

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Mortar

Mortar adalah bahan konstruksi yang umumnya digunakan sebagai bahan perekat, atau bahan pengisi pada sebuah bangunan. Mortar umumnya dibuat dengan mencampurkan tiga bahan utama yaitu air, agregat halus, dan bahan pengikat seperti semen. Pada proses pencampuran mortar, bahan pengikat akan bereaksi dengan air untuk merekatkan agregat halus misalnya pasir. Fungsi struktural mortar adalah menahan gaya tekan dan geser dan beban yang ditanggung sebuah bangunan. Sementara fungsi non-struktural mortar biasanya sebagai penutup celah pada bangunan untuk meningkatkan nilai estetika bangunan tersebut.

Mortar struktural dapat diklasifikasikan menjadi 5 kategori berdasarkan kegunaannya dan dengan syarat minimum kekuatan masing-masing kegunaan tersebut seperti yang dirangkum pada Tabel 2.1. (Sakir *et al.*, 2020)

Tabel 2.1 Persyaratan kekuatan untuk mortar struktural (Sakir *et al.*, 2020)

Kegunaan	Kekuatan Minimum pada Umur 28 Hari (MPa)
Pekerjaan pasangan bata (ASTM Type M)	17.2
Perbaikan struktural (EN Class R3)	25
Perbaikan beton	27.6
Produk semen yang diperkuat tipis	35
Perbaikan struktural (EN Class R4)	45

2.2 Agregat Halus

Berdasarkan SNI 2493:2011, agregat halus merupakan jenis agregat yang butirannya lolos saringan No. 4 (4,75 mm). Sebelum digunakan, agregat halus pada campuran mortar harus diuji untuk mengetahui distribusi ukuran butir agar memenuhi standar ASTM C33 seperti yang tercantum pada Tabel 2.2. Selain itu, berdasarkan ASTM C33 perlu diperhatikan bahwa nilai *Fineness Modulus* (FM) yang harus dipenuhi berkisar antara 2,3 – 3,1. Sehingga dapat dilanjutkan dengan pengujian *specific gravity* dan absorpsi sesuai ketentuan ASTM C128.

Tabel 2.2 Persen Lolos Agregat Halus (ASTM C33)

Saringan	Persen Lolos (%)
9,5 mm ($\frac{3}{8}$ -in.)	100
4,75 mm (No. 4)	95 - 100
2,36 mm (No. 8)	80 - 100
1,18 mm (No. 16)	50 - 85
600 μm (No. 30)	25 - 60
300 μm (No. 50)	5 - 30
150 μm (No. 100)	0 - 10

2.3 Pasir Halus Silika

Pasir halus silika adalah pasir halus hasil dari menghancurkan butiran pasir silika dalam penggiling hingga partikelnya cukup kecil untuk melalui saringan no. 325 (45 μm). Untuk dikategorikan sebagai pasir halus silika, pasir silika juga harus mengandung partikel halus silikon (SiO_2) 85-97%.

Pasir halus silika dapat diaplikasikan sebagai bahan pengisi (*filler*) pada agregat halus campuran mortar. Keuntungan dari penambahan pasir halus silika sebagai *filler*, antara lain: (Furlani *et al.*, 2024)

1. Meningkatkan kekuatan
2. Meningkatkan durabilitas dengan mengurangi permeabilitas, sehingga lebih tahan terhadap air, bahan kimia, dan juga karat.
3. Meningkatkan *workability*.
4. Meningkatkan kepadatan dan kerapatan mortar, sehingga meningkatkan berat jenis.

2.4 *Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBFS)

Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) adalah hasil samping dari pembakaran biji besi dalam tungku tanur gas dan dapat digunakan sebagai bahan pengganti semen pada pembuatan mortar atau beton. Proses pembuatan GGBFS juga mencakup pendinginan dengan cepat menggunakan semprotan air bertekanan tinggi hingga berbentuk serpihan kaca sebelum akhirnya digiling hingga berukuran $<45\mu\text{m}$.

Penggunaan GGBFS sebagai pengganti semen portland memiliki beberapa manfaat seperti mengurangi emisi karbon dioksida; meningkatkan kekuatan dalam jangka panjang, durabilitas, dan *workability* dari campuran beton atau mortar; dan relatif lebih ekonomis karena merupakan bahan samping.

2.5 Kalsium Oksida (CaO)

Kalsium oksida (CaO) atau umumnya dikenal sebagai kapur tohor merupakan salah satu senyawa yang dapat berperan sebagai aktivator alkali dalam pembuatan mortar. Aktivator alkali berperan dalam mempercepat proses hidrasi pada GGBFS agar memperoleh sifat semen. Selain itu, penggunaan CaO sebagai aktivator alkali dapat dikatakan lebih efektif dibandingkan aktivator lain seperti MgO atau NaOH dan juga harganya relatif terjangkau karena jumlahnya yang cukup banyak di alam. Senyawa CaO sendiri merupakan hasil dari kalsinasi kalsium karbonat (CaCO₃) atau batu gamping dengan cara dipanaskan pada suhu 900°C hingga 1000°C dalam tungku pembakaran sehingga terjadi proses dekomposisi panas yang melepaskan CO₂ dan meninggalkan CaO dalam bentuk kapur tohor seperti pada persamaan reaksi kimia berikut.



2.6 Air

Dalam proses pembuatan mortar, air dimasukkan untuk mengaktifkan aktivator alkali pada campuran *binder* hingga berbentuk pasta dan dapat mengeras seiring berjalannya waktu. Selain itu, jumlah air juga sangat berpengaruh pada konsistensi campuran mortar basah karena terlalu banyak air dapat menurunkan kekuatan mortar, tetapi di sisi lain kekurangan air akan menurunkan *workability* mortar.

Berdasarkan SNI 03-6861.1-2002 persyaratan air untuk campuran beton adalah:

1. Harus bersih, tidak mengandung lumpur, minyak dan benda terapung lainnya yang dapat dilihat secara visual.
2. Tidak mengandung benda-benda tersuspensi lebih dari 2 gram/liter.

3. Tidak mengandung garam-garam yang dapat larut dan merusak beton (asam-asam, zat organik, dan lain-lain).
4. Kandungan klorida (Cl) < 0.50 gram/liter, dan senyawa sulfat < 1 gram/liter sebagai SO₃.
5. Bila dibandingkan dengan kekuatan tekan adukan beton yang menggunakan air suling, maka penurunan kekuatan beton yang menggunakan air yang diperiksa tidak lebih dari 10%.
6. Khusus untuk beton pratekan, kecuali syarat-syarat di atas air mengandung klorida lebih dari 0.05 gram/liter.

2.7 Superplasticizer (SP)

Superplasticizer (SP) merupakan *admixture* kimia yang ditambahkan ke dalam campuran mortar guna meningkatkan *workability* dan performa saat pengecoran. Selain itu, dengan penambahan *superplasticizer* dapat mengurangi penggunaan air dalam campuran mortar, sehingga akan meningkatkan kekuatan mortar. Berdasarkan ASTM C494, terdapat 8 jenis *admixture* kimia yang dapat ditambahkan ke dalam campuran beton atau mortar dengan tujuan tertentu, yaitu:

1. Tipe A – *Water-reducing admixtures*
2. Tipe B – *Retarding admixtures*
3. Tipe C – *Accelerating admixtures*
4. Tipe D – *Water-reducing and retarding admixtures*
5. Tipe E – *Water-reducing and accelerating admixtures*
6. Tipe F – *Water-reducing, high range admixtures*
7. Tipe G – *Water-reducing, high range, and retarding admixtures*
8. Tipe S – *Specific performance admixtures*

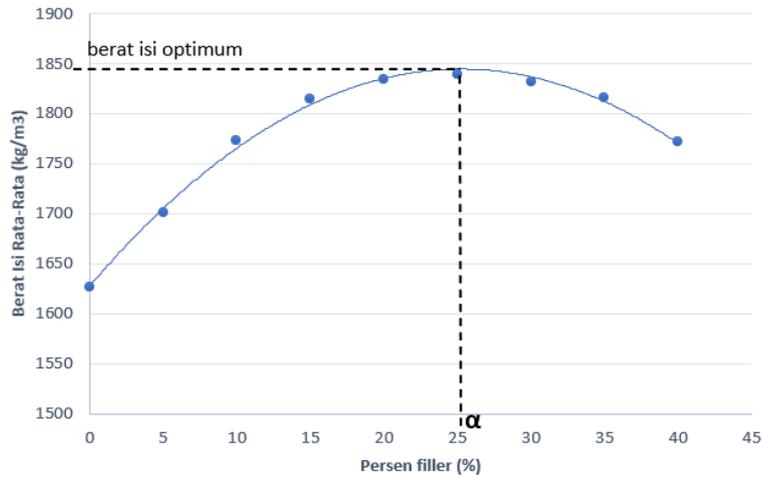
2.8 Silica Slurry (SS)

Berdasarkan pengertian di ACI 116R yang membahas tentang terminologi semen dan beton, *silica fume* merupakan silika non-kristal yang sangat halus yang dihasilkan dalam tungku busur listrik sebagai produk samping dari proses produksi silikon atau paduan yang mengandung silikon. *Silica fume* ditambahkan ke dalam

campuran mortar sebagai bahan pengisi (*filler*) dengan tujuan untuk meningkatkan kekuatan tekan, modulus elastisitas, kekuatan lentur, ketahanan terhadap abrasi dan erosi, serta memperkecil permeabilitas. *Silica fume* (SF) dapat digunakan dalam berbagai bentuk seperti bubuk SF, SF terkondensasi, SF butiran atau pellet, campuran dalam semen, ataupun *silica slurry* (Banar *et al.*, 2022). *Silica slurry* sendiri merupakan campuran homogen dari *silica fume* dan media cairan yang biasanya air. *Silica slurry* dibandingkan *silica fume* memiliki keunggulan, yaitu dengan bentuknya yang cair maka lebih mudah ditangani dan dicampur karena dengan bentuk bubuk kering, *silica fume* dapat menimbulkan tantangan seperti debu yang menyebar ke mana-mana. Kemudian, dengan menghasilkan lebih sedikit debu dibandingkan *silica fume*, *silica slurry* akan lebih menguntungkan dari segi keamanan pekerja karena menurunkan resiko terkena penyakit pada sistem pernapasan akibat menghirup partikel *silica fume*.

2.9 Uji Berat Isi Optimum

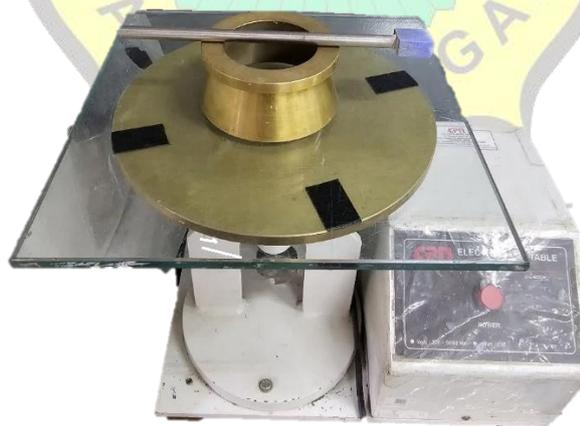
Berat isi optimum pada campuran agregat halus dengan bahan pengisi (*filler*) mengacu pada kemampuan bahan pengisi untuk mengisi ruang-ruang kosong di antara partikel agregat halus pada persentase tertentu, sehingga dapat meningkatkan berat jenis yang secara langsung juga akan meningkatkan kepadatan dari beton atau mortar yang akan dicor dengan harapan dapat meningkatkan kekuatan dari beton atau mortar. Uji berat isi optimum pada campuran mortar mengadaptasi metode uji *Densified Mixture Design Algorithm* (DMDA) dari hasil penelitian Hwang dan Hung (2005). Untuk campuran mortar yang hanya menggunakan agregat halus, maka uji dilakukan hanya pada campuran agregat halus dan bahan pengisi untuk memperoleh nilai α (alfa), yaitu persentase optimum bahan pengisi di dalam agregat halus. Nilai α diperoleh dengan memasukkan bahan pengisi dengan persentase tertentu sebelum dilakukan penimbangan. Setiap kali selesai dilakukan penimbangan, persentase bahan pengisi dinaikkan secara bertahap, misalnya setiap 5% hingga membentuk kurva polinomial parabolik dan terjadi penurunan sebanyak 2-3 kali. Dengan demikian, dapat diperoleh nilai α yang merupakan titik puncak dari kurva tersebut, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Mencari nilai α

2.10 Uji *Flowability*

Flowability dari campuran mortar segar mengacu pada kemampuannya untuk mengalir sehingga dapat dilihat seberapa mudah mortar tersebut dapat diaplikasikan secara merata sesuai dengan bentuk yang diinginkan (*workability*). Uji *flowability* dilakukan berdasarkan standar ASTM C1437 dengan bantuan alat *electric flow table* yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Berdasarkan standar ASTM C109, setelah 25 ketukan pada *flow table* diharapkan campuran mortar segar memperoleh *flow* $110 \pm 5\%$ dari diameter awal dengan rasio semen terhadap pasir sebesar 2,75 berdasarkan massanya.



Gambar 2.2 *Electric Flow Table*

2.11 Uji Kekuatan Lentur

Pengujian kuat lentur ditujukan untuk memperoleh nilai kuat tarik mortar dalam keadaan sedang melentur. Alat yang digunakan untuk pengujian ini adalah *Universal Testing Machine* dengan pembebanan *center point loading* berdasarkan standar ASTM C348. Pengujian dilakukan dengan menempatkan benda uji berbentuk balok dengan ukuran 40 × 40 × 160-mm pada dua titik perletakan dan diberikan beban vertikal tepat di tengah benda uji hingga mencapai beban maksimum yang dapat dipikul mortar. Dengan data dari mesin uji dan pengukuran, maka nilai kuat lentur mortar dapat dihitung dengan Persamaan 2.1 sebagai berikut:

$$f_r = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (2.1)$$

Keterangan:

f_r = Kekuatan lentur [MPa]

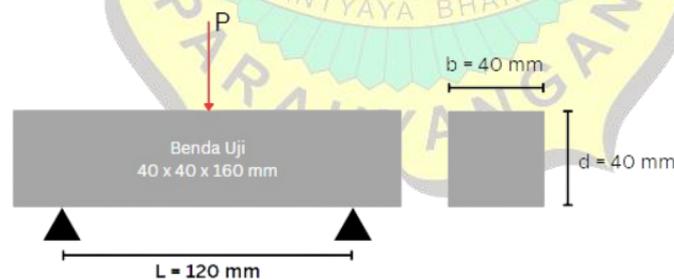
P = Beban maksimum [N]

L = Panjang benda uji [mm]

b = Lebar benda uji [mm]

d = Tinggi benda uji [mm]

Skema uji kekuatan lentur berdasarkan standar ASTM C348 dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.3 Skema Pengujian Kuat Lentur

2.12 Uji Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan ditujukan untuk memperoleh nilai kuat tekan mortar dengan memanfaatkan patahan dari hasil uji kuat lentur sesuai standar ASTM C349. Panjang dari patahan benda uji harus ≥ 65 mm dan bebas dari retakan, pecahan, dan

kecacatan yang kasat mata. Dengan alat yang sama dengan uji kuat lentur, yaitu *Universal Testing Machine*, dapat diperoleh beban maksimum yang dapat dipikul mortar sehingga menggunakan Persamaan 2.2 dapat dihitung nilai kuat tekan mortar.

$$f_m = \frac{P}{A} \quad (2.2)$$

Keterangan:

f_m = Kekuatan tekan [MPa]

P = Gaya tekan aksial maksimum [N]

A = Luas permukaan benda uji yang ditekan [mm]

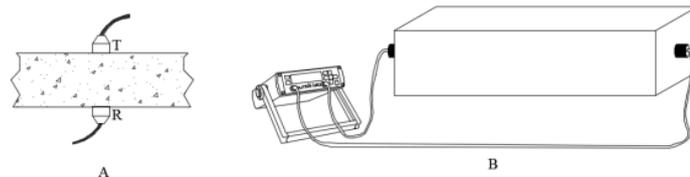
2.13 Uji *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)

Uji UPV merupakan pengujian non-destruktif pada benda uji mortar yang memanfaatkan cepat rambat gelombang ultrasonik untuk memperkirakan kualitas dan sifat dari mortar yang diuji berdasarkan standar ASTM C597. Secara lebih spesifik, sifat-sifat mortar yang dapat diperkirakan melalui uji UPV antara lain, homogenitas, kualitas, retak, rongga, dan cacat pada benda uji mortar (Kaliyavaradhan, 2019). Alat yang digunakan pada uji UPV adalah *Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester* (PUNDIT) yang memiliki bagian *transmitter* yang mengirimkan gelombang ultrasonik dan *receiver* yang menerima gelombang ultrasonik, sehingga PUNDIT dapat membaca dan menunjukkan waktu tempuh gelombang pada benda uji mortar.

Terdapat 3 metode pengujian UPV menggunakan alat PUNDIT, yaitu:

1. Metode Langsung (*Direct*)

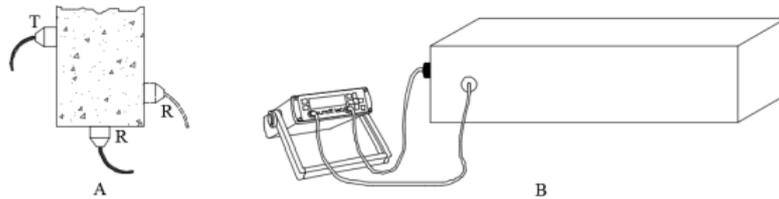
Posisi *transmitter* dan *receiver* ditempatkan berlawanan pada benda uji seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.4 Uji UPV metode langsung (Andi *et al.*, 2019)

2. Metode Semi-langsung (*Semi-direct*)

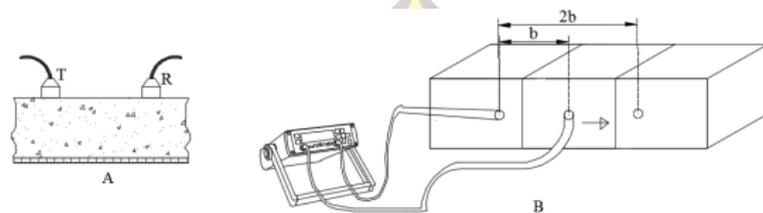
Posisi *transmitter* dan *receiver* ditempatkan membentuk siku, yang dibagi lagi menjadi 2 yaitu: metode semi-langsung arah vertical dan metode semi-langsung arah horizontal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.5 Uji UPV metode semi-langsung (Andi *et al.*, 2019)

3. Metode Tidak Langsung (*Indirect*)

Posisi *transmitter* dan *receiver* keduanya ditempatkan pada permukaan yang sama pada benda uji, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.6 Uji UPV metode tidak langsung (Andi *et al.*, 2019)

2.14 Hubungan Antara Kekuatan Lentur dan *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)

Kecepatan rambat gelombang ultrasonik berbanding lurus dengan kekuatan lentur sehingga dengan diketahuinya kecepatan gelombang ultrasonik dari uji UPV, maka dapat diprediksi kekuatan lentur dengan menggunakan Persamaan 2.3.

$$f_r = ae^{bV} \quad (2.3)$$

Keterangan:

f_r = Kekuatan lentur [MPa]

a, b = Koefisien

V = Kecepatan rambat gelombang ultrasonik [m/s]

2.15 Hubungan Antara Kekuatan Tekan dan *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)

Seperti kekuatan lentur, nilai kekuatan tekan juga dapat diprediksi dengan mengetahui kecepatan rambat gelombang ultrasonik. Nilai kekuatan tekan dari hubungannya dengan kecepatan rambat gelombang ultrasonik berdasarkan penelitian Kumar dan Rai (2019), dapat ditentukan menggunakan Persamaan 2.4.

$$f_c = ae^{bV} \quad (2.3)$$

Keterangan:

f_c = Kekuatan tekan [MPa]

a, b = Koefisien

V = Kecepatan rambat gelombang ultrasonik [m/s]

2.16 Uji Absorpsi

Uji absorpsi dilakukan berdasarkan standar ASTM C642 dengan tujuan untuk mengukur jumlah air yang dapat diserap benda uji mortar ketika direndam dalam air selama waktu yang ditentukan. Absorpsi yang tinggi dapat mengindikasikan tingkat porositas yang tinggi, sehingga biasanya mengacu pada mortar yang kurang kuat atau memiliki durabilitas yang rendah. Benda uji akan ditimbang dalam keadaan *surface-dry* setelah direndam selama 24 jam. Kemudian, benda uji yang sama akan dikeringkan dalam oven selama 24 jam hingga mencapai kondisi *oven-dry* dan setelah itu ditimbang pula untuk mengetahui beratnya. Dengan Persamaan 2.3 dapat dihitung Absorpsi dari mortar.

$$\% = \left(\frac{B-A}{A} \right) \cdot 100 \quad (2.3)$$

Keterangan:

% = Absorpsi setelah direndam [%]

A = Massa benda uji kondisi *oven-dry* [g]

B = Massa benda uji kondisi *surface-dry* setelah direndam [g]

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Material Campuran Mortar

Mortar pada studi eksperimental ini dikategorikan sebagai mortar khusus atau mortar *slag* karena semen sebagai bahan pengikat digantikan oleh GGBFS dan CaO sebagai activator alkali, serta adanya juga penambahan *superplasticizer*, pasir halus silika, dan *silica slurry*. Maka, Langkah pertama yang sangat krusial dalam proses pembuatan mortar adalah menentukan jenis-jenis material yang akan digunakan. Material-material dalam campuran mortar pada studi eksperimental ini, antara lain:

3.1.1 Agregat Halus

Agregat halus yang digunakan pada campuran mortar telah diseleksi dan lolos uji saringan ASTM No. 4 (4,75 mm). Agregat halus ini diperoleh dari penambangan di kaki Gunung Galunggung dan wujudnya dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Agregat Halus

3.1.2 *Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBFS)

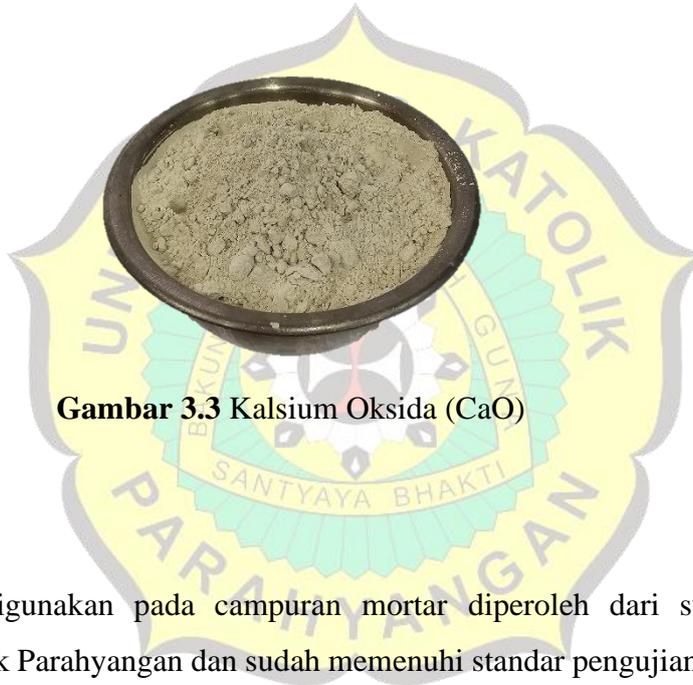
GGBFS digunakan sebagai bahan pengikat pengganti semen dan pada studi eksperimental ini, GGBFS yang digunakan diperoleh dari PT KRNG Indonesia yang dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 *Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS)*

3.1.3 Kalsium Oksida (CaO)

Senyawa aktivator alkali dalam campuran mortar di studi eksperimental ini adalah Kalsium Oksida (CaO) yang diperoleh secara komersial dan ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Kalsium Oksida (CaO)

3.1.4 Air

Air yang digunakan pada campuran mortar diperoleh dari sumur bor Universitas Katolik Parahyangan dan sudah memenuhi standar pengujian mutu air. Ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Air

3.1.5 Superplasticizer (SP)

Jenis *admixture* yang digunakan pada campuran mortar adalah *superplasticizer* tipe F menurut standar ASTM C494. *Superplasticizer* yang digunakan diperoleh dari PT Sika Indonesia dengan jenis MasterEase 3079, ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Superplasticizer (SP)

3.1.6 Pasir Halus Silika

Pasir halus silika yang digunakan telah lolos saringan no. 325 ($45 \mu\text{m}$) dan digunakan sebagai bahan pengisi (*filler*) pada agregat halus. Pasir halus silika diperoleh secara komersial, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Pasir Halus Silika

3.1.7 Silica Slurry

Silica slurry pada pengujian campuran mortar ini diperoleh dari PT Master Builders Solutions Indonesia dengan merk MasterLife SF3263, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 *Silica Slurry*

3.2 Pengujian Berat Isi Optimum

Pasir halus silika ditambahkan ke dalam agregat halus untuk mengisi ruang-ruang kosong (*void*) yang ada di antara partikel-partikel agregat halus. Tujuannya adalah untuk meningkatkan kepadatan dan mengurangi permeabilitas mortar, sehingga kekuatan dan durabilitas mortar juga akan meningkat. Untuk mengetahui rasio optimum dari campuran agregat halus dan pasir halus silika, maka dilakukan uji berat isi optimum.

Uji berat isi optimum dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Tabung uji ditimbang dalam keadaan kosong dan dalam keadaan terisi penuh oleh air, sehingga dapat diperoleh volume tabung uji dari selisih kedua hasil tersebut.
2. Agregat halus ditimbang dalam kondisi *oven dry* (OD) sebanyak 4000-gram dan dituangkan ke atas wadah uji berbentuk persegi.
3. Agregat halus diratakan di atas wadah uji dan dibagi menjadi 4 bagian, kira-kira sama rata.
4. Masukkan agregat halus dari salah satu bagian mana saja ke dalam tabung uji hingga terisi $\frac{1}{3}$ dari kapasitas tabung uji dan kemudian tumbuk sebanyak 25 kali.
5. Masukkan lagi agregat halus dari bagian yang sama hingga terisi $\frac{2}{3}$ bagian, jika kurang dapat mengambil dari bagian lain yang posisinya diagonal terhadap bagian awal. Kemudian, tumbuk sebanyak 25 kali.
6. Lanjut memasukkan agregat halus hingga penuh dan ditumbuk kembali sebanyak 25 kali.
7. Jika terjadi penurunan, penuhi kembali tabung uji dengan agregat halus dan ratakan menggunakan alat bantu.

8. Terakhir, timbang tabung uji berisi agregat halus dan catat hasilnya.
9. Ulangi langkah 4 hingga 8 menggunakan agregat halus dari 2 bagian yang tersisa untuk memperoleh hasil pembacaan ke-2.
10. Kembalikan agregat halus dari kedua pembacaan, campurkan kembali, rata-ratakan, dan bagi kembali menjadi 4 bagian sama rata.
11. Lakukan langkah 4 hingga 8 sekali lagi untuk memperoleh hasil pembacaan yang terakhir, yaitu yang ke-3.
12. Lakukan perhitungan untuk memperoleh *unit weight*, dirata-ratakan dari 3 hasil, dan diilustrasikan ke dalam grafik.
13. Kembalikan agregat halus ke dalam wadah uji.
14. Ke dalam wadah uji yang sama, tambahkan pasir halus silika sebanyak 5% dari berat agregat halus dan campurkan hingga homogen.
15. Ulangi langkah 3 hingga 12.
16. Ulangi terus langkah 14, dilanjutkan langkah 3 hingga 13 dan hentikan di langkah ke-12 ketika kurva telah turun sebanyak 2-3 titik.
17. Dengan mencari regresi berdasarkan persamaan kuadrat dari data pengujian, kemudian dapat diperoleh titik puncak kurva yang merupakan rasio optimal dari campuran agregat halus dan pasir halus silika.

3.3 Pengujian Karakteristik Material

Langkah selanjutnya setelah penentuan material-material pada campuran mortar adalah melakukan pengujian terhadap karakteristik material-material tersebut. Pengujian karakteristik material ditujukan untuk mengetahui apakah material-material yang digunakan telah memenuhi standar. Pengujian yang dilakukan pada tiap-tiap material adalah sebagai berikut:

3.3.1 GGBFS dan CaO

Untuk material GGBFS dan CaO dilakukan uji *specific gravity* (SG) sesuai standar ASTM C188 untuk memperoleh data berat jenis dari masing-masing material yang dirangkum pada Tabel 3.1 untuk GGBFS dan Tabel 3.2 untuk CaO. Data berat jenis yang diperoleh, nantinya akan digunakan dalam perhitungan

proporsi campuran mortar. Berikut Langkah-langkah dalam melakukan pengujian SG pada material GGBFS dan CaO:

1. Labu *Le Chatelier* diisi dengan minyak tanah hingga mencapai batas awal garis nol.
2. Labu yang telah diisi minyak tanah ditimbang untuk memperoleh data massanya.
3. GGBFS/CaO sebanyak 60g dimasukkan secara perlahan ke dalam labu *Le Chatelier*.
4. Labu diputar-putar secara perlahan selama 15 menit untuk melepaskan udara pada GGBFS/CaO.
5. Labu didiamkan selama 10 menit.
6. Labu berisi minyak tanah dan GGBFS/CaO ditimbang untuk memperoleh data massanya.
7. Perubahan volume minyak tanah pada labu *Le Chatelier* dicatat.
8. Perhitungan SG dilakukan menggunakan Persamaan 3.1.

$$SG = \frac{M_t - M_a}{V} \quad (3.1)$$

Keterangan:

SG = *Specific gravity*

M_t = Massa labu + minyak tanah + GGBFS/CaO (g)

M_a = Massa labu + minyak tanah (g)

V = Perubahan volume minyak tanah (cm³)

Tabel 3.1 Perhitungan SG GGBFS

Keterangan	Satuan	Notasi	Sampel I	Sampel II
Massa labu dengan minyak tanah	g	M_a	319,93	311,44
Massa labu dengan minyak tanah + GGBFS	g	M_t	379,44	370,96
Volume minyak tanah berpindah	cm ³	V	21,50	21,60
<i>Specific Gravity</i>		SG	2,77	2,76
SG rata-rata			2,76	

Tabel 3.2 Perhitungan SG CaO

Keterangan	Satuan	Notasi	Sampel I	Sampel II
Massa labu dengan minyak tanah	g	M_a	317,74	318,53
Massa labu dengan minyak tanah + CaO	g	M_t	377,39	377,09
Volume minyak tanah berpindah	cm^3	V	23,30	22,70
<i>Specific Gravity</i>		SG	2,56	2,58
SG rata-rata			2,57	

3.3.2 Agregat Halus

Pada material agregat halus, uji yang dilakukan adalah *specific gravity* (SG), *fineness modulus* (FM), dan absorpsi. Pada studi eksperimental ini, agregat halus yang digunakan dicampur dengan pasir halus silika dengan perbandingan yang telah diperoleh dari pengujian berat isi optimum. Maka, untuk pengujian *specific gravity* dan absorpsi digunakan sampel agregat halus dan pasir halus silika yang telah tercampur secara homogen. Hasil dari ketiga uji ini nantinya akan digunakan dalam perhitungan proporsi campuran mortar. Langkah-langkah dalam pengujian agregat halus berdasarkan standar ASTM yang terkait adalah sebagai berikut:

1. *Specific gravity* (SG)

Pengujian *specific gravity* dilakukan dengan mengacu pada standar ASTM C128, yang mana agregat halus diuji pada kondisi *saturated surface dry* (SSD) dan dirangkum pada Tabel 3.3. Langkah-langkah pengujian SG pada agregat halus adalah sebagai berikut:

- Menimbang 500 g campuran agregat halus dan pasir halus silika dalam keadaan SSD.
- Memasukkan campuran yang telah ditimbang ke dalam piknometer.
- Memasukkan air ke dalam piknometer hingga mencapai batas kalibrasi.
- Menimbang massa piknometer + campuran agregat halus + air.
- Menimbang massa piknometer berisikan air hingga batas kalibrasi.
- Melakukan perhitungan SG menggunakan Persamaan 3.2.

$$SG = \frac{W_{SSD}}{(W_{SSD} + W_{pyc}) - W_{pyc}^*} \quad (3.2)$$

Keterangan:

SG = *Specific gravity*

W_{SSD} = Massa agregat halus kondisi SSD (g)

W_{pyc} = Massa piknometer + air (g)

W_{pyc}^* = Massa piknometer + campuran agregat halus + air (g)

Tabel 3.3 Perhitungan SG agregat halus

Keterangan	Satuan	Notasi	Sampel I	Sampel II
Massa agregat halus kondisi SSD	g	W_{SSD}	500	500
Massa piknometer + air + agregat halus	g	W_{pyc}^*	988,4	975,9
Massa piknometer + air	g	W_{pyc}	682,8	669,9
<i>Specific Gravity</i>		SG	2,57	2,58
SG rata-rata			2,57	

2. *Fineness Modulus* (FM)

Pengujian *fineness modulus* dilakukan dengan mengacu pada standar ASTM C33, yang mana agregat halus diuji pada keadaan *oven dry* (OD). Pengujian dilakukan untuk mengetahui gradasi dari agregat halus yang akan digunakan. Hasil pengujian untuk kedua sampel disajikan dalam Tabel 3.4 dan

Tabel 3.5. Langkah-langkah pengujian FM pada agregat halus sebagai berikut:

- Menimbang 500 g agregat halus dalam keadaan OD.
- Memasukkan agregat halus ke dalam saringan standar ASTM yang telah diurutkan dari ukuran terbesar ke terkecil, dari atas ke bawah.
- Meletakkan saringan pada mesin *sieve shaker* dan dibiarkan bekerja selama 10 menit.
- Mendiamkan selama 2 menit.

e. Menimbang massa agregat halus yang tertahan pada tiap-tiap ukuran saringan.

f. Melakukan perhitungan FM menggunakan Persamaan 3.3.

$$FM = \frac{\Sigma_{massa\ tertahan}}{100} \quad (3.3)$$

Keterangan:

FM = *Fineness modulus* atau modulus kehalusan butir

$\Sigma_{massa\ tertahan}$ = Massa tertahan kumulatif (%)

Tabel 3.4 Perhitungan FM Agregat Halus Sampel 1

No. Agregat	Ukuran Ayakan (mm)	Massa Tertahan (g)	Massa Tertahan (%)	Massa Tertahan Kumulatif (%)	Massa Lolos Kumulatif (%)
4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
8	2,36	52,18	10,44	10,44	89,56
16	1,18	89,46	17,89	28,33	71,67
30	0,6	93,63	18,73	47,05	52,95
50	0,3	112,84	22,57	69,62	30,38
100	0,15	100,03	20,01	89,63	10,37
Pan		51,86	10,37		
Total		500	100	245,07	
FM				2,45	

Tabel 3.5 Perhitungan FM Agregat Halus Sampel 2

No. Agregat	Ukuran Ayakan (mm)	Massa Tertahan (g)	Massa Tertahan (%)	Massa Tertahan Kumulatif (%)	Massa Lolos Kumulatif (%)
4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
8	2,36	49,50	9,90	9,90	90,10
16	1,18	83,59	16,72	26,62	73,38
30	0,6	98,67	19,73	46,35	53,65
50	0,3	118,41	23,68	70,03	29,97
100	0,15	102,13	20,43	90,46	9,54
Pan		47,70	9,54		
Total		500	100	243,36	
FM				2,43	

3. Absorpsi

Uji absorpsi dilakukan pada sampel campuran agregat halus dan pasir dalam keadaan SSD dengan mengacu pada standar ASTM C128 untuk menentukan kadar air dalam agregat halus, sehingga nantinya dapat menentukan jumlah air yang dibutuhkan dalam campuran mortar. Hasil pengujian disajikan dalam Tabel 3.6. Langkah-langkah pengujian absorpsi pada agregat halus adalah sebagai berikut:

- a. Menimbang 100 g campuran agregat halus dan pasir halus silika dalam keadaan SSD.
- b. Memasukkan sampel ke dalam oven pada suhu $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ selama 24 jam.
- c. Mengeluarkan dari oven dan mendinginkan agregat halus hingga mencapai suhu ruangan.
- d. Menimbang campuran agregat halus dan pasir halus silika dalam keadaan *oven dry*.
- e. Melakukan perhitungan absorpsi menggunakan Persamaan 3.4.

$$Abs = \frac{W_{SSD} - W_{OD}}{W_{OD}} \times 100\% \quad (3.4)$$

Keterangan:

Abs = Absorpsi atau penyerapan air (%)

W_{SSD} = Massa agregat halus kondisi SSD (g)

W_{OD} = Massa agregat halus kondisi OD (g)

Tabel 3.6 Perhitungan Absorpsi Agregat Halus

Keterangan	Satuan	Notasi	Sampel I	Sampel II
Massa agregat halus kondisi SSD	g	W_{SSD}	100	100
Massa agregat halus kondisi OD	g	W_{OD}	96,9	97,1
Absorpsi	%	Abs	3,30	3,09
Abs rata-rata			3,20	

3.3.3 Silica Slurry

Pada material *silica slurry* dilakukan uji kadar air untuk perhitungan koreksi jumlah air dalam menentukan massa *silica slurry* pada proporsi campuran mortar. Secara rinci, perhitungan campuran mortar untuk tiap variasi dilampirkan pada Lampiran 7 hingga Lampiran 11. Hasil pengujian dirangkum dalam Tabel 3.7. Langkah-langkah pengujian kadar air *silica slurry* adalah sebagai berikut:

- Menimbang 100 g *silica slurry*.
- Memasukkan sampel ke dalam oven pada suhu $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ selama 24 jam.
- Mengeluarkan sampel dari oven dan mendinginkan *silica slurry* hingga mencapai suhu ruangan.
- Menimbang *silica slurry* dalam keadaan *oven dry*.
- Melakukan perhitungan kadar air menggunakan Persamaan 3.5.

$$WC_{SS} = \frac{W_{SS} - W_{OD}}{W_{SS}} \times 100\% \quad (3.5)$$

Keterangan:

WC_{SS} = Kadar air (%)

W_{SS} = Massa *silica slurry* (g)

W_{OD} = Massa *silica slurry* kondisi OD (g)

Tabel 3.7 Perhitungan Kadar Air *Silica Slurry*

Keterangan	Satuan	Notasi	Sampel I	Sampel II	Sampel III
Massa sampel	g	W_{SS}	100	100	100
Massa sampel kondisi OD	g	W_{OD}	43,96	44,25	44,66
Kadar Air	%	Abs	56,04	55,75	55,34
Kadar Air Rata-Rata			55,71		

3.4 Proporsi Campuran Mortar

Pada studi eksperimental ini, proporsi campuran mortar ditentukan menggunakan metode volume absolut yang disajikan dalam Tabel 3.8. Perhitungan dilakukan dengan mengacu pada kebutuhan akan tiap-tiap bahan per 1 m³ campuran mortar. Perhitungan proporsi campuran mortar secara rinci dipaparkan pada Lampiran 6 hingga Lampiran 11, dengan mengacu pada Persamaan 3.5 hingga 3.8

$$\Sigma V = 1 \text{ m}^3 \quad (3.5)$$

$$V_{pasir} + V_{GGBFS} + V_{CaO} + V_{air} + V_{udara} = 1 \text{ m}^3 \quad (3.6)$$

$$V_{pasir} + V_{GGBFS} + V_{CaO} + V_{air} = 1 \text{ m}^3 \quad (3.7)$$

$$\frac{W_{pasir}}{\gamma_{pasir}} + \frac{W_{GGBFS}}{\gamma_{GGBFS}} + \frac{W_{CaO}}{\gamma_{CaO}} + \frac{W_{air}}{\gamma_{air}} = 1 \text{ m}^3 \quad (3.8)$$

Keterangan:

V = Volume (m³)

V_{pasir} = Volume pasir (m³)

V_{GGBFS} = Volume GGBFS (m³)

V_{CaO} = Volume CaO (m³)

V_{air} = Volume air (m³)

V_{udara} = Volume udara (m³)

W_{pasir} = Berat pasir (kg/m³)

W_{GGBFS} = Berat GGBFS (kg/m³)

W_{CaO} = Berat CaO (kg/m³)

W_{air} = Berat air (kg/m³)

γ_{pasir} = Massa jenis pasir (kg/m³)

γ_{GGBFS} = Massa jenis GGBFS (kg/m³)

γ_{CaO} = Massa jenis CaO (kg/m³)

γ_{air} = Massa jenis air (kg/m^3)

Tabel 3.8 Proporsi Campuran Mortar

Volume (m^3)	Pasir (kg/m^3)	GGBFS (kg/m^3)	CaO (kg/m^3)	Air (kg/m^3)	SP (kg/m^3)
1	1481.79	503.81	88.91	207.45	8.89

3.5 Pembuatan Benda Uji Mortar

Benda uji mortar dibuat dengan melalui langkah-langkah sebagai berikut:

1. Siapkan cetakan balok berukuran $40 \times 40 \times 160$ mm sebanyak 3 buah yang telah dilumuri dengan oli.
2. Timbang agregat halus, pasir halus silika, GGBFS, CaO, air, SP, dan *silica slurry* sesuai dengan proporsi yang telah diperhitungkan sebelumnya.
3. Masukkan agregat halus, pasir halus silika, GGBFS, dan CaO ke dalam *mixer* untuk diaduk pada kecepatan pertama selama 3 menit.
4. Matikan *mixer*, kemudian campurkan secara manual selama ± 1 menit hingga campuran benar-benar homogen.
5. Nyalakan *mixer* pada kecepatan pertama, kemudian masukkan $\pm 75\%$ air secara konstan dan biarkan *mixer* bekerja selama 2 menit.
6. Matikan *mixer*, untuk membersihkan bahan-bahan yang menempel pada dinding dan pengaduk *mixer*.
7. Masukkan SP dan sisa air ke dalam *mixer* untuk diaduk selama 2 menit menggunakan kecepatan pertama.
8. Kemudian, naikkan kecepatan sebanyak 1 tingkat dan aduk kembali adonan selama 5 menit.
9. Setelah itu, masukkan *silica slurry* variasi 0%; 5%; 10%; 15%; dan 20% kedalam *mixer*, aduk kembali selama 2 menit tanpa penurunan kecepatan *mixer*.
10. Pastikan campuran mortar tercampur secara homogen untuk dilakukan uji *flowability*.

11. Jika *flow* campuran mortar telah memenuhi standar, maka dapat dimasukkan ke dalam cetakan.
12. Pada cetakan balok $40 \times 40 \times 160$ mm, campuran mortar dimasukkan sebanyak setengah penuh terlebih dahulu dan ditumbuk menggunakan penumbuk khusus sebanyak 8 kali agar rata.
13. Lalu, cetakan dipukul-pukul menggunakan palu karet untuk mengeluarkan gelembung udara pada campuran mortar.
14. Langkah 12 dan 13 diulangi sekali lagi dengan mengisi cetakan hingga penuh.
15. Permukaan cetakan diratakan untuk selanjutnya ditutup menggunakan *plastic wrap* selama 24 jam.
16. Setelah 24 jam, cetakan dibuka untuk mengeluarkan benda dan dilakukan perawatan benda uji menggunakan metode *sealed curing*.

3.6 Pengujian *Flowability* Mortar

Langkah-langkah pengujian *flowability* mortar untuk memperoleh *flow* campuran mortar adalah sebagai berikut:

1. Pastikan mesin *electric flow table* pada posisi yang rata pada keempat sisinya.
2. Masukkan campuran mortar ke dalam *slump cone* hingga terisi 1/2 penuh terlebih dahulu dan tumbuk sebanyak 20 kali untuk memadatkan.
3. Ulangi langkah 2 sehingga *slump cone* terisi penuh dan padat.
4. Ratakan permukaan *slump cone* seperti pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Uji *flowability* mortar

5. Angkat *slump cone* dan tekan tombol untuk menyalakan mesin secara bersamaan.
6. Pada ketukan ke-25, mesin dimatikan.
7. Ukur diameter dari pengujian *flowability* seperti pada Gambar 3.9



Gambar 3.9 Pengukuran diameter pengujian *flowability*

3.7 Perawatan Benda Uji Mortar

Setelah dikeluarkan dari cetakan, perlu dilakukan perawatan pada benda uji untuk memaksimalkan proses hidrasi pada mortar. Apabila proses hidrasi pada mortar telah maksimal, maka diharapkan mortar dapat mencapai kekuatan dan durabilitas yang optimal. Perawatan benda uji pada studi eksperimental ini menggunakan metode *sealed curing*, yaitu dengan membungkus benda uji dengan plastik untuk mencegah penguapan dari permukaan beton. Metode *sealed curing* pada mortar ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Metode *sealed curing*

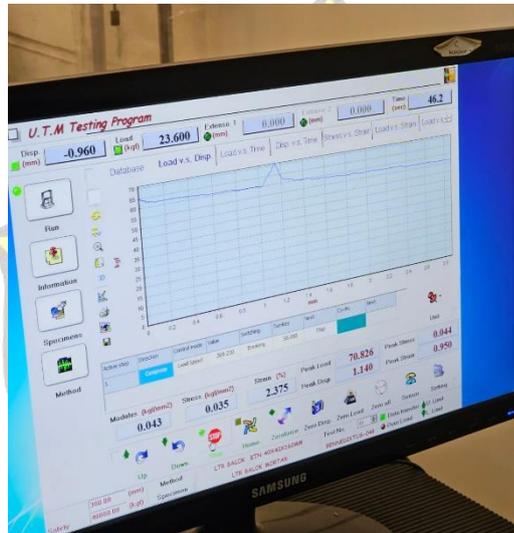
3.8 Pengujian Kekuatan Lentur Mortar

Pengujian kekuatan lentur mortar dilakukan dengan mengacu pada standar ASTM C348 dengan benda uji berupa balok berukuran $40 \times 40 \times 160$ mm. Alat yang digunakan pada uji ini adalah *Universal Testing Machine* yang ditunjukkan pada Gambar 3.11. Berikut merupakan langkah-langkah pengujian kekuatan lentur pada mortar:

1. Lakukan pengukuran dimensi pada masing-masing benda uji.
2. Letakkan benda uji pada tumpuan di *Universal Testing Machine* seperti pada Gambar 3.4.
3. Jalankan mesin hingga mencapai *peak load* yang biasanya ditandai dengan retaknya benda uji.
4. Catat *peak load* yang tercantum pada layar komputer seperti pada Gambar 3.12.
5. Lakukan perhitungan kekuatan lentur mortar menggunakan Persamaan 2.1.



Gambar 3.11 Pengujian Kekuatan Lentur

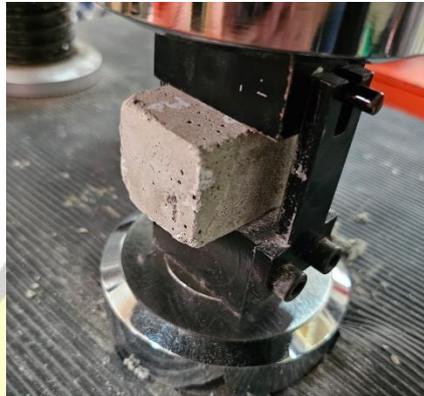


Gambar 3.12 Hasil Pembacaan pada Layar

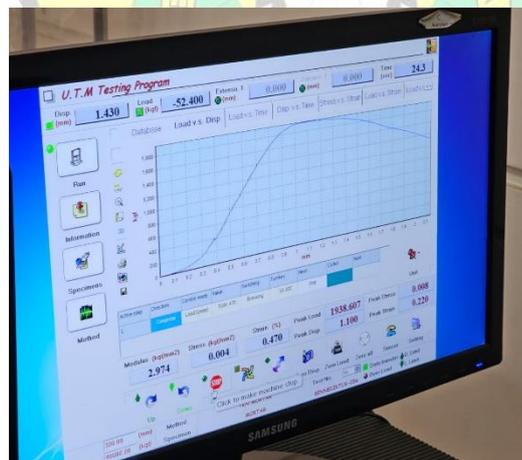
3.9 Pengujian Kekuatan Tekan Mortar yang Dimodifikasi

Pengujian kekuatan tekan mortar pada studi eksperimental ini mengacu pada standar ASTM C349 dengan menggunakan alat yang sama dengan pengujian kekuatan lentur, yaitu *Universal Testing Machine*. Benda uji yang digunakan adalah potongan benda uji hasil pengujian kekuatan lentur, dengan syarat potongan tersebut panjangnya ≥ 65 mm dan bebas dari retakan, pecahan, dan kecacatan yang kasat mata. Berikut merupakan langkah-langkah pengujian kekuatan tekan pada mortar:

1. Siapkan pelat pembebanan dengan dimensi bidang tekan 40×40 mm dan tebal 25 mm.
2. Letakkan benda uji di tengah-tengah beban.
3. Letakkan pelat pembebanan dan benda uji pada *Universal Testing Machine* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.13.
4. Jalankan mesin hingga mencapai *peak load* yang biasanya ditandai dengan hancurnya benda uji.
5. Catat *peak load* yang tercantum pada layar komputer seperti pada Gambar 3.14.
6. Lakukan perhitungan kekuatan tekan mortar menggunakan Persamaan 2.2.



Gambar 3.13 Pengujian Kekuatan Tekan



Gambar 3.14 Pembacaan pada Layar

3.10 Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* Mortar

Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* merupakan pengujian non-destruktif pada mortar yang mengacu pada standar ASTM C597. Pengujian ini dilakukan pada

benda uji berbentuk balok berukuran $40 \times 40 \times 160$ mm guna mengetahui kecepatan rambat gelombang ultrasonik yang melalui benda uji, dengan bantuan alat *Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester* (PUNDIT). Berikut merupakan langkah-langkah pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* pada mortar:

1. Lakukan pengukuran panjang pada masing-masing benda uji.
2. Lakukan kalibrasi pada alat PUNDIT seperti pada Gambar 3.15.
3. Oleskan secara merata, gel ultrasonik pada kedua permukaan 40×40 mm benda uji.
4. Tempatkan *transmitter* pada salah satu ujung benda uji dan *receiver* pada ujung yang berlawanan seperti pada Gambar 3.16.
5. Jalankan alat PUNDIT hingga berhenti secara otomatis dan catat waktu rambat dan kecepatan yang tertera pada layar PUNDIT.



Gambar 3.15 Kalibrasi PUNDIT



Gambar 3.16 Pengujian UPV

3.11 Pengujian Absorpsi Mortar

Pengujian absorpsi mortar, dilakukan dengan mengacu pada standar ASTM C642 untuk mengetahui jumlah air yang dapat diserap mortar ketika direndam dalam air selama selang waktu yang ditentukan. Benda uji yang digunakan merupakan potongan benda uji kedua dari hasil pengujian kekuatan lentur mortar yang tidak digunakan dalam pengujian kekuatan tekan. Berikut langkah-langkah pengujian absorpsi pada mortar:

1. Sisihkan potongan benda uji dari hasil pengujian kekuatan lentur mortar yang tidak digunakan pada pengujian kekuatan tekan.
2. Siapkan ember berisi air untuk merendam potongan benda uji yang telah disisihkan dan biarkan selama 24 jam di dalam air seperti pada Gambar 3.17.
3. Setelah 24 jam, keluarkan potongan benda uji dan keringkan menggunakan lap agar mencapai keadaan SSD.
4. Timbang potongan benda uji yang dalam keadaan SSD.
5. Masukkan potongan benda uji dalam keadaan SSD ke dalam oven dan biarkan di dalam oven selama 24 jam.
6. Keluarkan potongan benda uji dari oven dan diamkan hingga mencapai suhu ruangan.
7. Timbang benda uji dalam keadaan *oven dry*.
8. Lakukan perhitungan absorpsi menggunakan Persamaan 2.3.



Gambar 3.17 Pengujian Absorpsi

BAB 4

ANALISIS DATA

4.1 Analisis Uji *Flowability* Mortar

Uji *flowability* mortar dilakukan pada campuran mortar segar sebelum dimasukkan ke dalam cetakan untuk memastikan bahwa *flow* yang diperoleh memenuhi ketentuan ASTM C109. Dilakukan pengecoran sebanyak satu kali untuk tiap variasi, sehingga total jumlah pengecoran adalah 5 kali. Pengukuran dan perhitungan *flow* untuk tiap kali pengecoran dirangkum pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian *Flowability* Mortar

Kode Mix	d ₀ (cm)	d ₁ (cm)	d ₂ (cm)	d _{avg} (cm)	F (%)
SM0	10	21.5	21.5	21.5	115
SM5	10	22	22	22	120
SM10	10	21.5	22	21.75	117.5
SM15	10	21	21.5	21.25	112.5
SM20	10	21	21	21	110

Berdasarkan standar ASTM C109, ditetapkan bahwa *flow* yang baik dari campuran mortar segar adalah sebesar $110 \pm 5\%$. Pada Tabel 4.1, mortar dengan variasi *silica slurry* 0%, 15%, dan 20% telah memiliki *flow* yang sesuai standar ASTM C109. Tetapi, dapat dilihat juga bahwa *flow* campuran mortar segar dengan variasi *silica slurry* 5% dan 10% tidak memenuhi standar ASTM C109. Hal tersebut dapat diakibatkan penambahan *silica slurry* dengan persentase 5% dan 10% dapat memengaruhi konsistensi dari campuran mortar segar.

4.2 Analisis Uji Kekuatan Lentur Mortar

Pengujian kekuatan lentur pada mortar ditujukan untuk mengetahui kemampuan balok dengan campuran mortar tertentu dalam menahan tegangan tarik akibat momen lentur. Balok yang digunakan sebagai benda uji berukuran $40 \times 40 \times 160$ mm berdasarkan standar ASTM C348 yang akan ditempatkan pada 2 tumpuan di atas alat *Universal Testing Machine* dengan metode pembebanan *center point*

load. Pengujian dilakukan pada mortar dengan variasi *silica slurry* 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% pada umur pengujian 7, 14, dan 28 hari dengan 3 benda uji pada masing-masing umur pengujian.

4.2.1 Analisis Uji Kekuatan Lentur dengan Variasi *Silica Slurry* 0%

Data hasil pengujian lentur pada mortar dengan variasi *silica slurry* 0% yang tercatat pada alat *Universal Testing Machine* dan dimensi benda uji yang telah diukur, dirangkum dalam Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Kekuatan Lentur Variasi 0%

Umur (hari)	Benda Uji	b (mm)	d (mm)	L (mm)	P (kgf)	f_r (MPa)	$f_{r \text{ avg}}$ (MPa)
7	1	41,4	39,59	120,00	125,319	3,41	2,78
	2	41,66	40,34	120,00	82,277	2,14	
	3	41,63	40,87	120,00	109,362	2,78	
14	1	41,24	40,64	120,00	96,502	2,50	2,95
	2	41,42	40,07	120,00	139,776	3,71	
	3	41,13	40,00	120,00	98,666	2,65	
28	1	41,41	40,47	120,00	175,248	4,56	3,77
	2	41,74	40,62	120,00	123,278	3,16	
	3	41,89	40,35	120,00	138,721	3,59	

Pada Tabel 4.2 dapat dilihat bahwa pada mortar dengan variasi *silica slurry* 0%, nilai kekuatan lentur pada hari ke-7 sebesar 2,78 MPa, pada hari ke-14 sebesar 2,95 MPa, dan pada hari ke-28 sebesar 3,77 MPa. Oleh karena itu, dapat dilihat terjadi peningkatan nilai kekuatan lentur pada hari ke-7 hingga hari ke-28 sebesar 0,99 MPa atau 35,61%.

4.2.2 Analisis Uji Kekuatan Lentur dengan Variasi *Silica Slurry* 5%

Data hasil pengujian lentur pada mortar dengan variasi *silica slurry* 5% yang tercatat pada alat *Universal Testing Machine* dan dimensi benda uji yang telah diukur, dirangkum dalam Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Kekuatan Lentur Variasi 5%

Umur (hari)	Benda Uji	B (mm)	d (mm)	L (mm)	P (kN)	f _r (MPa)	f _{r avg} (MPa)
7	1	40,4	40,33	120,00	156,257	4,20	3,44
	2	40,83	40,08	120,00	110,963	2,99	
	3	40,33	40,20	120,00	115,507	3,13	
14	1	40,21	40,61	120,00	161,356	4,30	4,51
	2	39,37	40,33	120,00	162,664	4,49	
	3	40,23	40,56	120,00	177,623	4,74	
28	1	40,51	40,19	120,00	171,132	4,62	4,48
	2	40,83	40,47	120,00	154,094	4,07	
	3	40,21	40,26	120,00	175,957	4,77	

Pada Tabel 4.3 dapat dilihat bahwa pada mortar dengan variasi *silica slurry* 5%, nilai kekuatan lentur pada hari ke-7 sebesar 3,44 MPa, pada hari ke-14 sebesar 4,51 MPa, dan pada hari ke-28 sebesar 4,48 MPa. Oleh karena itu, dapat dilihat terjadi peningkatan nilai kekuatan lentur pada hari ke-7 hingga hari ke-28 sebesar 1,04 MPa atau 30.23%. Namun apabila diperhatikan kembali, terjadi penurunan kekuatan lentur dari hari ke-14 menuju hari ke-28. Hal tersebut dapat disebabkan ketika proses pencetakan, proses pemadatan untuk benda uji hari ke-28 kurang maksimal ataupun ketika memasukkan campuran mortar segar kurang homogen, sehingga menyebabkan terjadinya penurunan kekuatan.

4.2.3 Analisis Uji Kekuatan Lentur dengan Variasi Silica Slurry 10%

Data hasil pengujian lentur pada mortar dengan variasi *silica slurry* 10% yang tercatat pada alat *Universal Testing Machine* dirangkum dalam Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Kekuatan Lentur Variasi 10%

Umur (hari)	Benda Uji	b (mm)	d (mm)	L (mm)	P (kN)	f _r (MPa)	f _{r avg} (MPa)
7	1	41,60	40,26	120,00	140,133	3,67	3,39
	2	41,12	41,02	120,00	117,413	3,00	
	3	41,30	40,83	120,00	136,175	3,49	

Tabel 4.4 Kekuatan Lentur Variasi 10% (Lanjutan)

Umur (hari)	Benda Uji	b (mm)	d (mm)	L (mm)	P (kN)	f _r (MPa)	f _{r avg} (MPa)
14	1	41,28	41,04	120,00	143,302	3,64	4,22
	2	40,30	40,75	120,00	202,022	5,33	
	3	40,44	40,48	120,00	138,409	3,69	
28	1	40,64	40,80	120,00	225,11	5,88	5,44
	2	40,93	40,38	120,00	201,438	5,33	
	3	40,33	40,16	120,00	188,773	5,12	

Pada Tabel 4.4 dapat dilihat bahwa pada mortar dengan variasi *silica slurry* 10%, nilai kekuatan lentur pada hari ke-7 sebesar 3,39 MPa, pada hari ke-14 sebesar 4,22 MPa, dan pada hari ke-28 sebesar 5,44 MPa. Oleh karena itu, dapat dilihat terjadi peningkatan nilai kekuatan lentur pada hari ke-7 hingga hari ke-28 sebesar 2,05 MPa atau 60,47%.

4.2.4 Analisis Uji Kekuatan Lentur dengan Variasi *Silica Slurry* 15%

Data hasil pengujian lentur pada mortar dengan variasi *silica slurry* 15% yang tercatat pada alat *Universal Testing Machine* dan dimensi benda uji yang telah diukur, dirangkum dalam Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Kekuatan Lentur Variasi 15%

Umur (hari)	Benda Uji	b (mm)	d (mm)	L (mm)	P (kN)	f _r (MPa)	f _{r avg} (MPa)
7	1	41,25	40,03	120,00	100,939	2,70	2,83
	2	41,04	40,32	120,00	99,486	2,63	
	3	41,16	40,31	120,00	119,674	3,16	
14	1	40,66	41,07	120,00	149,517	3,85	3,87
	2	40,61	40,15	120,00	146,775	3,96	
	3	41,25	40,27	120,00	144,177	3,81	
28	1	40,74	40,26	120,00	136,178	3,64	4,04
	2	40,33	40,16	120,00	167,201	4,54	
	3	40,72	40,25	120,00	147,191	3,94	

Pada Tabel 4.5 dapat dilihat bahwa pada mortar dengan variasi *silica slurry* 15%, nilai kekuatan lentur pada hari ke-7 sebesar 2,83 MPa, pada hari ke-14 sebesar 3,87 MPa, dan pada hari ke-28 sebesar 4,04 MPa. Oleh karena itu, dapat dilihat terjadi peningkatan nilai kekuatan lentur pada hari ke-7 hingga hari ke-28 sebesar 1,21 MPa atau 42,76%.

4.2.5 Analisis Uji Kekuatan Lentur dengan Variasi *Silica Slurry* 20%

Data hasil pengujian lentur pada mortar dengan variasi *silica slurry* 20% yang tercatat pada alat *Universal Testing Machine* dan dimensi benda uji yang telah diukur, dirangkum dalam Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Kekuatan Lentur Variasi 20%

Umur (hari)	Benda Uji	b (mm)	d (mm)	L (mm)	P (kN)	f _r (MPa)	f _{r avg} (MPa)
7	1	40,57	40,37	120,00	95,42	2,55	2,56
	2	41,82	40,12	120,00	99,777	2,62	
	3	40,61	40,12	120,00	92,515	2,50	
14	1	40,28	40,77	120,00	97,273	2,57	2,95
	2	41,24	40,46	120,00	103,046	2,70	
	3	40,40	40,52	120,00	134,941	3,59	
28	1	39,97	40,85	120,00	161,561	4,28	4,45
	2	41,12	40,27	120,00	163,441	4,33	
	3	40,54	40,46	120,00	178,079	4,74	

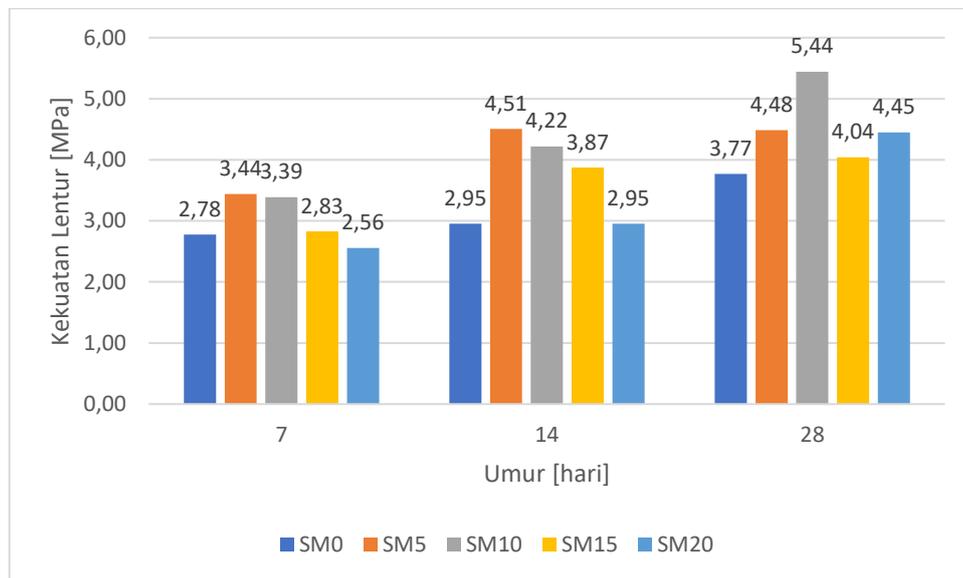
Pada Tabel 4.6 dapat dilihat bahwa pada mortar dengan variasi *silica slurry* 20%, nilai kekuatan lentur pada hari ke-7 sebesar 2,56 MPa, pada hari ke-14 sebesar 2,95 MPa, dan pada hari ke-28 sebesar 4,45 MPa. Oleh karena itu, dapat dilihat terjadi peningkatan nilai kekuatan lentur pada hari ke-7 hingga hari ke-28 sebesar 1,89 MPa atau 73,83%.

4.2.6 Perbandingan Hasil Uji Kekuatan Lentur Antar Variasi

Hasil uji kekuatan lentur pada Tabel 4.2 hingga Tabel 4.6 direkapitulasi dalam Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Rekapitulasi Kekuatan Lentur Tiap Variasi

Mixture Code	Kekuatan Lentur Rata-Rata [MPa]		
	Umur 7 hari	Umur 14 hari	Umur 28 hari
SM0	2,78	2,95	3,77
SM5	3,44	4,51	4,48
SM10	3,39	4,22	5,44
SM15	2,83	3,87	4,04
SM20	2,56	2,95	4,45



Grafik 4.1 Rekapitulasi Kekuatan Lentur untuk Setiap Variasi

Pada Grafik 4.1 dapat diperhatikan bahwa nilai kekuatan lentur mortar pada benda uji berbentuk balok dengan variasi penambahan *silica slurry* 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% mengalami peningkatan nilai kekuatan lentur seiring dengan bertambahnya umur benda uji. Nilai kekuatan lentur tertinggi pada umur 28 hari dimiliki mortar dengan variasi *silica slurry* 10% yaitu sebesar 5,44 MPa. Sementara nilai kekuatan lentur terendah pada umur 28 hari, dimiliki mortar dengan variasi *silica slurry* 0%, sebesar 3,77 MPa. Hal tersebut menunjukkan ketepatan salah satu fungsi penambahan *silica slurry*, yaitu untuk meningkatkan kekuatan mortar.

4.3 Analisis Uji Kuat Tekan Mortar

Pengujian kekuatan tekan pada mortar ditujukan untuk mengetahui kemampuan balok dengan campuran mortar tertentu dalam menahan gaya tekan. Benda uji yang digunakan adalah potongan benda uji hasil pengujian kekuatan lentur, dengan syarat potongan tersebut panjangnya ≥ 65 mm dan bebas dari retakan, pecahan, dan kecacatan yang kasat mata sesuai dengan standar ASTM C349. Benda uji akan ditempatkan pada alat *Universal Testing Machine* dengan metode dan dilakukan pada mortar dengan variasi *silica slurry* 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% pada umur pengujian 7, 14, dan 28 hari dengan 3 benda uji pada masing-masing umur pengujian.

4.3.1 Analisis Uji Kekuatan Tekan dengan Variasi *Silica Slurry* 0%

Data hasil pengujian tekan pada mortar dengan variasi *silica slurry* 0% yang tercatat pada alat *Universal Testing Machine* dirangkum dalam Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Kekuatan Tekan Variasi 0%

Umur (hari)	Benda Uji	b (mm)	d (mm)	A (mm ²)	P (kN)	f _m (MPa)	f _{m avg} (MPa)
7	1	41,4	39,76	1646,06	1473,596	8,78	8,36
	2	41,66	39,76	1656,40	1274,937	7,55	
	3	41,63	39,76	1655,34	1475,017	8,74	
14	1	41,24	39,76	1639,83	2147,225	12,85	12,60
	2	41,42	39,76	1646,73	1938,607	11,55	
	3	41,13	39,76	1635,46	2233,334	13,40	
28	1	41,41	39,76	1646,46	2416,05	14,40	14,08
	2	41,74	39,76	1659,58	2345,199	13,86	
	3	41,89	39,76	1665,68	2373,18	13,98	

Pada Tabel 4.8 dapat dilihat bahwa pada mortar dengan variasi *silica slurry* 0%, nilai kekuatan tekan pada hari ke-7 sebesar 8,36 MPa, pada hari ke-14 sebesar 12,60 MPa, dan pada hari ke-28 sebesar 14,08 MPa. Oleh karena itu, dapat dilihat terjadi peningkatan nilai kekuatan tekan pada hari ke-7 hingga hari ke-28 sebesar 5,72 MPa atau 68,42%.

4.3.2 Analisis Uji Kekuatan Tekan dengan Variasi *Silica Slurry* 5%

Data hasil pengujian tekan pada mortar dengan variasi *silica slurry* 5% yang tercatat pada alat *Universal Testing Machine* dirangkum dalam Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Kekuatan Tekan Variasi 5%

Umur (hari)	Benda Uji	b (mm)	d (mm)	A (mm ²)	P (kN)	f _m (MPa)	f _{m avg} (MPa)
7	1	40,4	39,76	1606,30	2329,096	14,22	14,47
	2	40,83	39,76	1623,27	2368,253	14,31	
	3	40,33	39,76	1603,39	2429,797	14,87	
14	1	40,21	39,76	1598,88	3060,186	18,78	18,57
	2	39,37	39,76	1565,22	2883,924	18,07	
	3	40,23	39,76	1599,41	3076,655	18,87	
28	1	40,51	39,76	1610,55	3340,748	20,35	19,68
	2	40,83	39,76	1623,40	2849,79	17,22	
	3	40,21	39,76	1598,88	3499,78	21,47	

Pada Tabel 4.9 dapat dilihat bahwa pada mortar dengan variasi *silica slurry* 5%, nilai kekuatan tekan pada hari ke-7 sebesar 14,47 MPa, pada hari ke-14 sebesar 18,57 MPa, dan pada hari ke-28 sebesar 19,68 MPa. Oleh karena itu, dapat dilihat terjadi peningkatan nilai kekuatan tekan pada hari ke-7 hingga hari ke-28 sebesar 5,21 MPa atau 36%.

4.3.3 Analisis Uji Kekuatan Tekan dengan Variasi *Silica Slurry* 10%

Data hasil pengujian tekan pada mortar dengan variasi *silica slurry* 10% yang tercatat pada alat *Universal Testing Machine* dirangkum dalam Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Kekuatan Tekan Variasi 10%

Umur (hari)	Benda Uji	b (mm)	d (mm)	A (mm ²)	P (kN)	f _m (MPa)	f _{m avg} (MPa)
7	1	41,60	39,76	1653,88	2641,38	15,67	15,05
	2	41,12	39,76	1634,80	2494,407	14,97	
	3	41,30	39,76	1641,96	2429,797	14,52	

Tabel 4.10 Kekuatan Tekan Variasi 10% (Lanjutan)

Umur (hari)	Benda Uji	b (mm)	d (mm)	A (mm ²)	P (kN)	f _m (MPa)	f _m avg (MPa)
14	1	41,28	39,76	1641,43	3036,037	18,14	18,55
	2	40,30	39,76	1602,20	3070,125	18,80	
	3	40,44	39,76	1607,76	3064,872	18,70	
28	1	40,64	39,76	1615,98	3452,093	20,96	20,90
	2	40,93	39,76	1627,24	3561,67	21,47	
	3	40,33	39,76	1603,65	3313,84	20,27	

Pada Tabel 4.10 dapat dilihat bahwa pada mortar dengan variasi *silica slurry* 10%, nilai kekuatan tekan pada hari ke-7 sebesar 15,05 MPa, pada hari ke-14 sebesar 18,55 MPa, dan pada hari ke-28 sebesar 20,90 MPa. Oleh karena itu, dapat dilihat terjadi peningkatan nilai kekuatan tekan pada hari ke-7 hingga hari ke-28 sebesar 5,85 MPa atau 38,87%.

4.3.4 Analisis Uji Kekuatan Tekan dengan Variasi *Silica Slurry* 15%

Data hasil pengujian tekan pada mortar dengan variasi *silica slurry* 15% yang tercatat pada alat *Universal Testing Machine* dirangkum dalam Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Kekuatan Tekan Variasi 15%

Umur (hari)	Benda Uji	b (mm)	d (mm)	A (mm ²)	P (kN)	f _m (MPa)	f _m avg (MPa)
7	1	41,25	39,76	1640,10	2272,747	13,59	13,64
	2	41,04	39,76	1631,75	2281,612	13,72	
	3	41,16	39,76	1636,39	2269,549	13,61	
14	1	40,66	39,76	1616,77	2702,43	16,40	16,81
	2	40,61	39,76	1614,79	2737,144	16,63	
	3	41,25	39,76	1640,10	2907,327	17,39	
28	1	40,74	39,76	1619,69	3293,68	19,95	20,58
	2	40,33	39,76	1603,65	3357,361	20,54	
	3	40,72	39,76	1619,03	3508,749	21,26	

Pada Tabel 4.11 dapat dilihat bahwa pada mortar dengan variasi *silica slurry* 15%, nilai kekuatan tekan pada hari ke-7 sebesar 13,64 MPa, pada hari ke-14 sebesar 16,81 MPa, dan pada hari ke-28 sebesar 20,58 MPa. Oleh karena itu, dapat

dilihat terjadi peningkatan nilai kekuatan tekan pada hari ke-7 hingga hari ke-28 sebesar 6,94 MPa atau 50,88%.

4.3.5 Analisis Uji Kekuatan Tekan dengan Variasi *Silica Slurry* 20%

Data hasil pengujian tekan pada mortar dengan variasi *silica slurry* 20% yang tercatat pada alat *Universal Testing Machine* dirangkum dalam Tabel 4.12 Tabel 4.8 Kekuatan Tekan Variasi 0%.

Tabel 4.12 Kekuatan Tekan Variasi 20%

Umur (hari)	Benda Uji	b (mm)	d (mm)	A (mm ²)	P (kN)	f _m (MPa)	f _{m avg} (MPa)
7	1	40,57	39,76	1613,06	1804,452	10,97	11,59
	2	41,82	39,76	1662,90	1950,298	11,51	
	3	40,61	39,76	1614,52	2023,727	12,30	
14	1	40,28	39,76	1601,53	2401,283	14,71	15,06
	2	41,24	39,76	1639,57	2507,978	15,01	
	3	40,40	39,76	1606,17	2533,518	15,47	
28	1	39,97	39,76	1589,07	2856,791	17,64	17,97
	2	41,12	39,76	1634,80	2864,79	17,19	
	3	40,54	39,76	1612,00	3134,373	19,07	

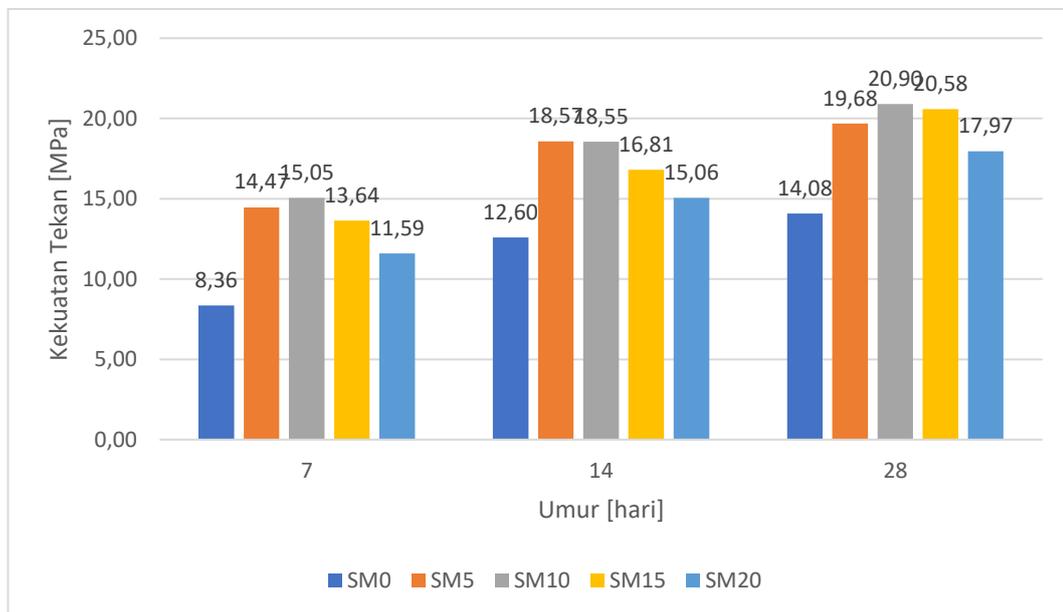
Pada Tabel 4.12 dapat dilihat bahwa pada mortar dengan variasi *silica slurry* 15%, nilai kekuatan tekan pada hari ke-7 sebesar 13,64 MPa, pada hari ke-14 sebesar 16,81 MPa, dan pada hari ke-28 sebesar 20,58 MPa. Oleh karena itu, dapat dilihat terjadi peningkatan nilai kekuatan tekan pada hari ke-7 hingga hari ke-28 sebesar 6,94 MPa atau 50,88%.

4.3.6 Perbandingan Hasil Uji Kekuatan Tekan Antar Variasi

Hasil uji kekuatan tekan pada Tabel 4.8 hingga Tabel 4.12 direkapitulasi dalam Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Rekapitulasi Kekuatan Tekan Tiap Variasi

Mixture Code	Kekuatan Tekan Rata-Rata [MPa]		
	Umur 7 hari	Umur 14 hari	Umur 28 hari
SM0	8,36	12,60	14,08
SM5	14,47	18,57	19,68
SM10	15,05	18,55	20,90
SM15	13,64	16,81	20,58
SM20	11,59	15,06	17,97



Grafik 4.2 Rekapitulasi Kekuatan Tekan Tiap Variasi

Pada Grafik 4.2 dapat diperhatikan bahwa nilai kekuatan tekan mortar pada benda uji berbentuk balok dengan variasi penambahan *silica slurry* 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% mengalami peningkatan nilai kekuatan tekan seiring dengan bertambahnya umur benda uji. Berdasarkan Grafik 4.2, nilai kekuatan tekan tertinggi pada umur 28 hari dimiliki mortar dengan variasi *silica slurry* 10% yaitu sebesar 20,90 MPa. Sementara nilai kekuatan lentur terendah pada umur 28 hari, dimiliki mortar dengan variasi *silica slurry* 0%, sebesar 14,08 MPa. Hal tersebut menunjukkan ketepatan salah satu fungsi penambahan *silica slurry*, yaitu untuk meningkatkan kekuatan mortar.

4.4 Analisis Uji *Ultrasonic Pulse Velocity*

Salah satu tujuan dilakukannya uji UPV adalah untuk mengetahui durabilitas mortar dengan memanfaatkan data kecepatan rambat gelombang ultrasonik yang diperoleh dari penggunaan alat PUNDIT. Pengujian dilakukan pada benda uji berbentuk balok berukuran $40 \times 40 \times 160$ mm dengan mengacu pada standar ASTM C597. Pengujian dilakukan pada variasi 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% yang masing-masing variasi menggunakan 3 benda uji dengan ukuran seragam dan diuji pada interval umur pengujian 7, 14, dan 28 hari.

4.4.1 Analisis Uji UPV Variasi *Silica Slurry* 0%

Dari monitor pada alat PUNDIT, diperoleh pembacaan hasil UPV untuk mortar dengan variasi *silica slurry* 0% yang disajikan pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 UPV Variasi 0%

Umur (hari)	Benda Uji	Panjang (mm)	Waktu (μ m)	Kecepatan (m/s)	Kecepatan rata-rata (m/s)
7	1	160,12	49,2	3254,370	3248,07
	2	159,96	49,2	3251,220	
	3	159,34	49,2	3238,618	
14	1	160,08	46,9	3413,113	3337,05
	2	159,85	48,4	3302,686	
	3	159,50	48,4	3295,351	
21	1	160,30	46,9	3417,910	3387,05
	2	160,11	47,4	3377,743	
	3	159,53	47,4	3365,506	
28	1	160,46	46,9	3421,251	3366,26
	2	159,97	47,9	3339,736	
	3	159,88	47,9	3337,787	

Pada Tabel 4.14 dapat dilihat bahwa pada mortar dengan variasi *silica slurry* 0%, nilai kecepatan rambat gelombang pada hari ke-7 sebesar 3248,069 m/s, pada hari ke-14 sebesar 3337,050 m/s, pada hari ke-21 sebesar 3387,053 m/s, dan pada hari ke-28 sebesar 3366,258 m/s. Dapat dilihat terjadi peningkatan nilai kecepatan rambat gelombang pada hari ke-7 hingga hari ke-28 sebesar 118,189 m/s.

Terdapat penurunan nilai kecepatan rambat gelombang dari hari ke-21 ke hari ke-28. Berdasarkan tren dari hari ke-7 hingga hari ke-21, kecepatan rambat gelombang meningkat seiring bertambahnya umur uji. Maka, penurunan tersebut dapat diakibatkan oleh error pembacaan pada alat PUNDIT.

4.4.2 Analisis Uji UPV Variasi *Silica Slurry* 5%

Dari monitor pada alat PUNDIT, diperoleh pembacaan hasil UPV untuk mortar dengan variasi *silica slurry* 5% yang disajikan pada Tabel 4.15.

Tabel 4.15 UPV Variasi 5%

Umur (hari)	Benda Uji	Panjang (mm)	Waktu (μ m)	Kecepatan (m/s)	Kecepatan rata-rata (m/s)
7	1	159,91	44,9	3561,470	3534,15
	2	160,07	45,4	3525,661	
	3	159,60	45,4	3515,308	
14	1	159,81	44,4	3599,212	3574,36
	2	159,94	44,9	3562,138	
	3	159,57	44,8	3561,719	
21	1	160,00	44,4	3603,604	3590,43
	2	160,03	43,9	3645,216	
	3	159,92	45,4	3522,467	
28	1	159,82	43,4	3682,488	3626,59
	2	159,95	44,9	3562,361	
	3	159,57	43,9	3634,928	

Pada Tabel 4.15 dapat dilihat bahwa pada mortar dengan variasi *silica slurry* 5%, nilai kecepatan rambat gelombang pada hari ke-7 sebesar 3534,146 m/s, pada hari ke-14 sebesar 3574,356 m/s, pada hari ke-21 sebesar 3590,429 m/s, dan pada hari ke-28 sebesar 3626,592 m/s. Dapat dilihat terjadi peningkatan nilai kecepatan rambat gelombang pada hari ke-7 hingga hari ke-28 sebesar 92,446 m/s. Peningkatan kecepatan rambat gelombang seiring bertambahnya umur pengujian mengindikasikan bahwa proses hidrasi mortar berjalan dengan baik, sehingga kepadatan mortar meningkat seiring bertambahnya umur benda uji.

4.4.3 Analisis Uji UPV Variasi *Silica Slurry* 10%

Dari monitor pada alat PUNDIT, diperoleh pembacaan hasil UPV untuk mortar dengan variasi *silica slurry* 10% yang disajikan pada Tabel 4.16.

Tabel 4.16 UPV Variasi 10%

Umur (hari)	Benda Uji	Panjang (mm)	Waktu (μ m)	Kecepatan (m/s)	Kecepatan rata-rata (m/s)
7	1	159,93	44,9	3561,915	3560,88
	2	159,91	44,9	3561,470	
	3	159,81	44,9	3559,243	
14	1	159,96	44,4	3602,703	3601,65
	2	159,99	44,4	3603,266	
	3	159,80	44,4	3598,986	
21	1	159,85	43,9	3641,116	3643,70
	2	160,10	43,9	3646,811	
	3	159,94	43,9	3643,166	
28	1	159,97	43,6	3668,960	3657,93
	2	159,88	43,9	3641,838	
	3	160,07	43,7	3663,005	

Pada Tabel 4.16 dapat dilihat bahwa pada mortar dengan variasi *silica slurry* 10%, nilai kecepatan rambat gelombang pada hari ke-7 sebesar 3560,876 m/s, pada hari ke-14 sebesar 3601,652 m/s, pada hari ke-21 sebesar 3643,698 m/s, dan pada hari ke-28 sebesar 3657,934 m/s. Dapat dilihat terjadi peningkatan nilai kecepatan rambat gelombang pada hari ke-7 hingga hari ke-28 sebesar 97,058 m/s. Peningkatan kecepatan rambat gelombang seiring bertambahnya umur pengujian mengindikasikan bahwa proses hidrasi mortar berjalan dengan baik, sehingga kepadatan mortar meningkat seiring bertambahnya umur benda uji.

4.4.4 Analisis Uji UPV Variasi *Silica Slurry* 15%

Dari monitor pada alat PUNDIT, diperoleh pembacaan hasil UPV untuk mortar dengan variasi *silica slurry* 15% yang disajikan pada .

Tabel 4.17.

Tabel 4.17 UPV Variasi 15%

Umur (hari)	Benda Uji	Panjang (mm)	Waktu (μ m)	Kecepatan (m/s)	Kecepatan rata-rata (m/s)
7	1	160,13	47,4	3378,270	3377,85
	2	160,11	47,4	3377,848	
	3	160,09	47,4	3377,426	
14	1	160,19	44,9	3567,595	3567,41
	2	160,26	44,9	3569,265	
	3	160,09	44,9	3565,367	
21	1	160,26	44,4	3609,347	3580,51
	2	160,11	44,9	3565,924	
	3	160,13	44,9	3566,258	
28	1	160,14	43,9	3647,912	3605,80
	2	160,09	44,4	3605,556	
	3	160,02	44,9	3563,920	

Pada .

Tabel 4.17 dapat dilihat bahwa pada mortar dengan variasi *silica slurry* 10%, nilai kecepatan rambat gelombang pada hari ke-7 sebesar 3377,848 m/s, pada hari ke-14 sebesar 3567,409 m/s, pada hari ke-21 sebesar 3580,510 m/s, dan pada hari ke-28 sebesar 3605,796 m/s. Dapat dilihat terjadi peningkatan nilai kecepatan rambat gelombang pada hari ke-7 hingga hari ke-28 sebesar 227,948 m/s. Peningkatan kecepatan rambat gelombang seiring bertambahnya umur pengujian mengindikasikan bahwa proses hidrasi mortar berjalan dengan baik, sehingga kepadatan mortar meningkat seiring bertambahnya umur benda uji.

4.4.5 Analisis Uji UPV Variasi *Silica Slurry* 20%

Dari monitor pada alat PUNDIT, diperoleh pembacaan hasil UPV untuk mortar dengan variasi *silica slurry* 20% yang disajikan pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18 UPV Variasi 20%

Umur (hari)	Benda Uji	Panjang (mm)	Waktu (μ m)	Kecepatan (m/s)	Kecepatan rata-rata (m/s)
7	1	160,25	48,9	3277,096	3282,57
	2	159,60	48,9	3263,804	
	3	160,05	48,4	3306,818	
14	1	160,47	46,9	3421,535	3412,83
	2	159,63	46,9	3403,518	
	3	160,09	46,9	3413,433	
21	1	160,30	46,4	3454,741	3447,41
	2	159,58	46,4	3439,224	
	3	160,00	46,4	3448,276	
28	1	160,20	46,4	3452,658	3471,20
	2	159,47	45,9	3474,365	
	3	160,03	45,9	3486,565	

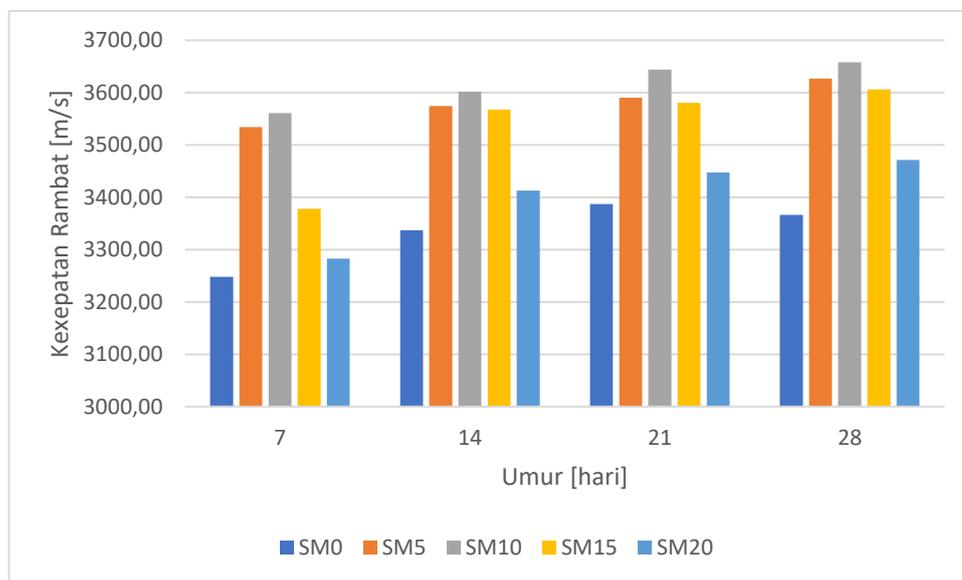
Pada Tabel 4.18 dapat dilihat bahwa pada mortar dengan variasi *silica slurry* 10%, nilai kecepatan rambat gelombang pada hari ke-7 sebesar 3282,573 m/s, pada hari ke-14 sebesar 3412,829 m/s, pada hari ke-21 sebesar 3447,414 m/s, dan pada hari ke-28 sebesar 3471,196 m/s. Dapat dilihat terjadi peningkatan nilai kecepatan rambat gelombang pada hari ke-7 hingga hari ke-28 sebesar 188,623 m/s. Peningkatan kecepatan rambat gelombang seiring bertambahnya umur pengujian mengindikasikan bahwa proses hidrasi mortar berjalan dengan baik, sehingga kepadatan mortar meningkat seiring bertambahnya umur benda uji.

4.4.6 Perbandingan Hasil Uji UPV Antar Variasi

Hasil uji UPV pada Tabel 4.14 hingga Tabel 4.18 direkapitulasi dalam Tabel 4.19.

Tabel 4.19 Rekapitulasi UPV Tiap Variasi

Mixture Code	UPV Rata-Rata [MPa]			
	Umur 7 hari	Umur 14 hari	Umur 21 hari	Umur 28 hari
SM0	3248,07	3337,05	3387,05	3366,26
SM5	3534,15	3574,36	3590,43	3626,59
SM10	3560,88	3601,65	3643,70	3657,93
SM15	3377,85	3567,41	3580,51	3605,80
SM20	3282,57	3412,83	3447,41	3471,20



Grafik 4.3 Rekapitulasi UPV Tiap Variasi

Dapat ditinjau dari Grafik 4.3, bahwa dengan adanya penambahan *silica slurry* pada campuran mortar akan meningkatkan kecepatan rambat gelombang ultrasonik pada benda uji. Dapat dilihat pula pada Grafik 4.3, bahwa benda uji dengan variasi penambahan *silica slurry* 10% memiliki kecepatan rambat tertinggi secara konsisten selama interval umur pengujian, sehingga dapat dinyatakan bahwa variasi 10% merupakan persentase optimum penambahan *silica slurry*. Sementara, kecepatan rambat terendah pada seluruh umur pengujian diperoleh benda uji dengan variasi *silica slurry* 0%.

4.5 Analisis Hubungan Kekuatan Lentur dan UPV

Setelah melakukan rangkaian analisis kekuatan lentur dan uji UPV mortar, kedua hasil tersebut dapat dikorelasikan melalui suatu persamaan eksponensial. Nilai kekuatan lentur mortar diperoleh dengan melakukan uji pada 3 sampel benda uji berbentuk balok berukuran $40 \times 40 \times 160$ mm untuk masing-masing variasi pada tiap umur pengujian, dengan bantuan alat *Universal Testing Machine*. Sementara, nilai kecepatan rambat gelombang ultrasonik dari uji UPV diperoleh dengan bantuan alat PUNDIT yang digunakan pada benda uji berbentuk balok dengan dimensi yang sama dan dilakukan juga pada 3 sampel benda uji untuk masing-masing variasi dan tiap umur pengujian.

Berdasarkan penelitian oleh Halim *et al.* (2017), koefisien determinasi (R^2) dapat dikatakan baik apabila nilainya lebih dari 0,5. Adapun interpretasi koefisien determinasi (R^2) terhadap tingkat hubungan yang diperlihatkan pada Tabel 4.20.

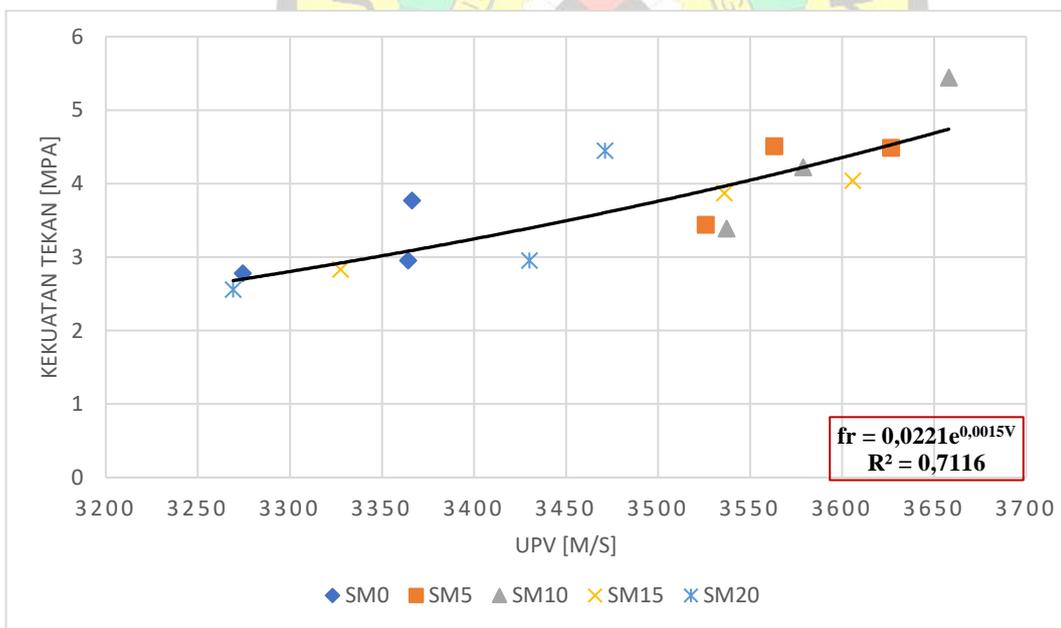
Tabel 4.20 Interpretasi Koefisien Determinasi

Koefisien Determinasi	Tingkat Hubungan
0,00 – 0,199	Sangat Rendah
0,20 – 0,399	Rendah
0,40 – 0,599	Sedang
0,60 – 0,799	Kuat
0,80 – 1,00	Sangat Kuat

Data hasil pengujian kekuatan lentur dan UPV dirangkum dalam Tabel 4.21, dan kemudian dimasukkan ke dalam grafik seperti pada Grafik 4.4. Dari titik-titik pada grafik, dapat dibuat garis tren kurva eksponensial untuk memperoleh koefisien determinasi (R^2) dan persamaan kekuatan lentur berdasarkan kecepatan rambat gelombang ultrasonik.

Tabel 4.21 Data kekuatan lentur dan UPV tiap variasi

Variasi	Kekuatan Lentur [MPa]	UPV [m/s]
0%	3274,40	2,78
	3364,21	2,95
	3366,26	3,77
5%	3525,82	3,44
	3563,03	4,51
	3626,59	4,48
10%	3537,30	3,39
	3578,80	4,22
	3657,93	5,44
15%	3327,49	2,83
	3535,95	3,87
	3605,80	4,04
20%	3269,12	2,56
	3430,14	2,95
	3471,20	4,45



Grafik 4.4 Hubungan Kekuatan Lentur dan UPV

Dapat dilihat pada Grafik 4.4, diperoleh koefisien determinasi (R^2) yang bernilai 0,7116 sehingga Tingkat hubungannya dikategorikan sebagai kategori

kuat. Kemudian, juga dapat diperoleh Persamaan 4.1 untuk memperhitungkan kekuatan lentur apabila diketahui nilai kecepatan rambat gelombang ultrasonik.

$$f_r = 0,0221e^{0,0015V} \quad (4.1)$$

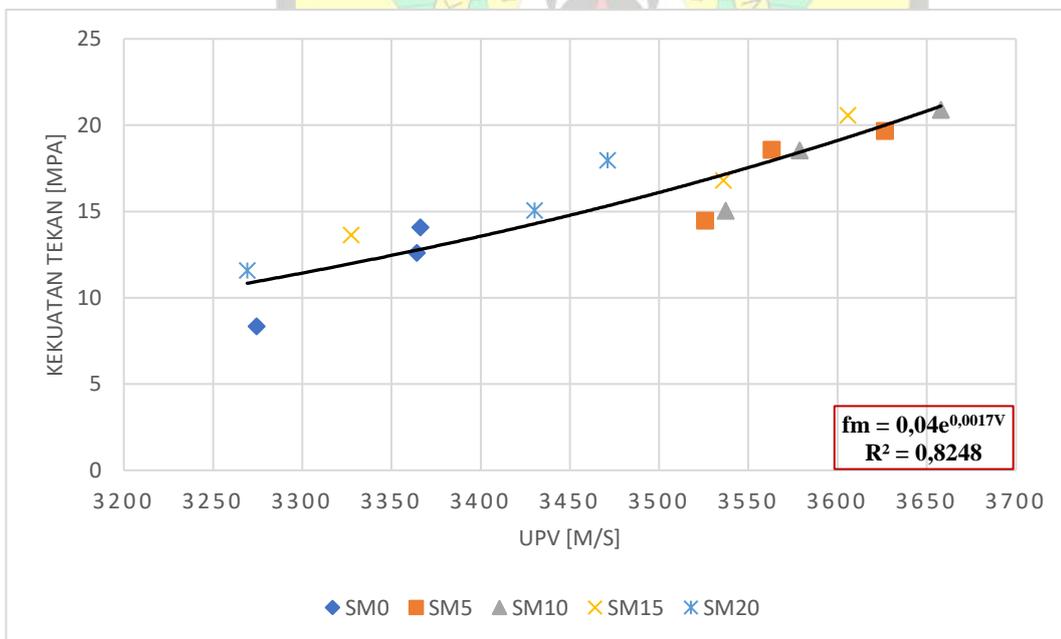
4.6 Analisis Hubungan Kekuatan Tekan dan UPV

Setelah melakukan rangkaian analisis kekuatan tekan dan uji UPV mortar, kedua hasil tersebut dapat dikorelasikan melalui suatu persamaan eksponensial seperti pada hubungan kekuatan lentur dan UPV. Nilai kekuatan tekan mortar diperoleh dengan melakukan uji pada 3 sampel benda uji yang merupakan potongan benda uji hasil dari uji kuat lentur dengan ukuran panjang ≥ 65 mm dan bebas dari retakan, pecahan, dan kecacatan yang kasat mata. Pengujian dilakukan untuk masing-masing variasi pada tiap umur pengujian, dengan bantuan alat *Universal Testing Machine*. Sementara, nilai kecepatan rambat gelombang ultrasonik dari uji UPV diperoleh dengan bantuan alat PUNDIT yang digunakan pada benda uji berbentuk balok dengan dimensi yang sama dan dilakukan juga pada 3 sampel benda uji untuk masing-masing variasi dan tiap umur pengujian. Pada analisis hubungan kekuatan tekan terhadap UPV, diperoleh koefisien determinasi (R^2) untuk menentukan tingkat hubungan dan diperoleh juga persamaan hubungan kuat tekan terhadap UPV.

Data hasil pengujian kekuatan tekan dan UPV dirangkum dalam Tabel 4.22, dan kemudian dimasukkan ke dalam grafik seperti pada Grafik 4.5. Dari titik-titik pada grafik, dapat dibuat garis tren kurva eksponensial untuk memperoleh koefisien determinasi (R^2) dan persamaan kekuatan tekan berdasarkan kecepatan rambat gelombang ultrasonik.

Tabel 4.22 Data kekuatan tekan dan UPV tiap variasi

Variasi	Kekuatan Tekan [MPa]	UPV [m/s]
0%	3274,40	8,36
	3364,21	12,60
	3366,26	14,08
5%	3525,82	14,47
	3563,03	18,57
	3626,59	19,68
10%	3537,30	15,05
	3578,80	18,55
	3657,93	20,90
15%	3327,49	13,64
	3535,95	16,81
	3605,80	20,58
20%	3269,12	11,59
	3430,14	15,06
	3471,20	17,97



Grafik 4.5 Hubungan Kekuatan Tekan dan UPV

Dapat dilihat pada Grafik 4.5, diperoleh koefisien determinasi (R^2) yang bernilai 0,8248 sehingga tingkat hubungannya dikategorikan sebagai kategori sangat kuat. Kemudian, juga dapat diperoleh Persamaan 4.2 untuk memperhitungkan kekuatan tekan apabila diketahui nilai kecepatan rambat gelombang ultrasonik.

$$f_m = 0,04e^{0,0017V} \quad (4.2)$$

4.7 Analisis Uji Absorpsi Mortar

Pengujian absorpsi pada mortar ditujukan untuk mengukur jumlah air yang dapat diserap benda uji ketika direndam dalam air selama waktu yang ditentukan. Pengujian dilakukan pada potongan benda uji hasil pengujian kekuatan lentur berdasarkan standar ASTM C642. Dilakukan pengujian untuk variasi *silica slurry* 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% pada umur pengujian 7, 14, dan 28 hari dengan 3 buah sampel untuk masing-masing variasi.

4.7.1 Analisis Uji Absorpsi Mortar Variasi *Silica Slurry* 0%

Hasil pengujian absorpsi untuk variasi *silica slurry* 0% setelah dilakukan penimbangan pada benda uji, dirangkum pada Tabel 4.23.

Tabel 4.23 Absorpsi variasi 0%

Umur (hari)	Benda Uji	Massa OD (gram)	Massa SSD (gram)	Absorpsi %	Absorpsi rata-rata %
7	1	235,4	261,9	11,257	11,26
	2	241,9	269,4	11,368	
	3	252	280,1	11,151	
14	1	234,8	261,9	11,542	11,60
	2	233,9	261	11,586	
	3	224,3	250,5	11,681	
28	1	234,8	259,9	10,690	10,50
	2	242,9	268,4	10,498	
	3	247,9	273,5	10,327	

Dari Tabel 4.23 dapat dilihat bahwa untuk mortar dengan variasi *silica slurry* 0%, umur pengujian 7 hari memiliki absorpsi sebesar 11,259%, pada umur 14 hari sebesar 11,603%, dan pada 28 hari sebesar 10,505%. Seiring bertambahnya umur pengujian, terjadi penurunan nilai absorpsi beriringan pula dengan peningkatan kepadatan benda uji. Tetapi, seperti pada Tabel 4.23 terjadi kenaikan nilai absorpsi pada hari ke-7 ke hari ke-14 sebesar 0,344%. Hal ini dapat disebabkan benda uji pada hari ke-14 tidak sama dengan benda uji pada hari ke-7. Maka, pemadatan ketika melakukan proses pencetakan dapat berpengaruh pada penambahan ruang kosong pada benda uji hari ke-14 yang menyebabkan nilai absorpsi meningkat dari yang seharusnya. Absorpsi pada hari ke-7 ke hari ke-28 menurun sebesar 1,098%.

4.7.2 Analisis Uji Absorpsi Mortar Variasi *Silica Slurry* 5%

Hasil pengujian absorpsi untuk variasi *silica slurry* 5% setelah dilakukan penimbangan pada benda uji, dirangkum pada Tabel 4.24.

Tabel 4.24 Absorpsi variasi 5%

Umur (hari)	Benda Uji	Massa OD (gram)	Massa SSD (gram)	Absorpsi %	Absorpsi rata-rata %
7	1	220	244,2	11,000	11,22
	2	243,8	271,2	11,239	
	3	239,3	266,6	11,408	
14	1	221,8	251,4	13,345	10,39
	2	241,3	266,8	10,568	
	3	252,6	278,4	10,214	
28	1	248,6	274,1	10,257	10,36
	2	225,8	248,9	10,230	
	3	241,5	267,1	10,600	

Dari Tabel 4.24 dapat dilihat bahwa untuk mortar dengan variasi *silica slurry* 5%, umur pengujian 7 hari memiliki absorpsi sebesar 11,216%, pada umur

14 hari sebesar 10,391%, dan pada 28 hari sebesar 10,363%. Dapat dilihat juga bahwa seiring bertambahnya umur pengujian, nilai absorpsi juga menurun. Absorpsi pada hari ke-7 ke hari ke-28 menurun sebesar 0,853%. Penurunan nilai absorpsi juga mengindikasikan bahwa proses hidrasi mortar berjalan dengan baik, sehingga terjadi peningkatan kepadatan seiring bertambahnya umur.

4.7.3 Analisis Uji Absorpsi Mortar Variasi *Silica Slurry* 10%

Hasil pengujian absorpsi untuk variasi *silica slurry* 10% setelah dilakukan penimbangan pada benda uji, dirangkum pada Tabel 4.25.

Tabel 4.25 Absorpsi variasi 10%

Umur (hari)	Benda Uji	Massa OD (gram)	Massa SSD (gram)	Absorpsi %	Absorpsi rata-rata %
7	1	232,5	258,1	11,011	10,98
	2	243,6	270,2	10,920	
	3	248,2	275,5	10,999	
14	1	234,4	259,3	10,623	10,58
	2	246,7	273,2	10,742	
	3	240,8	265,8	10,382	
28	1	251,4	276,5	9,984	10,13
	2	224,7	247,7	10,236	
	3	226,4	249,4	10,159	

Dari Tabel 4.25 dapat dilihat bahwa untuk mortar dengan variasi *silica slurry* 10%, umur pengujian 7 hari memiliki absorpsi sebesar 10,976%, pada umur 14 hari sebesar 10,582%, dan pada 28 hari sebesar 10,126%. Dapat dilihat juga bahwa seiring bertambahnya umur pengujian, nilai absorpsi juga menurun. Absorpsi pada hari ke-7 ke hari ke-28 menurun sebesar 0,85%. Penurunan nilai absorpsi juga mengindikasikan bahwa proses hidrasi mortar berjalan dengan baik, sehingga terjadi peningkatan kepadatan seiring bertambahnya umur.

4.7.4 Analisis Uji Absorpsi Mortar Variasi *Silica Slurry* 15%

Hasil pengujian absorpsi untuk variasi *silica slurry* 15% setelah dilakukan penimbangan pada benda uji, dirangkum pada Tabel 4.26.

Tabel 4.26 Absorpsi variasi 15%

Umur (hari)	Benda Uji	Massa OD (g)	Massa SSD (g)	Absorpsi %	Absorpsi rata-rata %
7	1	229,5	254,1	10,719	10,75
	2	246,3	272,7	10,719	
	3	234,9	260,3	10,813	
14	1	257,9	285,8	10,818	10,83
	2	229,3	254,1	10,816	
	3	235,7	261,3	10,861	
28	1	246,5	271,9	10,304	10,22
	2	242,5	267,1	10,144	
	3	250,8	276,4	10,207	

Dari Tabel 4.26 dapat dilihat bahwa untuk mortar dengan variasi *silica slurry* 15%, umur pengujian 7 hari memiliki absorpsi sebesar 10,75%, pada umur 14 hari sebesar 10,832%, dan pada 28 hari sebesar 10,219%. Pada teorinya, seiring bertambahnya umur pengujian, seharusnya terjadi penurunan nilai absorpsi seiring dengan bertambah padatnya benda uji. Tetapi, seperti pada Tabel 4.23 terjadi kenaikan nilai absorpsi pada hari ke-7 ke hari ke-14 sebesar 0,082%. Hal ini dapat disebabkan benda uji pada hari ke-14 tidak sama dengan benda uji pada hari ke-7. Maka, pemadatan ketika melakukan proses pencetakan dapat berpengaruh pada penambahan ruang kosong pada benda uji hari ke-14 yang menyebabkan nilai absorpsi meningkat dari yang seharusnya. Absorpsi pada hari ke-7 ke hari ke-28 menurun sebesar 0,531 %.

4.7.5 Analisis Uji Absorpsi Mortar Variasi *Silica Slurry* 20%

Hasil pengujian absorpsi untuk variasi *silica slurry* 20% setelah dilakukan penimbangan pada benda uji, dirangkum pada Tabel 4.27.

Tabel 4.27 Absorpsi variasi 20%

Umur (hari)	Benda Uji	Massa OD (gram)	Massa SSD (gram)	Absorpsi %	Absorpsi rata-rata %
7	1	245,5	272,4	10,957	10,83
	2	243	269,1	10,741	
	3	238,1	263,8	10,794	
14	1	233,4	258,5	10,754	10,78
	2	239,4	265,3	10,819	
	3	232,5	257,5	10,753	
28	1	247,9	272,2	9,802	9,86
	2	235	258,6	10,043	
	3	240,7	264,1	9,722	

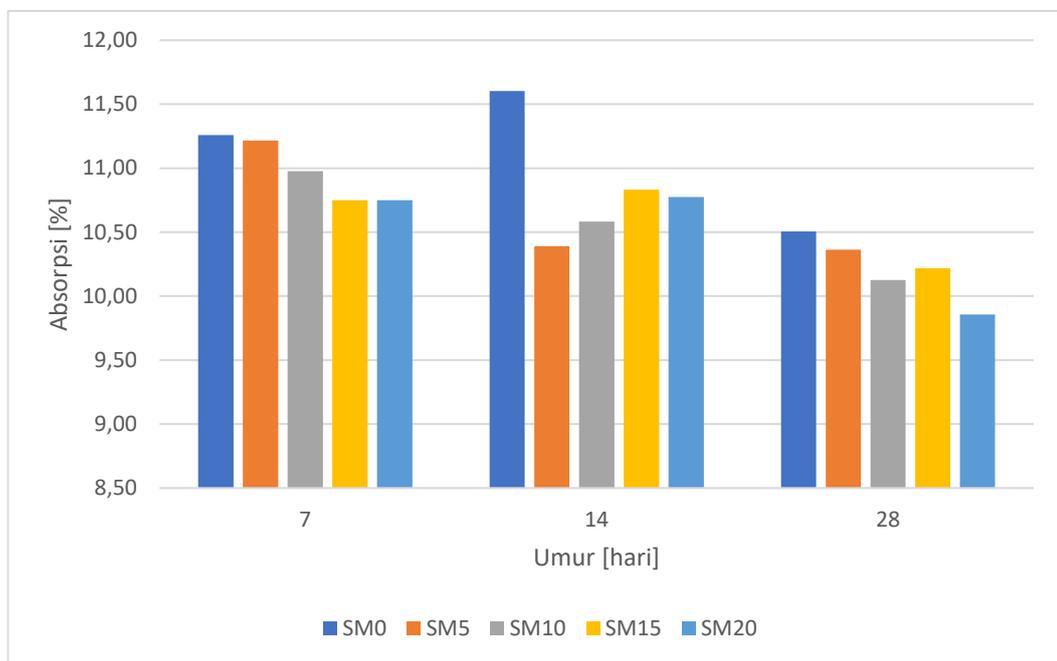
Dari Tabel 4.27 dapat dilihat bahwa untuk mortar dengan variasi *silica slurry* 20%, umur pengujian 7 hari memiliki absorpsi sebesar 10,831%, pada umur 14 hari sebesar 10,775%, dan pada 28 hari sebesar 9,856 %. Dapat dilihat juga bahwa seiring bertambahnya umur pengujian, nilai absorpsi juga menurun. Absorpsi pada hari ke-7 ke hari ke-28 menurun sebesar 0,975%. Penurunan nilai absorpsi juga mengindikasikan bahwa proses hidrasi mortar berjalan dengan baik, sehingga terjadi peningkatan kepadatan seiring bertambahnya umur.

4.7.6 Perbandingan Hasil Uji Absorpsi Antar Variasi

Hasil uji absorpsi pada Tabel 4.23 hingga Tabel 4.27 direkapitulasi dalam Tabel 4.28.

Tabel 4.28 Rekapitulasi Uji Absorpsi Tiap Variasi

Mixture Code	Absorpsi Rata-Rata [%]		
	Umur 7 hari	Umur 14 hari	Umur 28 hari
SM0	11,26	11,60	10,50
SM5	11,22	10,39	10,36
SM10	10,98	10,58	10,13
SM15	10,75	10,83	10,22
SM20	10,75	10,78	9,86



Grafik 4.6 Rekapitulasi Absorpsi Tiap Variasi

Pada Grafik 4.6 dapat dilihat bahwa penambahan *silica slurry* pada campuran mortar menyebabkan penurunan absorpsi seiring bertambahnya umur pengujian. Berdasarkan Grafik 4.6, pada hari ke-28 absorpsi paling rendah dimiliki oleh campuran mortar dengan kadar *silica slurry* 20% dengan persentase absorpsi 9,86%. Sementara, persentase absorpsi pada hari ke-28 paling tinggi sebesar 10,50% dimiliki mortar dengan kadar *silica slurry* 0%. Maka dapat disimpulkan bahwa penambahan *silica slurry* pada campuran mortar berdampak baik pada kepadatan mortar karena semakin tinggi kadar *silica slurry*, semakin rendah persentase absorpsi.