

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi material dalam bidang konstruksi terus mendorong pencarian alternatif bahan bangunan yang lebih ramah lingkungan dan efisien. Salah satu material yang banyak diteliti adalah mortar geopolimer, yang dinilai dapat menjadi pengganti sebagian atau seluruh penggunaan semen Portland. Seiring dengan laju pembangunan infrastruktur yang pesat, kebutuhan akan material konstruksi bermutu tinggi pun terus meningkat. Meskipun *mortar PCC (Portland Composite Cement)* sudah lama digunakan, kini muncul ketertarikan terhadap pemanfaatan bahan alternatif, misalnya *mortar geopolimer POFA (Palm Oil Fuel Ash)*. Langkah ini sejalan dengan upaya mengurangi dampak negatif dari sektor konstruksi terhadap lingkungan (2021, Smith).

Pemanfaatan *POFA (Palm Oil Fuel Ash)* untuk pembuatan mortar geopolimer dengan memberikan inovasi baru dalam dunia konstruksi. Wilayah Riau yang merupakan salah satu penghasil kelapa sawit terbesar di Indonesia. Sisa produksi dari industri kelapa sawit, misalnya abu hasil pembakaran, bisa dipakai sebagai bahan baku pembuatan mortar geopolimer. Pemanfaatan limbah ini tidak hanya akan mengurangi volume limbah yang dihasilkan, tetapi juga memberikan pilihan yang lebih bersahabat dengan lingkungan dibandingkan mortar biasa yang memakai semen *Portland*. Hal ini selaras dengan target pembangunan berkelanjutan yang kini menjadi perhatian utama di berbagai sektor, termasuk juga di industri konstruksi.

Beberapa pengujian kuat tekan dilakukan secara destruktif, yaitu dengan menghancurkan benda uji menggunakan mesin tekan. Metode ini membutuhkan waktu, biaya, serta menyebabkan kerusakan pada sampel. Oleh karena itu, dikembangkan metode *non-destruktif* seperti *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* untuk memperkirakan kuat tekan mortar tanpa merusak benda uji. Prinsip dari metode ini adalah pengukuran kecepatan rambat gelombang ultrasonik melalui material, di mana kerapatan material sangat memengaruhi hasil pengukuran.

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kerapatan antara mortar *PCC* dan mortar geopolimer *POFA*, serta menganalisis pengaruh posisi *transduser* dalam pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)*. Pengujian *UPV* dipilih karena kemampuannya untuk memberikan informasi tentang kualitas material secara non-destruktif. Dengan metode ini, diharapkan dapat diperoleh data yang akurat mengenai sifat fisik dari kedua jenis mortar, sehingga memberikan gambaran jelas tentang performa masing-masing.

Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih dalam tentang kelebihan dan kekurangan masing-masing jenis mortar. Dengan memahami perbedaan kerapatan, serta kekuatan tekan yang dihasilkan, para insinyur dan praktisi konstruksi di Riau dapat lebih tepat dalam memilih material yang sesuai untuk proyek mereka. Ini sangat penting mengingat tantangan yang dihadapi dalam pembangunan infrastruktur yang aman dan berkualitas di daerah yang rawan bencana, seperti gempa bumi dan banjir.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana perbandingan kerapatan antara mortar *PCC* dan mortar geopolimer *POFA* setelah berumur 28, dan 56 hari?
2. Bagaimana pengaruh posisi *transduser* terhadap hasil pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* pada mortar *PCC* dan mortar geopolimer *POFA*?
3. Bagaimana hubungan antara kerapatan mortar (pengujian *UPV*) dan kuat tekan (*compressive strenght*) dari mortar *PCC* dan mortar geopolimer *POFA*?

1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan dari penelitian ini:

1. Mengetahui perbandingan kerapatan antara mortar *PCC* dan mortar geopolimer *POFA* setelah berumur 28, dan 56 hari.
2. Mengetahui pengaruh posisi *transduser* terhadap hasil pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* pada mortar *PCC* dan mortar geopolimer *POFA*.
3. Mengetahui hubungan antara kerapatan mortar (pengujian *UPV*) dan kuat tekan (*compressive strenght*) dari mortar *PCC* dan mortar geopolimer *POFA*.

Manfaat dari Penelitian ini:

1. Dapat mengetahui perbandingan kerapatan antara mortar *PCC* dan mortar geopolimer *POFA* setelah berumur 28, dan 56 hari.
2. Dapat mengetahui pengaruh posisi *transduser* terhadap hasil pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* pada mortar *PCC* dan mortar geopolimer *POFA*.
3. Dapat mengetahui hubungan antara kerapatan mortar (pengujian *UPV*) dan kuat tekan (*compressive strenght*) dari mortar *PCC* dan mortar geopolimer *POFA*.

1.4 Batasan Penelitian

Batasan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Produksi abu sawit *POFA (palm oil fuel ash)* berasal dari PT. Rambah Sawit Mandiri Rokan Hulu.
2. Penelitian ini hanya akan membandingkan dua jenis mortar, yaitu mortar *PCC (Portland Cement Concrete)* dan mortar geopolimer *POFA (Palm Oil Fuel Ash)*.
3. Larutan activator yang di gunakan adalah gabungan dari larutan Natrium Hidroksida dengan (NaOH) 14M dan larutan Natrium Silika (Na₂SiO₃)
4. Pengujian kerapatan hanya akan dilakukan menggunakan metode *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)*, dan analisis akan difokuskan pada pengaruh posisi *transduser* dalam pengujian ini.
5. Hasil pengujian akan dianalisis pada dua waktu yang ditentukan, yaitu hari ke-28, dan hari ke-56 setelah proses pembuatan mortar.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Beberapa contoh penelitian terlebih dahulu yang juga melakukan penelitian tentang “Perbandingan Posisi *Transducer* Terhadap Nilai Kerapatan Mortar *PCC* Dan Mortar Geopolimer *POFA* Sebagai Parameter Kuat Tekan” tersebut antara lain sebagai berikut:

1. Dandachy dkk., (2024) dengan judul “Pengaruh Suhu Tinggi terhadap Kekuatan Tekan, *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)*, dan Sifat Transfer Mortar Geopolimer Berbasis Metakaolin”. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang dapat disimpulkan bahwa:

“Mortar geopolimer berbasis metakaolin memiliki ketahanan termal yang jauh lebih baik dibandingkan mortar *OPC* ketika dipaparkan pada suhu tinggi, baik dari segi kuat tekan, perubahan massa, struktur internal, maupun perilitas gas. Pada rentang suhu rendah hingga menengah (100–200 °C), kuat tekan mortar MK justru meningkat secara signifikan akibat proses geopolymerisasi lanjutan, densifikasi matriks, serta peningkatan keterikatan gel N-A-S-H yang menghasilkan struktur yang lebih padat. Bahkan, pada suhu 200 °C, kekuatan sisa mortar MK dapat mencapai sekitar 50 MPa, melampaui nilai awal tanpa pemanasan dan jauh melebihi performa mortar *OPC* pada kondisi yang sama. Namun pada suhu menengah (300–500 °C), peningkatan kuat tekan mulai melandai karena proses dehidrasi lanjutan dan awal pelemahan struktur, meskipun kekuatan mortar MK tetap lebih stabil dibanding mortar *OPC* yang mengalami degradasi cepat hingga kegagalan total pada 500–600 °C. Pada suhu tinggi (600–900 °C), kekuatan mortar MK mulai menurun akibat amorfisasi gel, pembentukan fase kristalin lemah, serta peningkatan mikroretak. Pengujian *UPV* memperlihatkan tren yang sejalan dengan kuat tekan dan menunjukkan korelasi polinomial yang kuat ($R^2 > 0,95$), sementara permeabilitas gas meningkat secara bertahap seiring suhu, tetapi nilai permeabilitas MK tetap lebih kecil dibanding *OPC* hingga 250–300 °C,

menandakan struktur internal yang lebih rapat dan tahan terhadap kerusakan termal”.

2. Musyafa dkk., (2023) dengan judul “Mortar Geopolimer Material Penyusun Mortar Baru Ramah Lingkungan”. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang dapat disimpulkan bahwa:

“Variasi rasio aktivator alkali $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ memberikan pengaruh signifikan terhadap perkembangan sifat mekanis mortar geopolimer berbahan dasar *fly ash*. Dari seluruh komposisi yang diuji, RUN-8 dengan rasio 2,85 terbukti menghasilkan kinerja paling optimal berdasarkan parameter kuat tekan, kuat tarik, kuat lentur, serta berat jenis. Nilai kuat tekan maksimum sebesar 26,46 MPa pada umur pengujian menunjukkan bahwa rasio aktivator tersebut mampu menghasilkan ikatan *geopolymerization* yang lebih sempurna, mencerminkan terbentuknya struktur matriks yang lebih rapat dan stabil. Berat jenis RUN-8 yang relatif rendah, yaitu 1.988,1 kg/m^3 , memperlihatkan efisiensi penggunaan material tanpa menurunkan kinerja mekanisnya. Selain itu, pengujian tarik memberikan nilai tertinggi sebesar 0,981 MPa, yang menunjukkan ketahanan mortar terhadap gaya tarik serta kualitas ikatan internal antar partikel. Pada pengujian lentur, RUN-8 kembali menunjukkan performa tertinggi baik pada posisi berdiri (0,337 MPa) maupun pada posisi tidur (0,280 MPa), yang mengindikasikan kemampuan material dalam menahan deformasi akibat pembebanan lentur”.

3. Espinosa dkk., (2023) dengan judul “Evaluasi Karakteristik Transmisi dan Atenuasi *Transducer* Ultrasonik Frekuensi Tinggi untuk Beton”. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang dapat disimpulkan bahwa:

“*Transducer* ultrasonik berfrekuensi tinggi, khususnya pada rentang 500 kHz hingga 1 MHz, memberikan kemampuan yang lebih baik dalam mendeteksi perubahan mikrostruktur beton dibandingkan *transducer* berfrekuensi rendah. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa peningkatan frekuensi menghasilkan resolusi yang lebih tinggi, namun diikuti oleh tingkat atenuasi yang lebih besar ketika gelombang merambat melalui beton. *Transducer* 500 kHz terbukti memberikan keseimbangan terbaik antara daya tembus dan sensitivitas, sehingga cocok untuk aplikasi nondestruktif pada beton

berkepadatan tinggi. Penelitian ini menegaskan bahwa pemilihan frekuensi *transducer* sangat menentukan kualitas data *UPV*, baik untuk deteksi retak halus, karakterisasi material, maupun evaluasi homogenitas beton”.

4. Shopiana & Sutandar, (2023) dengan judul “Korelasi Kekuatan Tekan Beton Menggunakan Metode Uji Hammer, Kecepatan Pulsa Ultrasonik dan Uji Kompresi”. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang dapat disimpulkan bahwa:

“Terdapat hubungan yang kuat antara metode uji nondestruktif dengan kuat tekan beton aktual sehingga kedua metode tersebut dapat digunakan sebagai alternatif ketika uji destruktif tidak memungkinkan dilakukan. Analisis regresi menghasilkan hubungan antara kecepatan rambat gelombang *UPV* dan kuat tekan beton dengan persamaan $y = 8.67e^{-0003x}$ dan koefisien determinasi 89,88%, menandakan bahwa *UPV* mampu merepresentasikan kondisi internal beton dengan tingkat keandalan tinggi. Sementara itu, hubungan antara hammer test dan *compression* test menghasilkan persamaan $y = 1.98e^{0.0812x}$ dengan koefisien determinasi 97,73%, serta persamaan gabungan lain dengan koefisien determinasi 98,18%, yang menunjukkan bahwa hammer test memiliki korelasi paling dekat dengan kuat tekan aktual. Evaluasi deviasi memperlihatkan bahwa selisih hasil hammer test terhadap uji tekan berada dalam rentang 2–7%, sehingga dianggap sangat layak sebagai metode estimasi kuat tekan di lapangan. Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa baik *UPV* maupun hammer test dapat digunakan untuk memprediksi kuat tekan beton secara efektif, dengan hammer test menunjukkan kecocokan hasil yang lebih tinggi, sehingga keduanya dapat memperkuat penerapan metode nondestruktif pada pemeriksaan struktur beton eksisting”.

5. Setiawati dkk., (2022) dengan judul “Variasi Molaritas NaOH Dan Alkali Aktivator Beton Geopolimer”. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang dapat disimpulkan bahwa:

“Penggunaan variasi molaritas NaOH dan rasio alkali aktivator memberikan pengaruh langsung terhadap kuat tekan dan tingkat *workability* beton geopolimer. Semakin tinggi molaritas NaOH yang digunakan, semakin besar

kuat tekan yang dihasilkan, karena peningkatan molaritas mempercepat reaksi polimerisasi dan menghasilkan matriks geopolimer yang lebih padat dan kuat. Sebaliknya, semakin besar rasio Na_2SiO_3 terhadap NaOH , kuat tekan justru menurun akibat larutan menjadi semakin kental sehingga mengurangi homogenitas campuran serta menurunkan *workability*. Variasi rasio 3,5:1 bahkan menghasilkan adukan yang terlalu kental dan sulit dikerjakan sehingga tidak layak dilanjutkan ke tahap pengujian mekanis. Dari seluruh kombinasi yang diuji, campuran terbaik diperoleh pada NaOH 14M dengan rasio Na_2SiO_3 : NaOH = 2,5 : 1, yang menghasilkan kuat tekan karakteristik tertinggi sebesar 28,98 MPa. Temuan ini menegaskan bahwa pengaturan molaritas dan rasio alkali aktivator yang tepat merupakan faktor kunci dalam merancang beton geopolimer yang tidak hanya memiliki kekuatan mekanis tinggi tetapi juga menjadi alternatif ramah lingkungan yang dapat mengurangi ketergantungan terhadap penggunaan semen *portland*".

6. Hong dkk., (2021) dengan judul "Korelasi antara Kekuatan Tekan dan *UPV* (*Ultrasonic Pulse Velocity*) Mortar Semen yang Dicampur dengan Silica Fume: Analisis Mikrostruktur dan Kinetika Hidrasi". Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang dapat disimpulkan bahwa: Penambahan silica fume (SF) pada mortar semen memberikan pengaruh signifikan terhadap perkembangan kekuatan tekan, struktur mikro, porositas, dan hubungan empiris dengan kecepatan rambat gelombang ultrasonik (*UPV*). Semakin tinggi persentase penggantian SF, semakin besar penurunan porositas dan semakin halus distribusi ukuran pori akibat kombinasi efek pengisian (*filler effect*) dan reaksi pozzolan yang semakin aktif pada umur lanjut. Kondisi tersebut menghasilkan mikrostruktur yang lebih rapat sehingga meningkatkan kekuatan tekan secara konsisten pada seluruh umur pengujian, dengan peningkatan paling menonjol pada umur 28 hari. Meskipun *UPV* meningkat seiring perbaikan struktur mikro, hubungannya dengan kadar SF bersifat nonlinier karena dipengaruhi oleh densitas material dan distribusi ukuran pori.
7. Jalil Bangun dkk., (2021) dengan judul "Pengaruh Variasi Molar Pada Kuat Tekan Mortar Geopolimer Berbahan Dasar *Fly Ash* Pltu Pangkalan Susu".

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang dapat disimpulkan bahwa:

“Penggunaan variasi molaritas larutan aktivator dan metode perawatan memiliki pengaruh signifikan terhadap perkembangan kuat tekan mortar geopolimer. Secara umum, mortar geopolimer dengan curing pada suhu ruangan tanpa *plastic covering* menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan metode perawatan lain pada seluruh variasi molaritas, sehingga metode *plastic covering* tidak memberikan peningkatan kinerja secara berarti. Peningkatan molaritas NaOH juga terbukti memberikan pengaruh positif terhadap kekuatan material, di mana nilai kuat tekan meningkat seiring meningkatnya konsentrasi molar. Performa terbaik diperoleh pada campuran dengan molaritas 10M, khususnya pada perawatan suhu ruangan, yang menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 32,9 MPa pada umur 28 hari, jauh melampaui performa variasi 6M dan 8M. Temuan ini memperlihatkan bahwa konsentrasi aktivator yang lebih tinggi mampu mempercepat reaksi geopolimerisasi dan membentuk matriks ikatan yang lebih padat, meskipun berpotensi menurunkan workability karena campuran menjadi lebih kental”.

8. Herlambang & Setyono, (2020) dengan judul “Perbandingan Hasil Uji Kecepatan Pulsa Ultrasonik Dengan dan Tanpa Menggunakan Transducer Stabilizer”. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang dapat disimpulkan bahwa:

“Penggunaan *transducer* stabilizer mampu meningkatkan akurasi pengukuran pada uji *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* secara signifikan. Ketidakstabilan posisi *transducer* yang umumnya terjadi pada pengujian manual, terutama pada posisi *overhead*, menyebabkan tingginya ketidakpastian hasil pembacaan. Setelah penerapan stabilizer, tingkat ketidakpastian relatif pada pengukuran kecepatan gelombang dan waktu rambat menurun drastis dari kisaran 4%–17% menjadi 0,1%–0,4%, yang menunjukkan peningkatan akurasi hingga lebih dari 99%. Hasil ini menegaskan bahwa stabilizer efektif dalam menjaga konsistensi posisi *transducer* dan sangat membantu meningkatkan keandalan pengukuran *UPV*,

sehingga layak digunakan untuk keperluan inspeksi beton secara non-destruktif’.

9. Hmood & Artikel, (2020) dengan judul “Penilaian Kekuatan Tekan Beton Menggunakan *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)*”. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang dapat disimpulkan bahwa:
“*Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* merupakan metode non-destruktif yang efektif dan sensitif untuk menilai kekuatan tekan beton. Dari lebih dari 150 sampel kubus beton yang diuji pada usia 7, 28, dan 56 hari, diperoleh hubungan yang konsisten antara peningkatan kecepatan gelombang ultrasonik dan bertambahnya kekuatan tekan. Baik metode transmisi langsung (*DUPV*) maupun transmisi tidak langsung (*SUPV*) menghasilkan korelasi yang tinggi terhadap kekuatan tekan, dengan nilai koefisien determinasi (R^2) mencapai lebih dari 0,90 pada beberapa umur beton. Perbedaan antara hasil uji destruktif dan non-destruktif semakin kecil pada umur 28 hari, menunjukkan kestabilan hubungan *UPV* pada umur beton yang lebih matang. Selain itu, pengaruh densitas beton sangat nyata, di mana sampel dengan densitas lebih tinggi menunjukkan kecepatan rambat gelombang dan kekuatan tekan yang lebih besar”.
10. Estévez dkk., (2020) dengan judul “*Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* - Kekuatan Tekan Hubungan untuk Mortar Semen *Portland* yang Dikeringkan pada Kondisi Berbeda. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang dapat disimpulkan bahwa:
“Penambahan silica fume (SF) pada campuran mortar memberikan peningkatan yang signifikan terhadap kinerja mekanis dan perubahan karakteristik mikrostrukturnya. Silica fume berperan sebagai bahan pozzolan yang mampu mempercepat pembentukan produk hidrasi serta memperhalus distribusi ukuran pori, sehingga menghasilkan struktur mortar yang lebih rapat dan kuat dibandingkan mortar tanpa SF. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin tinggi kandungan silica fume, semakin besar pengurangan porositas dan semakin meningkat kekuatan tekan akibat densifikasi matriks semen. Selain itu, hubungan antara kekuatan tekan dan sifat mikrostruktural

terbukti kuat, menunjukkan bahwa modifikasi beton dengan SF memberikan keuntungan baik dari aspek durabilitas maupun kekuatan mekanis”.

2.2 Keaslian Penelitian

Dalam menilai keaslian penelitian sebelumnya yang dijadikan pembandingan pada penelitian ini, beberapa faktor yang diperhatikan sebagai berikut:

1. Menggunakan 12 sampel uji untuk umur 28, dan 56 hari.
2. Menggunakan substitusi *POFA* sebanyak 80% sebagai pengganti semen *PCC*.

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Mortar

Mortar merupakan campuran antara perekat, agregat halus (pasir), dan air yang menghasilkan material dengan sifat *plastis* dan mampu mengisi celah secara merata (*workability*). Dalam konstruksi, mortar berfungsi sebagai bonding material atau perekat antar bata dan elemen pasangan, sebagai gap filler untuk menutup rongga kecil, serta sebagai lapisan perata yang memberikan stabilitas dan keseragaman permukaan. Mortar berperan sebagai komponen penting yang menyatukan elemen bangunan, menjaga keseragaman ukuran pasangan, meningkatkan kekuatan ikatan, serta menambah ketahanan permukaan terhadap cuaca, kelembapan, dan pengaruh mekanis. Kombinasi kekuatan tekan, daya rekat, dan ketahanan lingkungan menjadikan mortar sangat menentukan mutu dan umur layanan suatu konstruksi.

3.1.1 Jenis Mortar

Ada beberapa jenis mortar berdasarkan bahan ikatan yang di gunakan:

1. Mortar Lumpur

Mortar lumpur dibuat dari campuran air, tanah liat/ lumpur, dan agregat halus. Perbandingan campuran bahan-bahan tersebut harus tepat untuk memperoleh adukan kelecakan baik dan mendapatkan mortar yang baik pula. Terlalu sedikit pasir menghasilkan mortar yang retak-retak setelah mengeras sebagai akibat besarnya susutan pengeringan. Terlalu banyak pasir menyebabkan adukan kurang dapat melekat dengan baik. Mortar lumpur digunakan untuk bahan dinding tembok / bahan tungku api di pedesaan.

2. Mortar Kapur

Mortar Kapur dibuat dari beberapa campuran yaitu pasir, kapur, semen merah dan air. Kapur dan pasir mula-mula dicampur dalam keadaan kering kemudian ditambahkan air. Pada saat proses pelekatan, kapur mengalami susutan sehingga jumlah pasir yang umum digunakan menjadi tiga kali

volume kapur. Mortar kapur dipakai untuk perekat bata merah pada dinding tembok bata, atau perekat antar batu pada pasangan batu.

3. Mortar Semen

Mortar Semen dibuat dari campuran air, semen *Portland*, dan agregat halus dalam perbandingan campuran yang tepat. Perbandingannya antara volume semen dan volume agregat halus berkisar antara 1 : 2 dan 1 : 8. Mortar ini lebih besar dari mortar lumpur dan mortar kapur, oleh karena itu biasa dipakai untuk tembok, pilar, kolom, atau bangunan lain yang menahan beban.

4. Mortar Khusus

Mortar khusus ini dibuat dengan menambahkan bahan khusus pada mortar 1 dan 3 diatas dengan tujuan tertentu. Mortar ringan diperoleh dengan menambahkan *asbestos fibres*, *jute fibres* (serat alam), abu terbang (*fly ash*), butir-butir kayu, serbuk gergaji kayu, serbuk kaca dan lainnya. Mortar khusus dipakai dengan tujuan dan maksud tertentu.

3.1.2 Tipe Mortar

Bedasarkan ASTM C 270, 2007 *Standart Specification for Mortar for Unit Masonry*, mortar untuk adukan pasangan dapat dibedakan atas 5 tipe, yaitu:

1. Mortar Tipe M

Mortar tipe M yaitu campuran yang sangat tinggi yang direkomendasikan untuk pasangan bertulang maupun tidak bertulang yang akan memikul beban tekan yang besar.

2. Mortar Tipe S

Mortar tipe S direkomendasikan untuk struktur yang memikul beban tekan normal tetapi dengan kuat lekat lentur yang diperlukan untuk menahan beban lateral besar yang berasal dari tekanan tanah, angin dan beban gempa. Mortar tipe S juga direkomendasikan untuk struktur pada atau dibawah tanah karena keawetannya yang tinggi, seperti yang selalu berkaitan dengan tanah yaitu dinding penahan tanah, pondasi, perkerasan, saluran pembuangan dan mainhole.

3. Mortar Tipe N

Tipe N adalah mortar yang umum digunakan pada konstruksi diatas tanah. Mortar ini direkomendasikan untuk dinding penahan beban interior dan eksterior. Mortar ini memiliki kekuatan sedang yang memberikan kesesuaian paling baik antara kuat tekan dan kuat lentur, *workability*, dan segi ekonomi yang direkomendasikan untuk aplikasi konstruksi pasangan umumnya.

4. Mortar Tipe O

Mortar ini merupakan tipe mortar dengan kandungan kapur yang tinggi dan kuat tekannya rendah. Mortar tipe O direkomendasikan untuk dinding interior maupun eksterior yang tidak menahan beban struktur, yang tidak menjadi kaku dalam keadaan lembab dan jenuh. Mortar tipe ini memiliki *workabilitas* yang baik dan biaya yang ekonomis dan sering digunakan unruk pekerjaan setempat.

5. Mortar Tipe K

Mortar tipe K memiliki kuat tekan dan kuat lentur yang sangat rendah. Mortar tipe K jarang digunakan untuk konstruksi baru, dan direkomendasikan dalam ASTM C 270, 2007 hanya untuk konstruksi bangunan lama yang pada umumnya menggunakan mortar kapur.

3.1.3 Komponen Utama Mortar

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

1. Bahan Pengikat

Bahan pengikat utama pada mortar adalah semen *portland*, semen *portland* berfungsi sebagai komponen paling penting dalam mengikat agregat halus (pasir) dan air menjadi satu massa yang kuat dan padat. Semen bereaksi dengan air melalui proses hidrasi, sehingga menghasilkan pasta yang mampu mengeras dan memberikan kekuatan tekan serta daya rekat pada mortar. Proses ini menghasilkan ikatan yang kuat antara partikel penyusun mortar, sehingga mortar mampu menyalurkan beban dan memberikan kestabilan pada elemen bangunan. Kualitas dan jenis semen

portland yang digunakan sangat berpengaruh terhadap kuat tekan, daya rekat, serta ketahanan mortar terhadap pengaruh lingkungan.

Semen Portland mengandung beberapa senyawa kimia utama yang berperan penting terhadap sifat dan kinerjanya, yaitu kalsium oksida (CaO) sebagai pembentuk kekuatan utama, silikon dioksida (SiO_2) yang berpengaruh pada kekuatan jangka panjang, aluminium oksida (Al_2O_3) yang mempercepat waktu ikat awal, serta besi oksida (Fe_2O_3) yang memberi warna dan membantu proses pembakaran klinker. Selain itu, semen Portland juga mengandung magnesium oksida (MgO) dalam jumlah terbatas, sulfur trioksida (SO_3) untuk mengontrol waktu ikat melalui penambahan gips, serta alkali seperti natrium oksida (Na_2O) dan kalium oksida (K_2O) yang kadarnya harus dibatasi agar tidak menimbulkan reaksi merugikan.

2. Agregat Halus (Pasir)

Agregat halus atau pasir merupakan komponen dengan proporsi terbesar dalam mortar dan berperan penting sebagai material pengisi yang membentuk volume campuran, mengurangi potensi penyusutan, serta meningkatkan stabilitas dan keterkerjaan (*workability*) mortar.

Menurut SNI-03-2834, 2002, kekasaran pasir dibedakan menjadi 4 kelompok menurut gradasinya, yaitu pasir kasar, pasir sedang, pasir agak halus, pasir halus. Batas-batas gradasi untuk agregat halus (pasir) dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Batas-Batas Gradasi Untuk Agregat Halus (Pasir)

TABEL GRADASI AGREGAT HALUS (SNI 03-2834-2000 DAN ASTM C-33)

Ukuran Saringan		% Lolos Saringan/Ayakan			
		SNI 03-2834-2000			
SNI	ASTM	Pasir Kasar	Pasir Sedang	Pasir Agak Halus	Pasir Halus
		Gradasi No. 1	Gradasi No. 2	Gradasi No. 3	Gradasi No. 4
9,6	3/8 in	100 - 100	100 - 100	100 - 100	100 - 100
4,8	no 4	90 - 100	90 - 100	90 - 100	95 - 100
2,4	no 8	60 - 95	75 - 100	85 - 100	95 - 100
1,2	no 16	30 - 70	55 - 90	75 - 100	90 - 100
0,6	no 30	15 - 34	35 - 59	60 - 79	80 - 100
0,3	no 50	5 - 20	8 - 30	12 - 40	15 - 50
0,15	no 100	0 - 10	0 - 10	0 - 10	0 - 15

Sumber : SNI 03-2834-2000 DAN ASTM C-33

Tabel 3.2 Karakteristik Pengujian Agregat Halus (Pasir)

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Standar Acuan
1	Analisa Saringan	1,5-3,8	ASTM C 136; SNI 03-1968-1990
2	Kadar Air (%)	3-5%	ASTM C566; SNI 03-1971-1990
3	Berat Jenis (gr/cm ³)	2,58-7	ASTM C128; SNI 03-1970-1990
4	Berat Volume (gr/cm ³)	1,4-1,9	ASTM C29; SNI 03-4804-1998
5	Kadar Lumpur (%)	< 5%	ASTM C142; SNI 03-2461-2002

Sumber : Sni Dan Astm Acuan

3. Air

Air merupakan salah satu komponen utama dalam mortar yang memiliki peran sangat penting dalam proses pencampuran, pengikatan, dan pengerasan. Air berfungsi sebagai pemicu reaksi hidrasi antara semen dan air yang menghasilkan senyawa pengikat, terutama *calcium silicate hydrate* (C-S-H), yang berkontribusi langsung terhadap perkembangan kuat tekan mortar. Kualitas air yang digunakan sebaiknya air bersih dan bebas dari minyak, asam, garam, atau zat organik, karena air yang terkontaminasi dapat mengganggu proses pengikatan dan menurunkan mutu mortar.

3.2 Mortar *PCC (Portland Composite Cement)*

Mortar *PCC (Portland Composite Cement)* merupakan mortar yang memanfaatkan semen *Portland* komposit sebagai bahan pengikat utama, di mana komposisinya menggabungkan klinker dengan bahan aditif mineral untuk meningkatkan kinerja material. Penggunaan *PCC* memberikan sejumlah keunggulan teknis, antara lain kemudahan dalam proses aplikasi, peningkatan ketahanan terhadap retak susut, serta durabilitas yang lebih tinggi akibat terjadinya reaksi pozzolanik yang mampu menghasilkan struktur mikro yang lebih rapat dan stabil. Dengan karakteristik tersebut, mortar *PCC* banyak diaplikasikan pada pekerjaan pasangan bata, plesteran, dan acian karena mampu menghasilkan daya ikat yang konsisten sekaligus memberikan kualitas permukaan akhir yang lebih halus dan homogen.

Mortar yang menggunakan semen *Portland Composite Cement (PCC)* memiliki beberapa sifat utama yang membedakannya dari mortar semen biasa (*OPC*), terutama dalam hal kemudahan aplikasi dan ketahanan jangka panjang. Berikut adalah sifat utama mortar *PCC* :

1. Daya Ikat Kuat dan Tekstur Halus: Mortar *PCC* memiliki butiran yang lebih halus, sehingga menghasilkan daya rekat yang kuat dan permukaan yang lebih halus. Hal ini membuatnya sangat ideal untuk pekerjaan finishing seperti plesteran dan acian dinding.
2. Panas Hidrasi Rendah: *PCC* menghasilkan panas hidrasi yang lebih rendah selama proses pengerasan dibandingkan semen *OPC*. Sifat ini mengurangi risiko terjadinya retak rambut (retak susut) pada permukaan plesteran.
3. Ketahanan Terhadap Lingkungan Agresif: Campuran bahan pozzolan dan bahan tambahan lainnya pada *PCC* membuat mortar lebih tahan terhadap serangan sulfat dan asam, serta cocok untuk penggunaan di lingkungan dengan kadar air laut yang tinggi.
4. Waktu Pengerasan Lebih Lambat: Dibandingkan dengan *OPC*, mortar *PCC* umumnya memiliki waktu ikat (*setting time*) yang lebih lama. Ini memberikan waktu pengerjaan yang lebih panjang bagi tukang, namun kekuatan awalnya lebih rendah daripada semen tipe I.

5. Kemudahan Pengerjaan (*Workability*): Sifat plastisitas yang baik membuat mortar *PCC* lebih mudah diaduk, disebar, dan diratakan pada unit bangunan seperti bata merah atau bata ringan.

3.3 Mortar Geopolimer

Mortar geopolimer adalah mortar yang menggunakan bahan pengikat anorganik tanpa semen yang dihasilkan melalui proses aktivasi alkali terhadap material aluminosilikat, seperti *fly ash*, *slag*, atau *POFA* (*Palm Oil Fuel Ash*). Mortar ini dikenal sebagai alternatif yang lebih berkelanjutan karena proses pembuatannya menghasilkan emisi karbon yang jauh lebih rendah dibanding mortar berbasis semen. Mortar geopolimer memiliki sejumlah keunggulan, antara lain kekuatan tekan yang tinggi, ketahanan yang baik terhadap zat kimia agresif, stabilitas pada suhu tinggi, serta memiliki kemampuan yang baik dalam menahan masuknya air atau cairan. Karakteristik tersebut membuat mortar ini cocok digunakan pada konstruksi yang membutuhkan daya tahan tinggi, terutama pada lingkungan dengan kondisi ekstrem atau paparan bahan korosif. Selain itu, pemanfaatan limbah industri sebagai bahan baku, seperti *POFA*, mendukung penerapan prinsip konstruksi berkelanjutan dan pengurangan dampak lingkungan dari sektor bangunan.

3.3.1 Bahan Penyusun Mortar Geopolimer

Bahan yang digunakan dalam komposisi Mortar Geopolimer pada penelitian ini meliputi:

1. Abu Sawit (*Palm Oil Fuel Ash*)

Abu sawit atau *Palm Oil Fuel Ash* (*POFA*) adalah material berbentuk serbuk halus yang dihasilkan dari pembakaran serat dan cangkang kelapa sawit pada pabrik kelapa sawit. *POFA* mengandung senyawa silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan oksida mineral lainnya yang bersifat *pozzolanik*, sehingga dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida untuk membentuk struktur pengikat yang lebih padat saat digunakan sebagai bahan tambahan pada mortar atau beton. Kandungan silika yang tinggi membuat *POFA* mampu meningkatkan durabilitas, menurunkan porositas, dan mengurangi panas hidrasi pada campuran semen, sehingga *POFA* termasuk salah satu limbah biomassa yang efektif sebagai bahan pengganti sebagian semen dalam aplikasi mortar dan beton.

Tabel 3.3 Komposisi Kimia Dari Abu Sawit

Parameter	Persen (%) Berat
Silika dioksida (SiO_2)	43,0
Aluminium Oksida (Al_2O_3)	6,58
Feroksida (Fe_2O_3)	1,05
Kalsium Oksida (CaO)	6,50
Potassium Oksida (K_2O)	2,72
Fosfor Pentaoksida (P_2O_5)	0,340
Kadar Air	1,37

Sumber: Badan Riset dan Standar Industri

2. Agregat Halus (Pasir)

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. Modulus kehalusan butir harus berada di antara 2,3 dan 3,1.
4. 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.
5. Kandungan arang dan lignit dalam beton tidak boleh lebih dari 0,5%, sedangkan untuk jenis beton lainnya maksimum 1%.
6. Kadar gumpalan tanah liat dan partikel yang mudah diuraikan harus tidak lebih dari 3%.
7. 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.

8. Harus tidak reaktif terhadap alkali semen pada beton yang terpapar air atau lembap, dengan penggunaan natrium oksida tidak boleh lebih dari 0,6%.

3. Larutan Alkali Aktivator

Larutan alkali aktivator adalah senyawa kimia bersifat basa yang digunakan sebagai bahan pencampur dalam pembuatan geopolimer. Dalam penelitian ini, larutan alkali terdiri dari kombinasi Sodium Hidroksida (NaOH), Natrium Silikat (Na_2SiO_3), dan *Superplasticizer*. Larutan ini berperan penting dalam membentuk gel pengikat baru berupa aluminosilikat natrium (N-A-S-H: *Sodium Alumino Silicate Hydrate*) yang memberikan kekuatan, kekakuan, dan kestabilan pada mortar atau beton berbasis geopolimer.

Campuran Larutan Alkali Aktivator pada penelitian ini meliputi:

a) NaOH (Sodium Hidroksida)

Sodium Hidroksida (NaOH) adalah senyawa kimia yang bersifat basa kuat yang digunakan sebagai aktivator alkali dalam pembuatan geopolimer berbasis abu sawit (*POFA*). NaOH berfungsi untuk melarutkan senyawa silika dan alumina dalam abu sawit, sehingga memicu reaksi *geopolimerisasi* dan membentuk gel pengikat yang memberikan kekuatan pada mortar atau beton geopolimer. Penggunaan NaOH penting untuk memastikan material geopolimer memiliki struktur yang padat, tahan lama, dan stabil secara mekanis.

b) Na_2SiO_3 (Natrium Silikat)

Natrium silikat (Na_2SiO_3) adalah senyawa anorganik berbentuk larutan kental atau padatan glasial yang digunakan sebagai aktivator alkali dalam pembuatan geopolimer berbahan dasar abu sawit (*POFA*). Bersama Sodium Hidroksida (NaOH), Na_2SiO_3 melarutkan silika dan alumina dari pozzolan, memicu polimerisasi membentuk gel pengikat *aluminosilikat natrium* (N-A-S-H). Kehadirannya meningkatkan distribusi material, memperkuat struktur, menurunkan porositas, dan meningkatkan ketahanan kimia serta durabilitas geopolimer.

c) *Superplasticizer*

Superplasticizer merupakan bahan tambahan kimia yang dapat digunakan untuk mengurangi kebutuhan air sekaligus meningkatkan kemudahan

pengerjaan (*workability*) pada campuran mortar atau beton. Pada penelitian ini, bahan tambahan tersebut berupa *superplasticizer* jenis Sikament-NN, dengan dosis 1%–2% dari berat binder. Penggunaan Superplastisizer membuat campuran lebih mudah dicampur, dituangkan, dan diratakan tanpa menurunkan kekuatan dan durabilitas material.

4. Semen *PCC* (*Portland Composite Cement*)

Semen *Portland Composite Cement* (*PCC*) dapat dimanfaatkan sebagai substitusi sebagian bahan dalam mortar geopolimer berbasis abu sawit (*POFA*) untuk meningkatkan reaktivitas awal dan memperbaiki sifat mekanis campuran. Penggantian *PCC* dalam jumlah terbatas memberikan kontribusi melalui proses hidrasi awal yang membentuk kalsium silikat hidrat (C–S–H), berfungsi sebagai fase pengikat tambahan yang melengkapi gel geopolimer aluminosilikat. Kombinasi hidrasi *PCC* dan geopolimerisasi *POFA* menghasilkan struktur mikro lebih padat, sehingga meningkatkan kekuatan awal dan menurunkan porositas mortar.

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

Tabel 3.4 Komposisi Kimia dan Fisika *Portland Composite Cement*

Komposisi PCC	(%)
Al ₂ O ₃	6,00
CaO	63,00
SiO ₂	22,00
Fe ₂ O ₃	2,50
Kehalusan	4,00
Berat isi (Kg/1)	1,29

Sumber: (Nugraha & Antoni, 2007)

3.4 Waktu Perawatan

Perawatan selama 28 hari digunakan sebagai acuan standar karena periode tersebut merepresentasikan umur pengujian yang umum dipakai dalam evaluasi kuat tekan dan karakteristik mekanis material berbasis semen. Perawatan hingga 56 hari memberikan gambaran yang lebih luas mengenai peningkatan kekuatan akibat

reaksi hidrasi lanjutan dan proses pozzolanik (jika material mengandung bahan tambahan reaktif). Pada umur tersebut, perkembangan struktur mikro umumnya menjadi lebih stabil dan densifikasi matriks mortar lebih signifikan, sehingga hasil pengujian dapat menggambarkan perilaku material secara lebih komprehensif.

3.5 *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)*

Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) adalah metode non-destruktif yang digunakan untuk menilai kualitas, homogenitas, dan kekuatan material padat, khususnya mortar. Metode ini bekerja dengan mengukur kecepatan gelombang ultrasonik yang merambat melalui material. Semakin padat dan homogen mortar, semakin cepat gelombang ultrasonik merambat. *UPV* memungkinkan pemeriksaan kondisi mortar tanpa merusak struktur, sehingga sangat berguna untuk menilai kualitas mortar yang sudah diaplikasikan maupun mortar baru sebelum digunakan dalam konstruksi.

Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* dapat digunakan untuk menilai kualitas beton dengan mengukur waktu tempuh gelombang ultrasonik yang melintasi material. Dari pengukuran ini, dapat dilakukan estimasi kekuatan tekan beton. Keunggulan metode ini terletak pada kemampuannya untuk mendeteksi perubahan mikrostruktur beton, seperti adanya retakan atau rongga internal, yang dapat mempengaruhi daya tahan dan performa jangka panjang struktur.



Gambar 3.1 Alat UPV Tester Type C369N

Alat ini dirancang sesuai standar global untuk pengujian beton non-destruktif dengan mengacu pada ASTM C597. Adapun beberapa komponen dan fungsi alat UPV Tester Type C369N diantaranya sebagai berikut:

1. Unit Pembaca Utama (*Read-Out Unit*)

2. Sepasang *Transduser* / Probe (55 kHz)
3. Batang Silinder Kalibrasi (*Calibration Rod* 42,5 μ s)
4. Pasta Kontak Akustik (*Couplant Gel/Paste*)
5. Koper Pelindung Jinjing (*Anti-Shock Case*)

Setiap Komponen memiliki masing-masing fungsi diantaranya sebagai berikut:

1. *Read Out Unit* pada *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* Tester Type C369N merupakan unit utama yang berfungsi mengendalikan proses pengujian, mulai dari mengirim pulsa ultrasonik melalui *transduser* pemancar, menerima sinyal dari *transduser* penerima, hingga mengolah data waktu tempuh gelombang (*transit time*) menjadi nilai kecepatan rambat gelombang ultrasonik (*UPV*). Nilai tersebut digunakan untuk mengevaluasi kualitas mortar atau beton, seperti homogenitas material, keberadaan retak atau rongga, serta sebagai indikator mutu material secara tidak merusak (*non-destructive testing*). Selain itu, *Read Out Unit* dilengkapi dengan layar LCD, memori penyimpanan data, fitur kalibrasi, dan koneksi Mini USB untuk transfer data ke komputer.

UPV Tester Type C369N menggunakan catu daya 230 VAC dengan keluaran adaptor 12 V DC, 500 mA untuk mengisi baterai internal NiMH 4,8 V berkapasitas lebih dari 2000 mAh. Alat ini menghasilkan pulsa ultrasonik dengan amplitudo 250–1000 V menggunakan *transduser* frekuensi 55 kHz. Pabrikan tidak mencantumkan spesifikasi arus keluaran menuju *transduser* karena sistem bekerja menggunakan pulsa tegangan tinggi berdurasi singkat, sehingga parameter utama yang digunakan adalah amplitudo tegangan, bukan besarnya arus.

2. Sepasang *transduser* (probe) 55 kHz pada UPV Tester Type C369N terdiri atas *transduser* pemancar (*transmitter*) dan *transduser* penerima (*receiver*) yang berfungsi mengirim serta menerima gelombang ultrasonik selama proses pengujian. *Transduser* pemancar mengubah sinyal listrik menjadi gelombang ultrasonik yang merambat melalui benda uji, sedangkan *transduser* penerima menangkap gelombang yang telah melewati material dan mengubahnya kembali menjadi sinyal listrik untuk diolah oleh *Read Out Unit*. Frekuensi kerja 55 kHz merupakan frekuensi standar yang sesuai untuk pengujian beton dan mortar karena mampu memberikan keseimbangan antara daya tembus

gelombang dan ketelitian pengukuran. Kinerja *transduser* ini sangat menentukan keakuratan nilai waktu tempuh gelombang (*transit time*) dan kecepatan rambat ultrasonik (*UPV*) yang digunakan untuk menilai kualitas, homogenitas, serta mendeteksi adanya retak atau rongga pada material.

3. Batang silinder kalibrasi (*Calibration Rod*) 42,5 μs merupakan aksesoris standar pada UPV Tester Type C369N yang digunakan untuk melakukan kalibrasi alat sebelum pengujian. Batang ini memiliki waktu rambat gelombang ultrasonik yang telah ditetapkan sebesar 42,5 μs , sehingga berfungsi sebagai acuan untuk memeriksa keakuratan pembacaan waktu (*transit time*) pada *Read Out Unit*. Proses kalibrasi dilakukan dengan menempatkan kedua *transduser* pada ujung batang kalibrasi. Apabila nilai yang ditampilkan sesuai dengan nilai standar 42,5 μs , maka alat dinyatakan telah terkalibrasi dan siap digunakan. Penggunaan batang kalibrasi sangat penting untuk memastikan hasil pengukuran *UPV* tetap akurat, konsisten, dan sesuai dengan spesifikasi pabrikan.
4. Pasta kontak akustik (*Couplant Gel/Paste*) merupakan bahan perantara yang diaplikasikan pada permukaan *transduser* dan benda uji untuk menghilangkan celah udara di antara keduanya selama pengujian *UPV*. Keberadaan pasta ini memungkinkan gelombang ultrasonik merambat secara optimal dari *transduser* ke dalam material, sehingga kehilangan energi akibat pantulan dapat diminimalkan. Penggunaan *couplant* sangat penting untuk memperoleh nilai waktu tempuh (*transit time*) dan kecepatan rambat gelombang ultrasonik (*UPV*) yang akurat, terutama pada permukaan mortar atau beton yang kasar dan tidak rata.
5. Koper pelindung jinjing (*Anti-Shock Case*) merupakan wadah penyimpanan yang dirancang untuk melindungi seluruh komponen UPV Tester Type C369N dari benturan, getaran, debu, dan kelembapan selama penyimpanan maupun proses transportasi. Koper ini dilengkapi dengan bantalan pelindung yang menjaga posisi setiap komponen tetap aman sehingga mengurangi risiko kerusakan pada *Read Out Unit*, *transduser*, batang kalibrasi, dan aksesoris lainnya. Penggunaan *Anti-Shock Case* membantu mempertahankan kondisi alat agar tetap optimal serta memperpanjang umur pakainya.

3.5.1 Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)*

Prinsip kerja *UPV* didasarkan pada pengukuran waktu yang dibutuhkan gelombang ultrasonik untuk melewati suatu material. Gelombang ultrasonik akan bergerak lebih cepat melalui material yang padat, homogen, dan memiliki sedikit retakan atau pori. Sebaliknya, adanya retakan, rongga, atau kelembaban berlebih akan memperlambat perambatan gelombang. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan benda uji berbentuk balok berukuran (5cm × 5cm × 20 cm) yang diuji pada mesin *UPV* dengan kecepatan gelombang ultrasonik. Pengukuran *UPV* dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$V = \frac{L}{t} \dots\dots\dots (3.1)$$

Di mana :

V = kecepatan gelombang ultrasonik (m/s)

L = jarak antara pemancar dan penerima gelombang (m)

t = waktu tempuh gelombang (s)

Untuk mendukung proses evaluasi kualitas mortar yang diuji menggunakan metode *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)*, laporan ini menyajikan tabel interpretasi nilai kecepatan rambat gelombang sebagai acuan penilaian. Tabel tersebut mengacu Berdasarkan prinsip umum uji *UPV* yang digunakan sebagai rujukan dalam menentukan kategori kualitas material berdasarkan nilai *UPV*, sehingga hasil pengujian dapat dianalisis secara sistematis dan objektif.

Tabel 3.5 Kriteria Penilaian Pengujian Dengan Gelombang

Hasil kecepatan (m/s)	Kondisi beton
4500	Kualitas Sangat Baik / Sangat Padat (<i>Excelet</i>)
3500 - 4500	Kualitas Baik / Diduga Ada Rongga (<i>Good</i>)
3000 - 3500	Kualitas Sedang (<i>Medium</i>)
< 3000	Kualitas Diragukan / Kemungkinan Besar Ada Keroposan atau Retak (<i>Doubtfull</i>)

Sumber : berdasarkan BS 1881 : Part 203 : 1986.

3.5.2 Hubungan *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* Dengan Kerapatan

Kerapatan mortar merupakan parameter fisik yang menunjukkan tingkat kepadatan struktur internal mortar setelah melalui proses pencampuran, pemadatan,

pengerasan, dan perawatan. Secara karakteristik, kerapatan ditentukan oleh susunan dan interaksi antar partikel penyusun mortar, yang meliputi pasta semen atau matriks geopolimer sebagai bahan pengikat, agregat halus sebagai pengisi, serta distribusi rongga atau pori di dalam struktur. Mortar dengan kerapatan tinggi umumnya memiliki jumlah dan ukuran pori yang lebih kecil serta struktur yang lebih rapat dan homogen, sehingga mampu menghantarkan gelombang ultrasonik dengan lebih cepat dibandingkan mortar yang berkerapatan rendah.

pengujian *UPV* dapat digunakan sebagai indikator tidak langsung untuk menilai kerapatan mortar. Meskipun *UPV* tidak mengukur kerapatan secara langsung seperti metode massa jenis, nilai kecepatan gelombang ultrasonik yang tinggi mencerminkan struktur mortar yang lebih padat dan seragam.

Tabel 3.6 Kualitas Beton Berdasarkan Nilai *UPV*

Hasil kecepatan (m/s)	Kualitas Beton	Kerapatan Beton	Ket
4500	Sangat Baik	Sangat Padat	<i>Excellent</i>
3500 - 4500	Baik	Diduga Ada Rongga	<i>Good</i>
3000 - 3500	Sedang	Berongga	<i>Medium</i>
< 3000	Diragukan	Kemungkinan Keropos Atau Retak	<i>Doubtful</i>

Sumber : berdasarkan BS 1881 : Part 203 : 1986.

3.5.3 Hubungan *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* Dengan Kuat Tekan

Hubungan antara *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* dan kuat tekan mengikuti prinsip bahwa gelombang ultrasonik akan merambat lebih cepat pada material yang memiliki struktur internal padat dan porositas rendah. Mortar yang dicampur dengan proporsi semen dan pasir yang baik serta melalui proses pemadatan dan curing yang memadai cenderung membentuk mikrostruktur yang lebih homogen. Kondisi ini mengurangi rongga udara dan diskontinuitas di dalam material, sehingga jalur rambat gelombang menjadi lebih lancar. Dengan demikian, nilai *UPV* pada mortar dapat menjadi indikator densitas dan kualitas internalnya, yang pada akhirnya berkorelasi dengan kuat tekan.

Mortar dengan struktur mikro yang padat memiliki fase hidrasi semen (C–S–H gel) yang terbentuk lebih optimal dan distribusi pori yang lebih halus. Parameter tersebut berkontribusi langsung terhadap peningkatan kekuatan tekan karena mortar

dapat menahan beban dengan deformasi yang lebih kecil. Ketika gelombang ultrasonik melewati mortar yang demikian, hambatan yang dialami lebih rendah, sehingga *UPV* meningkat. Sebaliknya, mortar dengan retak mikro, *void* besar, atau ikatan antar partikel yang lemah akan menunjukkan penurunan kecepatan rambat karena gelombang harus melewati media tidak kontinu. Oleh sebab itu, *UPV* dapat digunakan sebagai prediktor tidak langsung terhadap kuat tekan mortar.

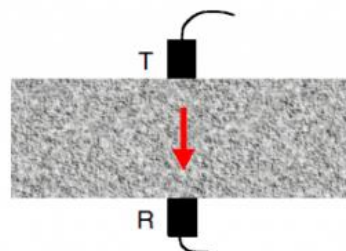
3.5.4 Posisi *Transduser* Pada Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)*

Pada pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)*, posisi *transduser* merujuk pada tata letak atau konfigurasi penempatan pasangan *transduser* pemancar (*transmitter*) dan penerima (*receiver*) pada permukaan benda uji untuk memungkinkan gelombang ultrasonik merambat melalui material secara optimal. Pemilihan posisi ini menentukan jalur rambat gelombang, sensitivitas deteksi cacat, serta akurasi estimasi kualitas material. Secara umum, konfigurasi penempatan *transduser* bertujuan menghasilkan jalur rambat yang paling representatif terhadap kondisi internal material.

Menurut ASTM C597-16 metode pengujian *UPV* terbagi ke dalam *direct*, *semi-direct*, dan *Indirect transmission* ketiganya merepresentasikan variasi lintasan gelombang, yang dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Posisi *direct*

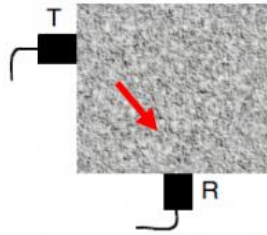
Posisi *direct* adalah konfigurasi di mana *transduser* pemancar dan penerima ditempatkan pada dua sisi berlawanan dari benda uji. Gelombang ultrasonik merambat menembus bagian dalam material secara lurus dari *transmitter* menuju *receiver*. Konfigurasi ini menghasilkan kualitas sinyal terbaik, amplitudo gelombang tertinggi, dan tingkat akurasi paling baik untuk menentukan kecepatan rambat.



Gambar 3.2 Posisi *Direct*

2. Posisi *semi-direct*

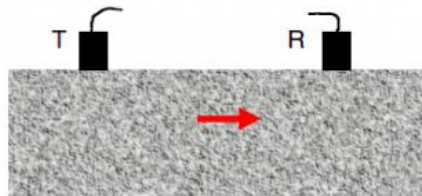
Posisi *semi-direct* menempatkan *transduser* pada dua bidang yang saling tegak lurus atau bertemu pada sudut tertentu. Gelombang ultrasonik merambat secara diagonal melalui material, sehingga kualitas sinyal berada di bawah posisi *direct* tetapi masih lebih baik dibandingkan metode *Indirect*. Konfigurasi ini digunakan ketika akses ke sisi berlawanan benda uji tidak memungkinkan, seperti pada struktur dinding atau balok yang hanya dapat dijangkau sebagian.



Gambar 3.3 Posisi *Semi-Direct*

3. Posisi *Indirect*

Posisi *Indirect (surface transmission)* menempatkan *transmitter* dan *receiver* pada permukaan yang sama dari benda uji. Gelombang ultrasonik merambat sepanjang lapisan permukaan material, sehingga hanya memberikan gambaran kondisi di dekat permukaan, bukan seluruh bagian inti material.



Gambar 3.4 Posisi *Indirect*