terdiri dari tiga komponen utama, di mana kualitas dan proporsinya sangat berpengaruh pada performa akhir campuran:

1. Bahan Pengikat Adalah Material yang bereaksi secara kimiawi dengan air, baik melalui *hidrasi* atau aktivasi *alkali*, sehingga mengeras dan memberikan kekuatan serta daya tempel pada mortar. Contoh umum termasuk Semen Portland, Kapur, atau *Geopolimer* (SNI 7306:2017 untuk Semen PCC).
2. Agregat Halus adalah Bahan pengisi yang bersifat inert dan berfungsi untuk menambah volume, mencegah penyusutan berlebihan, serta menstabilkan campuran. Pasir yang digunakan sebaiknya bersih, keras, dan memiliki ukuran butir yang tepat (SNI 03-6821-2002).
3. Air Adalah Diperlukan untuk memulai reaksi kimia dalam bahan pengikat serta memberikan kemudahan dalam pengolahan agar mortar dapat diaplikasikan dengan baik. Air yang digunakan harus bersih dan bebas dari kontaminan berbahaya, Biasanya mengikuti ketentuan air untuk campuran beton.

3.3 Fungsi dan Aplikasi Mortar

Mortar memiliki peranan yang signifikan baik dari segi struktur maupun non-struktur dalam suatu bangunan:

1. Perekat Unit Bangunan: Fungsi utamanya adalah menyatukan unit seperti bata, batako, atau batu alam, sehingga membentuk dinding atau struktur yang kuat.

2. Plesteran dan Acian: Digunakan untuk menutup dan meratakan permukaan dinding yang tidak rata. Plesteran berperan untuk melindungi unit bangunan dari kondisi cuaca, sementara acian memberikan permukaan akhir yang halus.
3. Pemasangan Ubin/Keramik: Mortar khusus digunakan sebagai lapisan dasar untuk menempelkan ubin lantai atau keramik pada dinding.

3.4 Jenis Mortar

3.4.1 Mortar Konvensional Berbasis PCC

Mortar konvensional yang menggunakan *Portland Composite Cement* (PCC) sebagai bahan utamanya, mengandalkan proses hidrasi untuk mencapai kekuatan. Proses ini melibatkan reaksi kimia antara semen dan air, yang menghasilkan produk utama berupa gel *Calcium Silicate Hydrate* (C-S-H) dan *Kalsium Hidroksida* (CaOH_2) (Tjokrodinuljo, 2007).

Sifat Utama Mortar PCC:

- a. Kuat Tekan: Kekuatan akan terus berkembang seiring waktu, dengan kuat tekan yang diharapkan umumnya tercapai pada umur 28 hari. Kinerja kekuatan sangat dipengaruhi oleh rasio air-semen; semakin rendah rasio w/c, maka semakin tinggi kekuatan dan potensi kerapatan.
- b. *Sorptivity* (Penyerapan Air): Mortar PCC biasanya memiliki nilai *sorptivity* yang relatif tinggi. Hal ini disebabkan oleh adanya pori-pori kapiler yang terhubung dalam matriksnya. Pori-pori tersebut terbentuk akibat air berlebih yang tidak bereaksi selama proses hidrasi dan ruang yang diisi oleh (CaOH_2). *Sorptivity* yang tinggi menunjukkan bahwa mortar bisa rentan terhadap penetrasi air dan zat agresif terlarut yang dapat menyebabkan korosi pada baja tulangan atau merusak matriks (Junaidi et al. , 2023).
- c. Ketahanan Suhu Tinggi: Mortar PCC mengalami penurunan signifikan saat terpapar suhu di atas 300°C akibat dekomposisi produk hidrasi, yang mengakibatkan hilangnya kekuatan serta integritas struktural.

3.4.2 Mortar *Geopolimer* Berbasis Abu Sawit

Mortar *geopolimer* dibuat menggunakan bahan yang mengandung aluminosilikat, seperti Abu Sawit (POFA), yang diaktifkan dengan larutan alkali kuat. Proses pengerasan ini, dikenal sebagai *geopolimerisasi*, menghasilkan sebuah matriks anorganik *polimer* yang padat dengan ikatan Si-O-Al-O (Davidovits, 2011).

Sifat Utama Mortar Geopolimer:

- a. Kuat Tekan: Perkembangan kekuatan sangat dipengaruhi oleh factor seperti konsentrasi alkali, rasio $(Na_2SiO_3)/(NaOH)$, dan yang terpenting, perawatan pada suhu tinggi (*heat curing*). Alwaeli (2018) menunjukkan bahwa Mortar Geopolimer POFA yang diproses dengan suhu tinggi menghasilkan kekuatan tekan yang sangat baik.
- b. *Sorptivity* (Penyerapan Air): Mortar geopolimer yang diproduksi dengan baik menunjukkan nilai *sorptivity* yang lebih rendah dibandingkan PCC. Matriks geopolimer yang amorf dan sangat padat membentuk struktur pori yang lebih halus dan terputus. Ketidakterhubungan pori ini secara signifikan membatasi kemampuan air untuk berpindah melalui proses kapiler. Syarif dkk., (2024) mengonfirmasi bahwa mortar geopolimer berbasis abu sawit dengan substitusi PCC yang dioptimalkan dapat mencapai *sorptivity* yang rendah, membuktikan daya tahan yang luar biasa dalam menahan penetrasi air.
- c. Ketahanan Suhu Tinggi: Mortar geopolimer memiliki ketahanan termal yang sangat baik. Material ini mampu mempertahankan kekuatan dan integritasnya pada suhu hingga 800°C atau lebih, jauh melebihi batas toleransi yang dimiliki mortar PCC.
- d. Keberlanjutan: Mortar geopolimer menawarkan manfaat lingkungan yang besar, Karena tidak menggunakan semen Portland, proses pembuatannya dapat mengurangi emisi *karbondioksida* (CO₂) hingga 80% dan memanfaatkan limbah industri seperti POFA (Rostami et al., 2020).

3.4.3 Mortar *Geopolimer Hibrida* Pengaruh Substitusi PCC

Mortar yang dibahas pada penelitian ini adalah Mortar *Geopolimer Hibrida*, yaitu *geopolimer* yang sebagian disubstitusi dengan PCC. Ciri-ciri dari material hibrida ini adalah gabungan dari kedua tipe mortar tersebut. Penambahan PCC bertujuan untuk:

- a. Mendorong terbentuknya matriks *hibrida C-A-S-H* dan *N-A-S-H* gel.
- b. (Nurwidayati dkk., 2025) menemukan bahwa semen dapat memperbaiki kinerja dan kepadatan Mortar *Geopolimer*, secara tidak langsung meningkatkan sifat daya tahannya.

Oleh karena itu, perbandingan nilai sorptivity dalam penelitian ini bertujuan untuk mengetahui persentase substitusi PCC yang ideal sehingga dapat memanfaatkan kekuatan semen sambil menjaga atau bahkan meningkatkan kepadatan matriks geopolimer POFA, yang bertujuan untuk mencapai nilai sorptivity terendah dan daya tahan terbaik.

3.5 Bahan Penyusun Mortar *Geopolimer*

Bahan yang digunakan dalam mortar geopolimer pada studi ini meliputi abu sawit, larutan aktivator *alkali*, agregat halus, dan air.

3.5.1 Abu Sawit (POFA)

Abu sawit diperoleh dari pembakaran limbah padat yang dihasilkan dari kelapa sawit pada suhu antara 800-1.000°C di pembangkit listrik tenaga uap di pabrik kelapa sawit (Tangchirapat, 2009). Dalam proses industri kelapa sawit, limbah padat yang muncul meliputi serat, cangkang, dan tandan kosong. Limbah ini mengandung sisa dari ekstraksi minyak sawit yang terdiri dari tandan kosong, serat, dan cangkang sawit. Limbah-limbah tersebut digunakan sebagai bahan bakar dalam boiler untuk menghasilkan energi mekanik dan panas.

Uap yang dihasilkan dari boiler dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik dan juga untuk merebus TBS sebelum diolah lebih lanjut di pabrik. Namun, masalah muncul dengan sisa pembakaran di boiler yang berbentuk abu, yang terus meningkat setiap tahunnya. Sayangnya, pemanfaatan abu sawit hingga saat ini belum optimal. Dengan laju pertumbuhan industri

kelapa sawit yang cepat, jumlah limbah terus meningkat, sehingga memerlukan lahan yang luas untuk menampung abu sawit.

Penggunaan abu sawit saat ini masih sangat terbatas dan belum dikelola dengan baik. Di sisi lain, jumlahnya terus bertambah sebesar 0,1 juta ton per tahun dan memerlukan area untuk pembuangannya, yang dapat menjadi masalah lingkungan. Produksi abu sawit meningkat setiap tahun, dan pengeluaran untuk transportasi serta tempat pembuangan tidak merupakan solusi yang efektif untuk mengelola limbah ini, karena abu sawit tidak memiliki nilai komersial dan berpotensi menjadi masalah lingkungan di masa depan. Abu sawit dapat dimanfaatkan sebagai pengganti semen atau sebagai agregat dalam beton karena sifat pozzolan yang dimilikinya.



Gambar 3. 1 Abu Sawit (POFA)

3.5.2 Larutan Alkali

Alkali merupakan kelompok senyawa kimia yang bersifat basa. Dalam campuran ini, digunakan bahan-bahan berikut:

1. *Sodium Hidroksida/Naoh*

Sodium hidroksida atau NaOH adalah tipe alkali hidroksida yang berfungsi sebagai pengikat dalam geopolimer. Senyawa ini sangat mudah menyerap uap air, sehingga jika terpapar udara, NaOH akan menyerap kelembapan dari lingkungan dan terlihat seolah-olah mencair (Caustic Soda, JSIA, 2006). Sodium hidroksida (NaOH) terlibat dalam reaksi dengan elemen-elemen Al dan Si yang ada dalam abu sawit untuk menciptakan ikatan polimer yang kuat. Berat jenis NaOH adalah 1,51.

2. *Sodium Silikat/Na SiO*

Untuk mencapai hasil yang maksimal, alkali *silikat* harus digabungkan dengan alkali *hidroksida*, karena reaksi yang berjalan lambat mampu mengurangi kekuatan material pengikat *geopolimer* itu sendiri (Craido dkk., 2010, Palomo dkk., 1999). *Sodium Metasilikat* muncul dalam bentuk butiran putih. Persentase kandungan sodium metasilikat mencapai 95-99,5%, sedangkan 1% sisanya adalah air. Penggunaan alkali *silikat* dalam bentuk padat cenderung menurunkan kekuatan bahan pengikat *geopolimer* jika dibandingkan dengan penggunaan alkali dalam bentuk larutan (S-D Wang dkk., 1994).

3. *Superplasticizer*

Superplasticizer berfungsi untuk meningkatkan daya tahan mortar *geopolimer*, sehingga proses pencampuran, pengisian, dan pemadatan menjadi lebih mudah. Selain itu, superplasticizer juga digunakan untuk mempercepat proses pembentukan kekuatan mortar.

3.5.3 Agregat Halus

Menurut SNI-03-2847-2002, agregat halus merujuk pada pasir yang terbentuk dari proses penghancuran alami batuan atau pasir yang diproduksi oleh industri penggilingan batu, dengan ukuran butir maksimum 5,0 mm.

Kriteria umum untuk agregat halus adalah sebagai berikut:

1. Agregat halus terdiri dari partikel-partikel yang tajam dan kokoh. Partikel halus bersifat permanen, yang berarti mereka tidak akan pecah atau rusak akibat pengaruh cuaca. Ketahanan agregat halus dapat diuji dengan menggunakan larutan garam jenuh. Jika menggunakan natrium sulfat, bagian yang rusak maksimum adalah 10% dari berat total.
2. Agregat halus sebaiknya tidak memiliki kandungan lumpur lebih dari 5% dalam keadaan kering, dan jika kadar lumpur melebihi 5%, pasir perlu dicuci.
3. Berdasarkan SNI-03-2847-2002, berikut adalah spesifikasi standar untuk agregat halus:
4. Modulus kehalusan butir harus berada di antara 2,3% dan 3,1%.

5. Kadar lumpur atau bahan yang lolos dari saringan No. 200 (0,074mm) harus maksimal 3% untuk beton yang terpapar abrasi, dan 5% untuk jenis beton lainnya.
6. Kandungan arang dan lignit dalam beton tidak boleh lebih dari 0,5%, sedangkan untuk jenis beton lainnya maksimum 1%.
7. Kadar gumpalan tanah liat dan partikel yang mudah diuraikan harus tidak lebih dari 3%.
8. Kadar zat organik, yang ditentukan dengan mencampurkan agregat halus ke dalam larutan natrium sulfat ($NaSO_4$) 3%, tidak boleh menghasilkan warna lebih gelap daripada warna standar.
9. Harus tidak reaktif terhadap alkali semen pada beton yang terpapar air atau lembap, dengan penggunaan natrium oksida tidak boleh lebih dari 0,6%.

3.5.4 Semen

Semen Portland merupakan tipe semen yang paling banyak dimanfaatkan di seluruh dunia sebagai bahan utama untuk beton, mortar, plester, dan lain-lain. Berdasarkan SNI 15-2049-2015, semen Portland di Indonesia dikategorikan menjadi beberapa jenis, antara lain:

1. Tipe I: Merupakan bahan pengikat yang dapat mengeras dalam air, yang diperoleh melalui proses penggilingan klinker yang mengandung kalsium silikat sebagai komponen utama dan digiling bersama gypsum.
2. Tipe II: Ini adalah bahan pengikat hidrolisis yang dibuat dengan menggiling klinker yang sebagian besar terdiri dari *kalsium silikat* dan kalsium aluminat, kemudian dicampurkan dengan gypsum.
2. Tipe III: Ini adalah bahan pengikat hidrolisis yang dihasilkan melalui proses penggilingan klinker yang sebagian besar mengandung kalsium silikat dan kalsium aluminat, lalu dicampurkan dengan gypsum.
3. Tipe IV: Ini adalah bahan pengikat hidrolisis yang diperoleh dengan menggiling klinker yang utama terdiri dari kalsium silikat dan kalsium aluminat dan dicampurkan bersama gypsum.

4. Tipe V: Ini adalah bahan pengikat hidrolisis yang dibuat melalui penggilingan klinker yang sebagian besar terbuat dari kalsium silikat dan kalsium aluminat, lalu dicampurkan dengan gypsum.

Semen Portland memiliki karakteristik yang dapat mengeras ketika dicampurkan dengan air, tidak larut dalam air, dan tetap mengeras meskipun berada di dalam air. Jenis semen ini adalah bahan pengikat yang paling dikenal dan paling sering digunakan.

Komposisi kimia dan fisik dari semen tipe I atau *Portland Composite Cement (PCC)* dapat dilihat dalam tabl berikut.

Tabel 3. 1 Komposisi Kimia dan Fisika *Portland Composite Cement*

Komposisi PCC	(%)
Al_2O_3	6,00
CaO	63,00
SiO_2	22,00
Fe_2O_3	2,50
Kehalusan	4,00
Berat isi (Kg/l)	1,29

Sumber: (Nugraha & Antoni, 2007)

3.5.5 Air

Air merupakan salah satu elemen yang sangat vital dalam pembuatan mortar. Air yang digunakan harus bebas dari zat-zat lain yang dapat merugikan proses hidrasi semen serta kekuatan beton. (Nugraha dan Antoni, 2007).

Menurut SNI 03-6882-2002, air yang dipakai harus bersih dan tidak terkontaminasi oleh minyak, asam, alkali, garam, zat organik, atau material lain yang dapat merusak mortar serta logam yang ada di dinding. Air yang digunakan dalam adukan beton tidak boleh mengandung klorida lebih dari 0,5 gram per liter dan tidak boleh mengandung senyawa sulfat lebih dari 1 gram per liter. Air yang tercemar dalam campuran mortar dapat mengakibatkan penurunan kualitas beton dan mengubah karakteristik mortar

yang dihasilkan. Penggunaan air yang sesuai dalam adukan mortar dapat menghasilkan kualitas yang baik, sehingga perlu dilakukan pengujian terhadap kadar lumpur dan kadar organik.

3.6 Waktu Perawatan

Waktu perawatan pada mortar geopolimer merujuk pada periode yang diperlukan agar mortar tersebut mencapai kekuatan dan daya tahan terbaik. Waktu perawatan ini berpengaruh besar terhadap karakteristik mortar geopolimer, yaitu:

- a. Ketahanan air: Ketahanan terhadap air dari mortar geopolimer juga akan meningkat sejalan dengan waktu perawatan. Semakin lama waktu perawatan, semakin baik ketahanan air mortar geopolimer.
- b. Ketahanan terhadap sulfat: Ketahanan terhadap sulfat dari mortar geopolimer pun akan meningkat sejalan dengan waktu perawatan. Semakin lama waktu perawatan, semakin baik ketahanan sulfat mortar geopolimer.

3.7 *Sorptivity* Mortar

Sorptivity adalah kemampuan air untuk berpindah melalui celah kapiler dari permukaan sampai ke lapisan dalam beton saat bahan tersebut bersentuhan dengan air. Adanya rongga-rongga udara dalam massa beton sangat mempengaruhi kekuatannya. Keberadaan rongga dalam mortar dapat mengurangi kepadatan dan menurunkan kekuatannya. Pengujian *Sorptivity* dilakukan berdasarkan metode pada standar ASTM C158 untuk mengukur tingkat penyerapan air oleh mortar dengan menimbang peningkatan berat pada sampel yang disebabkan oleh penyerapan air seiring dengan waktu, ketika hanya satu sisi yang terpapar air. Nilai *sorptivity* dapat ditentukan menggunakan garis regresi linier dari grafik yang menunjukkan hubungan antara jumlah air yang diserap per satuan area (I) dan akar dari waktu penyerapan (t).

$$I = St^{0,5} \text{ maka } S = I/t^{0,5} \dots\dots\dots (3.1)$$

Dimana:

S = *Sorptivity*

$t^{0,5}$ = akar waktu hisap (menit)

I = $\Delta w / A_d$

Δw = Perubahan berat = W2-W1

- W1 = berat kering oven (gr)
W2 = berat mortar setelah n waktu hisapan air (gr)
A = Luas Penampang (mm²)
d = densitas air/ massa jenis air g/mm³

Pada ASTM C1585, penyerapan air diplot terhadap akar waktu dari lamanya waktu pengujian karena pergerakan air di dalam mortar dikendalikan oleh mekanisme kapiler. Secara teoritis, kedalaman penetrasi air berbanding lurus dengan akar waktu, sehingga hubungan antara penyerapan air dan akar waktu menjadi linear. Oleh karena itu kemiringan grafik tersebut dapat digunakan untuk menentukan nilai sorptivity.

Contoh perhitungan:

Diketahui:

- $t^{0,5}$ = 5 menit
I = 0,100
 Δw = Perubahan berat = W2-W1
W1 = 1114,72 (gr)
W2 = 1115,72 (gr)
A = 10.000 (mm²)
d = 0,001 g/mm³

$$S = I/t^{0,5}$$

$$= 0,100/ 5^{0,5}$$

$$= 0,045 \text{ mm/ min}^{0,5}$$

Berdasarkan Standar nilai sorptivity menurut ASTM C1585 yang baik, Berikut ini merupakan kriteria *Sorptivity*

- Rendah : $> 0,2 \text{ mm/min}^{0,5}$
Diterima : $0,1 - 0,2 \text{ mm/min}^{0,5}$
Sangat baik : $< 0,2 \text{ mm/min}^{0,5}$

BAB IV

METODOLOGI PENELITIAN

4.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui metode eksperimen di laboratorium, metode yang diterapkan dalam penelitian ini adalah penelitian kuantitatif, yang didasari oleh filosofi positivisme, digunakan untuk menyelidiki populasi tertentu atau sampel, dengan pengumpulan data menggunakan instrumen pengukuran, serta analisis data yang bersifat kuantitatif dan statistik. Tujuannya adalah untuk menguji dan mengonfirmasi hipotesis yang telah ditetapkan sebelumnya. Penelitian dimulai dengan Perencanaan pembuatan benda uji, mix design dan pembuatan benda uji, Perawatan benda uji, dan Pengujian *sorptivity* untuk menilai kualitas bahan penyusun mortar geopolimer dari Abu Sawit (POFA), dengan pengujian yang meliputi *sorptivity*.

4.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan di laboratorium Bahan dan Struktur Teknik Sipil Universitas Pasir Pengaraian. Durasi penelitian berlangsung pada bulan juli 2025.

4.3 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini mencakup:

1. Abu Sawit (*palm oil fuel ash*) yang diperoleh dari PT. Surau gading RSM Rokan Hulu.
2. Semen yang digunakan adalah PCC (*Portland Composite Cement*) yang diproduksi oleh PT. Semen Padang.
3. Larutan aktivator merupakan kombinasi dari larutan natrium hidroksida (NaOH) 14M dan larutan natrium silika (Na₂SiO₃) 2,3 Mol.
4. Air
5. Pasir

4.4 Peralatan

Alat yang di gunakan dalam penelitian ini Adalah sebagai berikut:

4.4.1 Peralatan Pengujian Karakteristik Agregat Halus

Tabel 4. 1 Peralatan Pengujian Karakteristik Agregat Halus

No	Jenis Pengujian	Alat
1.	Analisa saringan	Satu set saringan agregat
		Sendok semen
		Timbangan
		Talam
		Kuas
2.	Berat volume	Timbangan
		Mould
		Tongkat besi
		Sendok semen
3.	Berat jenis	Oven
		Talam
		Sendok semen
		Timbangan
		Piknometer
4.	Kadar lumpur	Gelas ukur
		Sendok semen
		Penggaris
5.	Kadar air	Oven
		Timbangan
		Sendok semen
		Talam

4.4.2 Peralatan Pengujian Abu Sawit

Peralatan yang di gunakan untuk pengujian abu sawit meliputi oven, picnometer, dan timbangan.

Tabel 4. 2 Peralatan pengujian benda uji

No	Alat
1.	Picnometer
2.	Minyak tanah
3.	Timbangan

4.4.3 Peralatan Pengujian *sorptivity*

Tabel 4. 3 Peralatan pengujian

No	Jenis pengujian	Alat	Fungsi
----	-----------------	------	--------

1.	Uji penyerapan sorptivity	Talam	Wadah benda uji
		Penyangga	Penyangga mortar
		Timbangan	Menimbang mortar
		Stopwatch	Mengukur waktu

4.5 Metode pengambilan sampel/data

Dalam proses pengumpulan data untuk pembuatan mortar ini, diterapkan metode atau teknik pengambilan data melalui observasi. Proses pengamatan ini mempelajari objek-objek tertentu, dan dari observasi serta objek yang terkait, akan ditentukan alat ukur yang paling sesuai untuk digunakan. Metode pengujian yang diterapkan dalam penelitian ini merujuk pada standar berikut:

Tabel 4. 4 Standar pengujian

Pengujian	Standar acuan
Analisa saringan	ASTM C136; SNI 03-1968-1990
Kadar air agregat halus	ASTM C566; SNI 03-1971-1990
Berat jenis agregat halus	ASTM C117; SNI 03-1970-1990
Berat volume agregat halus	ASTM C29; SNI 03-4804-1998
Kadar lumpur agregat halus	ASTM C142; SNI 03-2461-2002
<i>Sorptivity</i>	ASTM C1585 GHD (Gravimetric–Height–Duration)

4.6 Prosedur Penelitian

4.6.1 Pemeriksaan Abu Sawit

Metode ini memanfaatkan piknometer, sebuah alat yang terbuat dari kaca atau logam dengan volume yang telah ditentukan. Berikut adalah langkah-langkahnya:

- Persiapan sampel: Keringkan abu sawit pada suhu 110 C° selama 24 jam untuk menghilangkan kandungan air. Abu yang digunakan harus lolos saringan no. 200.
- Persiapan piknometer: Bersihkan dan keringkan piknometer dengan baik. Timbang piknometer yang kosong dan catat beratnya (W1).

- c. Pengisian piknometer: Masukkan bubuk abu sawit ke dalam piknometer. Pastikan tidak ada udara terjebak, lalu timbang berat piknometer bersama abu sawit (W2).
- d. Penambahan minyak tanah: Isi piknometer dengan minyak tanah hingga penuh. Pastikan tak ada gelembung udara yang terperangkap.
- e. Setelah piknometer terisi, rendam piknometer dalam air hingga mencapai suhu normal. Selanjutnya, catat suhu air (t).
- f. Menghapus kelebihan air: Gunakan kain kering untuk mengelap permukaan piknometer, sehingga air yang berlebih dapat dihilangkan.
- g. Menimbang piknometer yang sudah terisi: Timbang piknometer yang berisi minyak dan abu sawit (W3). Setelah itu, keluarkan benda uji dari piknometer dan bersihkan piknometer dari sisa-sisa benda uji.
- h. Masukkan minyak tanah sebanyak 500 ml ke dalam piknometer dan catat beratnya (W4).
- i. Menghitung berat jenis

Hitung berat jenis abu sawit dengan rumus berikut:

$$A = W2 - W1$$

$$B = W3 - W4$$

$$C = A - B$$

Berat Jenis

$$= A / C \dots\dots\dots(4.8)$$



Gambar 4. 1 Berat Jenis Abu Sawit

4.6.2 Pemeriksaan Agregat Halus

A. Analisa Saringan

1. Tujuan Pengujian

Untuk mengetahui sebaran ukuran (gradasi) dari agregat. Informasi mengenai sebaran agregat sangat penting dalam merencanakan campuran mortar.

2. Peralatan Pengujian

- a. Timbangan atau neraca dengan tingkat akurasi 0,1% dari bobot sampel.
- b. Kumpulan saringan yang ukurannya tertera dalam Tabel 4. 5 di bawah ini.
- c. Oven yang dilengkapi dengan pengatur temperatur sampai $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$.
- d. Talam, kuas, sikat tembaga, dan sendok.

Tabel 4. 5 Analisa saringan

Nomor saringan	Ukuran lubang ayakan(mm)
No 4	4,74
No 8	2,36
No 16	1,18
No 30	0,600
No 50	0,300
No 100	0,160
No 200	0,075
Pan	-

3. Bahan

Bahan yang digunakan adalah hasil ayakan dari agregat halus dengan minimum 500 gram.

4. Prosedur Pengujian

- a. Mengeringkan agregat halus di oven pada suhu 105°C hingga beratnya stabil.

- b. Menyusun saringan dengan urutan mulai dari ukuran paling besar di atas dan palet diletakkan di bawah untuk menampung partikel yang lolos dari ayakan No. 200.
- c. Memasukkan agregat halus ke dalam ayakan yang berada di posisi tertinggi, kemudian melakukan proses ayakan selama 15 menit.
- d. Menimbang agregat halus pada setiap ayakan.

5. Perhitungan

Modulus halus butir adalah sebuah ukuran yang digunakan untuk menilai tingkat kehalusan atau kekasaran dari butir-butir agregat. Modulus ini dihitung sebagai jumlah persentase kumulatif dari butir-butir agregat yang tertinggal di atas seperangkat ayakan, lalu dibagi seratus. Nilai modulus halus yang lebih tinggi menunjukkan bahwa ukuran butir-butir agregat tersebut lebih besar.



Gambar 4. 2 Analisa Saringan

B. Berat volume

1. Tujuan Pengujian

Untuk menentukan berat volume dari agregat halus, yaitu perbandingan antara berat agregat yang kering dengan volumenya.

2. Peralatan Pengujian

- a. Timbangan dengan akurasi 0,1% dari berat sampel
- b. Wadah datar
- c. Alat pemadat dengan diameter 16 mm dan panjang 60 cm, yang ujungnya berbentuk bulat dan terbuat dari stainless steel
- d. Alat perata dengan ketebalan 6 mm dari stainless steel
- e. Sendok
- f. Wadah berbentuk silinder yang terbuat dari baja

3. Bahan

Agregat halus dengan berat sampel sesuai dengan kapasitas wadah silinder yang digunakan

4. Prosedur pengujian

- a. Mempersiapkan mould silinder dan menimbanginya.
- b. Mengisi agregat secara bertahap setiap sepertiga dari volume mould dan menekannya sebanyak 25 kali untuk setiap lapisan.
- c. Meratakan bagian atas agregat menggunakan alat perata hingga rata.
- d. Menimbang dan mencatat beratnya.
- e. Menentukan berat agregat di dalam cetakan dan membandingkannya dengan kapasitas cetakan.

5. Perhitungan

Bobot volume (g/cm^3) W/V (4. 1)

Dimana:

W = berat contoh (g)

V = volume contoh (cm^3)



Gambar 4. 3 Berat Volume

C. Berat Jenis

1. Tujuan Pengujian

Untuk mengetahui berat jenis *bulk* dan tingkat penyerapan dari agregat halus. Nilai ini penting untuk menghitung proporsi volume agregat halus dalam campuran beton.

2. Peralatan Pengujian

- a. Timbangan dengan akurasi 0,1% dari berat sampel atau 0,1 gram.
- b. Piknometer dengan kapasitas 500 gram.
- c. Kerucut pasir dengan diameter atas (40 ± 3) mm, diameter bawah (90 ± 3) mm, tinggi (75 ± 3) mm, dan ketebalan (25 ± 3) mm.
- d. Stik pemadat dari logam yang memiliki berat (340 ± 15) gram dan diameter (25 ± 3) mm.

3. Bahan

Agregat halus seberat 500 gram. Sampel diambil dari bahan yang telah dipisahkan menggunakan alat ayakan No. 4.

4. Prosedur Pengujian

- a. Mengeringkan agregat halus dalam oven dan mencatat beratnya.
- b. Merendam agregat halus dalam air hingga jenuh selama 24 jam.
- c. Mengeringkan agregat yang direndam di udara panas hingga mencapai kondisi *Saturated Surface Dry (SSD)*.

- d. Memasukkan agregat halus dalam kondisi SSD ke dalam piknometer, kemudian mengisi air hingga volume air mencapai batas di leher piknometer.
- e. Menggerakkan piknometer agar udara yang terperangkap dapat keluar.
- f. Membiarkan piknometer dalam desikator supaya suhunya stabil.
- g. Menimbang berat agregat serta air di dalam piknometer.

5. Perhitungan

Apparent Specific Gravity (Semu)

$$= \frac{A}{(B+A+C)} \dots\dots\dots(4.2)$$

$$\text{Bulk Specific Gravity (Kering)} = \frac{A}{(B+D-C)} \dots\dots\dots(4.3)$$

$$\text{Bulk Specific Gravity (SSD)} = \frac{D}{(B+D-C)} \dots\dots\dots(4.4)$$

$$\text{Peresentase Absorption} = \frac{(D-A)}{A} \times 100\% \dots\dots\dots(4.5)$$

Keterangan:

A = Berat contoh kering oven

B = Berat piknometer + air

C = Berat piknometer + air + contoh SSD

D = Berat Contoh Kering permukaan jenuh



Gambar 4. 4 Berat jenis

D. Kadar Lumpur

1. Tujuan Pengujian

Menentukan persentasi kadar lumpur agregat halus.

2. Peralatan Pengujian

- a. Gelas Ukur
- b. Alat pengaduk

3. Bahan

Agregat halus secukupnya dalam kondisi lapangan dengan bahan pelarut air biasa.

4. Prosedur pengujian

- a. Memasukkan pasir ke dalam gelas ukur hingga memenuhi sepertiga dari kapasitas gelas ukur.
- b. Menambahkan air ke dalam gelas ukur sampai semua pasir tenggelam dalam air.
- c. Menggoyang-goyangkan gelas ukur untuk membersihkan pasir yang ada di dalamnya.
- d. Membiarkan gelas ukur selama 24 jam agar endapan lumpur dapat terbentuk.
- e. Mengukur ketinggian lumpur serta ketinggian pasir dan membandingkan ketinggian lumpur dengan keduanya.

5. Perhitungan

Kadar Lumpur

$$= \frac{h_2}{(h_1 + h_2)} \times 100\% \dots\dots\dots(4.6)$$

Keterangan:

h_1 = tinggi pasir (mm)

h_2 = tinggi lumpur (mm)



Gambar 4. 5 Kadar Lumpur

E. Kadar Air

1. Tujuan Pengujian

Untuk mengukur tingkat kelembapan pada agregat melalui proses pengeringan menggunakan oven. Kadar air agregat merujuk pada rasio antara bobot air yang terdapat dalam agregat dengan bobot agregat dalam kondisi kering. Nilai kadar air ini digunakan untuk menyesuaikan jumlah air dalam campuran beton sesuai dengan kondisi agregat di lapangan.

2. Peralatan

- a. Timbangan dengan akurasi 0,1% dari berat sampel.
- b. Oven dengan suhu yang bisa diatur hingga $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$.
- c. Talam metal sebagai wadah untuk pengeringan sampel.

3. Bahan

Agregat halus atau pasir dengan berat minimal 500 gram.

4. Prosedur Pengujian

- a. Menimbang berat talam.
- b. Menempatkan sampel uji di atas talam, kemudian menimbang dan mencatat beratnya.
- c. Menghitung berat dari sampel uji.

- d. Mengeringkan sampel uji di dalam oven.
- e. Setelah proses pengeringan, dinginkan sampel uji hingga mencapai suhu ruangan, lalu timbang dan catat berat sampel yang sudah kering.
- f. Menghitung tingkat kelembapan agregat, yang merupakan persentase air dalam sampel dibandingkan dengan berat sampel kering dari oven.

5. Perhitungan

Kadar air

$$= \frac{(W_1 - W_2)}{W_2} \times 100\% \dots\dots\dots(4.7)$$

Keterangan:

W_1 = berat contoh awal (gram)

W_2 = berat contoh kering (gram)



Gambar 4. 6 Kadar Air

4.7 Pelaksanaan Dan Pembuatan Mortar

Perencanaan campuran mortar mengacu pada standar yang telah ditetapkan di SNI 03-6882-2002. Material utama yang dibutuhkan adalah semen, pasir (agregat halus), dan air.

Tabel 4. 6 Benda Uji

No.	Variasi PCC (%)	Pengujian Sampel Geopolimer Variasi PCC (%)		Pengujian Sampel Konvensional	
		28 hari	56 hari	28 hari	56 hari
1.	10	3	3	3	3
2.	20	3	3	3	3
3.	30	3	3	3	3
4.	40	3	3	3	3
5.	50	3	3	3	3
Total		15	15	15	15
Total keseluruhan benda uji= 60 benda uji					

Sebelum melakukan pengujian, langkah pertama adalah menentukan desain campuran untuk pembuatan benda uji. Selanjutnya, benda uji dibuat melalui proses pencampuran yang dilakukan secara manual dengan menggabungkan bahan kering (abu sawit dan agregat halus) serta aktivator alkali. Bahan kering dicampur terlebih dahulu, kemudian larutan alkali (natrium silikat, natrium hidroksida, dan superplasticizer) ditambahkan secara perlahan sambil terus diaduk hingga campuran tercampur dengan baik dan siap dicetak menjadi mortar. Campuran itu dituangkan ke dalam cetakan berbentuk kubus dengan ukuran 5x5x20 cm untuk pengujian Sorptivity.

4.8 Perawatan Mortar

Setelah benda uji dikeluarkan dari cetakan, benda tersebut diletakkan pada suhu ruang hingga waktu pengujian tiba. Perawatan mortar *geopolimer* adalah proses penting yang diperlukan untuk memastikan kekuatan dan daya tahan yang maksimal. Pemilihan umur perawatan mortar geopolimer pada 28 dan 56 hari dilakukan untuk mewakili kondisi standar dan lanjutan jangka menengah dalam evaluasi sifat durabilitas material. Umur 28 hari secara luas digunakan sebagai umur referensi dalam pengujian mortar dan beton karena pada umur tersebut

sebagian besar reaksi awal telah berlangsung dan sifat material relatif stabil untuk dievaluasi (Laila dkk., 2023) (ASTM C1585-20).

Pengujian pada umur 56 hari dipilih untuk mengamati perkembangan lanjutan reaksi geopolimerisasi dan hidrasi PCC, yang pada material geopolimer diketahui dapat berlangsung lebih lambat dibandingkan sistem semen konvensional. Beberapa referensi penelitian melaporkan bahwa sifat transport seperti sorptivity dan permeabilitas menunjukkan penurunan signifikan hingga umur sekitar 56 hari, kemudian cenderung mengalami laju perubahan yang lebih lambat pada umur berikutnya (Davidovits, 2015, Provis van Deventer, 2014).

Oleh karena itu, umur 90 hari tidak digunakan dalam penelitian ini karena perubahan sifat sorptivity setelah umur 56 hari umumnya tidak signifikan dibandingkan dengan tambahan waktu curing yang diperlukan. Pengujian hingga 56 hari dinilai telah cukup untuk menggambarkan durabilitas mortar *geopolimer* berbasis abu sawit secara representatif dan efisien (Neville, 2011, Provis van Deventer, 2014).

4.9 Pelaksanaan Pengujian Mortar

Tujuan dari pengujian Sorptivity adalah untuk menilai seberapa banyak air diserap oleh mortar. Metode yang digunakan adalah GHD (Gravimetric–Height–Duration). Pemilihan metode GHD didasarkan pada kondisi dan fasilitas laboratorium di kampus tempat penelitian dilakukan. Peralatan khusus yang dipersyaratkan ASTM C1585, seperti perangkat uji sorptivity standar dan sistem kontrol kondisi lingkungan, belum tersedia secara lengkap. Oleh karena itu, metode GHD digunakan sebagai pendekatan alternatif yang secara prinsip fisik dan matematis tetap mengikuti ASTM C1585, yaitu dalam pengukuran laju penyerapan air akibat gaya kapiler pada spesimen tak jenuh dengan analisis berbasis akar waktu.

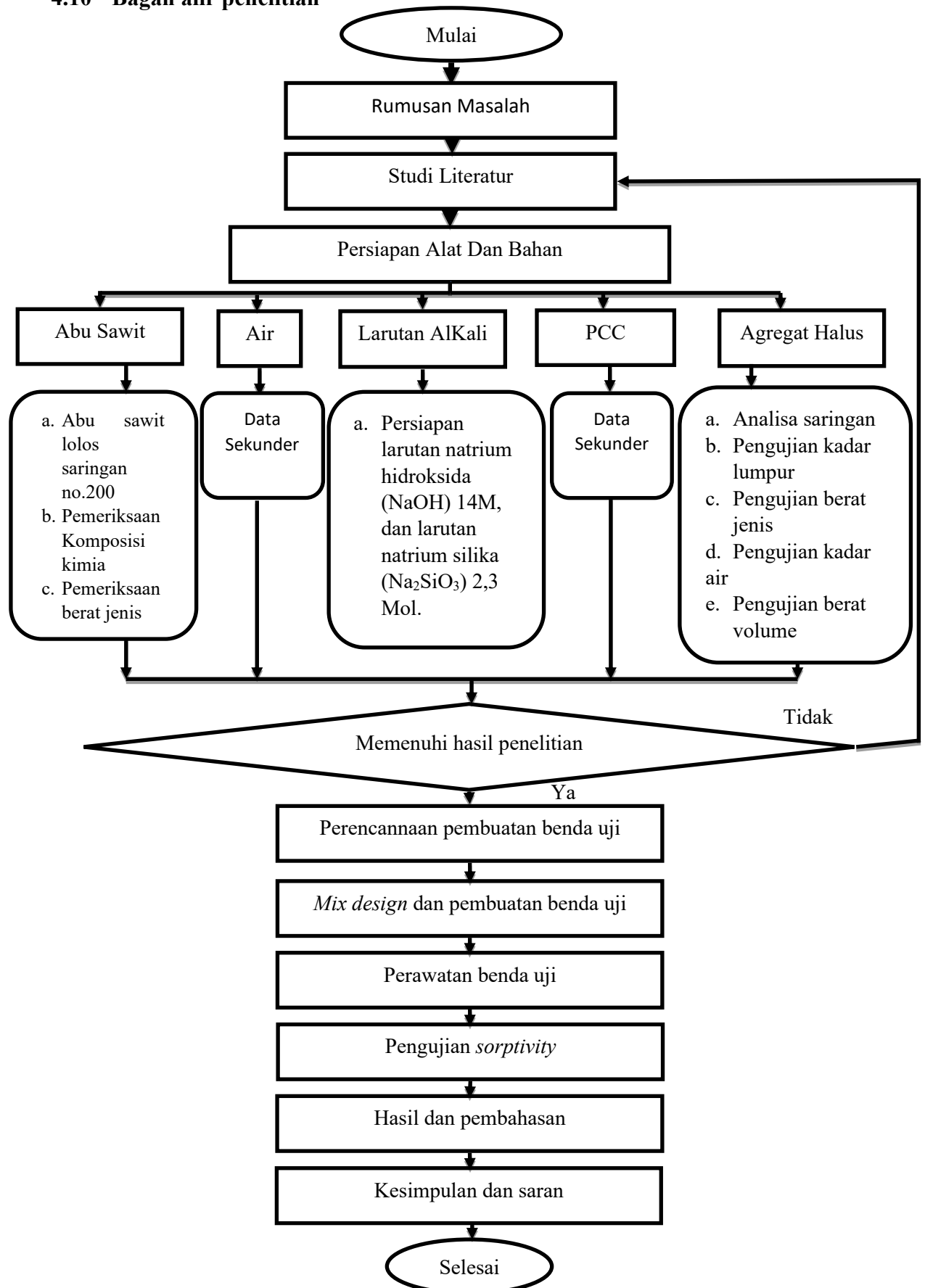
Pada metode GHD mengacu pada teori transport air berbasis *difusivitas* kapiler yang dikembangkan oleh Hall, C., & Hoff, W. D. (2012) *Water Transport in Brick, Stone and Concrete*, di mana aliran air awal pada material berpori didominasi oleh gaya kapiler dan mengikuti hukum akar waktu. Model ini juga

menjadi dasar formulasi ASTM C1585, sehingga kesesuaian GHD dengan ASTM bersifat fundamental.

Langkah-langkah pengujian untuk mengetahui Sorptivity pada mortar adalah sebagai berikut:

- a. Mengeringkan benda uji menggunakan oven pada suhu 110 C° selama 1 jam.
- b. Menyusun peralatan pengujian yang terdiri dari wadah dan penyangga untuk menopang mortar.
- c. Menempatkan benda uji di atas penyangga tersebut, kemudian mengisi wadah dengan air hingga ketinggiannya 1-2 mm di bawah permukaan mortar.
- d. Waktu mulai dihitung, dan berat benda uji dicatat pada interval 0, 1, 5, 10, 20, 30, 60, 120, 180, dan 240 menit sejak pengujian dimulai.
- e. Menghitung nilai Sorptivity berdasarkan rumus yang telah ditentukan.

4.10 Bagan alir penelitian



Gambar 4. 7 Bagan alir