SKRIPSI

STUDI EKSPERIMENTAL MORTAR RINGAN BERBASIS PALM OIL FUEL ASH (POFA)

Disusun Oleh:

WILLA SAPUTRI

NPM. 220204006

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS ISLAM KUANTAN SINGINGI

TELUK KUANTAN TAHUN

2026

PENGESAHAN SKRIPSI

Diperiksa dan disahkan oleh Panitia Ujian Skripsi

Fakultas Teknik

Universitas islam Kuantan Singingi

Pada :

Hari : Senin

Tanggal : 7

Bulan : September

Tahun : 2026

Tim Penguji

KETUA	SEKRETARIS
AGUS CANDRA, S.T.,M.Si	**SURYA ADINATA, S.T.,M.ST**
NIDN.10 200887 01	**NIDN.10 05097703**

1. **IWAYAN DERMANA, S.T.,MSc** **(Pebimbing I)** ( )
2. **ADE IRAWAN, S.T.,M.T** **(Penguji I)** ( )
3. **MELIA NURAFNI S.T.,M.Sc** **(Penguji II)** ( )

Mengetahui,
Dekan Fakultas Teknik
Universitas Islam Kuantan Singingi

AGUS CANDRA, ST.MSi
NIDN.1020088701

TANDA PERSETUJUAN SKRIPSI

JUDUL	**:STUDI EKSPERIMENTAL MORTAR RINGAN BERBASIS PALM OIL FUEL ASH (POFA)**
NAMA	**: WILLA SAPUTRI**
NPM	**: 220204006**
PROGRAM STUDI	**: TEKNIK SIPIL**
FAKULTAS	**: TEKNIK**
UNIVERSITAS	**: ISLAM KUANTAN SINGINGI**

Telah Diperiksa dan Disetujui oleh Dosen Pebimbing

PEBIMBING I	**PEBIMBING II**
SURYA ADINATA S.T.,M.T	**IWAYAN DERMANA, S.T.,M.Sc**
NIDN.10 05097703	**NIDN.10 021183011**

Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Sipil

Fakultas Teknik

Universitas Islam Kuantan Singingi

IWAYAN DERMANA, S.T.,M.Sc

NIDN. 10 021183 01

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penggunaan Palm Oil Fuel Ash (POFA) sebagai substitusi sebagian semen terhadap sifat mortar ringan serta menentukan persentase POFA yang menghasilkan kuat tekan tertinggi. Variasi penggunaan POFA yang digunakan adalah 0%, 10%, 20%, 30%, dan 40% dari berat semen. Pengujian dilakukan pada umur 7, 14, dan 28 hari dengan benda uji berbentuk kubus berukuran 15 × 15 × 15 cm. Parameter yang diuji meliputi densitas dan kuat tekan mortar.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada umur 28 hari, densitas mortar berturut-turut sebesar 1.156 kg/m³, 948 kg/m³, 919 kg/m³, 830 kg/m³, dan 770 kg/m³ untuk variasi 0%, 10%, 20%, 30%, dan 40% POFA. Nilai kuat tekan pada umur 28 hari berturut-turut sebesar 3,11 MPa, 3,33 MPa, 2,44 MPa, 2,00 MPa, dan 2,00 MPa. Penggunaan POFA hingga 10% menunjukkan peningkatan kuat tekan dibandingkan mortar tanpa POFA, sedangkan penggunaan POFA di atas 10% cenderung menurunkan kuat tekan. Berdasarkan hasil penelitian, variasi 10% POFA merupakan variasi optimum dengan kuat tekan tertinggi sebesar 3,33 MPa pada umur 28 hari. Seluruh variasi mortar memiliki densitas di bawah 1.400 kg/m³ sehingga memenuhi batas densitas mortar ringan yang direncanakan.

Kata kunci: Palm Oil Fuel Ash (POFA), mortar ringan, densitas, kuat tekan.

ABSTRAK

This study aims to determine the effect of Palm Oil Fuel Ash (POFA) as a partial cement replacement on the properties of lightweight mortar and to determine the percentage of POFA that produces the highest compressive strength. The POFA replacement variations used were 0%, 10%, 20%, 30%, and 40% of the cement weight. The tests were conducted at the ages of 7, 14, and 28 days using cubic specimens measuring 15 × 15 × 15 cm. The tested parameters included mortar density and compressive strength.

The results showed that at 28 days, the mortar densities were 1,156 kg/m³, 948 kg/m³, 919 kg/m³, 830 kg/m³, and 770 kg/m³ for the 0%, 10%, 20%, 30%, and 40% POFA variations, respectively. The corresponding compressive strengths at 28 days were 3.11 MPa, 3.33 MPa, 2.44 MPa, 2.00 MPa, and 2.00 MPa. The use of POFA up to 10% increased the compressive strength compared with mortar without POFA, while POFA replacement above 10% tended to decrease the compressive strength. Based on the results, 10% POFA was identified as the optimum variation, achieving the highest compressive strength of 3.33 MPa at 28 days. All mortar variations had densities below the planned limit of 1,400 kg/m³, indicating that they met the planned lightweight mortar density requirement.

***Keywords**: Palm Oil Fuel Ash (POFA), lightweight mortar, density, compressive strength.*

KATA PENGANTAR

Puji syukur kita panjatkan kehadirat Allah SWT, yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya kepada kita semua, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.

Skripsi ini merupakan salah satu syarat dalam sistem akademik, khususnya pada Jurusan Teknik Sipil, untuk memenuhi kewajiban dalam meraih gelar Sarjana Strata 1 serta untuk mengembangkan sumber daya manusia dalam bentuk tulisan ilmiah.

Skripsi ini berjudul **"STUDI EKSPERIMENTAL MORTAR RINGAN BERBASIS PALM OIL FUEL ASH (POFA)."**

Dengan telah selesainya skripsi ini, penulis menyadari bahwa tidak terlepas dari bantuan, dukungan, serta peran serta berbagai pihak yang telah membantu. Untuk itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Dr. Ikrima Mailani, S.Pd.I., M.Pd.I selaku Rektor Universitas Islam Kuantan Singingi.
2. Bapak Agus Candra, S.T., M,Si selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Islam Kuantan Singingi.
3. Bapak Iwayan Dermana, S.T., M,Sc selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil sekaligus Pembimbing II.
4. Bapak Surya Adinata, S.T., M.T selaku dosen Program Studi Teknik Sipil sekaligus Pembimbing I.
5. Bapak Ade Irawan, S.T., M.T selaku dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Islam Kuantan Singingi.
6. Bapak Chitra Hermawan, S.T., M.Si selaku dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Islam Kuantan Singingi.
7. Ibu Melia Nurafni, S.T., M.Si selaku dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Islam Kuantan Singingi.
8. Bapak Elpi Riska, S.T.,M.T Selaku dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Islam Kuantan Singingi.

9. Kepada kedua orang tua tercinta, Bapak dan Omak, terima kasih atas cinta, kasih sayang, doa, dan pengorbanan yang tiada henti. Meskipun tidak pernah merasakan bangku perkuliahan, Bapak dan omak selalu berusaha memberikan pendidikan terbaik bagi penulis. Gelar ini menjadi salah satu bentuk rasa terima kasih penulis atas segala perjuangan yang telah diberikan.
10. Kepada adik perempuan satu-satunya yang penulis sayangi. Terima kasih atas kebersamaan, perhatian, dan dukungan yang diberikan. Maaf untuk setiap marah dan pertengkaran yang pernah terjadi. Semoga kita selalu saling menyayangi dan membanggakan kedua orang tua.
11. Kepada seluruh keluarga tercinta, terima kasih atas kasih sayang, doa, dukungan, dan semangat yang selalu diberikan kepada penulis selama menjalani perkuliahan hingga menyelesaikan skripsi ini. Semoga keberhasilan ini dapat menjadi kebahagiaan dan kebanggaan bagi keluarga.
12. Kepada Angah dan Pak Angah, terima kasih atas pengertian, kebaikan, dan kemudahan yang telah diberikan selama penulis menjalani kuliah sambil bekerja. Dukungan dan kelonggaran waktu yang diberikan sangat berarti bagi penulis hingga dapat menyelesaikan pendidikan ini.
13. Kepada Teman-teman seperjuangan khususnya, Azirah, Eva Refita, Siti Nurmaysarah, Nur Ramadhani, dan Mita Purnama, terima kasih telah menjadi sahabat dan menemani penulis sejak lama.
14. Teman-teman satu angkatan Program Studi Teknik Sipil.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, saran dan kritik yang bersifat membangun demi kesempurnaan skripsi ini sangat penulis harapkan dengan senang hati.

Teluk Kuantan, 26 Mei 2026

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN i
LEMBAR PENGESAHAN ii
LEMBAR TIM PENGUJI iii
HALAMAN PENGESAHAN iv
PERNYATAAN TENTANG ORIGINALITAS v
MOTTO vi
ABSTRAK vii
ABSTRACT viii
KATA PENGANTAR ix
DAFTAR ISI xi
DAFTAR TABEL xiii
DAFTAR GAMBAR xiv
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Tujuan Penelitian 2
1.4 Manfaat Penelitian 3
1.5 Batasan Masalah 3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 5
2.1 Umum 5
2.2 Penelitian Sebelumnya 5
2.3 Mortar 7
2.4 Bahan Penyusun Mortar Ringan 8
2.5 Palm Oil Fuel Ash (Pofa) 9
2.6 Kuat Tekan (*Compressive Strength*) 11
2.7 *Density* Mortar Ringan 11
BAB III METODOLOGI PENELITIAN 13
3.1 Lokasi Penelitian 13
3.2 Alat Dan Bahan Penelitian 13
3.3 Rancangan Penelitian 16

3.4 Prosedur Penelitian.....20
3.5 Bagan Alir Penelitian 23
3.6 Jadwal Penelitian.....24
BAB iV KESIMPULAN DAN SARAN 25
4.1 Kesimpulan 25
4.2 Saran.....26
DAFTAR PUSTAKA 27

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Mortar merupakan salah satu material konstruksi yang paling banyak digunakan dalam pekerjaan bangunan, meliputi pekerjaan plesteran, pasangan bata, dan pekerjaan finishing. Mortar konvensional tersusun dari campuran semen Portland, agregat halus (pasir), dan air dengan proporsi tertentu. Dalam perkembangan teknologi konstruksi, mortar ringan (*lightweight mortar*) semakin diminati karena kemampuannya mengurangi beban mati pada struktur bangunan sekaligus tetap mempertahankan kekuatan mekanik yang memadai (Mulyono, 2004).

Penggunaan semen Portland sebagai bahan pengikat utama dalam mortar berdampak negatif terhadap lingkungan. Proses produksi semen Portland diketahui menyumbang sekitar 5–8% emisi gas CO_2 global setiap tahunnya (Hamada et al., 2020). Hal ini mendorong para peneliti dan praktisi teknik sipil untuk mencari bahan alternatif yang dapat mensubstitusi sebagian penggunaan semen, salah satunya adalah bahan pozzolan seperti Palm Oil Fuel Ash (POFA).

Palm Oil Fuel Ash (POFA) atau abu terbang cangkang kelapa sawit merupakan limbah hasil pembakaran cangkang dan serat (fiber) kelapa sawit pada boiler pabrik minyak kelapa sawit. POFA mengandung senyawa silika (SiO_2) sekitar 56%, alumina (Al_2O_3), dan besi oksida (Fe_2O_3) dalam jumlah yang signifikan, sehingga bersifat pozzolan dan berpotensi bereaksi dengan $Ca(OH)_2$ dari hidrasi semen membentuk kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang meningkatkan kepadatan dan kekuatan mortar (Rahman et al., 2025).

Provinsi Riau, khususnya Kabupaten Kuantan Singingi, merupakan salah satu daerah penghasil kelapa sawit terbesar di Indonesia dengan rata-rata produksi mencapai 2 juta ton per tahun. Aktivitas pengolahan kelapa sawit di wilayah ini menghasilkan limbah POFA dalam jumlah yang sangat besar setiap harinya namun belum dimanfaatkan secara optimal. Sebagian besar POFA hanya dibuang atau ditimbun di sekitar pabrik sehingga berpotensi mencemari lingkungan (Rahmadi *et al*., 2021). Pemanfaatan POFA sebagai bahan bangunan merupakan solusi yang dapat memberikan nilai tambah terhadap limbah industri kelapa sawit sekaligus

mendukung konsep konstruksi ramah lingkungan dan berkelanjutan (*sustainable construction*).

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penggunaan POFA sebagai substitusi semen pada mortar dapat memengaruhi kuat tekan. Azhar *et al*. (2022) menemukan bahwa inklusi POFA 2,5% menghasilkan kuat tekan mortar dengan 2,5% POFA mencapai 37,7 MPa pada umur 28 hari yang melampaui kuat tekan target 30 MPa. Selain itu, Kunchariyakun *et al*. (2024) melaporkan bahwa POFA berperan dalam produksi beton ringan yang lebih berkelanjutan dengan penurunan emisi karbon yang signifikan. Namun, penelitian mengenai pengaruh POFA pada mortar ringan dengan variasi persentase yang lebih luas masih perlu dikaji lebih mendalam, khususnya dalam konteks kondisi material lokal di Kabupaten Kuantan Singingi.

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, maka peneliti tertarik untuk melakukan penelitian dengan judul "Pemanfaatan Palm Oil Fuel Ash (POFA) sebagai Substitusi Semen terhadap Kuat Tekan Mortar Ringan".

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh variasi persentase POFA sebagai substitusi semen terhadap nilai kuat tekan mortar ringan?
2. Berapa persentase optimum penggantian semen dengan POFA yang menghasilkan mortar ringan dengan kuat tekan tertinggi serta berapa nilai density mortar ringan yang dihasilkan?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui pengaruh variasi persentase POFA sebagai substitusi semen terhadap nilai kuat tekan mortar ringan.
2. Menentukan persentase optimum penggantian semen dengan POFA untuk menghasilkan mortar ringan dengan kuat tekan tertinggi dan menentukan nilai density mortar ringan yang dihasilkan.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagi Peneliti

   Penelitian ini diharapkan dapat menambah pengetahuan, wawasan, dan pengalaman peneliti dalam bidang teknologi bahan bangunan, khususnya tentang pemanfaatan limbah industri kelapa sawit sebagai bahan konstruksi yang ramah lingkungan.

2. Bagi Akademik

   Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi ilmiah bagi mahasiswa dan civitas akademika Universitas Islam Kuantan Singingi serta peneliti lain yang ingin mengembangkan penelitian di bidang material bangunan berbasis limbah agroindustri.

3. Bagi Masyarakat dan Industri

   Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi kepada masyarakat dan pelaku industri konstruksi mengenai potensi POFA sebagai bahan pengganti semen yang ekonomis, sehingga dapat mengurangi biaya produksi material bangunan sekaligus membantu mengatasi permasalahan limbah pabrik kelapa sawit di Kabupaten Kuantan Singingi.

4. Bagi Pemerintah

   Hasil penelitian ini dapat dijadikan sebagai bahan pertimbangan dalam perumusan kebijakan pengelolaan limbah agroindustri dan pengembangan material bangunan lokal yang berkelanjutan di Provinsi Riau.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terfokus dan terarah, maka ditetapkan batasan masalah sebagai berikut :

1. POFA yang digunakan berasal dari pabrik kelapa sawit yang ada di wilayah Kabupaten Kuantan Singingi, Provinsi Riau.
2. Variasi persentase substitusi POFA terhadap berat semen adalah 0%, 10%, 20%, dan 40%.
3. Agregat ringan yang digunakan adalah pasir ringan lokal Kabupaten Kuantan Singingi.

4. Pengujian yang dilakukan hanya terbatas pada kuat tekan mortar ringan.
5. Benda uji berupa kubus dengan ukuran 15 × 15 × 15 cm.
6. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur mortar 7 hari, 14 hari, dan 28 hari.
7. Metode pembuatan mortar ringan menggunakan metode Cellular Lightweight Concrete (CLC).

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Perkembangan teknologi bahan bangunan mendorong peningkatan pemanfaatan limbah industri sebagai bahan substitusi dalam campuran konstruksi. Mortar ringan berbasis bahan pozzolan merupakan salah satu inovasi material bangunan yang dikembangkan untuk mengurangi beban mati struktur sekaligus menurunkan konsumsi semen Portland. Penggunaan Palm Oil Fuel Ash (POFA) sebagai substitusi semen pada mortar ringan memiliki potensi besar mengingat Indonesia merupakan penghasil minyak kelapa sawit terbesar di dunia, sehingga limbah POFA tersedia dalam jumlah yang sangat besar.

Penelitian ini mengkaji pengaruh variasi persentase POFA terhadap kuat tekan mortar ringan. Tinjauan pustaka dalam bab ini membahas penelitian terdahulu yang relevan, teori dasar mortar dan komponennya, karakteristik POFA sebagai pozzolan, serta metode pengujian yang digunakan.

2.2 Penelitian Sebelumnya

Beberapa penelitian terdahulu telah dilakukan berkaitan dengan pemanfaatan POFA dalam campuran mortar dan beton, di antaranya sebagai berikut.

Rahmadi, Maizir, dan Suryanita (2021) meneliti kekuatan mortar Cellular Lightweight Concrete (CLC) dengan tambahan abu cangkang sawit (POFA). Hasil penelitian yang diterbitkan dalam Jurnal Rekayasa Sipil Universitas Andalas menunjukkan bahwa penambahan POFA berpengaruh terhadap kuat tekan mortar CLC, dengan kadar optimal yang menghasilkan peningkatan kekuatan dibandingkan mortar CLC tanpa POFA. Lebih lanjut, mereka menjelaskan bahwa POFA dapat berfungsi sebagai bahan pozzolan karena mengandung silika dan alumina yang dapat bereaksi membentuk bahan semen. Pemanfaatan POFA sebagai bahan substitusi sebagian semen tidak hanya berpotensi meningkatkan sifat mekanik mortar, tetapi juga dapat menjadi alternatif untuk mengurangi penggunaan semen sekaligus memanfaatkan limbah industri kelapa sawit. Dalam penelitian tersebut, komposisi 10% POFA terhadap berat semen menghasilkan kuat tekan rata-

rata tertinggi sebesar 1,41 MPa pada umur 28 hari, atau meningkat sebesar 32,7% dibandingkan mortar tanpa substitusi POFA. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan POFA pada kadar tertentu dapat memberikan kontribusi terhadap peningkatan kekuatan mortar CLC.

Azhar et al. (2022) meneliti pengaruh penambahan POFA dalam kadar rendah sebagai pengganti sebagian pasir pada mortar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan POFA 2,5% menghasilkan nilai kuat tekan mortar mencapai 37,7 MPa pada umur 28 hari yang melampaui kuat tekan target 30 MPa.

Satriani, Tjaronge, dan Caronge (2025) meneliti mortar berkelanjutan dengan campuran S325-POFA. Penelitian ini mengkaji aspek workability, kuat tekan, serta potensi pengurangan emisi CO2. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa penggunaan POFA memberikan pengaruh positif terhadap keberlanjutan lingkungan dengan mengurangi jejak karbon pada produksi mortar.

Kunchariyakun et al. (2024) melaporkan peran POFA dalam beton ringan yang lebih berkelanjutan. Penelitian menggunakan superabsorbent polymers (SAPs) dan POFA pada beton ringan, dan menemukan bahwa kombinasi SAPs-POFA menghasilkan beton ringan dengan emisi CO2 lebih rendah dibandingkan beton aerasi berbasis aluminium konvensional.

Rahman et al. (2025) melakukan tinjauan kritis berbagai jenis POFA dalam meningkatkan sifat beton dan mortar. Kajian komprehensif ini menyimpulkan bahwa POFA yang telah melalui proses kalsinasi ulang dan penghalusan partikel memiliki reaktivitas pozzolan yang lebih tinggi sehingga lebih efektif dalam meningkatkan kepadatan dan kekuatan mekanik campuran semen.

Sari (2021) dalam penelitiannya yang berjudul "Observasi Kuat Tarik Belah Beton Ringan CLC (Cellular Lightweight Concrete) yang Diperkuat Abu Sekam Padi dan Serbuk Cangkang Telur Secara Eksperimental" melakukan penelitian mengenai beton ringan CLC dengan menggunakan abu sekam padi dan serbuk cangkang telur sebagai bahan pengganti sebagian semen. Penelitian tersebut menggunakan perbandingan pasir dan semen 1:2 serta faktor air semen (FAS) sebesar 0,55. Dalam pembuatan beton ringan CLC, digunakan foam agent dengan perbandingan foam agent dan air pengencer sebesar 1:40. Penelitian ini menjadi

salah satu acuan dalam menentukan penggunaan foam agent dan air pengencer pada penelitian mortar ringan yang dilakukan.

2.3 Mortar

2.3.1 Pengertian Mortar

Mortar adalah campuran bahan bangunan yang terdiri dari bahan perekat (semen atau kapur), agregat halus (pasir), dan air dengan perbandingan tertentu. Mortar digunakan secara luas dalam berbagai pekerjaan konstruksi seperti pekerjaan pasangan bata, plesteran dinding, pengisian sambungan, dan pekerjaan finishing (Mulyono, 2004). Menurut SNI 03-6825-2002, mortar semen Portland adalah adukan yang dihasilkan dari campuran semen Portland, agregat halus, dan air yang telah memenuhi persyaratan teknis tertentu.

Neville (2011) mendefinisikan mortar sebagai material komposit yang kekuatannya sangat dipengaruhi oleh rasio air-semen, kualitas agregat, dan proses perawatan (curing). Mortar yang baik harus memiliki karakteristik utama, yaitu kekuatan mekanik yang cukup pada kondisi keras.

2.3.2 Komponen Penyusun Mortar

Mortar terdiri dari tiga komponen utama. Pertama, semen Portland yang berfungsi sebagai bahan pengikat yang mengalami reaksi hidrasi dengan air membentuk pasta semen yang mengikat agregat. Kedua, agregat halus (pasir) yang berfungsi sebagai bahan pengisi untuk memberikan volume dan mengurangi susut akibat pengerasan semen. Ketiga, air yang berfungsi sebagai media reaksi hidrasi semen sekaligus memberikan workability pada campuran mortar segar (Mulyono, 2004).

2.3.3 Mortar Ringan (Lightweight Mortar)

Mortar ringan adalah mortar yang menggunakan agregat ringan sebagai bahan pengisi sehingga memiliki berat isi lebih rendah dari mortar normal, umumnya kurang dari 1.800 kg/m³ (Neville, 2011). Penggunaan mortar ringan dalam konstruksi dapat mengurangi beban mati struktur bangunan sehingga berdampak pada efisiensi dimensi struktur secara keseluruhan (Mulyono, 2004).

Keunggulan mortar ringan antara lain:

(1) mengurangi beban mati struktural,

(2) memiliki sifat insulasi termal yang lebih baik,

(3) mempermudah pekerjaan konstruksi karena massa yang lebih ringan, dan

(4) potensi penghematan material struktur secara keseluruhan.

Namun mortar ringan umumnya memiliki kuat tekan yang lebih rendah dibandingkan mortar normal dengan komposisi bahan pengikat yang sama.

2.3.4 Cellular Lightweight Concrete (CLC)

Cellular Lightweight Concrete (CLC) atau beton ringan seluler adalah jenis beton ringan yang dihasilkan dengan cara menambahkan busa (foam) ke dalam campuran semen, agregat halus, dan air, sehingga terbentuk rongga-rongga udara yang merata di dalam matriks semen. Busa dihasilkan dari campuran bahan pembusa (foaming agent) dengan air menggunakan alat foam generator (Rahmadi et al., 2021). CLC berbeda dengan beton aerasi (AAC/autoclaved aerated concrete) karena CLC tidak memerlukan proses autoclaving sehingga lebih mudah diproduksi di lapangan dengan peralatan yang lebih sederhana.

Karakteristik utama CLC adalah memiliki berat isi yang dapat diatur sesuai kebutuhan, umumnya berkisar antara 400–1.800 kg/m³, dengan kuat tekan yang bervariasi antara 0,5–15 MPa tergantung pada densitas campuran (Rahmadi et al., 2021). Semakin rendah densitas target, semakin besar volume busa yang ditambahkan sehingga kuat tekan yang dihasilkan juga semakin rendah.

2.4 Bahan Penyusun Mortar Ringan

2.4.1 Semen Portland

Semen Portland adalah hasil penggilingan terak (clinker) semen dengan gips (CaSO4.2H2O) dan bahan tambahan lainnya. Berdasarkan SNI 15-2049-2004, semen Portland diklasifikasikan menjadi lima tipe berdasarkan karakteristik dan kegunaannya. Dalam penelitian ini digunakan semen Portland tipe I yang merupakan semen serbaguna untuk konstruksi umum tanpa persyaratan khusus.

Proses hidrasi semen Portland menghasilkan kalsium silikat hidrat (C-S-H) dan kalsium hidroksida (Ca(OH)2) sebagai produk utama yang memberikan

kekuatan pada mortar. Ca(OH)2 yang dihasilkan bersifat larut dan tidak berkontribusi pada kekuatan, namun dapat bereaksi dengan material pozzolan seperti POFA untuk membentuk C-S-H tambahan melalui reaksi pozzolan (Neville, 2011).

2.4.2 Agregat Ringan

Agregat ringan adalah agregat yang memiliki berat jenis kurang dari 2,0 g/cm3 atau berat isi kurang dari 1.120 kg/m3 (SNI 03-6820-2002). Agregat ringan dapat berupa agregat alam seperti batu apung (pumice) dan pasir ringan vulkanik, maupun agregat buatan seperti expanded clay dan expanded shale. Penggunaan agregat ringan dalam mortar secara signifikan mengurangi berat isi campuran sekaligus memberikan sifat insulasi termal yang baik (Neville, 2011).

Dalam penelitian ini digunakan pasir ringan lokal yang berasal dari Kabupaten Kuantan Singingi. Penggunaan agregat lokal bertujuan untuk meningkatkan relevansi penelitian dengan kondisi material yang tersedia di wilayah setempat sekaligus mengurangi biaya transportasi material.

2.4.3 Air

Air yang digunakan dalam campuran mortar harus bersih dan bebas dari bahan organik, minyak, garam, dan bahan kimia lain yang dapat mengganggu proses hidrasi semen. Menurut SNI 03-6825-2002, air yang digunakan harus memenuhi persyaratan air minum atau setara. Faktor air-semen (FAS) merupakan parameter kunci yang memengaruhi kuat tekan dan workability mortar. Semakin tinggi FAS, workability meningkat namun kuat tekan cenderung menurun karena lebih banyak pori kapiler yang terbentuk setelah air menguap (Mulyono, 2004).

2.5 Palm Oil Fuel Ash (POFA)

2.5.1 Pengertian dan Asal POFA

Palm Oil Fuel Ash (POFA) atau abu terbang kelapa sawit adalah limbah padat hasil pembakaran cangkang (shell) dan serat (fiber) kelapa sawit pada boiler pabrik pengolahan minyak kelapa sawit (CPO). POFA dihasilkan dalam jumlah yang sangat besar, yaitu sekitar 5% dari total biomassa yang dibakar, dan sebagian besar belum dimanfaatkan secara optimal sehingga berpotensi mencemari lingkungan sekitar pabrik (Rahman et al., 2025).

Indonesia merupakan penghasil minyak kelapa sawit terbesar di dunia, dengan Provinsi Riau sebagai sentra produksi utama. Kabupaten Kuantan Singingi sebagai salah satu daerah penghasil kelapa sawit di Riau menghasilkan limbah POFA dalam jumlah besar setiap harinya. Pemanfaatan POFA sebagai bahan bangunan merupakan upaya valorisasi limbah agroindustri sekaligus mendukung konsep konstruksi berkelanjutan (Rahmadi et al., 2021).

2.5.2 Karakteristik Kimia dan Fisik POFA

POFA memiliki kandungan silika (SiO2) dominan berkisar antara 50-65%, disertai alumina (Al2O3) dan besi oksida (Fe2O3) dalam jumlah yang signifikan. Menurut Rahman et al. (2025), kandungan silika aktif dalam POFA sangat dipengaruhi oleh proses pembakaran dan perlakuan pasca-bakar. POFA yang telah melalui proses kalsinasi ulang pada suhu 500 derajat celcius hingga 600 derajat celcius dan penghalusan (lolos saringan No. 200) memiliki reaktivitas pozzolan yang lebih tinggi karena meningkatnya kandungan amorfous silika (SiO2 amorf).

Secara fisik, POFA yang belum diproses memiliki warna abu-abu kehitaman akibat sisa karbon (unburned carbon). Setelah proses kalsinasi ulang, warna berubah menjadi keabu-abuan terang. Berat jenis POFA berkisar antara 2,0-2,5 g/cm3, lebih rendah dari semen Portland (3,15 g/cm3), sehingga penggunaan POFA sebagai substitusi semen akan sedikit mengurangi kepadatan campuran (Hamada et al., 2020).

2.5.3 POFA sebagai Material Pozzolan

Pozzolan adalah material silikat atau silikat-aluminat yang tidak memiliki sifat pengikat sendiri, namun bila bereaksi dengan Ca(OH)2 hasil hidrasi semen dan air akan membentuk senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang bersifat sementasi (Neville, 2011). Produk C-S-H tambahan dari reaksi pozzolan ini mengisi pori-pori pasta semen sehingga meningkatkan kepadatan dan kuat tekan mortar.

Di sisi lain, karena POFA menggantikan sebagian semen, jumlah Ca(OH)2 dari hidrasi semen berkurang seiring meningkatnya persentase substitusi POFA. Hal ini dapat menurunkan kuat tekan pada kadar substitusi yang terlalu tinggi karena reaksi pozzolan menjadi terbatas akibat berkurangnya Ca(OH)2 sebagai

reaktan (Hamada et al., 2020; Rahman et al., 2025). Oleh karena itu, terdapat persentase optimum substitusi POFA yang menghasilkan keseimbangan antara manfaat pozzolan dan ketersediaan bahan pengikat.

2.6 Kuat Tekan (Compressive Strength)

Kuat tekan mortar adalah kemampuan mortar untuk menahan beban aksial tekan per satuan luas penampang. Pengujian kuat tekan mortar dilakukan sesuai SNI 03-6825-2002 menggunakan mesin uji tekan (compression testing machine). Nilai kuat tekan dihitung dengan persamaan:

$$f_c' = \frac{P}{A}$$

Keterangan: fc = kuat tekan mortar (MPa)
P = beban maksimum (N)
A = luas penampang benda uji (mm2)

Kuat tekan mortar dipengaruhi oleh faktor air-semen, jenis dan proporsi bahan, umur mortar, dan kondisi perawatan (curing) (Neville, 2011). Pengujian kuat tekan pada umur 7, 14, dan 28 hari dilakukan untuk mengetahui perkembangan kekuatan mortar seiring waktu. Mortar umumnya mencapai sekitar 65% kuat tekan 28 hari pada umur 7 hari, dan sekitar 85% pada umur 14 hari.

2.7 *Density* mortar ringan

Densitas atau massa jenis merupakan salah satu karakteristik yang penting dalam menentukan tingkat ringan suatu mortar. Parameter ini menggambarkan perbandingan antara massa mortar terhadap volume yang ditempatinya, dengan satuan kg/m³. Mortar dikategorikan sebagai mortar ringan apabila memiliki densitas yang lebih rendah dibandingkan mortar konvensional. Kondisi tersebut disebabkan oleh adanya rongga udara yang terbentuk di dalam campuran. Pada penerapan metode Cellular Lightweight Concrete (CLC), rongga udara dihasilkan dengan menambahkan foam ke dalam campuran, sehingga massa jenis mortar dapat dikurangi.

Pada umumnya, material ringan memiliki nilai densitas sekitar 500–1.800 kg/m³. Nilai tersebut dapat berbeda-beda sesuai dengan komposisi material yang

digunakan, jumlah foam yang ditambahkan, serta teknik atau metode pembuatannya. Pada penelitian ini, nilai densitas yang direncanakan adalah sebesar 1.400 kg/m³, yang digunakan sebagai target massa jenis mortar ringan yang akan diperoleh.

Persamaan *density* :

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

Keterangan:

ρ = *density* (kg/m^3)

W = berat benda uji (kg)

V = volume benda uji (m^3)

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Kuantan Singingi, Teluk Kuantan. POFA yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari Pabrik Kelapa Sawit (PKS) yang berlokasi di Kabupaten Kuantan Singingi, Provinsi Riau, sesuai dengan batasan masalah yang telah ditetapkan. Peta lokasi penelitian dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 3.1 Laboratorium Teknik Sipil

(Sumber : Dokumentasi)

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

3.2.1 Alat Penelitian

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Timbangan digital

   digunakan untuk menimbang air dan foam agent.

2. Cetakan kubus 15 cm × 15 cm × 15 cm

   digunakan untuk mencetak benda uji mortar ringan.



Gambar 3.2 Cetakan Mortar

(Sumber ; Dokumentasi)

3. Gelas ukur

   digunakan untuk mengukur volume air dan foam agent.

4. Mesin pengaduk (molen)

   digunakan untuk mencampurkan bahan-bahan mortar hingga diperoleh campuran yang homogen.



Gambar 3.3 Mesin Molen

(*Sumber ; Dokumentasi)*

5. Foam generator

   digunakan untuk menghasilkan busa dari foam agent yang digunakan dalam pembuatan mortar ringan CLC.



Gambar 3.4 Foam generator

(Sumber ; Dokumentasi)

6. Compression Testing Machine (CTM)
   digunakan untuk melakukan pengujian kuat tekan benda uji mortar.
7. Sekop atau sendok semen
   digunakan untuk mengambil dan memasukkan bahan ke dalam wadah pencampuran.
8. Ayakan pasir
   digunakan untuk menyaring pasir dan memisahkan material yang tidak sesuai.
9. Ember atau wadah pencampuran
   digunakan sebagai tempat penampungan dan pencampuran bahan.

3.2.2 Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Semen Portland, sebagai bahan pengijat utama dalam campuran mortar.



Gambar 3.5 Semen Portland

2. Palm oil fuel ash (POFA), sebagai bahan subtitusi semen.



Gambar 3.6 POFA

(Sumber ; Dokumentasi)

3. Agregat halus, sebagai bahan pengisi campuran mortar.



Gambar 3.7 Agregat halus

(Sumber ; Dokumentasi)

4. Air, sebagai bahan pencampuran dan membantu proses hidrasi semen.
5. Foam agent, digunakan untuk menghasilkan busa yang membentuk rongga-rongga udara di dalam mortar sehingga diperoleh mortar dengan berat yang lebih ringan.

3.3 Rancangan Campuran *mix Design*

Penelitian ini menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan variabel bebas berupa persentase substitusi POFA terhadap berat semen, yaitu 0%, 10%, 20%, 30%, dan 40%. Variabel terikat meliputi nilai kuat tekan, Mortar ringan dibuat menggunakan metode Cellular Lightweight Concrete (CLC). Benda uji

berupa kubus ukuran 15 × 15 × 15 cm. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari untuk mengetahui perkembangan kuat tekan mortar pada masing-masing umur pengujian.

Pada setiap variasi POFA dibuat 3 benda uji utama, yang masing-masing digunakan untuk pengujian pada umur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Dengan demikian, jumlah benda uji utama yang diperlukan adalah 15 benda uji.

Selain benda uji utama, dibuat 10 benda uji cadangan yang digunakan untuk mengantisipasi apabila terjadi kerusakan pada benda uji, kesalahan dalam proses pencetakan, atau kondisi benda uji yang tidak memenuhi persyaratan sebelum dilakukan pengujian.

Dengan demikian, jumlah keseluruhan benda uji yang dibuat adalah 25 benda uji. Benda uji dengan variasi 0% POFA digunakan sebagai benda uji kontrol untuk dibandingkan dengan benda uji yang menggunakan penambahan POFA. Hasil pengujian pada umur 7, 14, dan 28 hari kemudian dibandingkan untuk mengetahui perubahan kuat tekan mortar ringan CLC akibat penambahan POFA.

3.3.1 Dasar rancangan *mix design* CLC

Rancangan campuran mortar ringan CLC pada penelitian ini mengacu pada penelitian terdahulu yang menggunakan metode Cellular Lightweight Concrete. Berdasarkan penelitian tersebut, belum terdapat komposisi mix design CLC yang bersifat baku karena density mortar ringan sangat dipengaruhi oleh penggunaan foaming agent dan proses pembentukan pori selama pencampuran. Oleh karena itu, perancangan campuran dilakukan berdasarkan pendekatan SNI 03-6825-2002 dan penelitian sejenis. Parameter dasar yang digunakan adalah perbandingan semen dan pasir sebesar 1:2, faktor air semen sebesar 0,55, serta perbandingan foam agent dan air sebesar 1:40.

Berdasarkan density rencana sebesar 1.400 kg/m³, diperoleh kebutuhan semen sebesar 466,67 kg/m³ dan pasir sebesar 933,33 kg/m³. Dengan FAS 0,55, kebutuhan air pencampur sebesar 256,67 liter/m³. Komposisi tersebut selanjutnya dikonversikan berdasarkan volume benda uji kubus 15 × 15 × 15 cm sehingga

diperoleh kebutuhan semen 1,575 kg, pasir 3,150 kg, dan air pencampur sekitar 0,866 liter untuk satu benda uji.

Tabel 3.1 Parameter Dasar Rancangan *Mix Design*

PARAMETER	NILAI
Metode	CLC
Semen : pasir	1:2
FAS	0,55
Foaming agent : air	1:40
Density rencana	1.400 kg/m^3
Ukuran benda uji	15 cm x 15 cm x 15 cm
Variasi POFA	0% ; 10% ; 20% ; 30% ; 40%
Benda uji per variasi	5
Total benda uji	25

3.3.2 Rancangan mix design untuk volume 1 m^3

Density rencana : ρ =1400 kg/m^3

Maka berat material untuk 1 m^3:

$$W = \rho \times V$$

$$W = 1400 \times 1$$

$$W = 1400\ kg$$

Selanjutnya perbandingan:

Semen : Pasir = 1 : 2

Semen :

$$W_S = \frac{1}{3} \times 1400 = 466{,}67 \text{ kg/m}^3$$

Pasir :

$$W_S = \frac{2}{3} \times 1400 = 933{,}33 \text{ kg/m}^3$$

FAS :

$$FAS = \frac{W_{Air}}{W_{Semen}}$$

$$W_{Air} = FAS \times W_{Semen}$$

$$W_{Air} = 0{,}55 \times 466{,}67 = 256{,}67\ kg$$

Pada contoh jurnal, untuk volume pengadukan 0,01855 m^3 digunakan 19 ml foam agent dan 760 ml air.

Jika angka tersebut diskalakan ke 1 m^3:

$$\frac{1}{0{,}01855} \times 19 = 1024{,}26\ ml$$

Jadi :

Foam agent = 1,024 L/m^3

Air Pengencer foam = 40,96 L/m^3

3.3.3 Kebutuhan material untuk satu kubus

Volume kubus ukuran 15 x 15 x 15 = 3.375 cm^3 = 0,003375 m^3

Semen:

$$466{,}67 \times 0{,}003375 = 1{,}575\ kg$$

Pasir:

$$933{,}33 \times 0{,}003375 = 3{,}150\ kg$$

Air:

$$256{,}67 \times 0{,}003375 = 0{,}866\ liter$$

Foam agent:

$$1{,}024 \times 0{,}003375 = 0{,}00346\ liter \approx 3{,}46\ ml$$

Tabel 3.2 Campuran Mortar Ringan Untuk Satu Kubus

Variasi	Semen (kg)	Pasir (kg)	Air (L)	Foam Agent (mL)	POFA (gr)
0%	1,575	3,150	0,866	3,46	0
10%	1,418	3,150	0,866	3,46	0,158
20%	1,260	3,150	0,866	3,46	0,315
30%	1,103	3,150	0,866	3,46	0,473
40%	0,945	3,150	0,866	3,46	0,630

Tabel 3.3 Campuran Mortar Ringan Untuk Lima Kubus

Variasi	Semen (kg)	Pasir (kg)	Air (L)	Foam Agent (mL)	POFA (gr)
0%	7,875	15,750	4,33	17,3	0
10%	7,088	15,750	4,33	17,3	0,788
20%	6,300	15,750	4,33	17,3	1,575
30%	5,513	15,750	4,33	17,3	2,363
40%	4,725	15,750	4,33	17,3	3,150

3.4 Prosedur Penelitian

1. Persiapan alat dan bahan

Seluruh alat dan bahan yang diperlukan dipersiapkan sesuai dengan kebutuhan penelitian. Alat yang digunakan meliputi cetakan kubus, timbangan, mesin pengaduk (molen), foam generator, gelas ukur, ayakan, Compression Testing Machine (CTM), dan peralatan pendukung lainnya. Bahan yang digunakan terdiri dari semen, pasir, air, foam agent, dan POFA.

2. Persiapan POFA

POFA dicuci dan dikeringkan, kemudian disaring dan ditimbang sesuai dengan ukuran yang telah ditentukan.



Gambar 3.8 Pencucian POFA

(Sumber ; Dokumentasi)

3. Persiapan pasir

Pasir diayak untuk memperoleh material dengan ukuran yang sesuai dan mengurangi material pengotor. Pasir yang telah dipersiapkan kemudian ditimbang sesuai dengan kebutuhan campuran.

4. Penimbangan Bahan

Semen, pasir, air, foam agent, dan POFA ditimbang sesuai dengan rancangan campuran.

5.Pembuatan foam

Foam agent dicampurkan dengan air sesuai dengan komposisi yang telah ditentukan, kemudian diproses menggunakan foam generator hingga menghasilkan busa yang sesuai untuk pembuatan mortar ringan CLC.



Gambar 3.9 Foam agent

(Sumber ; Dokumentasi)

6.Pencampuran mortar

Semen dan pasir dimasukkan ke dalam mesin pengaduk (molen**)** dan dicampur hingga merata. Air kemudian ditambahkan secara bertahap dan campuran diaduk hingga homogen. POFA dimasukkan sesuai dengan variasi yang telah ditentukan. Setelah campuran merata, foam ditambahkan secara perlahan dan diaduk hingga diperoleh campuran mortar ringan CLC yang homogen.

7.Pencetakan benda uji

Campuran mortar dimasukkan ke dalam cetakan kubus berukuran 15 cm × 15 cm × 15 cm**.** Campuran diratakan pada permukaan cetakan dan dibiarkan mengalami pengerasan awal.



Gambar 3.10 Adonan mortar basah

(*Sumber ; Dokumentasi)*

8.Pelepasan cetakan dan pemberian kode

Benda uji dilepaskan dari cetakan setelah cukup mengeras. Setiap benda uji diberi kode berdasarkan variasi POFA dan umur pengujiannya.

9.Perawatan benda uji

Benda uji dirawat sampai mencapai umur pengujian yang telah ditentukan, yaitu **7** hari, 14 hari, dan 28 hari**.**

10.Pengujian kuat tekan

Benda uji yang telah mencapai umur pengujian diuji menggunakan Compression Testing Machine (CTM)**.** Beban diberikan secara bertahap sampai benda uji mengalami keruntuhan. Beban maksimum yang diterima benda uji dicatat sebagai data pengujian.

Kuat tekan dihitung menggunakan persamaan:

$$f_c' = \frac{P}{A}$$

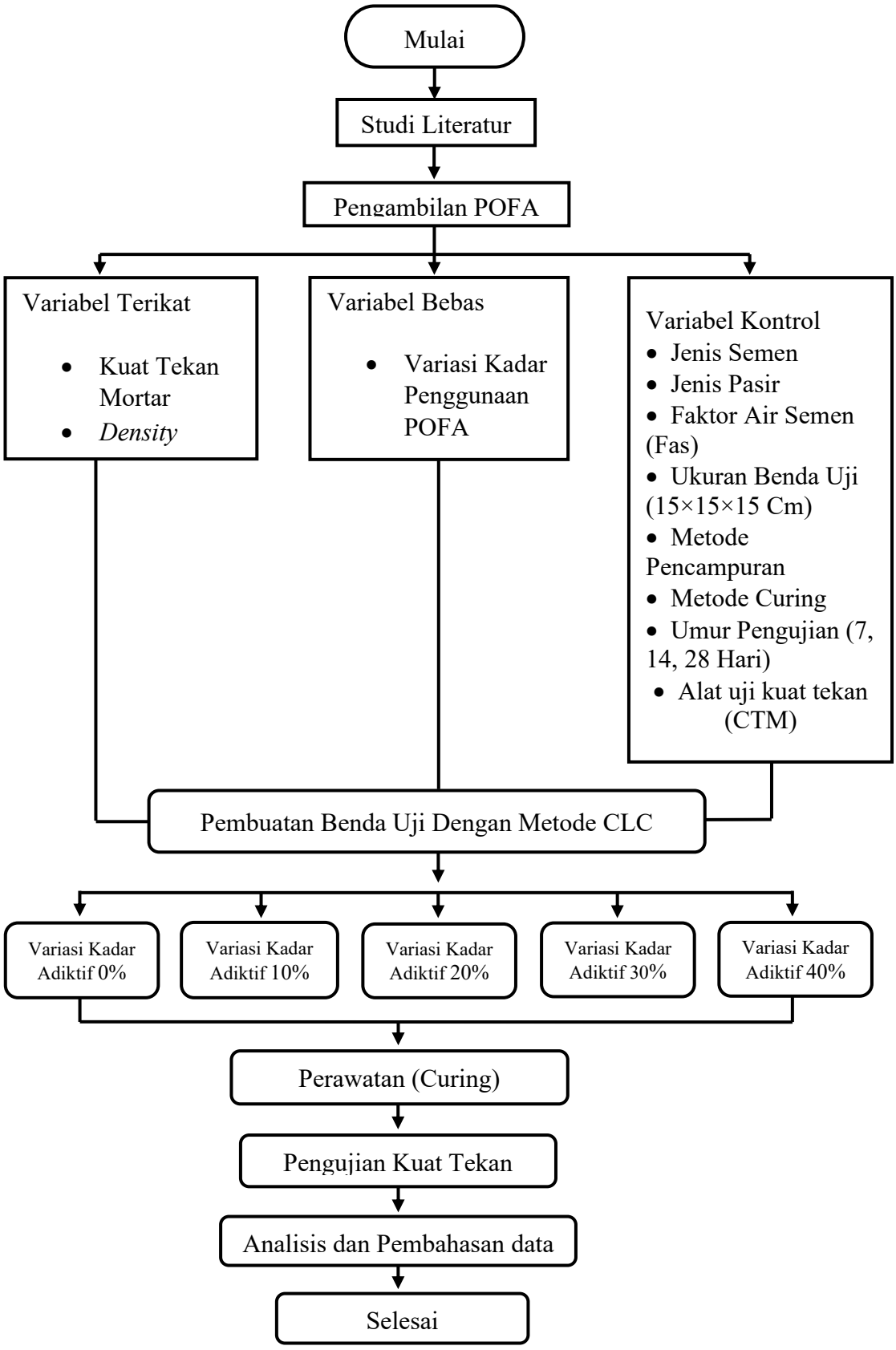
dengan:

(f_c') = kuat tekan mortar (MPa)

(P) = beban maksimum yang diterima benda uji (N)

(A) = luas penampang benda uji (mm^2)

3.5 Bagan Alir Penelitian



Gambar 3.11 Bagan Alir Penelitian

3.6 Jadwal Penelitian

Usulan jadwal penelitian yang direncanakan ditunjukkan pada Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3.4 Jadwal Penelitian

No	Kegiatan	Maret	April	Mei	Juni	Juli	Agustus	September
1	Studi Literatur	✓	✓					
2	Persiapan Bahan dan Alat	✓	✓	✓				
3	Pembuatan Benda Uji		✓	✓	✓			
4	Perawatan (Curing) Benda Uji			✓	✓			
5	Pengujian Sampel				✓	✓		
6	Analisis dan Pengolahan Data					✓	✓	
7	Penulisan Laporan						✓	✓
8	Seminar/Sidang							✓

(Sumber: Rancangan Penelitian)

BAB IV
KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan mengenai penggunaan Palm Oil Fuel Ash (POFA) sebagai substitusi sebagian semen pada mortar ringan, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Variasi persentase POFA sebagai substitusi sebagian semen memberikan pengaruh terhadap kuat tekan mortar ringan. Pada umur 28 hari, kuat tekan mortar dengan variasi 0%, 10%, 20%, 30%, dan 40% POFA berturut-turut sebesar 3,11 MPa, 3,33 MPa, 2,44 MPa, 2,00 MPa, dan 2,00 MPa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan POFA sebesar 10% dapat meningkatkan kuat tekan dibandingkan campuran kontrol, sedangkan penggunaan POFA di atas 10% cenderung menyebabkan penurunan kuat tekan.
2. Persentase optimum penggunaan POFA diperoleh pada variasi 10%, karena menghasilkan kuat tekan tertinggi di antara variasi yang menggunakan POFA, yaitu sebesar 3,33 MPa pada umur 28 hari. Pada variasi 10% POFA, density mortar yang dihasilkan pada umur 28 hari sebesar 948 kg/m^3, sehingga masih berada di bawah density rencana sebesar 1.400 kg/m^3 dan memenuhi karakteristik mortar ringan yang direncanakan.

4.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan variasi persentase POFA yang lebih rendah dan lebih rapat, seperti 5%, 10%, dan 15%, untuk mengetahui persentase optimum yang lebih spesifik.
2. Pengolahan POFA perlu diperhatikan, terutama pada proses pembakaran, penggilingan, dan penyaringan, karena karakteristik POFA dapat memengaruhi sifat dan kuat tekan mortar.

3. Penelitian selanjutnya disarankan menambahkan pengujian lainnya, seperti daya serap air, porositas, dan kuat tarik belah, serta menggunakan jumlah benda uji yang lebih banyak agar hasil penelitian dapat lebih representative.

DAFTAR PUSTAKA

Azhar, N. A. S. M., Hashim, N. H., Sidek, M. N. M., Halim, N. A. I. A., Newman, A., & Fauzi, M. A. M. (2022). Effect of low inclusion of palm oil fuel ash (POFA) as a partially sand replacement to the performance of mortar. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, *7*(1), 41. https://doi.org/10.1007/s41024-022-00181-2

Badan Standardisasi Nasional. (2002). SNI 03-6820-2002: Spesifikasi Agregat Halus untuk Pekerjaan Adukan dan Plesteran dengan Bahan Dasar Semen. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. (2002). SNI 03-6825-2002: Metode Pengujian Kekuatan Tekan Mortar Semen Portland untuk Pekerjaan Sipil. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Bahruddin, B., Helwani, Z., Saktiani, L., Yanuar, Y., & Satoto, R. (2014). Study on Utilization of Palm Oil Fly Ash as a Filler for Thermoset Natural Rubber. *Advanced Materials Research*, *844*, 280-284. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.844.280

Hamada, H. M., Al-Attar, A. A., Tayeh, B., & Yahaya, F. B. M. (2022). Optimizing the concrete strength of lightweight concrete containing nano palm oil fuel ash and palm oil clinker using response surface method. *Case Studies in Construction Materials*, *16*, e01061. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01061

Hamada, H. M., Alya'a, A., Yahaya, F. M., Muthusamy, K., Tayeh, B. A., & Humada, A. M. (2020). Effect of high-volume ultrafine palm oil fuel ash on the engineering and transport properties of concrete. *Case Studies in Construction Materials*, *12*, e00318. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00318

Kunchariyakun, K., Sinyoung, S., MacKenzie, K.J.D., & Chaiprapat, S. (2024). Roles of Superabsorbent Polymers (SAPs) and Palm Oil Fuel Ash (POFA) on the Strength, Cost Analysis and CO_2 Emission of Lightweight Concrete: Comparison with Aluminum-Based Aerated Concrete. Heliyon, 10, e40305. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40305

Mulyono, T. (2004). Teknologi Beton. Yogyakarta: Penerbit ANDI.

Neville, A.M. (2011). Properties of Concrete (5th ed.). London: Pearson Education.

Olivia, M., Asmanovita, R., Sinuhaji, I. J., Putri, W. R., Sitompul, I. R., Utama, P. S., & Supit, S. W. (2025). Properties of blended Palm Oil Fuel Ash (POFA) concrete using additive micro silica exposed to organic peat water environment. *Cleaner Waste Systems*, 100414. https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100414

Rahmadi, R., Maizir, H., & Suryanita, R. (2021). Kekuatan Mortar Cellular Lighweight Concrete Dengan Tambahan Abu Cangkang Sawit (POFA). *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand)*, *17*(3), 239-247. https://doi.org/10.25077/jrs.17.3.239-247.2021

Rahman, M.R., et al. (2025). A Critical Review of Various Types of Palm Oil Fuel Ash (POFA) Utilization in Enhancing Concrete and Mortar Properties. Journal of Building Pathology and Rehabilitation. Springer Nature. https://doi.org/10.1007/s41024-025-00622-8

Sari, D. N. (2021). Observasi kuat tarik belah beton ringan CLC (Cellular Lightweight Concrete) yang diperkuat abu sekam padi dan serbuk cangkang telur secara eksperimental. Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik (JIMT), 1(2).

Satriani, S., Tjaronge, M. W., & Caronge, M. A. (2025, June). Mortar Berkelanjutan dengan S325-Pofa: Studi Workability, Kuat Tekan, dan Potensi Pengurangan Emisi. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil UMS* (pp. 174-182). https://proceedings.ums.ac.id/sipil/article/view/5603

Badan Standardisasi Nasional. (2004). SNI 15-2049-2004: Semen Portland. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials (4th ed.). New York: McGraw-Hill Education.

Tjaronge, M. W., Irmawaty, R., Harun, A. I., & Caronge, M. A. (2022). Compressive Strength and Microstructure of Self Compacting Concrete Incorporating Rice Husk Ash and Palm Oil Fuel Ash as Partial Cement Replacement. Construction and Building Materials, 317, 125608. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125608