

**PEMANFAATAN LIMBAH CANGKANG KERANG
HIJAU (*Perna Viridis*) SEBAGAI BAHAN TAMBAHAN
SEBAGIAN SEMEN OPC (*Ordinary Portland Cement*)
DAN PENGARUHNYA TERHADAP KUAT TEKAN
DAN *STRENGTH ACTIVITY INDEX*
SKRIPSI**

Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Syarat Guna
Memperoleh Gelar Sarjana Sains dalam Ilmu Kimia



Oleh:

ANSIA AULIA DINA

2108036039

**PROGRAM STUDI KIMIA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI WALISONGO
SEMARANG
2025**

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Ansia Aulia Dina

NIM : 2108036039

Jurusan/Program Studi : Kimia

Menyatakan bahwa skripsi yang berjudul:

**PEMANFAATAN LIMBAH CANGKANG KERANG
HIJAU (*Perna Viridis*) SEBAGAI BAHAN
TAMBAHAN SEBAGIAN SEMEN OPC (*Ordinary
Portland Cement*) DAN PENGARUHNYA TERHADAP
KUAT TEKAN DAN *STRENGTH ACTIVITY INDEX*.**

Secara keseluruhan adalah hasil penelitian/karya saya sendiri, kecuali bagian tertentu yang dirujuk sumbernya.

Semarang, 17 Juni 2025

Pembuat pernyataan



Ansia Aulia Dina

2108036039



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI WALISONGO
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

Jl. Prof. Dr. Hamka Ngaliyan Semarang Telp. 024-7601295

PENGESAHAN

Naskah skripsi berikut ini:

Judul : Pemanfaatan Limbah Cangkang Kerang Hijau (*Perna Viridis*) Sebagai Bahan Tambahan Sebagian Semen OPC (*Ordinary Portland Cement*) dan Pengaruhnya Terhadap Kuat Tekan Dan *Strength Activity Index*

Nama : Ansia Aulia Dina

NIM : 2108036039

Jurusan : Kimia

Telah diujikan dalam sidang munaqosah oleh Dewan Penguji Fakultas Sains dan Teknologi UIN Walisongo dan dapat diterima sebagai salah satu syarat memperoleh gelar sarjana sains dalam bidang ilmu kimia.

Semarang, 24 Juni 2025

DEWAN PENGUJI

Ketua Sidang

Wirda Udaibah, M. Si
NIP 198501042009122003

Sekretaris Sidang

Mutista Hafshah, M. Si
NIP 199401022019032015

Penguji I

Dr. Mulyatun, M. Si
NIP 198305042011012008



Penguji II

Kholidah, M. Sc
NIP 198508112019032008

Pembimbing

Wirda Udaibah, M. Si
NIP 198501042009122003

NOTA DINAS

Semarang, 17 Juni 2025

Kepada
Yth. Ketua Program Studi Kimia
Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Walisongo Semarang

Assalamu 'alaikum. wr,wb.

Dengan ini diberitahukan bahwa saya telah melakukan bimbingan dan arahan serta koreksi naskah skripsi dengan:

Judul : Pemanfaatan Limbah Cangkang Kerang Hijau (*Perna Viridis*) Sebagai Bahan Tambahan Sebagian Semen OPC (*Ordinary Portland Cement*) dan Pengaruhnya Terhadap Kuat Tekan Dan *Strength Activity Index*

Nama : **Ansia Aulia Dina**

NIM : 2108036039

Jurusan: Kimia

Saya memandang bahwa naskah tersebut sudah dapat diajukan kepada fakultas Sains dan Teknologi UIN Walisongo Semarang untuk diajukan dalam siding munaqosah.

Wassalamualaikum. wr,wb.

Pembimbing



Wirda Udaibah, M. Si

NIP. 198501042009122003

ABSTRAK

Peningkatan kebutuhan semen dalam industri konstruksi berdampak pada konsumsi energi yang tinggi dan emisi gas CO₂. Di sisi lain, limbah cangkang kerang hijau (*Perna Viridis*) dari industri perikanan belum dimanfaatkan secara optimal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pemanfaatan limbah cangkang kerang hijau sebagai bahan tambahan sebagian semen OPC (*Ordinary Portland Cement*) dan mengkaji kuat tekan serta *Strength Activity Index* (SAI) dari bahan tersebut. Metode penelitian menggunakan variasi cangkang kerang hijau sebesar 0%, 2%, 4%, 6%, dan 8% dari massa semen. Cangkang kerang hijau di panaskan pada suhu 100°C selama 3 jam, kemudian dihaluskan hingga lolos saringan 75 µm. parameter uji meliputi analisis kimia menggunakan XRF, FTIR, uji *moisture content*, *insoluble residue*, hilang pijar, densitas, karbon dioksida, kehalusan, kuat tekan, dan SAI. Hasil uji XRF menunjukkan bahwa cangkang kerang hijau mengandung CaO sebesar 51,81% yang berpotensi sebagai bahan tambahan. Karakteristik semen OPC yang telah ditambahkan cangkang kerang hijau menunjukkan peningkatan kandungan kalsium karbonat dalam campuran, terkonfirmasi melalui analisis FTIR dengan peningkatan puncak serapan pada 1450-1471 cm⁻¹. Penambahan cangkang kerang hijau juga meningkatkan kemurnian material dengan perbaikan nilai *insoluble residue* dari 0,97% (kontrol) menjadi 0,5898% (S-CK8%), meskipun terdapat tren penurunan kuat tekan seiring peningkatan persentase penambahan. Variasi optimal pada S-CK2% dengan nilai kuat tekan pada umur 3, 7, dan 28 hari berturut-turut sebesar 225,36 kg/cm², 305,92 kg/cm², dan 409,93 kg/cm², serta *Strength Activity Index* sebesar 84,03% yang memenuhi standar SNI 2049:2015. Peningkatan persentase substitusi lebih dari 4% menyebabkan penurunan nilai kuat tekan dan *Strength Activity Index* di bawah standar yang ditetapkan.

Kata kunci: cangkang kerang hijau, tambahan semen, kuat tekan, *strength activity index*, bahan pozolan.

TRANSLITERASI ARAB-LATIN

Penulisan transliterasi huruf-huruf Arab Latin dalam skripsi ini berpedoman pada SKB Menteri Agama dan Menteri Pendidikan dan Kebudayaan R.I Nomor : 158/1987 dan Nomor : 054/U1987. Penyimpangan penulisan kata sanding (al-) disengaja secara konsisten supaya sesuai teks arabnya.

ا	A	ط	ṭ
ب	B	ظ	ẓ
ت	T	ع	'
ث	Ṣ	غ	Gh
ج	J	ف	F
ح	ḥ	ق	Q
خ	Kh	ك	K
د	D	ل	L
ذ	ẓ	م	M
ر	R	ن	N
ز	Z	و	W
س	S	ه	H
ش	Sy	ء	"
ص	ṣ	ي	Y
ض	ḍ		

Bacaan Mad :

ā = a panjang

ī = i panjang

ū = u Panjang

Bacaan Diftong :

au = اؤ

ai = اي

iy = يـ

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya ucapkan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan nikmat, rahmat, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyusun dan menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pemanfaatan Limbah Cangkang Kerang Hijau (*Perna Viridis*) Sebagai Bahan Tambahan Sebagian Semen OPC (*Ordinary Portland Cement*) dan Pengaruhnya Terhadap Kuat Tekan dan *Strength Activity Index*” dengan baik. Shalawat serta salam senantiasa aturcurahkan kepada Rasulullah Muhammad SAW.

Terselesainya skripsi ini tidak terlepas dari bimbingan, dukungan, bantuan, dan arahan yang diberikan oleh berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan penuh rasa hormat, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan kontribusi, terutama kepada:

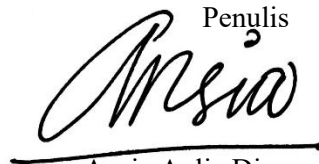
1. Prof. Dr. Nizar, M.Ag, selaku rektor UIN Walisongo Semarang.
2. Prof. Dr. H. Musahadi, M.Ag, selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Walisongo Semarang.
3. Ibu Mulyatun, M. Si, selaku ketua program studi Kimia UIN Walisongo Semarang.

4. Ibu Wirda Udaibah, M.Si, selaku dosen pembimbing skripsi sekaligus wali dosen yang telah memberikan motivasi dan bimbingan.
5. Kedua orang tua penulis, Ayah Akhmad Rikhan dan Ibu Siti Tri Nur Akilasih. Terima kasih atas segala harapan, do'a dan pengorbanan yang telah diberikan kepada penulis. Selamat atas keberhasilan Ayah dan Ibu telah mendidik penulis menjadi pribadi yang kuat dan memberikan pendidikan yang layak kepada penulis. Semoga dengan adanya skripsi ini dapat membuat Ayah dan Ibu bangga karena telah berhasil menjadikan anak perempuan pertamanya ini menyandang gelar sarjana seperti yang diharapkan.
6. Adik Ahmad Hilmy Bachtiar, yang selalu membuat penulis termotivasi untuk bisa terus belajar menjadi kakak yang dapat memberikan pengaruh positif, baik dalam bidang akademik maupun non-akademik, serta berusaha menjadi panutannya dimasa depan.
7. Abi Nidhom dan Ummi Aniqoh, sebagai kakak sekaligus orang tua penulis. Terima kasih atas segala bentuk do'a dan dukungan selama penulis menyelesaikan studi. Selamat atas keberhasilan Abi dan Ummi telah mendidik penulis menjadi pribadi yang lebih berani, mandiri, dan lebih keren.

8. Bapak Gugus, Bapak Hanif, dan rekan-rekan *Quality Assurance* PT. Semen Gresik Plan Rembang telah membantu serta memfasilitasi penelitian ini.
9. Kepada Niyah, Fathiya, Vika, Viki, Defikha, dan Tasya. Penulis ucapkan terima kasih yang tak terhingga kepada teman tercinta yang telah menjadi bagian tak terpisahkan dari perjalanan akademik ini. Terima kasih atas segala bentuk do'a dan motivasi yang senantiasa teman-teman berikan. Tak lupa, terima kasih kepada sahabat sulis (Kimia B '21) atas segala dukungan, diskusi-diskusi produktif, dan momen-momen kebersamaan yang membuat perjalanan panjang ini terasa lebih ringan dan bermakna. Selamat atas pencapaian kita!

Penulis menyadari bahwa skripsi ini terdapat kekurangan. Maka dari itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan skripsi ini. Besar harapan penulis, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis dan pembaca.

Semarang, 17 Juni 2025

Penulis

Ansia Aulia Dina
2108036039

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
PENGESAHAN.....	iii
NOTA DINAS.....	iv
ABSTRAK	v
TRANSLITERASI ARAB-LATIN.....	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah.....	8
C. Tujuan.....	9
D. Manfaat Penelitian	9
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	10
A. Landasan Teori	10
B. Karakterisasi	20
C. Kajian Riset Relevan.....	36
D. Hipotesis	40
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	41
A. Waktu dan Tempat.....	41

B.	Alat dan Bahan.....	41
C.	Prosedur Kerja.....	42
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		55
A.	Preparasi dan Karakterisasi Serbuk Cangkang Kerang Hijau	56
B.	Preparasi dan Karakterisasi Semen OPC dengan Bahan Tambahan Serbuk Cangkang Kerang Hijau.....	83
BAB V PENUTUP.....		105
A.	Kesimpulan	105
B.	Saran.....	106
DAFTAR PUSTAKA.....		108
DAFTAR LAMPIRAN		130
RIWAYAT HIDUP.....		145

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan senyawa kimia	12
Tabel 2. 2 Syarat Kimia Semen Portland	17
Tabel 2. 3 Syarat Fisika Semen Portland	17
Tabel 3. 1 Komposisi Benda Uji Kuat Tekan	53
Tabel 4. 1 Hasil analisis XRF cangkang kerang hijau.....	59
Tabel 4. 2 Bilangan gelombang FTIR gugus Ca-O dan OH	65
Tabel 4. 3 Hasil Uji Kadar Air Cangkang Kerang Hijau	68
Tabel 4. 4 Hasil Uji InsolubleResidue Cangkang Kerang Hijau.....	69
Tabel 4. 5 Hasil Uji Densitas.....	71
Tabel 4. 6 Hasil Uji Hilang Pijar.....	74
Tabel 4. 7 Hasil Uji Kadar Karbon Dioksida	77
Tabel 4. 8 Hasil Uji Kehalusan	79
Tabel 4. 9 Hasil Uji XRF Semen-Cangkang Kerang Hijau..	85
Tabel 4. 10 Hasil Uji Insoluble Residue Semen-Cangkang Kerang Hijau.....	91
Tabel 4. 11 Hasil uji hilang pijar.....	93
Tabel 4. 13 Hasil Uji Kuat Tekan.....	95
Tabel 4. 14 Hasil analisis Strength Activity Index.....	101

DAFTAR GAMBAR

Gambar 4. 1	Cangkang kerang hijau	56
Gambar 4. 2	Spektrum FTIR cangkang kerang hijau.....	64
Gambar 4. 4	Spektrum Semen-Cangkang Kerang Hijau.....	88

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1: Skema Prosedur Kerja.....	130
LAMPIRAN 2: Analisis Data Cangkang Kerang Hijau	136
LAMPIRAN 3: Analisis Data Sampel Semen yang Ditambahkan Cangkang Kerang Hijau	138
LAMPIRAN 5: Dokumentasi	141

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Seiring perkembangan zaman, kegiatan pembangunan infrastruktur yang dilakukan semakin mengalami peningkatan. Hal ini mengakibatkan kebutuhan material juga meningkat, khususnya kebutuhan penggunaan semen sebagai material konstruksi pada bangunan. Semakin meningkatnya penggunaan semen ini mengakibatkan penggunaan material dari alam menjadi semakin meningkat pula. Peningkatan penggunaan semen sebagai bahan material konstruksi dapat meningkatkan penambangan material dari alam berupa batu kapur dan tanah liat yang dapat mengakibatkan kerusakan lingkungan. Selain itu, peningkatan proses produksi semen mengakibatkan industri semen menjadi penyumbang emisi gas rumah kaca global terbesar dari proses pembakaran pada suhu $\pm 1500^{\circ}\text{C}$ (Aprizal, 2015).

Kerusakan lingkungan akibat penambangan batu kapur dan tanah liat dari industri semen memiliki dampak yang luas terhadap ekosistem serta kehidupan masyarakat sekitar. Proses penambangan batu kapur yang merupakan bahan baku utama dalam produksi semen menyebabkan hilangnya mata air dan aliran sungai, yang berakibat pada kekeringan di daerah

sekitarnya (Sulasmi, 2022). Selain itu, aktivitas penambangan juga menghasilkan debu dan gas beracun yang dapat mencemari udara, mengganggu kesehatan masyarakat, serta merusak kualitas tanah dan tanaman di sekitarnya (Khusnia, 2024). Dampak negatif ini tidak hanya mengancam kesejahteraan masyarakat, tetapi juga mengganggu keseimbangan ekosistem, yang dapat menyebabkan hilangnya keanekaragaman hayati dan kerusakan habitat alami (Huwaina, 2024).

Pesatnya perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi serta tuntutan lingkungan global, sehingga peningkatan kebutuhan material untuk pembangunan menimbulkan banyak inovasi mengenai pemanfaatan bahan pengganti atau bahan tambahan dalam pembuatan material yang dapat mengurangi dampak negatif yang ditimbulkan. Salah satu bahan alternatif yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan tambahan dalam semen adalah limbah cangkang kerang. Kerang merupakan komoditas perikanan Indonesia dengan kenaikan produksi setiap tahunnya termasuk proyeksi di tahun 2024 sebesar 137 ribu ton pertahun (Purnamasari, 2024). Limbah cangkang kerang hijau di pesisir utara Jawa Tengah sekitar 20-30% dari total produksi kerang hijau. Produksi kerang hijau di Jawa Tengah mencapai 5.000 ton per tahun,

maka limbah cangkang kerang hijau yang dihasilkan diperkirakan mencapai 1.000-1.500 ton per tahun (Nisa, 2021). Kerang hanya dapat dimakan di bagian dalamnya, sedangkan cangkang kerang tidak dapat dimanfaatkan secara maksimal. Akibatnya, cangkang kerang hanya dibuang di lingkungan terbuka dan menimbulkan tumpukan sampah yang tidak hanya menempati sumber daya lahan, tetapi juga dapat menghasilkan ammonia, hidrogen sulfida dan gas berbahaya lainnya (Chen, 2023).

Cangkang kerang hijau (*Perna Viridis*) adalah salah satu sumber alternatif yang berpotensi untuk menghasilkan senyawa kalsium karbonat (CaCO_3). Kandungan bahan kimia berupa CaCO_3 yang terdapat dalam cangkang kerang hijau merupakan bahan yang digunakan dalam pembuatan semen. Di dalam cangkang kerang hijau terdapat senyawa CaCO_3 sebesar 95,69%, SiO_2 sebesar 0,22%, Fe_2O_3 sebesar 1,00%, MgO sebesar 3,08%, dan Al_2O_3 sebesar 0,01% (Liemawan, 2015). Oleh karena itu, kalsium karbonat yang dihasilkan dari cangkang kerang hijau berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan pengganti sebagian semen.

Semen OPC (*Ordinary Portland Cement*) adalah semen hidrolik yang dihasilkan dari pembakaran bahan baku seperti batu kapur, tanah liat, dan bahan lainnya yang mengandung

senyawa silika, alumina, dan oksida besi pada suhu tinggi, kemudian dihaluskan bersama dengan *gypsum* (Pradana, 2017). Komposisi utama semen OPC adalah trikalsium silikat ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), dikalsium silikat ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), trikalsium aluminat ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), tetrakalsiumaluminoforit ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$), dan *gypsum* ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Amiri, 2015). Kandungan senyawa kimia utama dalam semen OPC yaitu kapur (CaO) sebesar 60-67%, Silika (SiO_2) sebesar 17-25%, Alumina (Al_2O_3) sebesar 3-8%, Oksida besi (Fe_2O_3) sebesar 0,5-6% dan *Gypsum* ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) sebesar 3-4%. Semen OPC digunakan secara luas dalam industri konstruksi, seperti untuk beton, mortar, *paving block*, plesteran, dan berbagai jenis struktur bangunan (Kosmatka, 2016).

Semen OPC memerlukan penambahan material tambahan berupa cangkang kerang hijau yang mengandung CaCO_3 untuk mengatasi kekurangan semen konvensional. Secara teknis, cangkang kerang hijau dengan kandungan kalsium karbonat 95-98% berfungsi sebagai *filler* mikroskopis yang mengisi pori-pori dalam semen, sehingga meningkatkan kepadatan dan mengurangi permeabilitas. Kalsium karbonat dalam cangkang kerang hijau juga berperan sebagai tempat awal tumbuhnya kristal saat semen bereaksi dengan air (*nucleation site*) yang mempercepat proses hidrasi semen dan

memfasilitasi pembentukan kristal C-S-H (*Calcium Silicate Hydrate*) yang lebih homogen (Irfa'i, 2022). Selain itu, CaCO_3 dapat bereaksi dengan alumina dalam semen membentuk *carboaluminate hydrate* yang berkontribusi pada peningkatan kekuatan jangka panjang. Dari aspek lingkungan, penambahan semen OPC dengan cangkang kerang hijau dapat mengurangi masalah penumpukan *waste organic* di wilayah pesisir (Wan, 2017).

CaCO_3 (kalsium karbonat) memiliki peran yang sangat penting dalam semen OPC karena berkontribusi pada peningkatan kinerja dan kualitas beton secara keseluruhan. Sebagai mineral *filler*, CaCO_3 berfungsi mengisi ruang kosong dan pori-pori mikro dalam matriks semen, sehingga meningkatkan kepadatan dan mengurangi permeabilitas beton yang pada akhirnya meningkatkan kekuatan tekan dan durabilitas struktur. Kalsium karbonat juga berperan sebagai *nucleation site* atau titik awal pembentukan kristal yang mempercepat proses hidrasi semen dan membantu terbentuknya struktur C-S-H (*Calcium Silicate Hydrate*) yang lebih homogen dan teratur (Falikman, 2023). Dalam jangka panjang, CaCO_3 dapat bereaksi dengan fase aluminat dalam semen membentuk senyawa *carboaluminate hydrate* yang berkontribusi pada peningkatan kekuatan dan ketahanan beton

terhadap serangan kimia. Kehadiran CaCO_3 juga membantu mengontrol *rheologi* atau sifat alir campuran beton, sehingga meningkatkan *workability* dan kemudahan dalam proses pengecoran. Selain itu, CaCO_3 memiliki sifat kimia yang stabil dan tidak reaktif dalam kondisi normal, sehingga tidak mengganggu proses hidrasi semen utama namun tetap memberikan kontribusi positif terhadap pembentukan struktur mikro yang lebih baik. Pentingnya CaCO_3 dalam semen OPC menjadikannya sebagai bahan tambahan yang strategis untuk mengoptimalkan performa semen sekaligus mengurangi ketergantungan pada semen konvensional yang berdampak tinggi terhadap lingkungan (Irfa'i, 2022).

Penambahan cangkang kerang hijau sebagai material tambahan pada semen OPC menjadi solusi yang inovatif untuk mengatasi tantangan keberlanjutan dalam industri konstruksi. Cangkang kerang hijau yang mengandung 95-98% kalsium karbonat dapat berfungsi sebagai *filler* dan bahan *pozzolan* yang berpotensi meningkatkan kekuatan beton melalui efek pengisian rongga (*filler effect*) dan reaksi kimia dengan kalsium hidroksida dari hasil hidrasi semen (Meddah, 2023). Pemanfaatan limbah cangkang kerang hijau ini dapat mengatasi permasalahan lingkungan berupa penumpukan limbah organik di wilayah pesisir. Selain itu, substitusi parsial

semen OPC dengan cangkang kerang hijau dapat mengurangi jejak karbon industri konstruksi dan menciptakan material konstruksi yang lebih berkelanjutan (Wang & Gao, 2022).

Penambahan serbuk cangkang kerang hijau dapat meningkatkan kekuatan mekanik dari campuran semen. Pada penelitian yang telah dilakukan oleh Darweesh (2023) dengan mengevaluasi semen yang ditambahkan serbuk cangkang kerang tiram dengan variasi 2%, 4%, dan 6% dari massa semen yang dilakukan sesuai dengan standar ASTM C109 untuk semen menunjukkan bahwa penambahan hingga 4% masih memenuhi standar persyaratan minimum kuat tekan yang ditetapkan dalam standar. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Amin, dkk (2019), penambahan batu kapur terhadap karakteristik semen dengan variasi penambahan batu kapur sebanyak 0%, 5%, 10%, dan 15%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar persentase pemakaian batu kapur di dalam campuran, maka nilai *Loss On Ignition* (LOI) semakin meningkat dan nilai kuat tekan semakin menurun seiring dengan penambahan batu kapur pada semen. Campuran optimum dengan penambahan variatif batu kapur di dalam semen yaitu pada persentase 5%. Berdasarkan penelitian dari Wardani (2022), kekuatan beton dapat meningkat apabila penambahan serbuk cangkang kerang hijau dengan kadar yang

tepat, sedangkan penambahan dengan kadar yang tinggi dapat menurunkan kekuatan pada beton.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini fokus pada pemanfaatan limbah cangkang kerang hijau sebagai bahan tambahan dalam semen OPC. Komposisi cangkang kerang hijau divariasi dan dikaji pengaruhnya terhadap uji kuat tekan dan *strength activity index*. Tujuan dari penelitian ini yaitu agar dapat mengurangi kerusakan lingkungan akibat penambangan batu kapur dari alam dan mengolah limbah dari cangkang kerang hijau. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam mengurangi dampak lingkungan dari limbah cangkang kerang hijau sekaligus memberikan inovasi mengenai material konstruksi yang lebih ramah lingkungan.

B. Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana karakteristik semen OPC (*Ordinary Portland Cement*) yang dihasilkan dari penambahan cangkang kerang hijau ditinjau dari sifat fisik dan mekaniknya?
2. Berapakah komposisi terbaik dari cangkang kerang hijau (*Perna Viridis*) sebagai bahan tambahan dalam semen

OPC (*Ordinary Portland Cement*) terhadap hasil uji kuat tekan dan *strength activity index*?

C. Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, tujuan dari penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui karakteristik semen OPC (*Ordinary Portland Cement*) yang dihasilkan dari penambahan cangkang kerang hijau ditinjau dari sifat fisik dan mekaniknya.
2. Untuk mengetahui komposisi terbaik dari cangkang kerang hijau sebagai bahan tambahan semen OPC (*Ordinary Portland Cement*) terhadap kuat tekan dan *strength activity index*.

D. Manfaat Penelitian

Berdasarkan tujuan yang telah diuraikan, manfaat penelitian ini yaitu dapat memberikan inovasi mengenai pengganti penggunaan bahan baku konvensional ke bahan baku pengganti yang terdapat dalam limbah cangkang kerang hijau dengan variasi terbaik terhadap hasil uji kuat tekan dan *strength activity index*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Landasan Teori

1. Kerang Hijau

Kerang hijau (*Perna viridis*) adalah bivalvia yang hidup di perairan estuari dan teluk, berperan sebagai *suspension feeder*. Selain memiliki nilai gizi yang tinggi, kerang hijau juga memiliki potensi sebagai material tambahan dalam industri semen. Penelitian menunjukkan bahwa limbah kerang hijau dapat dimanfaatkan sebagai bahan pengganti sebagian dari bahan baku semen, yang dapat meningkatkan sifat mekanik dan daya tahan beton (Sari, 2021). Penggunaan kerang hijau sebagai material tambahan tidak hanya memberikan manfaat ekonomi, tetapi juga berkontribusi pada pengurangan limbah dan dampak lingkungan dari industri semen.

Kerang hijau memiliki komposisi kimia yang kaya akan kalsium karbonat (CaCO_3) yang merupakan komponen utama dalam semen. Kalsium karbonat dalam kerang hijau dapat berfungsi sebagai pengganti sebagian CaO dari batu kapur sebagai bahan baku semen portland, yang dapat mengurangi penggunaan semen

konvensional dan emisi karbon dioksida yang dihasilkan selama proses produksinya (Irfa'i, 2022). Selain itu, kerang hijau juga mengandung senyawa organik yang dapat meningkatkan ikatan antara agregat dan pasta semen, sehingga meningkatkan kekuatan dan daya tahan beton (Nuemann, 2023). Penggunaan kerang hijau sebagai substitusi semen dalam beton berpotensi meningkatkan sifat mekanik dan durabilitas, sesuai dengan penelitian mengenai substitusi kalsium karbonat dalam pembuatan beton (Deny, 2013).

Beberapa studi telah menunjukkan bahwa penambahan kerang hijau dalam campuran beton dapat meningkatkan sifat mekanik seperti kekuatan dan ketahanan terhadap serangan kimia. Penelitian oleh Sari (2021), menemukan bahwa beton yang mengandung kerang hijau menunjukkan peningkatan kekuatan tekan hingga 15% dibandingkan dengan beton tanpa tambahan. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Liemawan, dkk (2015), didapatkan senyawa kimia dalam cangkang kulit kerang hijau beserta kadarnya yaitu senyawa CaCO_3 sebesar 95,69%, SiO_2 sebesar 0,22%, Fe_2O_3 sebesar 1,00%, MgO sebesar 3,08%, dan Al_2O_3 sebesar 0,01%. Perbandingan senyawa antara cangkang kerang

hijau dengan semen Portland dapat dilihat melalui tabel sebagai berikut (Wardani, 2022).

Tabel 2. 1 Perbandingan senyawa kimia

Senyawa	Kadar Senyawa pada Cangkang Kerang Hijau	Kadar Senyawa pada Semen Portland
CaCO ₃	95,69%	63%
SiO ₂	0,22%	22%
Fe ₂ O ₃	1,00%	2,5%
MgO	3,08%	2,6%
Al ₂ O ₃	0,01%	6%

Hal ini menunjukkan bahwa kerang hijau tidak hanya berfungsi sebagai pengganti, tetapi juga dapat meningkatkan performa beton secara keseluruhan.

Penambahan kerang hijau sebagai material tambahan dalam semen juga memiliki dampak positif terhadap lingkungan. Dengan memanfaatkan limbah kerang hijau, industri semen dapat mengurangi jumlah limbah yang dibuang ke laut dan meningkatkan keberlanjutan sumber daya (El Biri, 2020). Selain itu, pengurangan penggunaan semen portland dapat mengurangi emisi karbon dioksida yang dihasilkan selama proses produksi semen, sehingga berkontribusi pada upaya mitigasi perubahan iklim (Nehdi, 2020).

Kandungan kalsium yang tinggi dari cangkang kerang menyebabkan cangkang kerang hijau masuk ke

dalam kategori yang tidak mudah terurai secara alami. Akibatnya, cangkang kerang yang dibuang di lingkungan terbuka dan menimbulkan tumpukan sampah. Hal ini termasuk dalam bentuk kerusakan yang dilarang oleh Allah SWT, sebagaimana dalam firman Allah SWT pada QS. Al-A'raf ayat 56 (Mustakim, 2017):

وَلَا تُفْسِدُوا فِي الْأَرْضِ بَعْدَ إِصْلَاحِهَا وَادْعُوهُ خَوْفًا وَطَمَعًا إِنَّ رَحْمَتَ
اللَّهِ قَرِيبٌ مِّنَ الْمُحْسِنِينَ

Artinya: *“Janganlah kamu berbuat kerusakan di bumi setelah diatur dengan baik. Berdoalah kepada-Nya dengan rasa takut dan penuh harap. Sesungguhnya Allah sangat dekat dengan orang-orang yang berbuat baik” (QS. Al-A'raf: 56).*

Isi kandungan dalam QS. AL-A'raf ayat 56 ini yaitu melarang perbuatan yang menimbulkan kerusakan di bumi, yang mana perbuatan tersebut merupakan salah satu bentuk pelampauan batas. Alam semesta diciptakan oleh Allah SWT dalam keadaan harmonis, serasi, dan memenuhi segala kebutuhan makhluk di bumi. Allah SWT telah menjadikannya dalam keadaan baik, serta memerintahkan hamba-hamba-Nya untuk memperbaikinya. Salah satau bentuk perbaaikan yang dilakukan Allah SWT adalah dengan mengutus paara

nabi untuk meluruskan dan memperbaiki kehidupan masyarakat. Maka merusak setelah diperbaiki jauh lebih buruk daripada sebelum diperbaiki. Karena pada ayat tersebut dengan tegas melarang hal yang menimbulkan kerusakan, walaupun memperparah kerusakan atau merusak sesuatu yang baik juga dilarang (Shihab, 2013: (Mustakim, 2017)). Larangan berbuat kerusakan ini mencakup semua bidang, salah satunya yaitu merusak lingkungan hidup. Allah SWT menciptakan bumi dengan segala kelengkapannya ditujukan kepada manusia agar dimanfaatkan dengan sebaik-baiknya untuk kesejahteraan mereka hidup di bumi (Depag R.I., 2009 (Mustakim, 2017)).

Secara keseluruhan, kerang hijau memiliki potensi yang signifikan sebagai material tambahan dalam semen. Penggunaannya tidak hanya dapat meningkatkan kualitas beton, tetapi juga memberikan manfaat lingkungan yang penting. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi berbagai proporsi dan metode pengolahan kerang hijau yang optimal dalam campuran semen, serta untuk mengevaluasi dampak jangka panjang dari penggunaannya dalam konstruksi (Ismail, 2021)

2. Semen *Ordinary Portland Cement* (OPC)

Semen *Ordinary Portland Cement* (OPC) adalah jenis semen yang paling umum digunakan dalam konstruksi bangunan. OPC terdiri dari campuran klinker semen, gipsum, dan bahan tambahan lainnya yang memberikan sifat tertentu pada semen. Klinker semen dihasilkan melalui proses pemanasan bahan baku seperti batu kapur dan tanah liat pada suhu tinggi, yang kemudian digiling menjadi bubuk halus (Kumar, 2021). OPC memiliki karakteristik yang baik dalam hal kekuatan, daya rekat, dan ketahanan terhadap berbagai kondisi lingkungan, sehingga menjadikannya pilihan utama dalam berbagai aplikasi konstruksi.

Komposisi utama OPC meliputi kalsium silikat, kalsium aluminat, dan kalsium aluminoforit yang masing-masing memberikan kontribusi terhadap sifat fisik mekanik dan kimia semen (Chattopadhyay, 2020). Proses produksi semen OPC melibatkan beberapa tahap, mulai dari pengolahan bahan baku, pembakaran untuk menghasilkan klinker, hingga penggilingan klinker dengan gipsum untuk mengatur waktu pengikatan semen. Proses ini memerlukan energi cukup besar, sehingga berkontribusi pada emisi karbon dioksida yang

signifikan, menjadikan OPC sebagai salah satu penyumbang utama emisigas rumah kaca dalam industri konstruksi (John, 2020).

Di Indonesia, semen OPC diatur oleh Standar Nasional Indonesia (SNI) yaitu SNI 15-2049-2015 tentang semen portland. SNI ini menetapkan persyaratan teknis untuk semen portland, termasuk spesifikasi fisik dan kimia, serta metode pengujian yang harus dilakukan untuk memastikan kualitas semen yang diproduksi. SNI ini bertujuan untuk menjamin bahwa semen yang digunakan dalam konstruksi memenuhi standar yang diperlukan untuk keamanan dan daya tahan bangunan (SNI-2049, 2015).

Berikut tabel spesifikasi kimia dan fisika dari semen OPC.

Tabel 2. 2 Syarat Kimia Semen Portland

No	Uraian	Jenis semen portland				
		I	II	III	IV	V
1	SiO ₂ , max		6,0			
2	Al ₂ O ₃ , max		6,0			
3	Fe ₂ O ₃ , max		6,0		6,5	
4	MgO, max	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
5	SO ₃ , max					
	C ₃ A ≤ 8,0	3,0	3,0	3,5	2,3	2,3
	C ₃ A > 8,0	3,5		4,5		
6	Hilang pijar, max	5,0	3,0	3,0	2,5	3,0
7	Bagian tak larut, max	3,0	1,5	1,5	1,5	1,5

Satuan dalam %

Tabel 2. 3 Syarat Fisika Semen Portland

No	Uraian	Umur Benda Uji			
		1	3	7	28
1.	Kuat tekan	-	130	200	280

Satuan dalam kg/cm²

Semen OPC memiliki sifat fisik dan mekanik yang sangat baik, termasuk kekuatan tekan yang tinggi dan daya rekat yang baik terhadap agregat. Kekuatan tekan OPC dapat mencapai 20-40 MPa dalam waktu 28 hari setelah pengikatan, tergantung pada proporsi campuran dan kondisi curing (Kumar, 2021). Selain itu, OPC juga

memiliki waktu pengikatan yang relatif cepat, yang memungkinkan proses konstruksi berlangsung lebih efisien. Namun, sifat ini juga membuat OPC kurang tahan terhadap serangan kimia, seperti sulfat dan klorida, yang dapat menyebabkan kerusakan pada struktur beton (Chattopadhyay, 2020).

Kelebihan utama dari OPC adalah kemampuannya untuk memberikan kekuatan yang tinggi dalam waktu yang singkat, serta kemudahan dalam penggunaannya. OPC juga memiliki daya rekat yang baik, sehingga dapat digunakan dalam berbagai jenis campuran beton (Zhang, 2022). Namun, kekurangan OPC terletak pada dampak lingkungan yang ditimbulkannya, terutama terkait dengan emisi karbon dioksida selama proses produksinya. Selain itu, OPC juga memiliki ketahanan yang terbatas terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem, seperti serangan sulfat, yang dapat mengurangi umur pakai struktur beton (Kumar, 2021).

Penggunaan semen OPC dalam industri konstruksi memiliki dampak lingkungan yang signifikan, terutama terkait dengan emisi karbon dioksida yang dihasilkan selama proses produksinya. Menurut Zhang (2022), produksi satu ton OPC dapat menghasilkan 0,8 ton CO₂ yang berkontribusi pada

perubahan iklim. Oleh karena itu, banyak penelitian yang berfokus pada pengembangan alternatif semen yang lebih ramah lingkungan, seperti semen berbasis bahan baku lokal atau limbah industri, untuk mengurangi ketergantungan pada OPC dan dampak lingkungannya (Kumar, 2021).

Inovasi dalam produksi OPC terus dilakukan untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi dampak lingkungan. Salah satu pendekatan yang sering dikembangkan adalah penggunaan teknologi pengurangan emisi, seperti penggunaan bahan bakar alternatif dan proses produksi yang lebih efisien (Chattopadhyay, 2020). Selain itu, penelitian juga dilakukan untuk mengembangkan OPC dengan sifat lebih baik, seperti ketahanan terhadap serangan kimia dan pengikatan daya rekat, melalui modifikasi komposisi dan penggunaan bahan tambahan (Zhang, 2022). Dalam konteks konstruksi berkelanjutan OPC dapat digunakan dengan cara yang lebih ramah lingkungan dengan mengombinasikannya dengan bahan tambahan yang mengurangi kebutuhan akan semen Portland murni. Misalnya, penggunaan *fly ash*, *slag*, atau bahan organik lainnya sebagai pengganti sebagian semen yang dapat mengurangi emisi karbon dan meningkatkan sifat

mekanik beton (Kumar, 2021). Pendekatan ini tidak hanya mengurangi dampak lingkungan, tetapi juga meningkatkan daya tahan dan umur pakai struktur beton.

Secara keseluruhan, semen OPC merupakan bahan yang sangat penting dalam industri konstruksi, dengan sifat mekanik yang baik dan aplikasi yang luas. Namun, dampak lingkungan dari proses produksinya menjadi perhatian utama dalam upaya menuju pembangunan berkelanjutan. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi alternatif bahan semen yang dapat mengurangi emisi karbon dan meningkatkan keberlanjutan dalam industri konstruksi (Zhang, 2022).

B. Karakterisasi

1. *X-Ray Fluorescence (XRF)*

X-ray Fluorescence (XRF) adalah teknik analisis yang digunakan untuk menentukan komposisi elemen dari suatu material dengan cara memancarkan sinar-X ke sampel. Ketika sinar-X mengenai sampel, elemen dalam sampel tersebut akan memancarkan sinar-X sekunder yang memiliki energi karakteristik untuk setiap elemen (Gracia, 2021). Metode ini sangat berguna dalam berbagai bidang, termasuk geologi, metalurgi, dan

lingkungan, karena dapat memberikan informasi yang cepat dan akurat mengenai komposisi kimia tanpa merusak sampel.

Spektroskopi XRF adalah teknik analisis unsur yang membentuk suatu material dengan dasar interaksi sinar-X dengan material analit. Metode ini banyak digunakan untuk menganalisis batuan karena membutuhkan jumlah sampel yang relatif sedikit (± 1 gram). Teknik ini dapat digunakan untuk mengukur unsur-unsur terutama yang banyak terdapat dalam batuan atau mineral. Sampel yang digunakan biasanya berupa serbuk hasil penggilingan atau pengepresan menjadi film. Metode ini telah banyak digunakan dalam teknik analitis non destruktif dan sebagai alat kontrol dalam industri pengolahan. Peralatan ini terdiri dari tabung pembangkit sinar-X yang mampu mengeluarkan elektron dari semua jenis unsur yang telah diteliti. Sinar-X yang dihasilkan harus berenergi sangat tinggi, sehingga anoda target dalam tabung pembangkit harus berupa unsur Cr, Mo, W atau Au (Gapur, 2014).

Prinsip kerja XRF didasarkan pada fenomena fluoresensi, dimana sinar-X yang dipancarkan dari sumber akan mengionisasi atom dalam sampel, menyebabkan elektron dari kulit dalam atom tersebut

terlepas. Ketika elektron dari kulit luar menggnatikan posisi elektron yang hilang, energi yang dilepaskan akan memancarkan sinar-X dengan energi yang spesifik untuk elemen tersebut. Dengan menganalisis energi dan intensitas sinar-X yang dipancarkan, perangkat XRF dapat mengidentifikasi dan mengukur konsentrasi elemen dalam sampel (Liu & Teng, 2018).

XRF memiliki beberapa keunggulan, termasuk kecepatan analisis, kemampuan untuk menganalisis berbagai elemen dalam satu pengukuran, dan sifat non-destruktifnya (Zhang, 2022). Metode ini juga dapat digunakan untuk analisis lapangan, sehingga sangat fleksibel dalam aplikasinya. Namun, XRF juga memiliki keterbatasan, seperti kesulitan dalam mendeteksi elemen dengan konsentrasi sangat rendah dan ketidakmampuan untuk membedakan anantara elemen yang memiliki energi fluoresensi yang sangat mirip (Litofsky, 2022).

XRF banyak digunakan dalam karakterisasi material, termasuk dalam analisis bahan bangunan, mineral, dan limbah. Dalam industri semen, mislanya, XRF digunakan untuk memantau kualitas bahan baku dan memastikan bahwa komposisi kimia memenuhi standar yang ditetapkan (Al-Masri & Al-Harbi, 2019).

2. *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)*

Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) merupakan salah satu metode analisis spektroskopi yang menggunakan sinar infra merah. FTIR banyak digunakan untuk mengetahui vibrasi molekul yang dapat menentukan gugus fungsi kimia dari senyawa organik maupun anorganik (Serfas, 2022). FTIR bekerja dengan mengukur absorbansi atau transmitansi radiasi inframerah yang dipancarkan melalui sampel, yang memberikan informasi tentang ikatan kimia dan gugus fungsional yang aadaa dalam senyawa tersebut (Serfas, 2022).

Prinsip kerja FTIR didasarkan pada fenomena bahwa setiap jenis ikatan kimia dalam molekul akan menyerap radiasi inframerah pada panjang gelombang tertentu. Ketika sampel terkena radiasi infraerah, molekul dalam sampel akan bergetar dan menghasilkan spektrum. Spektrum ini kemudian diubah menjadi bentuk yang lebih mudah dibaca menggunakan transformasi *fourier*, yang memungkinkan analisis lebih lanjut. Dengan membandingkan spektrum yang diperoleh dengan basis data spektrum yang ada, sehingga dapat mengidentifikasi senyawa yang ada dalam sampel (Serfas, 2022).

Hasil dari analisis FTIR biasanya ditampilkan dalam bentuk spektrum yang menunjukkan puncak-puncak absorpsi pada panjang gelombang tertentu. Setiap puncak dalam spektrum mewakili gugus fungsional atau ikatan tertentu dalam molekul. Pada puncak sekitar 3400 cm^{-1} seringkali menunjukkan keberadaan gugus -OH , sedangkan pada puncak sekitar 1700 cm^{-1} dapat menunjukkan keberadaan gugus karbonil (C=O). Dengan demikian, FTIR tidak hanya memberikan informasi tentang komposisi kimia, tetapi juga tentang struktur dan interaksi molekul (Lee, 2022). Data yang akan diperoleh dari karakterisasi sampel menggunakan FTIR adalah berupa bilangan gelombang (cm^{-1}) dan transmitansi (%). Bilangan gelombang (cm^{-1}) merupakan jumlah panjang gelombang per satu sentimeter (cm). Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa bilangan gelombang berbanding terbalik terhadap panjang gelombang yang diserap oleh detektor (Serfas, 2022).

Kelebihan dari karakterisasi menggunakan FTIR adalah kemampuannya untuk memberikan analisis yang cepat dan non-destruktif terhadap sampel. Teknik ini dapat digunakan untuk analisis kuantitatif dan kualitatif, serta dapat diterapkan pada berbagai jenis sampel,

termasuk padatan, cairan, dan gas. Selain itu, FTIR memiliki sensitivitas yang tinggi dan dapat mendeteksi konsentrasi rendah dari senyawa tertentu (Wang, 2023). Meskipun demikian, karakterisasi menggunakan FTIR juga memiliki kekurangan, yaitu pada keterbatasan dalam analisis senyawa yang sangat kompleks atau campuran, dimana spektrum dapat tumpang tindih dan menyulitkan identifikasi. Selain itu, FTIR tidak dapat memberikan informasi tentang struktur tiga dimensi molekul (Gracia, 2021).

Hasil karakterisasi FTIR pada cangkang kerang hijau menunjukkan adanya pita serapan yang signifikan, terutama pada panjang gelombang 3446 cm^{-1} yang mengindikasikan keberadaan gugus -OH , serta pita sekitar 1420 cm^{-1} yang terkait dengan gugus Ca-O . Analisis ini penting untuk memahami komposisi kimia dan potensi aplikasi cangkang kerang hijau dalam berbagai bidang, termasuk sebagai bahan tambahan dalam semen (Nurhamzah, 2024). Selain itu, spektrum FTIR juga menunjukkan adanya gugus fungsional lain yang dapat berkontribusi pada sifat reaktivitas cangkang kerang dalam campuran semen (Sari, 2022).

Pada penelitian Ardhani (2021), karakterisasi cangkang kerang hijau menggunakan FTIR

menunjukkan adanya pita serapan gugus Ca-O yang terlihat pada daerah panjang gelombang $874,41\text{ cm}^{-1}$ dan pita serapan gugus OH yang terdapat pada daerah panjang gelombang $3645,77\text{ cm}^{-1}$ kemungkinan berasal dari molekul air yang terabsorb pada permukaan CaO, karena CaO bersifat higroskopis yang mudah menyerap air.

3. Uji *Moisture Content* (Kadar air)

Uji kadar air (*moisture content*) merupakan salah satu parameter penting dalam karakterisasi material, terutama dalam konteks penggunaan *fly ash* dan pozolan alami dalam campuran beton (Cataldo, 2017). Menurut ASTM C311, pengujian ini bertujuan untuk menentukan jumlah air yang terkandung dalam sampel *fly ash* atau pozolan alami, yang dapat mempengaruhi sifat fisik dan kimia dari material tersebut. Kadar air yang sangat tepat penting untuk memastikan kualitas dan kinerja beton, karena dapat mempengaruhi proses hidrasi semen dan kekuatan akhir beton (Kumar, 2021). Oleh karena itu, pengujian kadar air harus dilakukan secara akurat untuk memastikan bahwa campuran beton mencapai sifat mekanis yang diinginkan. Pengujian ini juga berperan penting dalam mengoptimalkan penggunaan *fly ash*

sebagai bahan campuran beton, yang dapat meningkatkan kekuatan tekan dan mengurangi dampak lingkungan (Apriyanti, 2024). Persentase Kadar air dihitung dengan persamaan (2.1) di bawah ini.

$$\text{moisture content} = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \times 100\% \quad (2.1)$$

Keterangan:

w_1 : massa awal (g)

w_2 : massa akhir (g)

4. Uji *Insoluble Residue* (IR)

Residu tak larut merupakan material non-semen yang terdapat dalam semen portland. Material residu ini mempengaruhi sifat-sifat semen, terutama pada hasil kekuatan tekannya (Ribeiro, 2020). Untuk mengontrol material non-semen dalam semen portland, standar ASTM memberikan batas maksimal residu tak larut dengan presentase 0,75%. Material non-semen sebagian besar berasal dari kotoran dalam gipsum dan dapat ditemukan dengan melarutkan semen ke dalam larutan asam klorida dan natrium hidroksida (Kiattikomol, 2000).

Residu yang dihasilkan dihitung dengan persamaan di bawah ini (SNI-2049, 2015):

$$\% \text{ IR} = ((W_2 - W_0) / (W_1)) \times 100\% \quad (2.2)$$

Keterangan:

IR : insoluble residue

W_0 : massa cawan kosong (g)

W_1 : massa sampel awal (g)

W_2 : massa cawan + sampel setelah pengabuan (g)

Pengendalian residu tak larut penting untuk memastikan kualitas semen portland dan kekuatan beton yang dihasilkan. Pengendalian ini berkontribusi pada keberlanjutan dalam produksi semen, mengingat bahwa pengurangan material non-semen dapat mengurangi dampak lingkungan dari proses produksi tersebut. Pengendalian residu tak larut yang efektif dapat meningkatkan kualitas semen dan mendukung konstruksi yang berkelanjutan (Setiati, 2018).

5. Uji Densitas

Menurut ASTM C311, densitas didefinisikan sebagai massa per unit volume dari material, yang dapat memberikan informasi tentang sifat fisik dan potensi reaktivitas dari *fly ash* atau pozolan. Densitas yang tepat sangat penting digunakan untuk memastikan kualitas dan

kinerja beton, karena dapat mempengaruhi proporsi campuran dan sifat mekanik beton (Rmdan Amer, 2020).

Tujuan pengujian densitas adalah untuk menentukan massa jenis dari *fly ash* alami sebelum digunakan dalam campuran beton. Densitas yang lebih tinggi dapat menunjukkan bahwa material tersebut memiliki lebih banyak partikel padat dalam volume tertentu, yang dapat berkontribusi pada kekuatan dan stabilitas beton. Oleh karena itu, pengujian ini dapat menjadi langkah awal dalam proses persiapan material untuk konstruksi (Sari, 2021). Selain itu, pemilihan *fly ash* yang tepat juga dapat berkontribusi pada pengurangan emisi CO₂ dari industri semen (Anggara, 2023).

6. Uji Hilang Pijar (*Loss on Ignition/LOI*)

Hilang pada pemijaran adalah metode yang digunakan dalam analisis kimia anorganik, terutama untuk memeriksa kandungan mineral. Teknik ini dilakukan dengan memanaskan suatu sampel pada suhu tertentu hingga hanya residu yang tahan terhadap pemanasan tinggi yang tersisa. Pengujian sederhana biasanya melibatkan penempatan sejumlah kecil bahan, ke dalam wadah yang bobotnya telah diketahui sebelumnya. Wadah dan sampel kemudian dipanaskan

untuk menentukan massa yang hilang selama proses pemanasan (Musfiroh, 2021).

Hilang pijar atau *loss on ignition* (LOI) merupakan salah satu parameter uji untuk menentukan kualitas semen. Tujuan dari analisis ini yaitu untuk mengontrol penambahan batu kapur pada semen dengan cara memastikan bahwa kandungan mineral yang dihasilkan memenuhi standar kualitas yang ditetapkan. Metode ini penting dalam produksi semen untuk menjaga konsistensi dan kekuatan material (Olubajo, 2019).

Persentase hilang pijar dihitung dengan persamaan 2.3 dibawah ini (SNI-2049, 2015).

$$\%HP = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \quad (2.3)$$

Keterangan:

HP : hilang pijar

W_1 : massa sampel awal (g)

W_2 : massa sampel setelah pemijaran (g)

7. Uji Kadar Karbon Dioksida (Metode *Split-LOI*)

Uji karbon dioksida (CO_2) dengan metode *split Loss on Ignition* (LOI) merupakan teknik yang digunakan untuk menentukan kandungan karbonat dalam *fly ash* dan pozolan alami. Menurut ASTM C311, pengujian ini bertujuan untuk mengukur jumlah karbon dioksida yang dilepaskan saat sampel dipanaskan pada suhu tertentu, yang dapat memberikan informasi tentang keberadaan kalsium karbonat ($CaCO_3$) dan senyawa karbonat lainnya dalam material. Kandungan karbonat yang tinggi dapat mempengaruhi reaktivitas dan kinerja *fly ash* atau pozolan alami dalam campuran beton (Kumar, 2020).

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memastikan bahwa proporsi karbonat dalam *fly ash* atau pozolan alami berada dalam batas yang dapat diterima

untuk aplikasi dalam beton. Karbon dioksida yang terlepas selama proses pemanasan dapat menunjukkan potensi reaktivitas material, yang penting untuk memastikan bahwa material tersebut dapat berfungsi secara efektif sebagai pengganti semen (Rausis, 2021).

Uji karbon dioksida dengan metode *split* LOI sesuai dengan ASTM C114 dilakukan dengan pemanasan sampel sebanyak 2 kali. Pemanasan pertama dilakukan pada suhu 550°C selama 2 jam, sedangkan pemanasan kedua pada suhu 950°C selama 2 jam. Persentase karbon dioksida dihitung dengan persamaan berikut (C114).

$$\text{HP } 550^{\circ}\text{C} = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \times 100\% \quad (2.4)$$

$$\text{HP } 950^{\circ}\text{C} = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \times 100\% \quad (2.5)$$

$$\text{CO}_2 = \text{HP } 950^{\circ}\text{C} - \text{HP } 550^{\circ}\text{C} \quad (2.6)$$

Keterangan:

w_1 : massa sampel awal (g)

w_2 : massa sampel akhir (g)

8. Uji Kehalusan

Uji kehalusan (*fineness*) merupakan parameter uji penting dalam karakterisasi material, khususnya dalam konteks penggunaan *fly ash* dan pozolan alami dalam campuran beton. Menurut ASTM C311, kehalusan

didefinisikan sebagai ukuran partikel dari material, yang dapat mempengaruhi reaktivitas dan kinerja *fly ash* atau pozolan dalam campuran beton. Kehalusan yang tepat dsangat penting untuk memastikan bahwa material dapat berinteraksi secara optimal dengan komponen lain dalam campuran, seperti semen dan air (Kumar, 2020).

Tujuan dari uji kehalusan adalah untuk menentukan distribusi ukuran paartikel *fly ash* atau pozolan alami sebelum digunakan dalam campuran beton. Material dengan ukuran partikel yang lebih halus cenderung memiliki luas permukaan yang lebih besar, yang dapat meningkatkan reaktivias dan mempercepat proses hidrasi (Lee, 2022). Pengujian ini dilakukan dengan pengambilan sampel dan penyaringan material dengan *mesh tray* 45 μ m. Setelah penyaringan, berat material yang tertahan diatas ayakan dicatat dan dibandingkan dengan berat total sampel untuk menghitung persentase partikel yang tertinggal pada *mesh tray*. Hasil daari pengujian ini dinyatakan dalam persentase yang menunjukkan proporsi partikel yang tidak memenuhi kriteria kehalusan (Halim, 2022).

Persentase uji kehalusan cangkang kerang hijau dihitung dengan persamaan 2.7 dan 2.8.

$$\%tertahan = \frac{w_2}{w_1} \times 100\% \quad (2.7)$$

$$\%lolos = 100\% - \%tertahan \quad (2.8)$$

Keterangan:

w_1 : massa total (g)

w_2 : massa tertahan (g)

9. Uji Kuat Tekan

Kuat tekan merupakan besarnya beban per satuan luas yang dapat menyebabkan hancurnya benda uji jika dikenai gaya tekan (Wardani, 2022). Kecepatan pengepresan mulai dari pemuatan sampai benda uji hancur diatur sedemikian rupa sehingga tidak kurang dari satu menit dan tidak lebih dari dua menit (Nur, 2017). Hal ini penting agar hasil pengujian dapat mencerminkan karakteristik material secara akurat dan konsisten. Pengujian kuat tekan yang tepat akan memberikan informasi yang berguna untuk menentukan kualitas dan daya tahan beton dalam aplikasi konstruksi.

Pengujian ini penting untuk memastikan bahwa beton memenuhi standar yang ditetapkan dan dapat berfungsi dengan baik dalam konstruksi bangunan. Pengujian kuat tekan yang dilakukan pada campuran

beton dengan penambahan sabut kelapa menunjukkan bahwa variasi persentase sabut kelapa memengaruhi nilai kuat tekan yang dihasilkan (Susilawati, 2023). Hasil ini dapat memberikan wawasan penting dalam pengembangan material beton yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Kekuatan tekan benda uji dihitung menggunakan persamaan berikut ini (SNI-2049, 2015):

$$F_m = \frac{P}{A} \quad (2.8)$$

Keterangan:

F_m : kuat tekan (Mpa)

P : beban maksimum (kg)

A : luas permukaan (cm²)

10. *Strength Activity Index (SAI)*

Strength Activity Index (SAI) merupakan suatu metode untuk mengetahui kualitas bahan tambahan yang dicampurkan ke dalam semen dengan mengacu pada standar ASTM C595/C595M-12 (Susanti, 2019). Analisis nilai SAI diperoleh dari uji kuat tekan. Pengujian SAI dilakukan pada sampel yang berumur 7 hari.

Indeks aktivitas dengan semen portland dapat dihitung menggunakan persamaan di bawah ini (Susanti, 2019)

$$A.I.W.P.C = \frac{A}{B} \times 100\% \quad (2.9)$$

Keterangan:

AIWPC : *activity index with portland cement*

A : rata-rata kuat tekan blanko (kg/cm²)

B : rata-rata kuat tekan sampel (kg/cm²)

C. Kajian Riset Relevan

Penggunaan material alternatif dalam konstruksi terus dikembangkan untuk mnegurangi dampak lingkungan. Salah satu inovasi yang menarik perhatian adalah pemanfaatan limbah cangkang kerang hijau sebagai bahan substitusi sebagian semen *Ordinary Portland Cement* (OPC). Penelitian ini berfokus pada upaya mengurangi penggunaan semen portland (OPC) dengan memanfaatkan limbah cangkang kerang hijau, yang diharapkan tidak hanya mengurangi dampak lingkungan tetapi juga meningkatkan sifat fisis dan mekanis dari semen OPC. Beberapa penelitian relevan yang mendukung pemanfaatan bahan alternatif ini akan dibahas, sebagai landasan untuk mendukung penelitian ini.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Liemawan dkk (2015) komposisi senyawa kimia yang terdapat pada serbuk cangkang kerang terkandung dalam seluruh unsur semen, walaupun dalam presentase yang kecil. Pada hasil analisa menggunakan XRD, senyawa yang paling dominan yaitu CaCO_3 . Peambahan serbuk cangkang kerang yang tidak mengalami perlakuan khusus tidak dapat memberikan kontribusi terhadap kuat tekan beton.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Wardani (2022) penambahan serbuk cangkang kerang hijau dapat meningkatkan kekuatan beton jika digunakan dengan kadar yang tepat. Penggunaan dengan kadar yang tinggi dapat menurunkan kekuatan beton. Tidak ditemukan persentase optimum dari beberapa variasi serbuk cangkang kerang hijau sebagai substitusi sebagian semen yang diuji pada pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah beton karena hasil yang didapatkan masih di bawah kuat tekan dan kuat tarik belah beton normal. Meskipun demikian, didapatkan nilai kuat tekan terbesar dari beberapa variasi yaitu pada kadar 6% sebesar 19,534 MPa dan didapatkan nilai kuat tarik belah beton yang setara dengan beton normal pada kadar 4% yakni sebesar 2,408 MPa.

Pada penelitian yang dilakukan Firdaus dan Haikal (2019), Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemanfaatan kulit kerang darah dapat meningkatkan atau menurunkan kuat tekan mortar, dimana kuat tekan mortar tersebut ditandai meningkat setelah diberi penambahan kulit kerang hingga 5-10%, namun apabila diberi penambahan sebesar lebih dari 10%, kuat tekan mortar mengalami penurunan. Artinya ada jumlah konsentrasi yang ideal kulit kerang untuk pemanfaatannya sebagai bahan substitusi semen.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Amin, dkk (2019), mengenai penambahan batu kapur terhadap karakteristik semen dengan variasi penambahan batu kapur sebanyak 0%, 5%, 10%, dan 15%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar persentase pemakaian batu kapur di dalam campuran, maka nilai *Loss On Ignition* (LOI) semakin meningkat dan nilai kuat tekan semakin menurun seiring dengan penambahan batu kapur pada semen. Campuran optimum dengan penambahan variatif batu kapur di dalam semen yaitu paada persentase 5%.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Rani (2020), penambahan kadar kapur sebagai filler pada semen OPC diperoleh nilai optimum penambahan kapur (CaCO_3)

sebesar 5,5% berdasarkan interpolasi linier dengan perbandingan blanko. Akan tetapi, nilai optimum yang aman digunakan sebagai acuan untuk PT Semen Indonesia (Persero) Tbk yaitu sebesar 5,4%.

Pada penelitian Febrian (2020), penambahan abu tulang sapi yang dibakar pada suhu 800°C yang mengandung CaO , P_2O_5 dan SiO_2 ditambahkan dalam semen pada mortar dapat meningkatkan kuat tekan dan mengurangi porositas serta penyerapan.

Pada penelitian Tanggu dkk (2018), kalsium karbonat dan debu bekas marmer dapat digunakan sebagai bahan tambahan dalam campuran mortar dengan presentase 5%, 10%, dan 15% untuk meningkatkan sifat mekanis dari mortar.

Berdasarkan penelitian-penelitian di atas, pemanfaatan limbah cangkang kerang hijau sebagai bahan substitusi semen menawarkan solusi inovatif untuk mengurangi penggunaan semen portland (OPC) sekaligus meningkatkan sifat fisis dan mekanis dari semen. Melalui tinjauan terhadap penelitian-penelitian relevan, terbukti bahwa penggunaan material alternatif ini mendukung upaya pembangunan yang berkelanjutan. Pada penelitian ini akan memanfaatkan limbah cangkang kerang hijau sebagai sumber CaCO_3 dengan variasi

optimal ke dalam semen *Ordinary Portland Cemen* (OPC) untuk mengetahui pengaruhnya terhadap hasil uji kuat tekan dan analisis *Strength Activity Index* (SAI).

D. Hipotesis

Hipotesis dalam penelitian ini adalah serbuk cangkang kerang hijau berpotensi menjadi material tambahan pada semen OPC (*Ordinary Portland Cement*) karena kandungan kalsium karbonat (CaCO_3) yang tinggi secara kimiawi memiliki kesamaan dengan kalsium karbonat (CaCO_3) yang berasal dari batuan atau mineral yang telah digunakan dalam industri semen.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan pada Januari 2025 di Laboratorium *Quality Assurance* (QA) PT. Semen Gresik Rembang dan di Laboratorium anorganik/fisik Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Walisongo Semarang.

B. Alat dan Bahan

1. Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu oven, *crusher*, mesin *manual grinding* Harzog HSM100, ayakan 75 μm , ayakan 45 μm , timbangan analitik kimia Sartorius Secura 224-1S, cawan porselein, gelas ukur, *hot plate* Thermo Scientific 2200, spatula, penjepit cawan, krusibel platina, kertas saring *whatman* no. 40, *furnace* Carbolite 950°C CWF1300, *furnace* Carbolite 550°C VMF1000, mesin pengaduk Toni Technik 6214.200, mangkuk aduk, bak perendaman Toni Technik, lemari lembab Matest, mesin *compression test* Toni Technik 1543, cetakan kubus 5x5x5 cm, *Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence* (WD XRF)

Thermofisher tipe ARL9900, *Air Jet Sieve* Hosokawa Alpine tipe e200 LS, *mesh tray* 45 μm , *gas pycnometer* Micromeritics tipe AccuPyc II 1340, *vibrating table* Toni Technik 5533, *ring pallet*, mesin *manual press* Harzog HTP40 .

2. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu cangkang kerang hijau, semen OPC (*Ordinary Portland Cement*), aquades, pil spectromelt C 20 yang mengandung *sodium biphenyl complex*, pasir silika ottawa ASTM *Graded Sand*, HCl p.a (asam klorida), NH_4Cl p.a (amonium klorida), NaOH p.a (natrium hidroksida), dan indikator *methyl red*.

C. Prosedur Kerja

1. Preparasi dan Karakterisasi Serbuk Cangkang Kerang Hijau

Penelitian ini, serbuk cangkang kerang hijau digunakan sebagai bahan tambahan dalam semen OPC. Uji kualitas bahan dalam semen dilakukan untuk memverifikasi kesesuaiannya dengan kriteria ASTM C311 (*Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete*).

a. Preparasi Serbuk Cangkang Kerang Hijau

Cangkang kerang hijau yang akan digunakan dibersihkan dengan air sampai bersih, kemudian dijemur di bawah sinar matahari selama satu hari. Cangkang kerang hijau yang telah kering dicacah dengan mesin *crusher* untuk memudahkan proses selanjutnya.

1) Pembuatan Serbuk Cangkang Kerang Hijau

Cacahan cangkang kerang hijau yang telah dioven, dihaluskan menggunakan mesin *manual grinding* selama satu menit dan bertahap. Cacahan cangkang kerang hijau kemudian di ayak menggunakan *mesh tray* ukuran 75 μm . Pengayakan dilakukan menggunakan alat vibrasi elektrik selama 30 menit. Hasil ayakan berupa serbuk cangkang kerang hijau dengan kehalusan yang seragam.

b. Karakterisasi Serbuk Cangkang Kerang Hijau

1) Uji X-Ray Fluorescence (XRF)

Sampel cangkang kerang hijau dihaluskan dengan menggunakan mesin *manual grinding* merek Hazorg HSM100 dan ditambahkan 3 buah pil *spectromelt* selama 1 menit. Proses dari penghalusan cangkang kerang hijau

menggunakan mesin *manual grinding* yang mana sampel dimasukkan ke dalam *grinding vessel* dari bahan *tungsten carbide* menghasilkan bubuk cangkang kerang hijau. Sampel kemudian dikeluarkan dan dipres pada *ring pallet*. Sampel dipress menggunakan mesin *manual press*. Sampel yang telah dipres dimasukkan ke dalam *sample holder*. Selanjutnya dilakukan input data sampel ke *software*. Setelah selesai di input, kemudian dimulai pengukuran menggunakan *Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence* (WD-XRF). Setelah selesai, *software* akan menampilkan hasil berupa komposisi senyawa kimia yang terdapat dalam cangkang kerang hijau.

2) Uji *Moisture Content* (Kadar Air)

Cangkang kerang hijau yang telah dicacah, dioven pada suhu $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ selama 3 jam. Setelah dioven cangkang kerang hijau ditimbang dan dihitung dengan persamaan (2.1) (ASTM, 2021).

3) Uji *Insoluble Residue* (Zat Tak Larut)

Proses pengujian dimulai dengan menimbang sebanyak 1 g sampel dengan neraca

analitik. Sampel dimasukkan ke dalam gelas beker dan dilarutkan dengan aquades serta 5 mL HCl pekat. Selanjutnya, ditambahkan dengan aquades hingga volume mencapai 50 mL. Larutan dipanaskan di atas *hotplate* dengan suhu 200°C selama 5 menit. Selanjutnya dilakukan filtrasi menggunakan kertas saring *whatman* no 40. Sampel yang masih tertinggal di dalam gelas beker dicuci dengan aquades panas hingga tidak ada endapan yang tersisa. Kertas saring dan residu dimasukkan ke dalam gelas beker berisi 100 mL NaOH 1% panas dan dipanaskan selama 15 menit. Kertas saring kemudian dihancurkan dan ditambahkan *metil red* sebanyak 3 tetes sebagai indikator. Kemudian ditambahkan 5-10 tetes HCl hingga warna larutan berubah menjadi merah muda. Campuran dipanaskan selama 15 menit. Setelah dipanaskan, campuran difiltrasi menggunakan kertas saring *whatman* no.40 dan dicuci dengan larutan NH_4Cl sampai tidak ada endapan yang tersisa. Endapan dalam kertas saring dimasukkan ke dalam cawan krusibel dan dilakukan proses pembakaran pada suhu 950°C selama 1 jam 30 menit untuk menghilangkan

karbon dari kertas saring dan menghasilkan massa endapan akhir. Persentase insoluble residue dihitung dengan persamaan (2. 2).

4) Uji Densitas

Sampel dimasukkan ke dalam tabung silinder sebanyak 8,6627 g. Kemudian, dimasukkan ke dalam ruang sampel *pycnometer*. Ruang sampel ditutup rapat untuk mencegah kebocoran gas. Alat gas *pycnometer* dinyalakan, selanjutnya gas nitrogen akan dimasukkan ke dalam ruang referensi, lalu dilepaskan ke ruang sampel. Diulangi pengukuran 3 kali pada sampel dan diambil nilai rata-rata. Hasil pengukuran menggunakan alat gas *pycnometer* berupa densitas sampel (g/cm^3) (Ardiyanto, 2023).

5) Uji Hilang Pijar (*Loss On Ignition/ LOI*)

Cawan porselen kosong dan sampel ditimbang sebanyak 1 gram. Sampel dimasukkan ke dalam cawan porselen yang telah ditimbang beratnya. Dipijarkan ke dalam *furnace* dengan suhu 1000°C selama 20 menit. Sampel dikelurkan dan didinginkan, kemudian ditimbang. Dihitung presentase hilang pijar dengan persamaan (2.3) (ASTM, 2021).

6) Uji Kadar Karbon Dioksida (Metode *Split LOI*)

Cawan kosong ditimbang dengan timbangan analitik, dicatat sebagai massa cawan kosong. Sampel serbuk cangkang kerang hijau ditimbang sebanyak 1 g, dicatat sebagai massa awal sampel. Cawan yang berisi sampel diketuk perlahan sampai sampel terlihat rata. Cawan berisi sampel dimasukkan ke dalam furnace dengan suhu 550°C selama 2 jam. Cawan berisi sampel dikeluarkan dari furnace dan didinginkan hingga mencapai suhu ruang di dalam desikator. Setelah mencapai suhu ruang, cawan berisi sampel ditimbang menggunakan timbangan analitik. Dihitung massa yang hilang dengan persamaan (2. 4) (ASTM, 2021).

Cawan berisi sampel dimasukkan kembali ke dalam furnace dengan suhu 950°C selama 2 jam. Cawan berisi sampel dikeluarkan dari furnace dan didinginkan hingga mencapai suhu ruang di dalam desikator. Setelah mencapai suhu ruang, cawan berisi sampel ditimbang dengan menggunakan timbangan analitik. Dihitung massa sampel yang hilang dengan

persamaan (2.5). Hasil uji kadar karbon dioksida dihitung dengan persamaan (2.6) (ASTM, 2021).

7) Uji Kehalusan

Uji kehalusan menggunakan alat *Air Jet Sieve* merk Hosokawa Alpine tipe e200 LS. Sampel serbuk cangkang kerang hijau ditimbang sebanyak 5 g dengan menggunakan timbangan analitik. Sampel dimasukkan ke dalam *mesh tray* 45 μm secara merata dan ditutup. Alat *air jet sieve* dijalankan dengan waktu pengujian satu menit. Alat akan menghasilkan aliran udara yang membuat partikel halus melewati *mesh tray*, sementara partikel kasar akan tertahan. Ditimbang massa sampel yang tertahan oleh *mesh tray*. Persentase material tertahan dihitung dengan persamaan (2.7) ppersentase material lolos ayakan dihitung dengan persamaan (2.8).

2. Preparasi dan Karakterisasi Semen OPC dengan Bahan Tambahan Serbuk Cangkang Kerang Hijau

Penelitian ini, cangkang kerang hijau ditambahkan ke dalam semen OPC. Uji kuat tekan dan analisis *strength activity index* dilakukan untuk mengetahui

kualitas dari semen yang dihasilkan berdasarkan SNI 2019:2015 tentang semen Portland.

a. Preparasi Semen OPC dengan Bahan Tambahan Serbuk Cangkang Kerang Hijau

Dibuat variasi penambahan cangkang kerang hijau dalam penelitian ini yaitu S-CK 0%, S-CK 2%, S-CK 4%, S-CK 6%, dan S-CK 8%. Setiap variasi memiliki massa 350 g yang terdiri dari sampel semen OPC dan cangkang kerang hijau, dengan komposisi setiap sampelnya yaitu:

- a. S-CK 0% : 350 g semen OPC
- b. S-CK 2% : 343 g semen OPC dan 7 g cangkang kerang hijau
- c. S-CK 4% : 336 g semen OPC dan 14 g cangkang kerang hijau
- d. S-CK 6% : 329 g semen OPC dan 21 g cangkang kerang hijau
- e. S-CK 8% : 322 g semen OPC dan 28 g cangkang kerang hijau.

Setiap variasi ditimbang sebanyak 250 g untuk analisis kuat tekan dan 100 g sisanya untuk analisis kimia dan fisika.

b. Karakterisasi Semen OPC dengan Bahan Tambahan Serbuk Cangkang Kerang Hijau

1) Uji *X-Ray Fluorescence* (XRF)

Dilakukan uji pada sampel semen yang telah ditambahkan dengan serbuk cangkang kerang hijau. Setiap variasi sampel ditimbang sebanyak 15 g dan dimasukkan ke dalam cawan dan diberi label. Cawan yang berisi sampel dimasukkan ke dalam lemari TTR (*Turn Table Rack*) yang digunakan untuk menyimpan sampel semen yang akan diuji WD-XRF.

Sampel yang telah dimasukkan ke dalam lemari TTR kemudian diinput melalui komputer untuk diberi label nama dan antrean. Selanjutnya, sampel diambil oleh robot dan dimasukkan ke dalam mesin manual press untuk dicetak palet pada ring. Sampel dimasukkan ke instrumen WD-XRF (*Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence*) untuk di analisis.

2) Uji *Insoluble Residue*

Proses pengujian dimulai dengan menimbang sebanyak 1 g sampel dengan neraca analitik. Sampel dimasukkan ke dalam gelas beker dan dilarutkan dengan aquades serta 5 mL

HCl pekat. Selanjutnya, ditambahkan dengan aquades hingga volume mencapai 50 mL. Larutan dipanaskan di atas hotplate dengan suhu 200°C selama 5 menit. Selanjutnya dilakukan filtrasi menggunakan kertas saring whatman no 40. Sampel yang masih tertinggal di dalam gelas beker dicuci dengan aquades panas hingga tidak ada endapan yang tersisa. Kertas saring dan residu dimasukkan ke dalam gelas beker berisi 100 mL NaOH 1% panas dan dipanaskan selama 15 menit. Kertas saring kemudian dihancurkan dan ditambahkan metil red sebanyak 3 tetes sebagai indikator. Kemudian ditambahkan 5-10 tetes HCl hingga warna larutan berubah menjadi merah muda.

Campuran dipanaskan selama 15 menit. Setelah dipanaskan, campuran difiltrasi menggunakan kertas saring whatman no.40 dan dicuci dengan larutan NH_4Cl sampai tidak ada endapan yang tersisa. Endapan dalam kertas saring dimasukkan ke dalam cawan krusibel dan dilakukan proses pembakaran pada suhu 950°C selama 1 jam 30 menit untuk menghilangkan karbon dari kertas saring dan menghasilkan

massa endapan akhir. Persentase insoluble residue dihitung dengan persamaan (2. 2).

3) Uji Hilang Pijar (*Loss On Ignition/LOI*)

Cawan porselen kosong dan sampel ditimbang sebanyak 1 gram. Sampel dimasukkan ke dalam cawan porselen yang telah ditimbang beratnya. Dipijarkan ke dalam *furnace* dengan suhu 1000°C selama 20 menit. Sampel dikelurkan dan didinginkan, kemudian ditimbang. Dihitung presentase hilang pijar dengan persamaan (2.3) (ASTM, 2021).

4) Analisis Uji Kuat Tekan

a) Pembuatan Benda Uji Kuat Tekan

Setiap variasi sampel ditimbang sebanyak 250 g. Sampel semen kemudian ditambahkan air sebanyak 125 mL dan pasir 687,5 g, lalu di *mixer* sampai tercampur rata. Selama selang waktu 15 detik, campuran yang menenmpel pada dinding mangkuk pengaduk dibersihkan kemudian diaduk kembali. Campuran semen dan pasir dicetak dengan cetakan kubus ukuran 5x5x5 cm. Benda uji disimpan di dalam ruang lembab selama 24

jam, dengan permukaan atasnya kontak dengan udara lembab tetapi harus dihindarkan dari tetesan air. Setelah benda uji dikeluarkan dari cetakan, benda uji direndam dalam bak perendaman. Komposisi campuran ditunjukkan pada tabel dibawah ini:

Tabel 3. 1 Komposisi benda uji kuat tekan

Variasi	Cangkang Kerang Hijau (g)	Semen (g)	Pasir (g)	Air (mL)
S-CK0%	0	250	687,5	125
S-CK2%	5	245	687,5	125
S-CK4%	10	240	687,5	125
S-CK6%	15	235	687,5	125
S-CK8%	20	230	687,5	125

b) Perawatan Benda Uji

Curing adalah perlakuan atau perawatan terhadap benda uji selama masa pembekuan. Pengukuran *curing* diperlukan untuk menjaga kondisi kelembaban dan suhu yang diinginkan pada benda uji, karena suhu dan kelembaban di dalam secara langsung berpengaruh terhadap sifat-sifat benda uji (Arman, 2023). Benda uji direndam ke dalam bak perendaman

yang terbuat dari bahan yang tidak berkarat dan berisi air kapur jenuh serta dijaga agar air tetap dalam keadaan jernih. Benda uji tetap berada dalam bak perendaman sampai waktu pengujian (SNI-2049, 2015).

c) Uji Kuat Tekan

Benda uji dikeluarkan dari bak perendaman. Permukaan benda uji diseka menggunakan kain sampai kondisi permukaan benda uji kering dan dihilangkan butiran pasir yang lepas atau lapisan kasar dari permukaan yang akan kontak dengan landasan blok mesin *compression test*. Setiap sampel diuji kuat tekan pada hari ke-7, hari ke-14 dan hari ke-28 (SNI-2049, 2015). Benda uji diletakkan diatas mesin *compression test* dan ditekan sampai benda uji retak/pecah. Dicatat hasil uji kuat tekan.

5) *Strength Activity Index (SAI)*

Analisis nilai *strength activity index* yaitu benda uji yang berumur 7 hari setelah diuji kuat tekan. Dianalisis indeks aktivitas dengan menggunakan persamaan (2.10).

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Preparasi semen dari cangkang kerang hijau dimulai dengan pengumpulan limbah dari penjual *seafood* di Semarang, yang kemudian dibersihkan, dikeringkan, dan digiling menjadi serbuk halus. Cangkang ini dimanfaatkan karena kandungan kalsium karbonatnya yang tinggi, dan dicampur dengan semen OPC (*Ordinary Portland Cement*) untuk mengurangi penggunaan semen konvensional serta meningkatkan sifat mekaniknya. Karakterisasi dilakukan menggunakan XRF untuk mengetahui komposisi kimia dan FTIR untuk menganalisis struktur fungsional material. Uji kadar air, *insoluble residue*, hilang pijar, densitas, karbon dioksida, dan kehalusan turut dilakukan untuk menilai sifat fisiknya, sementara uji kehalusan, densitas, kuat tekan, dan *Strength Activity Index* (SAI) digunakan untuk menilai sifat mekaniknya. Optimasi proporsi campuran dilakukan guna mendapatkan nilai kuat tekan dan *strength activity index* terbaik dan layak digunakan dalam konstruksi.

A. Preparasi dan Karakterisasi Serbuk Cangkang Kerang Hijau

1. Preparasi Sampel Cangkang Kerang Hijau

Preparasi sampel cangkang kerang hijau dimulai dari pengumpulan cangkang kerang hijau yang berasal dari penjual *seafood* di pantai Kota Semarang. Cangkang kerang hijau kemudian dibersihkan dengan menggunakan air sampai bersih untuk menghilangkan pengotornya. Selanjutnya cangkang kerang hijau dijemur di bawah sinar matahari selama satu hari sampai kering untuk mengurangi kadar air pada cangkang kerang hijau. Penjemuran cangkang kerang hijau dapat dilihat pada gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Cangkang kerang hijau

Cangkang kerang hijau yang telah kering, di cacah menggunakan mesin *crusher* menjadi pecahan-

pecahan kecil untuk memudahkan proses penghalusan. Pecahan cangkang kerang hijau dipanaskan di dalam oven pada suhu 100°C selama 3 jam untuk mengetahui kadar air pada cangkang kerang hijau. Setelah dipanaskan, cangkang kerang hijau dihaluskan menggunakan mesin *manual grinding* dari bahan *tungsten carbide* selama satu menit dan diulang untuk memperoleh serbuk cangkang kerang hijau yang lebih halus. Serbuk cangkang kerang hijau kemudian diayak menggunakan *mesh tray* ukuran 75 µm. Pengayakan ini bertujuan untuk memperoleh serbuk cangkang kerang hijau dengan kehalusan yang sama.

2. Karakterisasi Serbuk Cangkang Kerang Hijau

a. Uji *X-Ray Fluorescence* (XRF)

Serbuk cangkang kerang hijau diambil ± 10 g dan ditambahkan 3 pil spectromelt C20 kemudian dihaluskan dengan mesin *manual grinding* selama satu menit. Pil spectromelt C20 merupakan bahan kimia yang mengandung *sodium biphenyl complex*. Pil ini merupakan bahan yang ditambahkan bersama sampel di dalam *vessel* penggiling pada mesin *manual grinding* yang berfungsi sebagai bahan pengikat dan memperkuat sampel ketika

dicetak dalam bentuk tablet sehingga tidak mudah pecah atau rapuh pada saat analisa menggunakan X-Ray (Putri, 2020).

Sampel yang sudah dihaluskan kemudian dimasukkan ke dalam mesin *manual press* dan dicetak pada *ring palet*. Palet ini nantinya akan digunakan untuk analisis XRF. Sampel yang telah dipres kemudian dimasukkan ke dalam rak XRF. Sampel serbuk cangkang kerang hijau kemudian di analisis menggunakan instrumen XRF untuk mengidentifikasi komposisi senyawa kimia dari semen yang dihasilkan serta memberikan informasi tentang kandungan unsur-unsur penting yang berkontribusi terhadap kekuatan semen.

Pengujian XRF dilakukan secara duplo atau pengulangan dua kali untuk sampel cangkang kerang hijau dengan tujuan memastikan bahwa data komposisi kimia yang dihasilkan memiliki tingkat akurasi dan konsistensi yang tinggi. Sehingga meminimalkan kemungkinan kesalahan pengukuran.

Hasil analisis XRF ditampilkan dalam bentuk tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Hasil analisis XRF cangkang kerang hijau

Uji	Si	Al	Fe	Ca	Mg	S	K	Na	P	Cl
satuan komposisi (%)										
Uji ke-1	0,28	0,17	0,09	51,81	0,1	0,01	0,01	0,31	0,1	--
Uji ke-2	0,28	0,17	0,09	51,81	0,1	0,01	0,01	0,31	0,1	--
SNI (max)	20	8	2	65	1	0,8	1,3	0,5	0,01	

Hasil karakterisasi kimia cangkang kerang hijau menggunakan *Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence* (WD XRF) Thermofisher tipe ARL9900 menunjukkan potensi signifikan sebagai *material additive* pada semen. Kandungan kalsium dari cangkang kerang hijau mendekati standar penerimaan bahan dengan komposisi senyawa kimia impuritis (Al, Si, Mg) yang sangat rendah yaitu sebesar 0,55%, mengindikasikan minimnya risiko cacat pada produk semen.

Sulfur dalam cangkang kerang hijau memiliki kandungan yang sangat rendah, yaitu 0,01% sehingga dapat dijadikan sebagai material potensial untuk bahan baku atau substitusi klinker

dalam produksi semen. Dalam industri semen, parameter sulfur yang dibutuhkan yaitu maksimal 0,8%. Pada penelitian Artiningsih (2015) yang melakukan penelitian tentang kandungan sulfur pada batubara diperoleh rata-rata 1,3% yang artinya, batu bara tidak layak untuk digunakan dalam bidang industri pabrik semen karena melebihi parameter yang dibutuhkan. Rendahnya kadar sulfur dapat memberikan keuntungan dalam proses pembakaran di kiln, mencegah terjadinya clogging atau penyumbatan yang dapat mengganggu kelancaran operasional. Oleh karena itu, penggunaan cangkang kerang hijau sebagai substitusi klinker dapat meningkatkan efisiensi produksi semen dengan mengurangi potensi penyumbatan (Prisecaru, 2020).

Pada proses produksi semen, sulfur dengan konsentrasi yang tinggi dapat menyebabkan pembentukan endapan dan kerak dalam tungku pembakaran (*kiln*) yang dapat mengakibatkan terhambatnya proses pembakaran, penurunan efisiensi operasi, hilangnya jam operasional produksi dan meningkatnya biaya pemeliharaan. Dengan kandungan sulfur yang rendah, cangkang

kerang hijau dapat mengurangi risiko teknis tersebut, sekaligus menawarkan alternatif material ramah lingkungan dalam industri semen. Karakteristik ini dapat menjadikan cangkang kerang hijau sebagai bahan substitusi yang baik dan mendukung konsep produksi semen berkelanjutan (Tisdale, 2023).

Analisis kandungan alkali (kalium dan natrium) pada cangkang kerang hijau dengan total alkali sebesar 0,32%, yang mana secara signifikan berada di bawah batas maksimum yang ditetapkan dalam Standar Nasional Indonesia (SNI) 2049-2015 untuk produk semen yaitu sebesar 0,6%. Rendahnya kadar alkali total ini dapat menjadikan material aman digunakan dalam proses pembakaran kiln sebagai bahan baku (*raw material*) atau substitusi klinker di *Finish Mill*. Rendahnya kadar alkali total dapat memberikan dampak penting dalam produksi semen (Rahman, 2021).

Kadar alkali total yang terlalu tinggi, dapat menimbulkan reaksi alkali-silika (ASR). Reaksi alkali-silika terjadi ketika oksida alkali yang berasal dari komposisi semen dalam beton bersatu dengan silika reaktif dan uap air yang berasal dari agregat

(Sahin, 2024). Reaksi ini dapat mengakibatkan kerusakan substansial pada beton dan mortar dengan menghasilkan gel yang mampu mengembang, sehingga dapat menyebabkan kerusakan struktural pada beton (Davraz, 2008: Sahin, 2024).

Cangkang kerang hijau dengan kandungan alkali rendah dapat memberikan inovasi dalam mencegah risiko tersebut. Karakteristik kimianya yang stabil memungkinkan penggunaan sebagai bahan substitusi klinker yang aman serta mendukung konstruksi berkelanjutan dengan meminimalkan potensi kerusakan struktural.

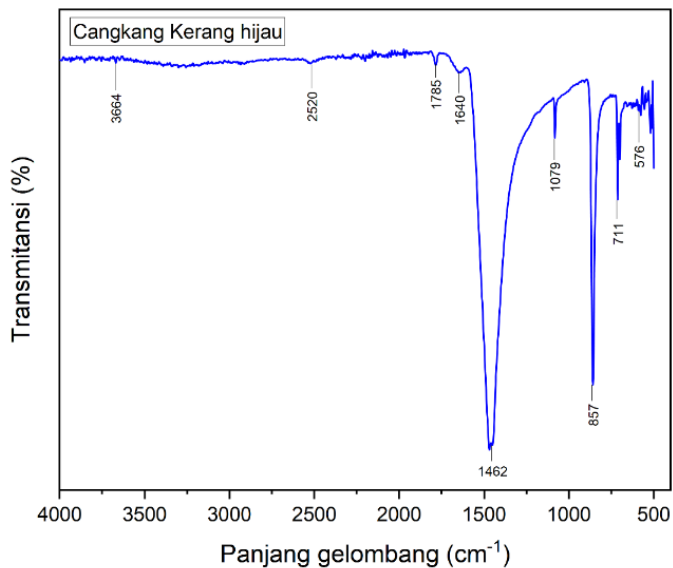
Kadar fosfat dalam cangkang kerang hijau berada di bawah standar yang ditetapkan oleh Standar Nasional Indonesia (SNI) 2049-2015 yaitu sebesar 0,5% sehingga memenuhi standar untuk bahan substitusi semen. Karakteristik ini sangat penting dalam proses hidrasi semen, yang mana kadar fosfat memiliki pengaruh yang signifikan terhadap setting time atau waktu pengerasan material. Fosfat dalam semen berinteraksi dengan kalsium dan air selama proses hidrasi (Chen, 2023).

Konsentrasi fosfat yang terlalu tinggi dapat memperlambat proses pembentukan kristal kalsium silikat hidrat, memperpanjang waktu pengerasan awal semen dan mengganggu proses pembentukan struktur mikroskopis beton (Li, 2022). Rendahnya kadar fosfat dalam cangkang kerang hijau dapat memberikan proses pengerasan semen yang optimal serta mendukung penggunaannya sebagai material substitusi yang efektif. Karakteristik ini memungkinkan tercapainya setting time yang sesuai dengan standar dari SNI 2049:2015, sehingga dapat meningkatkan kualitas beton yang dihasilkan (Chen, 2023).

Berdasarkan hasil analisis menggunakan XRF yang menunjukkan cangkang kerang hijau mengandung kalsium yang tinggi yaitu sebesar 51,81%, maka cangkang kerang hijau berpotensi untuk dijadikan bahan substitusi batu kapur pada sebagian semen OPC. Penggunaan cangkang kerang hijau sebagai bahan tambahan dapat membantu mengurangi penggunaan semen OPC konvensional, sekaligus mengatasi permasalahan penumpukan limbah cangkang kerang hijau yang menjadi masalah lingkungan (Arumningsih, 2022).

b. Uji *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR)

Sampel serbuk cangkang kerang hijau kemudian dianalisis menggunakan instrumen FTIR untuk mengetahui struktur fungsional dari material. Hasil pengujian *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) cangkang kerang hijau ditampilkan dalam bentuk spektrum bilangan gelombang dan transmitansi pada gambar 4.3.



Gambar 4. 2 Spektrum FTIR cangkang kerang hijau

Selanjutnya analisis gugus fungsi dilakukan dengan bilangan gelombang dan intensitas puncak yang ditampilkan pada tabel 4.3.

Tabel 4. 2 Bilangan gelombang FTIR gugus Ca-O dan OH

Sampel	Bilangan gelombang (cm ⁻¹)	Gugus fungsi	Referensi
Cangkang kerang hijau	857	Ca-O	Penelitian
	1462	CO	
Cangkang kerang hijau	871,76	Ca-O	Sari dan Yusuf (2018)
	3641,34	OH	
Cangkang kerang hijau	878	Ca-O	Meski, dkk (2019)
	3457	OH	
Batu kapur	875,99	Ca-O	Elfina, dkk (2019)
	3637,98	OH	

Hasil analisis FTIR pada cangkang kerang hijau menunjukkan puncak serapan yang khas, seperti pada 1462 cm⁻¹ yang mengindikasikan adanya karbonat, serta puncak serapan pada 857 cm⁻¹ yang megindikasikan adanya CaO. Puncak pada 1462 cm⁻¹ dan 1079 cm⁻¹ menunjukkan vibrasi C-O, menegaskan bahwa cangkang kerang hijau

memiliki kandungan kalsium karbonat yang tinggi. Selain itu, puncak pada 2520 cm^{-1} menunjukkan adanya senyawa organik, yang menunjukkan bahwa cangkang kerang hijau tidak hanya terdiri dari kalsium karbonat, tetapi juga mengandung komponen organik yang dapat mempengaruhi sifat reaktifnya (Irfa'i, 2022).

Hasil penelitian ini, diperkuat dengan hasil uji FTIR pada cangkang kerang hijau dan batu kapur yang sudah dilakukan sebelumnya. Pita serapan gugus Ca-O terlihat pada daerah dengan panjang gelombang $871\text{-}878\text{ cm}^{-1}$. Pita serapan gugus OH terlihat pada panjang gelombang $3637\text{-}3664\text{ cm}^{-1}$ yang memungkinkan berasal dari molekul air yang terserap pada permukaan CaO yang bersifat higroskopis yang mudah menyerap air (Aridhani, 2021).

Hasil uji FTIR menunjukkan bahwa cangkang kerang hijau memiliki spektrum yang sangat mirip dengan kalsium karbonat (CaCO_3) yang berasal dari batu kapur pada penelitian yang dilakukan oleh Anisa, dkk (2023), terutama pada puncak serapan yang menunjukkan keberadaan

ikatan Ca-O dan C-O. Hal ini mengindikasikan bahwa cangkang kerang hijau kaya akan CaCO_3 .

Hasil penelitian yang dilakukan oleh Anisa, dkk (2023) menunjukkan spektrum dari sampel CaCO_3 . Penyerapan inframerah dari $1794,26 \text{ cm}^{-1}$ terdapat gugus fungsi C-O, yang mengindikasikan adanya CaCO_3 . Pada bilangan gelombang $1393,38 \text{ cm}^{-1}$ merupakan vibrasi dari gugus *Carboxyl group*. Puncak serapan ini adalah karakteristik umum dari ion karbonat yang terkandung dalam kalasium karbonat dan merupakan dasar getaran molekul CaCO_3 (Rasamy, 2018: (Anisa, 2023)). Puncak serapan di daerah $870,76 \text{ cm}^{-1}$ terdapat gugus fungsi C-H yang mengindikasikan karakteristik dari fasa kalsit. Serapan pada daerah $711,85 \text{ cm}^{-1}$ terdapat gugus fungsi Ca-O yang mengindikasikan puncak dari CaCO_3 (Veronika & Rahmawati, 2022: (Anisa, 2023)). Hasil spektrum FTIR dari cangkang kerang hijau mirip dengan hasil spektrum FTIR dari batu kapur yang kaya akan kalsium karbonat.

c. Uji Kadar Air (*Moisture Content*)

Uji *moisture content* atau kadar air dilakukan pada saat sampel cangkang kerang hijau sebanyak 1,000 g dioven pada suhu 100°C selama 3 jam. Metode yang dilakukan sesuai dengan ASTM C-311 tentang *Sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use in Portland-cement concrete*. Hasil uji kadar air pada cangkang kerang hijau dapat dilihat pada tabel 4.3

Tabel 4. 3 Hasil Uji Kadar Air Cangkang Kerang Hijau

Kadar Air (%)	ASTM C168 (%)
1,73	3

Analisis kadar air (*moisture content*) pada cangkang kerang hijau dapat memberikan keuntungan untuk material konstruksi. Kadar air yang dihasilkan relatif rendah, yaitu 1,73%. Rendahnya kadar air ini berkaitan dengan tingkat *high purity* atau tingkat kemurnian material. Minimnya kandungan air mengindikasikan rendahnya kontaminasi dan adanya senyawa pengotor seperti SiO_2 dan Al_2O_3 . Hal ini dapat meningkatkan efektivitas material sebagai bahan substitusi semen dan menjamin konsistensi kualitas

produk (Silva, 2023). Dari segi operasional, kadar air yang rendah dapat meminimalkan risiko penggumpalan selama penggilingan dan mengurangi kebutuhan energi pengeringan. Hal ini, dapat memberikan dampak yang signifikan pada optimalisasi proses *handling* dan *storage material*, menurunkan biaya operasional, dan meningkatkan efisiensi produk.

d. Uji Zat Tak Larut (*Insoluble Residue/IR*)

Uji *insoluble residue* dilakukan untuk mengetahui kandungan zat pengotor (impuritis) yang ada dalam semen. Metode uji ini mengacu pada SNI 2049: 2015 dengan metode pemisah (*referee*) dengan menggunakan sampel semen OPC untuk mengetahui klasifikasi kadar bahan pengotor dalam semen. Hasil uji *insoluble residue* (IR) dapat dilihat pada tabel 4.4

Tabel 4. 4 Hasil Uji InsolubleResidue Canggang Kerang Hijau

Sampel	IR (%)	SNI (max)
Canggang kerang hijau	0,40983	10

Analisis *insoluble residue* (IR) pada canggang kerang hijau menunjukkan karakteristik material

yang baik untuk dimanfaatkan dalam bidang konstruksi. Nilai *insoluble residue* pada cangkang kerang hijau diperoleh 0,40983%. Nilai *insoluble residue* yang rendah menunjukkan material tak larut sangat rendah. Hal ini, mengindikasikan bahwa *high purity* atau tingkat kemurnian kalsium karbonat (CaCO_3) dalam cangkang kerang hijau yang tinggi. Tingginya tingkat kemurnian material dibuktikan dengan uji kelarutan, dimana 99,592% material dapat larut sempurna ketika direaksikan dengan asam kuat dan basa kuat. Persentase kelarutan yang tinggi ini menunjukkan bahwa cangkang kerang hijau memiliki kualitas yang unggul sebagai material substitusi semen. Rendahnya nilai *insoluble residue* mengindikasikan minimnya material *inert* yang tidak berkontribusi pada reaksi hidrasi, sehingga memiliki potensi reaksi pozolan yang lebih baik. Pozolan merupakan bahan yang apabila dicampur dengan kapur dan air dapat menghasilkan senyawa yang berkontribusi pada kekuatan dan daya tahan beton. Reaksi pozolan merupakan reaksi kimia yang terjadi antara material pozolan dengan kalsium hidroksida yang dihasilkan dari proses hidrasi semen dalam

lingkungan yang mengaandung air. Tingkat residu yang tidak larut yang lebih rendah memungkinkan reaksi pozzolanik yang lebih efektif mengarah pada produk hidrasi yang lebih baik (Kiattikomol, 2000). Hal ini, akan dapat meningkatkan *workability* yang lebih baik dengan target kehalusan tertentu (diperlukan *trial and error* di luar peneitian ini).

e. Uji Densitas

Pengujian densitas cangkang kerang hijau menggunakan *gas pycnometer* menunjukkan hasil yang baik untuk dimanfaatkan dalam material konstruksi. Sampel seberat 8,6627gram yang diuji sebanyak tiga kali dengan masing-masing lima kali *running*. Hasil uji densitas dapat dilihat pada tabel 4.5

Tabel 4. 5 Hasil Uji Densitas

<i>Running</i>	Uji ke-1	Uji ke-2 g/cm ³	Uji ke-3
1	2,6682	2,6667	2,6653
2	2,6701	2,6669	2,6653
3	2,6694	2,6692	2,6651
4	2,6702	2,6677	2,6660
5	2,6702	2,6672	2,6650
$\bar{x}$	2,6696	2,6675	2,6653
$\bar{x}$ total		2,6675	
SNI (max)		5	

Nilai densitas ini menunjukkan tingkat kepadatan material yang baik dan sangat mendekati densitas CaCO_3 murni sebesar $2,730 \text{ g/cm}^3$. Kedekatan nilai ini mengindikasikan tingkat kemurnian material yang tinggi. Karakteristik densitas yang optimal pada material, berpotensi dapat berinteraksi secara maksimal dengan komponen utama semen serta memungkinkan distribusi partikel yang lebih merata dalam campuran (Tangboriboon, 2015). Hal ini didukung oleh kemampuan material dalam mengisi rongga (*filler effect*) yang baik, yang dapat berkontribusi pada pengembangan struktur mikro yang lebih padat.

Nilai densitas cangkang kerang hijau ini identik dengan nilai densitas dari batu kapur, yaitu sebesar $1,5\text{-}2,7 \text{ g/cm}^3$ (Irfa'i, 2022). Karena nilainya yang identik dengan batu kapur, tingkat kekerasan cangkang kerang hijau dalam skala mohs juga sangat identik, sehingga proses grinding awal maupun akhir tidak jauh beda dengan penggilingan pada batu kapur. Dalam situasi pengembangan material konstruksi berkelanjutan, karakteristik densitas cangkang kerang hijau memperkuat

potensinya sebagai material substitusi semen yang efektif. Kombinasi antara kemurnian material yang tinggi dan kemampuan teknis yang baik dapat memberikan peluang untuk dimanfaatkan lebih luas dalam industri konstruksi, sekaligus dapat mendukung upaya pengurangan dampak lingkungan dari produksi semen konvensional (Liu, 2022). Penggunaan cangkang kerang hijau sebagai alternatif material konstruksi dapat membantu mengurangi limbah dan meningkatkan keberlanjutan dalam industri bangunan.

f. Uji Hilang Pijar (*Loss On Ignition/LOI*)

Analisis hilang pijar dimulai dari menimbang sampel cangkang kerang hijau sebanyak 1 g. Sampel dimasukkan ke dalam cawan porselein dan ditanur selama 20 menit pada suhu 950 °C. Tujuan pemanasan pada suhu 950 °C adalah untuk menentukan kadar zat yang hilang akibat pembakaran, seperti air dan karbon dioksida yang dapat mempengaruhi kualitas semen.

Prinsip dari pengujian ini adalah untuk mencegah dan meminimalisir adanya senyawa CO₂ dan H₂O dalam semen yang dapat terurai dalam pemijaran (Surya, 2023). Setelah pembakaran,

sampel cangkang kerang hijau dikeluarkan dari tanur dan dimasukkan ke dalam desikator. Sampel cangkang kerang hijau kemudian ditimbang sebagai massa akhir dan dianalisis %HP (Hilang Pijar) dengan persamaan 2.3.

Hasil uji hilang pijar (LOI) dapat dilihat pada tabel 4.6

Tabel 4. 6 Hasil Uji Hilang Pijar

Sampel	LOI (%)	SNI (max)
Cangkang kerang hijau	47,5	10

Hasil analisis %HP diperoleh sebesar 47,5%. Hasil ini menunjukkan kandungan CaCO_3 dengan tingkat kemurnian yang tinggi dalam cangkang kerang hijau. Namun juga terdapat sebagian kecil senyawa MgCO_3 . Penambahan material dengan kadar LOI yang tinggi dapat menurunkan nilai kuat tekan. Hal ini karena fungsi cangkang kerang hijau untuk menggantikan material batu kapur dalam *filler* pada produk semen. Namun, dapat digunakan sebagai pengganti batu kapur pada *raw material*. Sifat cangkang kerang hijau yang mirip dengan batu kapur sangat memungkinkan untuk menjadi material substitusi batu kapur yang mana dapat

memberikan dampak pada pengurangan penambangan material dan penyelesaian masalah untuk mereduksi limbah cangkang kerang hijau yang meresahkan. Sehingga produksi semen lebih *sustainable* sesuai dengan rencana jangka panjang perusahaan dan BUMN serta mendukung tujuan pembangunan pembangunan berkelanjutan (SDGs) (Hamada, 2023).

Cangkang kerang hijau tidak dikalsinasi, karena dapat menimbulkan emisi gas rumah kaca sama dengan proses produksi semen konvensional. Industri semen adalah industri utama yang menyumbang emisi gas rumah kaca hampir 10% dari pemanasan global dunia dan emisi gas rumah kaca (Zhang et al., 2014; Ali et al., 2015). Pabrik semen merupakan sumber utama sulfur dioksida, nitrogen oksida dan karbon monoksida yang memberikan dampak pada kesehatan dan lingkungan. Nitrogen oksida (NOx) dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan dan dampak lingkungan yang merugikan, seperti ozon dipermukaan tanah, hujan asam, pemanasan global, penurunan kualitas air dan gangguan penglihatan. Populasi yang terkena dampak buruk ini meliputi

anak-anak, penderita penyakit paru-paru seperti asma dan paparan terhadap kondisi ini dapat menyebabkan kerusakan jaringan paru-paru bagi orang-orang yang beraktivitas di luar ruangan (Adeyanju & Okeke, 2019). Sulfur dioksida (SO_2) dalam konsentrasi tinggi dapat memengaruhi pernapasan dan dapat memperparah penyakit pernapasan dan kardiovaskular.

Populasi yang terdampak termasuk penderita asma, bronkitis atau emfisema. SO_2 juga merupakan kontributor utama pengendapan asam atau hujan asam (Khalaf, 2024). Karbon monoksida (CO) dapat menyebabkan efek kesehatan yang berbahaya dengan mengurangi pengiriman oksigen ke organ dan jaringan tubuh, serta efek buruk pada sistem kardiovaskular dan saraf pusat. CO juga berkontribusi pada pembentukan kabut asap (ozon tingkat dasar) yang dapat menyebabkan masalah pernapasan (Ali, 2015). Untuk mengatasi pemanasan global dan ketidakpastian perubahan lingkungan, *International Agency modeling* menyarankan bahwa pelepasan CO_2 harus dikurangi 50% pada tahun 2050 (Gao et al: Ali et al., 2015). Untuk mengurangi emisi CO_2 di Industri

semen dapat dilakukan dengan penggunaan bahan baku/bahan bakar alternatif, mengganti klinker dengan bahan tambahan semen (*Supplementary Cementitious Materials* (SCM)), menerapkan penangkapan, penggunaan, dan penyimpanan karbon (*carbon capture, utilization and storage/CCUS*), serta mengembangkan bahan pengikat alternatif yang rendah karbon (Ali, 2015). Maka dari itu, cangkang kerang dapat memberikan kontribusi untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dalam produksi semen dengan pengolahan tanpa kalsinasi pada suhu tinggi sebagai *supplementary cementitious materials*.

g. Uji Kadar Karbon Dioksida (Metode Split-LOI)

Analisis kadar karbon dioksida pada cangkang kerang hijau menggunakan metode *split Loss on Ignition* (LOI) dengan pengujian duplo. Hasil uji kadar karbon dioksida pada cangkang kerang hijau dapat dilihat pada tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Hasil Uji Kadar Karbon Dioksida

Pengujian	CO2	ASTM C114 (max)
Uji ke-1	12,397	5
Uji ke-2	12,628	

Pada sampel pertama menghasilkan kadar karbon dioksida sebesar 12,397% dan pada sampel kedua menghasilkan kadar karbon dioksida sebesar 12,628%. Kedekatan duplikasi hasil antar sampel ini mengindikasikan stabilitas proses termal dan homogenitas sampel yang baik. Namun, diperlukan studi lebih lanjut dan data lebih banyak terkait homogenitas sampel cangkang kerang hijau di daerah-daerah yang lain di luar penelitian ini. Total LOI sebesar 47,5% dengan kandungan CO₂ sebesar 12,5% menunjukkan bahwa sisa material terdiri dari mineral yang mengandung Ca(OH)₂ dan senyawa karbon lainnya (Irfa'i, 2022).

Kadar CO₂ sebesar 12,5% pada cangkang kerang hijau mengindikasikan dominasi kalsium karbonat (CaCO₃) dalam komposisi material. Tingginya kandungan CO₂ ini berhubungan dengan penurunan kuat tekan. Kadar CO₂ tinggi menunjukkan bahwa sebagian besar material tambahan bersifat inert dan tidak memberikan kontribusi positif terhadap pembentukan produk hidrasi yang mengikat (Helmer-Denzel, 2022).

h. Uji Kehalusan

Berdasarkan hasil penelitian, menunjukkan bahwa serbuk cangkang kerang hijau memiliki potensi sebagai bahan pengganti sebagian semen. Hasil uji kehalusan pada cangkang kerang hijau dapat dilihat pada tabel 4.9.

Tabel 4. 8 Hasil Uji Kehalusan

Sampel		Tertahan (%)	ASTM C618 (max)
Cangkang hijau	kerang	20,29	34

Hasil uji kehalusan material yang tertahan dalam ayakan sebesar 20,29%. Persentase ini memenuhi standar yang ditetapkan oleh ASTM C618 untuk material tertahan pada semen dengan syarat maksimal 34% lolos ayakan 45 μm . Hal ini menunjukkan potensi besar material cangkang kerang hijau sebagai substitusi parsial semen. Proses penggilingan cangkang kerang hijau dilakukan menggunakan alat *manual grinding* berupa *grinding vessel* yang terbuat dari *tungsten carbide* dengan tingkat kekerasan 7,5 skala mohs. Kekerasan cangkang kerang berkisar antara 4-5 skala mohs (Tioris, 2018). Metode penggilingan dilakukan dengan menggiling 30 g sampel

sebanyak 2 kali dengan durasi masing-masing satu menit. Metode ini cukup efektif meskipun dapat ditingkatkan dengan menyesuaikan massa sampel atau waktu penggilingan.

Cangkang kerang hijau memiliki karakteristik yang serupa dengan batu kapur. Kehalusan cangkang kerang hijau berpengaruh terhadap kekuatan beton (Wardani, 2022). Semakin halus serbuk cangkang kerang hijau, semakin baik interaksi antara partikel dan semen, sehingga dapat meningkatkan kekuatan beton (Nika, 2020). Cangkang kerang hijau yang dihancurkan menjadi serbuk halus dapat meningkatkan kinerja material beton, memberikan sifat yang lebih baik dalam hal daya tahan dan ketahanan terhadap retak (Devi, 2025). Untuk mencapai tingkat kehalusan lebih tinggi, proses penggilingan perlu dilaksanakan secara bertahap dengan jumlah sampel yang lebih sedikit dan waktu yang lebih lama. Tingkat kehalusan material yang belum optimal dapat berdampak pada kinerja material sebagai bahan pengganti sebagian semen. Partikel yang lebih halus memiliki luas permukaan spesifik yang lebih tinggi,

yang dapat meningkatkan area kontak antara partikel semen dan air. Hal ini dapat mempercepat reaksi hidrasi karena lebih banyak partikel semen yang terlibat dalam proses kimia (Diez-Garcia, 2022). Partikel yang lebih kasar cenderung memperlambat reaksi hidrasi. Dengan luas permukaan yang lebih rendah, partikel kasar mengurangi jumlah area yang tersedia untuk interaksi dengan air, sehingga memperlambat laju hidrasi dan pengikatan (Qu, 2023).

Kehalusan semen dan bahan pengganti berpengaruh pada kekuatan akhir beton. Semen yang lebih halus dapat menghasilkan kekuatan yang lebih tinggi karena reaksi hidrasi yang lebih cepat dan lengkap, sedangkan semen yang lebih kasar dapat menghasilkan kekuatan yang lebih rendah akibat reaksi yang terhambat (Almuzaini, 2022).

Berdasarkan hasil uji kualitas bahan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa serbuk cangkang kerang hijau memiliki potensi yang baik sebagai bahan tambahan dalam semen OPC dilihat dari hasil karakterisasi dengan *X-Ray Fluorescence* (XRF) yang memenuhi standar penerimaan bahan dan hasil *Fourier*

Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) yang memiliki kemiripan spektrum dengan batu kapur yang mengandung kalsium karbonat. Berdasarkan parameter uji kadar air sebesar 1,73%, uji *insoluble residue* sebesar 0,40983%, uji densitas sebesar 2,6674%, uji kehalusan tertahan sebesar 20,29% telah memenuhi standar bahan tambahan dalam semen. Sedangkan dari parameter uji hilang pijar sebesar 47,5% dan kadar karbon dioksida sebesar 12,5% belum memenuhi standar bahan yang akan ditambahkan dalam semen OPC. Meskipun hilang pijar dan kadar karbon dioksida belum memenuhi standar, parameter komposisi kimia dan keberadaan kalsium karbonat tetap menjadi faktor penentu utama potensi cangkang kerang hijau sebagai bahan tambahan. Parameter uji yang belum memenuhi standar, mungkin dapat diatasi dengan proses pengolahan lebih lanjut seperti kalsinasi atau perlakuan termal untuk mengurangi kandungan organik dan karbon dioksida (Wang & Gao, W., 2022).

B. Preparasi dan Karakterisasi Semen OPC dengan Bahan Tambahan Serbuk Cangkang Kerang Hijau

1. Preparasi Semen OPC dengan Bahan Tambahan Serbuk Cangkang Kerang Hijau

Preparasi sampel semen OPC dan cangkang kerang hijau dimulai dengan menimbang sampel semen OPC dan cangkang kerang hijau sesuai dengan variasi massa. Penelitian ini menggunakan lima variasi komposisi, yaitu S-CK 0% (kontrol tanpa penambahan serbuk cangkang kerang hijau), S-CK 2%, S-CK 4%, S-CK 6%, dan S-CK 8%, dimana persentase tersebut menunjukkan proporsi cangkang kerang hijau sebagai pengganti parsial semen OPC. Setelah penimbangan, sampel semen dan serbuk cangkang kerang hijau dicampurkan secara homogen dengan pengadukan yang merata untuk memastikan distribusi partikel yang sama dalam setiap campuran.

Variasi komposisi ini dirancang untuk mengevaluasi pengaruh dari penambahan cangkang kerang hijau terhadap kuat tekan semen, dimulai dari konsentrasi yang rendah hingga konsentrasi yang lebih tinggi. Campuran serbuk yang telah

homogen, selanjutnya akan digunakan untuk pengujian sifat kimia, fisika, dan uji kuat tekan.

2. Karakterisasi Semen OPC dengan Bahan Tambahan Serbuk Cangkang Kerang Hijau
 - a. *Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence* (WD XRF)

Karakterisasi *X-Ray Fluorescence* (XRF) dilakukan pada setiap variasi sampel. Analisis ini bertujuan untuk menentukan kandungan elemen dan senyawa yang terdapat dalam sampel. Selain itu, pengujian ini dilakukan untuk membandingkan perbedaan komposisi unsur kimia antar variasi sampel yang berbeda (Gracia, 2021).

Hasil analisis WD-XRF ditampilkan pada tabel 4.9.

Tabel 4. 9 Hasil Uji XRF Semen-Cangkang Kerang Hijau

	S-CK 0%	S-CK 2%	S-CK 4%	S-CK 6%	S-CK 8%	SNI (max)
Si	17,51	18,74	18,47	18,37	18,2	25
Al	5,26	4,59	4,46	4,39	4,3	8
Fe	3,13	3,28	3,2	3,17	3,12	6
Ca	60,07	64,22	64,29	64,29	64,33	67
Mg	0,87	1,24	1,2	1,18	1,14	5
S	1,58	1,72	1,69	1,67	1,64	3
K	0,56	0,41	0,4	0,4	0,39	1
Na	0,34	0,14	0,17	0,17	0,18	0,5
P	--	0,14	0,14	0,14	0,14	0,5

Satuan komposisi (%)

Hasil karakterisasi kimia sampel semen dan cangkang kerang hijau menggunakan *Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence* (WD XRF) *Thermofisher* tipe ARL9900 menunjukkan potensi kalsium dari cangkang kerang hijau sebagai material *additive* pada semen.

Kadar silika dalam semen menunjukkan peningkatan dari 17,51% pada S-CK0% menjadi 18,74% pada S-CK2%. Peningkatan ini kemungkinan disebabkan oleh kontribusi silika yang berasal dari cangkang kerang, yang merupakan sumber silika alami. Namun, kadar silika mulai menurun pada S-CK4%, 6%, dan 8%. Penurunan ini terjadi karena cangkang kerang hijau didominasi oleh CaCO_3 dengan kandungan silika yang sangat rendah. Peningkatan persentase cangkang kerang hijau berarti menggantikan lebih banyak semen OPC yang kaya akan silika. Semen OPC yang digantikan memiliki kandungan silika sebesar 17,51% yang jauh lebih tinggi dari cangkang kerang hijau (Sokoltsov, 2018).

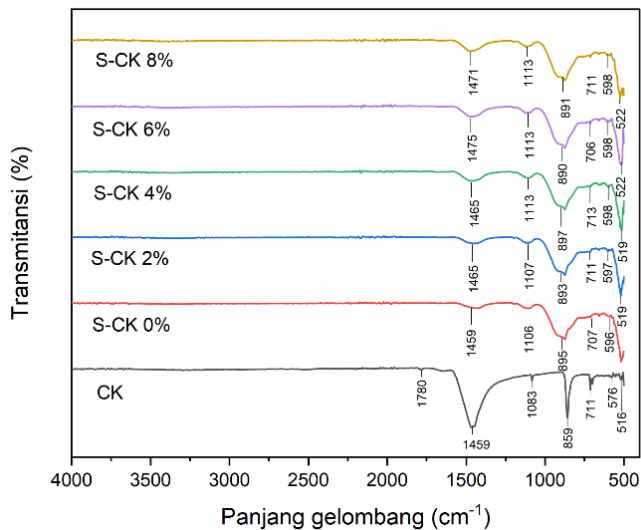
Kadar kalsium mengalami peningkatan yang signifikan, dari 60,07% pada S-CK0% menjadi 64,33% pada S-CK8%. Kalsium merupakan komponen utama dalam semen, dan peningkatan ini menunjukkan bahwa cangkang kerang yang kaya akan kalsium karbonat memberikan kontribusi positif terhadap

komposisi semen. Kadar kalsium yang tinggi dapat meningkatkan reaktivitas semen dan memperbaiki sifat mekaniknya (Darweesh, 2023).

Berdasarkan hasil analisis kadar unsur semen OPC yang ditambahkan dengan cangkang kerang hijau menunjukkan bahwa penambahan cangkang kerang hijau ke dalam semen OPC memberikan dampak terhadap komposisi kimia campuran, khususnya kandungan silika dan kalsium oksida. Peningkatan kadar silika dari 17,51% pada S-CK0% menjadi 18,74% pada S-CK2% menunjukkan bahwa cangkang kerang hijau dapat berkontribusi positif dalam jumlah yang optimal, namun penurunan kadar silika pada variasi S-CK4%, 6%, dan 8% mengindikasikan bahwa penambahan berlebih akan mengurangi kandungan silika total karena cangkang kerang hijau didominasi oleh CaCO_3 dengan kandungan silika yang sangat rendah dibandingkan semen OPC.

b. *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR)

Uji FTIR dilakukan pada sampel semen yang telah ditambahkan cangkang kerang hijau. Uji ini bertujuan untuk menganalisis interaksi kimia yang terjadi antara semen dengan partikel cangkang kerang hijau sebagai bahan tambahan. Melalui spektra FTIR, dapat diidentifikasi perubahan gugus fungsi dan ikatan kimia yang terbentuk. Hasil analisis ini penting untuk mengetahui efektivitas penggunaan cangkang kerang hijau sebagai bahan pengganti parsial dalam campuran semen (Manuilova, 2022). Hasil pengujian FTIR setiap variasi sampel ditampilkan pada gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Spektrum Semen-Cangkang Kerang Hijau

Hasil analisis FTIR pada semen menunjukkan beberapa serapan yang mengidentifikasi mengenai struktur material tertentu. Puncak pada 1459 cm^{-1} terkait dengan vibrasi C-O, mengindikasikan adanya senyawa karbonat seperti kalsium karbonat (CaCO_3) dalam semen. Selain itu, puncak pada 1106 cm^{-1} dan 895 cm^{-1} menunjukkan vibrasi Si-O, yang menegaskan keberadaan silikat, komponen utama dalam semen portland yang berkontribusi pada kekuatan dan daya tahan material. Puncak pada 707 cm^{-1} menunjukkan adanya senyawa anorganik lainnya, seperti kalsium silikat, yang juga penting untuk sifat fisik semen. Puncak pada 596 cm^{-1} dan 519 cm^{-1} lebih lanjut mengkonfirmasi keberadaan silikat dan senyawa kalsium, yang berperan dalam proses hidrasi dan pengikatan semen (Muin, 2023).

Hasil analisis FTIR pada semen yang telah ditambahkan dengan cangkang kerang hijau menunjukkan bahwa penambahan serbuk cangkang kerang hijau menambah kalsium karbonat pada campuran. Hal ini dapat dibuktikan pada spektrum

dengan puncak serapan 1450 cm^{-1} - 1471 cm^{-1} yang menunjukkan peningkatan kalsium karbonat pada semen OPC. Hal ini menunjukkan bahwa cangkang kerang hijau dapat berfungsi sebagai bahan tambahan yang efektif dalam semen, meningkatkan sifat mekanik dan reaktivitasnya tanpa mengorbankan integritas material. Puncak serapan yang mirip ini menegaskan potensi cangkang kerang hijau sebagai alternatif bahan baku yang ramah lingkungan dalam industri konstruksi, sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan manfaat penggunaan limbah organik dalam campuran semen (Hamada, 2023).

c. Uji Zat Tak Larut (*Insoluble Residue/IR*)

Uji *insoluble residue* dilakukan untuk mengetahui kandungan zat pengotor (impuritis) yang ada dalam semen. Metode uji ini mengacu pada SNI 2049: 2015 dengan metode pemisah (*referee*) dengan menggunakan sampel semen OPC untuk mengetahui klasifikasi kadar bahan pengotor dalam semen. Hasil uji *insoluble residue* (IR) dapat dilihat pada tabel 4.10.

Tabel 4. 10 Hasil Uji Insoluble Residue Semen-Cangkang Kerang Hijau

Sampel	IR (%)	SNI (max)
S-CK0%	0,97	3
S-CK2%	0,7694	
S-CK4%	0,6599	
S-CK6%	0,5998	
S-CK8%	0,5898	

Uji *insoluble residue* dilakukan pada sampel semen yang telah ditambahkan dengan cangkang kerang hijau. Berdasarkan **tabel 4.4** dapat dilihat bahwa nilai IR pada sampel semakin menurun seiring dengan banyaknya penambahan cangkang kerang hijau ke dalam semen. Menurut SNI 2049:2015 maksimal persentase IR yaitu sebesar 3%, pada penelitian ini menghasilkan persentase IR yang tidak melewati ketentuan yang ditetapkan oleh SNI.

Sampel S-CK 0% memiliki nilai IR tertinggi sebesar 0,97, yang menunjukkan bahwa tanpa penambahan cangkang kerang hijau, terdapat lebih banyak material tak larut dalam campuran. Hal ini mengindikasikan bahwa komposisi awal memiliki lebih banyak komponen inert yang tidak berkontribusi pada reaksi hidrasi (Putra, 2024).

Sebaliknya, dengan peningkatan persentase penambahan cangkang kerang hijau, nilai IR menurun secara konsisten. Sampel S-CK 2% menunjukkan nilai IR sebesar 0,7694, diikuti oleh S-CK 4% dengan nilai 0,6599, S-CK 6% dengan nilai 0,5998, dan S-CK 8% dengan nilai terendah 0,5898. Penurunan nilai IR ini menunjukkan bahwa penambahan cangkang kerang hijau yang kaya akan kalsium karbonat berkontribusi pada pengurangan jumlah material inert dalam campuran. Hal ini sangat penting karena material inert dapat mengurangi efektivitas reaksi hidrasi, yang pada gilirannya dapat mempengaruhi kekuatan dan daya tahan beton (Shetty, 2023).

Rendahnya nilai IR pada sampel dengan persentase cangkang kerang hijau yang lebih tinggi menunjukkan bahwa material ini tidak hanya memiliki kemurnian yang tinggi, tetapi juga berpotensi untuk meningkatkan reaksi pozolan dalam campuran (Dai, 2022). Reaksi pozolan yang optimal dapat menghasilkan produk hidrasi yang lebih baik, yang berkontribusi pada peningkatan kekuatan dan *workability* beton (Zhao, 2022). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan bahan

pozolan dapat meningkatkan sifat mekanik dan fisik beton, serta mengurangi dampak lingkungan dari penggunaan semen konvensional.

d. Uji Hilang Pijar (*Loss On Ignition*)

Uji hilang pijar dilakukan pada sampel semen OPC yang ditambahkan serbuk cangkang kerang hijau. Hasil uji hilang pijar (LOI) dapat dilihat pada tabel 4.11

Tabel 4. 11 Hasil uji hilang pijar

Sampel	LOI (%)	SNI (max)
S-CK0%	2,697	5
S-CK2%	3,547	
S-CK4%	4,928	
S-CK6%	5,135	
S-CK8%	6,266	

Sampel semen yang telah ditambahkan cangkang kerang hijau dilakukan uji LOI. Hasil dari uji LOI sampel semen yang telah ditambahkan dengan cangkang kerang hijau dapat dilihat pada Tabel 4.7. Menurut SNI 2049-2015 batas maksimal LOI yaitu sebesar <5%. Dari hasil penelitian diperoleh data bahwa nilai LOI semakin meningkat seiring dengan penambahan cangkang kerang hijau.

Nilai LOI meningkat disebabkan karena penambahan cangkag kerang hijau yang mengandung uap air dan gas CO_2 dari penguraian material CaCO_3 sehingga semakin besar penambahan yang dilakukan maka semakin besar kanduangan uap air dan gas CO_2 semakin banyak yang menyebabkan LOI semakin tinggi. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Amin (2019), mengenai meningkatnya nilai LOI seiring dengan penambahan material tambahan berupa *limestone* ke dalam semen. Penambahan cangkag kerang hijau ke dalam semen dengan nilai LOI yang masih berada dalam standar yaitu maksimal sebesar 4%.

Nilai LOI yang besar menunjukkan bahwa semen yang dihasilkan masih banyak mengandung kalsium karbonat (CaCO_3). Kadar LOI dibatasi karena, kandungan CO_2 berlebih pada semen akan menyebabkan kerusakan pada beton dalam jangka waktu yang panjang. CO_2 yang berlebih akan bereaksi dengan kalsium hidroksida membentuk kalsium karbonat. Dalam keadaan basah, kalsium karbonat yang terbentuk akan larut dalam air dan beton akan mudah rusak (Surya, 2023).

e. Uji Kuat Tekan

Uji kuat tekan dilakukan pada umur 3 hari (17 Januari 2025), umur 7 hari (21 Januari 2025), dan umur 28 hari (11 Februari 2025). Hasil uji kuat tekan benda uji umur 3 hari ditampilkan pada tabel 4.13.

Tabel 4. 12 Hasil Uji Kuat Tekan

Sampel	Kuat Tekan (kg/cm ²)		
	Umur 3 hari	Umur 7 hari	Umur 28 hari
S-CK0%	257,9882	364,0387	476,2075
S-CK2%	225,3573	305,915	409,9259
S-CK4%	174,3715	222,298	280,422
S-CK6%	138,6814	195,7855	252,8896
S-CK8%	137	181,5095	216,1798
SNI 2049	130	200	280

Nilai kuat tekan dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya yaitu kekuatan semen, kekuatan agregat, kualitas air, faktor air semen, dan kualitas dari bahan tambahan (Surya, 2023). Menurut SNI 2049:2015 tentang semen Portland, kuat tekan semen pada umur 3 hari minimal adalah 130 kg/cm². Hasil uji kuat tekan pada benda uji umur 3 hari menunjukkan penurunan dari 258 kg/cm² ke 137 kg/cm². Jika merujuk pada SNI 2049:2015, semua sampel memenuhi standar yang telah ditentukan.

Nilai kuat tekan semen umur 7 hari menurut SNI 2049-2015 yaitu 200 kg/cm^2 . Hasil uji kuat tekan pada benda uji umur 3 hari menunjukkan penurunan dari 364 kg/cm^2 ke 181 kg/cm^2 . Jika merujuk pada SNI 2049:2015, sampel dengan konsentrasi cangkang kerang hijau sebanyak 2% dan 4% memenuhi standar kuat tekan yang telah ditentukan. Sedangkan sampel dengan konsentrasi cangkang kerang hijau 6% dan 8% belum dapat memenuhi standar yang telah ditentukan meskipun selisihnya 5-10 kg/cm^2 di bawah standar yang telah ditentukan.

Nilai kuat tekan semen umur 28 hari menurut SNI 2049-2015 yaitu 280 kg/cm^2 . Hasil uji kuat tekan benda uji umur 28 hari menunjukkan penurunan dari 476 kg/cm^2 ke 216 kg/cm^2 . Jika merujuk pada SNI 2049:2015, sampel dengan konsentrasi cangkang kerang hijau sebanyak 2% dan 4% memenuhi standar kuat tekan yang telah ditentukan. Sedangkan sampel dengan konsentrasi cangkang kerang hijau 6% dan 8% mengalami penurunan yang signifikan, sehingga belum dapat memenuhi standar yang telah ditentukan.

Hasil uji kuat tekan semen dengan penambahan cangkang kerang hijau menunjukkan bahwa semakin tinggi penambahan bahan ini semakin menurun nilai kuat tekan yang dihasilkan. Hal ini seharusnya dapat dilakukan uji *flow*, sehingga dapat mengurangi faktor-faktor yang mempengaruhi nilai kuat tekan yang dihasilkan. Uji *flow table* merupakan metode yang digunakan untuk mengevaluasi konsistensi dan *workability* dari campuran semen yang berpengaruh terhadap kualitas beton dalam konstruksi. Campuran semen yang telah dicampur dengan air dimasukkan ke dalam cetakan dan kemudian diangkat untuk mengukur seberapa jauh campuran tersebut menyebar setelah dilakukan getaran pada *flow table*. Diameter penyebaran yang dihasilkan memberikan indikasi tentang kemudahan kerja dari campuran semen, dimana semakin besar diameter semakin baik *workability* yang dimiliki (Shin, 2022). Preparasi sampel cangkang kerang hijau membutuhkan air yang lebih sedikit ketika penambahan dengan variabel yang lebih tinggi, dikarenakan ukuran partikel dari cangkang kerang hijau yang lebih kasar saat preparasi, sehingga membutuhkan rasio air-semen (*w/c ratio*) yang lebih

rendah. Namun, *workability* beton cenderung menurun, karena semakin halus material, kebutuhan air semakin tinggi (Irfa'i, 2022). Untuk mengurangi pemakaian air dalam semen, perlu ditambahkan aditif semen seperti *Cement Grinding Aids* (CGA). Penambahan CGA dalam sampel, perlu diperhitungkan dan dilakukan trial pada parameter kandungan udara (*air content*), karena dapat mengurangi kuat tekan. Maksimal kandungan air yang diperbolehkan adalah 12%, di atas itu kuat tekan akan turun drastis (Sunarsih, 2024).

Ketika melihat hasil penambahan cangkang kerang hijau, penting untuk melakukan *trial* yang lebih komprehensif mengenai penggunaan CGA (*Cement Grinding Aids*) dan substitusi klinker dengan menggunakan cangkang kerang hijau sebelum dilakukan produksi massal. Hal ini bertujuan untuk memastikan bahwa proporsi yang digunakan dapat memberikan hasil yang optimal dalam hal kekuatan dan *workability*. Dalam pengujian ini, diperlukan *water-cement ratio* (w/c) 0,5 dimana massa air setengah dari massa semen. Pemilihan rasio ini mempengaruhi kuat tekan, dimana semakin

rendah kandungan air, semakin tinggi kuat tekan yang dihasilkan (Nguyen, 2020). Keterbatasan pasir silika Ottawa juga menjadi faktor yang perlu diperhatikan, karena tidak dapat dilakukan uji *flow table*, yang merupakan metode penting untuk mengevaluasi *workability* campuran beton (Manuilova, 2022). Dengan demikian, penggunaan cangkang kerang hijau sebagai bahan tambahan dalam semen dapat menjadi alternatif yang berkelanjutan dan efisien dalam industri konstruksi. Keterbatasan stok pasir silika Ottawa di PT Semen Gresik Rembang, mengakibatkan uji *flow table* untuk menentukan *w/c ratio* yang optimal tidak dapat dilakukan. Pada kondisi normal, campuran dengan *w/c ratio* yang sama seharusnya menunjukkan hasil uji *flow table* yang berbeda, karena kehalusan cangkang kerang hijau yang lebih rendah. Hal ini, seharusnya membutuhkan air lebih sedikit untuk mencapai uji *flow* yang sama, sehingga penurunan kuat tekan pada variabel substitusi tidak terlalu signifikan (Ochowiak, 2022).

Berdasarkan hasil uji kuat tekan yang telah dilakukan, penambahan cangkang kerang hijau dalam

semen OPC dengan konsentrasi 2-4% masih memenuhi standar kualitas semen. Sedangkan penambahan cangkang kerang hijau dalam semen OPC dengan konsentrasi lebih dari 6-8% dapat menurunkan nilai kuat tekan yang signifikan sehingga belum memenuhi standar kualitas semen. Penurunan nilai kuat tekan ini disebabkan karena peningkatan nilai *Loss On Ignition* (LOI) yang dapat menimbulkan keretakan dan penurunan kualitas semen sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Amin, dkk (2019). Selain itu, diperlukan uji *flow table* untuk menentukan *water/cement ratio* (*w/c ratio*) karena semakin banyak penambahan cangkang kerang hijau dalam semen, maka air yang ditambahkan lebih sedikit. Hasil uji kuat tekan yang menurun juga dipengaruhi oleh kadar karbon dioksida (CO_2) dalam cangkang kerang hijau. Kadar CO_2 12,5% pada cangkang kerang hijau menunjukkan bahwa sebagian besar material bersifat inert dan tidak memberikan kontribusi positif terhadap pembentukan produk hidrasi yang mengikat. Ketika CaCO_3 menggantikan sebagian semen dalam campuran, terjadi efek delusi yang mengurangi kandungan senyawa aktif seperti C_3S

dan C₂S yang bertanggungjawab untuk membentuk gel C-S-H sebagai sumber kekuatan utama. Semakin tinggi persentase penambahan cangkang kerang hijau, semakin besar proporsi material inert yang menggantikan semen aktif, sehingga kapasitas pembentukan produk hidrasi menurun secara proporsional dan kuat tekan menurun (Helmer-Denzel, 2022)

f. Analisis *Strength Activity Index* (SAI)

Nilai *strength activity index* dihitung menggunakan persamaan 2.9 dari hasil uji kuat tekan sampel umur 7 hari. Hasil uji *strength activity index* ditampilkan pada gambar 4.14.

Tabel 4. 13 Hasil analisis *Strength Activity Index*

Sampel	SAI hari ke-7(%)	ASTM C618
S-CK2%	84,0336	75
S-CK4%	61,0643	
S-CK6%	53,7815	
S-CK8%	49,8599	

Analisis *Strength Activity Index* (SAI) pada sampel umur 7 hari menunjukkan variasi nilai berdasarkan persentase substitusi 2% mencapai

84,0336%; 4% sebesar 61,0643%; 6% sebesar 53,7815% dan 8% sebesar 49,8599%. Berdasarkan standar untuk material pozolan seperti *trass* (pozolan alami) dan *fly ash* (pozolan sintetis) nilai SAI minimal yang ditentukan adalah 75%.

Penelitian ini diarahkan pada pengembangan semen PCC (*Portland Composite Cement*) karena penggunaan batu kapur sebagai substitusi klinker dalam PCC secara langsung berdampak pada ketidaksuburan tanah dan kerusakan lingkungan. Cangkang kerang hijau berpotensi menggantikan batu kapur dalam peran ini. Namun, untuk mengoptimalkan penggunaan cangkang kerang hijau dalam produksi klinker, diperlukan penambahan *cement additive* yang membutuhkan penelitian lebih lanjut terkait performa semen, meliputi parameter kuat tekan, kandungan udara, *setting time*, uji ekspansi, dan parameter kimia lainnya (Kavas, 2021).

Berdasarkan pengujian, penambahan serbuk cangkang kerang hijau optimal ditemukan pada variasi 2%. Hal ini penting karena produksi semen PCC sat ini memerlukan dua kali proses penambangan: pertama untuk pembuatan klinker dan

kedua untuk *filler*. Penggunaan cangkang kerang sebagai substitusi dapat mengurangi ketergantungan pada penambahan batu kapur sekaligus memberikan solusi pengelolaan limbah yang berkelanjutan.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, penambahan cangkang kerang hijau sebagai bahan tambahan dalam semen OPC (*Ordinary Portland Cement*) menunjukkan bahwa meskipun cangkang kerang hijau memiliki potensi sebagai bahan tambahan dalam semen, penggunaannya perlu dipertimbangkan. Hal ini dilihat dari hasil uji *insoluble residue* semua variasi penambahan cangkang kerang hijau memenuhi standar. Hasil uji hilang pijar pada semen yang telah ditambahkan serbuk cangkang kerang hijau memenuhi standar pada variasi S-CK0%, S-CK2%, dan S-CK4% sedangkan, pada variasi S-CK6% dan S-CK8% tidak memenuhi standar. Kemudian dari hasil uji kuat tekan umur 3 hari semua variasi memenuhi standar, pada umur 7 hari variasi S-CK0%, S-CK2%, dan S-CK4% memenuhi standar, paada umur 28 hari variasi S-CK0%, S-CK2%, dan S-CK4% memenuhi standar. Sedangkan hasil analisis *Strength Activity Index* (SAI) hanya variasi S-CK2% dengan indeks aktivitaas sebesar 84,0336% yang memenuhi standar. Variasi optimal penambahan cangkang kerang hijau yaitu pada S-CK2% dengan nilai kuat

tekan pada hari ke-3 sebesar 225,3573%, hari ke-7 sebesar 305,915%, dan hari ke-28 sebesar 409,9259% serta persentase *Strength Activity Index* (SAI) optimal paada hari ke-7 sebesar 84,0336%. Pada persentase ini, semen masih mampu memenuhi standar kuat tekan dan *Strength Activity Index* yang ditetapkan oleh SNI 2049:2015 dan ASTM C618. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan persentase penambahan cangkang kerang hijau dalam semen OPC cenderung menurunkan nilai kuat tekan. Penurunan ini disebabkan oleh tingginya persentase hilang pijar (*Loss On Ignition/LOI*). Persentase hilang pijar meningkat disebabkan karena penambahan cangkang kerang hijau yang mengandung uap air dan gas karbon dioksida (CO_2) dari penguraian mineral kalsium karbonat (CaCO_3) sehingga semakin besar penambahan yang dilakukan maka kandungan air dan CO_2 semakin banyak. Hal ini, dapat menimbulkan keretakan dan penurunan kualitas pada semen.

BAB V

PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan maka dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Karakteristik semen OPC yang telah ditambahkan cangkang kerang hijau menunjukkan bahwa penambahan cangkang kerang hijau memperkaya kandungan kalsium karbonat dalam campuran. Semen dengan tambahan cangkang kerang hijau menunjukkan karakteristik yang konsisten dengan semen OPC standar dilihat dari kesamaan pola puncak serapan pada hasil analisis *Fourier transform infrared spectroscopy* yang menunjukkan peningkatan pada puncak serapan 1450 cm^{-1} - 1471 cm^{-1} yang menunjukkan adanya kalsium karbonat, peningkatan parameter kualitas seperti perbaikan nilai insoluble residue dari 0,97% (kontrol) menjadi 0,5898% (S-CK8%) yang mengindikasikan peningkatan kemurnian material dan pengurangan komponen *inert* dalam campuran. Nilai hilang pijar/LOI pada variasi S-CK0%, S-CK2%, dan S-CK4% masih memenuhi standar. Dari sifat mekanik, penambahan cangkang kerang hijau

menghasilkan tren penurunan kuat tekan yang konsisten seiring dengan peningkatan persentase penambahan. Hasil uji kuat tekan umur 3 hari semua variasi memenuhi standar, pada umur 7 hari variasi S-CK0%, S-CK2%, dan S-CK4% memenuhi standar, pada umur 28 hari variasi S-CK0%, S-CK2%, dan S-CK4% memenuhi standar. Sedangkan hasil analisis *Strength Activity Index* (SAI) hanya variasi S-CK2% dengan indeks aktivitaas sebesar 84,0336% yang memenuhi standar

2. Variasi optimal penambahan cangkang kerang hijau dalam campuran semen adalah sebesar 2% dengan nilai kuat tekan pada umur 3 hari, 7 hari, dan 28 hari berturut-turut sebesar 225,3573 kg/cm², 305,915 kg/cm², dan 409,9259 kg/cm², serta hasil *Strength Activity Index* (SAI) sebesar 84,0336% yang masih berada dalam standar yang ditetapkan oleh SNI 2049:2015.

B. Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, terdapat saran yang diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap perkembangan penelitian, diantaranya sebagai berikut.

1. Dilakukan penambahan variasi di bawah 2% untuk mengetahui hasil dari parameter uji *insoluble residue*, uji hilang pijar, uji kuat tekan, dan analisis *Strength Activity Index* (SAI) telah memenuhi standar.
2. Perlu dikaji mengenai sumber CaCO_3 dari jenis cangkang kerang lain, karena terdapat hasil parameter uji kualitas cangkang kerang hijau yaitu uji hilang pijar/LOI dan uji kadar karbon dioksida yang belum memenuhi standar.
3. Dilakukan uji *flow table* untuk menentukan *water/cement ratio* (w/c ratio).

DAFTAR PUSTAKA

- Abdul, H. d. (2024). Keputusan Bupati Rembang No. 10 Tahun 2024.
- Adeyanju & Okeke, C. (2019). Exposure Effect to Cement Dust Pollution: a Mini Review. *SN Applied Science*, 1(12), 1-17. doi:<https://doi.org/10.1007/S42452-019-1583-0>
- Ali, N., Abbas, Anwer, M., Alwi, S., & Anjum, M. (2015). The Greenhouse Gas Emissions Produced by Cement Production and its Impact on Environment: A Review of Global Cement Processing. *International Journal Of Research*, 2(2), 488-500.
- Al-Masri & Al-Harbi, A. (2019). X-Ray Fluorescence Spectroscopy for the Analysis of Environmental Samples: A Review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(4), 1-12. doi:<https://doi.org/10.1007/s10661-019-7370-5>
- Almuzaini, A. S., & Alawad, O. M. (2022). Effect of Local Coarse Aggregates on the Compressive Strength of High Strength Concrete. *Materials Science Forum*, 1053, 267-274. doi:<https://doi.org/10.4028/p-x25xg7>
- Amin, M. S. (2019). Pengaruh Penambahan Batu Kapur (Limestone) Terhadap Karakteristik Semen. *Construction and Material Journal*, 1(2), 141-151. doi:<http://jurnal.pnj.ac.id/index.php/cmj>
- Amiri A. & Overli, J. A. (2015). Salt Scaling Resistance of Concrete Containing Cement with Supplementary Cementitious Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(10).

- Anggara, F., Sutresno, V., Sujoto, H., Christ, W., Tangkas, W. H., Astuti, W. T. R., Sumardi, S., Satria, I., Putra, R., Putra, A. D., Tri, H., & Petrus, B. (2023). Pengaruh Penambahan Fly Ash PLTU Cirebon dan Temperatur Pengeringan Terhadap Kuat Tekan Material Konstruksi Beton High Volume Fly Ash (HFVA). *Jurnal Rekayasa Proses*, 17(2), 172-178. doi:<https://doi.org/10.22146/jrekpros.77825>
- Anisa, Mubarakah, L., Setyaningrum, D. & Novianto, H. (2023). Identifikasi Sifat Termal dan Ikatan Batu Kapur Alam dengan Menggunakan DSC-TGA dan FTIR. *Jurnal Inovasi Ikatan Kimia*, 8(3), 173-177.
- Apriyanti, E. C. (2024). Pemanfaatan Material Komposit Fly Ash Sebagai Bahan Substitusi pada Pembuatan Beton Ditinjau dari Uji Tekan dan Uji Porositas. *Jurnal Teknik Sipil Unpad*, 1(2), 146-153. doi:<https://doi.org/10.69796/axb1yh47>
- Aprizal, E. P. (2015). Pengaruh Partial Replacement Semen Portland Dengan Bentonite Terhadap Kuat Tekan Beton Berdasarkan Variasi Umur. *Inersia*, 11(1), 67-8.
- Ardiyanto, A. I. (2023). Pengaruh Presentase Binder Tanah Liat Terhadap Densitas Pelet Katalis Zeolit Alam. *Journal Teknik Mesin*, 11(1), 40-43. doi:<https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm>
- Aridhani, A. K. (2021). Pemanfaatan Cangkang Kerang Hijau Sebagai Adsorben Untuk Menurunkan Kadar Besi (Fe²⁺) dalam Air. 6(1), 13-16.

- Arman, A. M. (2023). Pengaruh Penambahan Abu Arang Tempurung Kelapa Terhadap Kuat Tekan Paving Block. *Jurnal Teknologi dan Vokasi*, 1(2), 23-30.
- Artiningsih, A. W. (2015). Studi Penentuan Kandungan Sulfur (Sulphur Analysis) dalam Batubara pada PT Geoservices Samarinda Kalimantan Timur. *Jurnal Geomine*, 2, 68-71.
- Arumningsih, D. P. (2022). Sustainable Green Concrete Using Shellfish Waste Powder, and Rice Husk Ash. *Jurnal Teknik Sipil Dan Arsitektur*, 27(2), 18-27. doi:<https://doi.org/10.36728/jtsa.v27i2.1857>
- ASTM, C.-1. (2021). Standard Test Method for Sampling and Testing Fly Ash or Natural pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete. 1-11.
- C114, A. (n.d.). Standard Test Method for Chemical Analysis of Hydraulic Cement. 1-32.
- Cataldo, A. D. (2017). Moisture Content Monitoring Of Construction Materials: From In-Line Production Through On-Site Applications. *Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 1-5. doi:<https://doi.org/10.1109/I2MTC.2017.7969762>
- Chattopadhyay, B. (2020). 20-Genetically-enriched Microbe-facilitated Self-healing Nano-concrete. *Smart Nanoconcretes and Cement-based Material*, 461-483. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817854-6.00020-9>
- Chen, B. P. (2023). Improving the Mechanical Properties of Mussel Shell Aggregate Concrete By Aggregate

Modification and Mixture Design. *Case Studies in Construction Materials*, 18.

Dai, S. (2022). Properties and Activation Modification of Eco-friendly Cementitious Materials Incorporating High-Volume Hydrated Cement Powder from Construction Waste. *Construction and Building Materials*, 1-17. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125788>

Dampang & Purwanti, E. (2020). Karakterisasi Limbah Cangkang Kerang Melalui Kalsinasi. *Jurnal Teknik Kimia*, 7(2), 135-141.

Darweesh, H. (2023). Utilization of Oyster Shell Powder for Hydration and Mechanical Properties Improvement of Portland Cement Pastes. doi:<https://doi.org/10.30880/jsmpm.2023.03.01.003>

De Sensale, G. R. (2018). A Study on Blended Portland Cements Containing Residual Rice Husk Ash and Limestone Filler. *Construction and Building Material*, 166, 873-888.

Deng, J. P. (2014). Research on the Hydration Mechanism of Portland Cement with Magnesium Slag. *Applied Mechanics and Materials*. doi:<https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.576.57>

Deny, W. (2013). Kajian Kuat Tekan Beton Dengan Kalsium Karbonat Sebagai Substitusi Sebagian Portland Cement.

Devi, D., Fauzi, M., & Salsabiela, T. (2025). Sifat Mekanik Beton dengan Pemanfaatan Serbuk Cangkang Kerang

- dan Serbuk Kaca. *Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 8(2), 507-516.
- Diez-Garcia, Gaitero, J., Aguirre, F. B., Erkizia, E., San-Jose, J. T., Aymonier, C., & Dolado, J. S. (2022). Synthesis and Addition of Al-Substituted Tobermorite Particles to Cement Pastes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(12). doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004486](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004486)
- El Biriane & Barbachi, M. (2020). Properties of Sustainable Concrete with Mussel Shell Waste Powder. *The Open Civil Engineering Journal*, 14(1), 350-354. doi:<https://doi.org/10.2174/1874149502014010350>
- Elfina, S., Subriadi, F., Azharman, Z., Sisca, V., & Jamarun, N. (2020). Karakterisasi Kalsium Oksida Untuk Pembuatan Aplikasi Biodisel dengan Metode Kalsinasi. *Seminar Nasional Teknologi Industri Hijau*, 4(2), 205-211.
- Elfina, Subriadi, Azhaman, Z., Sisca, V., & Jamarun, N. (2020). Karakterisasi Kalsium Oksida Untuk Pembuatan Aplikasi Biodiesel dengan Metode Kalsinasi. *Seminar Nasional Teknologi Hijau*, 2(1), 205-211.
- Fadiah, A., dan Murdiyoto, A. (2022). Kuaat Tekan Mortar Dengan Cangkang Kerang Sebagai Substitusi Agregat Halus. *Construction and Material Journal*, 4(2), 109-116.
- Falikman, V. (2023). Floured CaCO₃ as Supplementary Cementitious Material in Defined Performance

- Concrete. *Lecture Notes in Civil Engineering*, (pp. 162-171). doi:https://doi.org/10.1007/978-3-031-32519-9_14
- Fanny, W. A., Subagjo, S., & Prakoso, T. (2018). Pengembangan Katalis Kalsium Oksida Untuk Sintesis Biodisel. *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*.
- Febrian, H. (2020). Pemanfaatan Abu Tulang Sapi Sebagai Bahan Tambah Semen Pada Mortar. *Semantic Scholar*.
From
<https://www.semanticscholar.org/paper/Pemanfaatan-Abu-Tulang-Sapi-Sebagai-Bahan-Tambah-Febrian/ca5b9f00cd6388bdaf3b743abf6249729e2319da>
- Fediuk, Amran, Mosaberpanah, M. A., Danish, A., El-Zeadani, M., Klyuev, S., & Vatin, N. (2020). A Critical Review on the Properties and Applications of Sulfur-Based Concrete. *Journal Materials*, 13(21). doi:<https://doi.org/10.3390/MA13214712>
- Firdaus & Haikal, M. (2019). Pemanfaatan Limbah Kulit Kerang Darah Sebagai Substitusi Semen Pada Mortar. *Jurnal Tekno*, 16(1), 362-374.
- Fleming, A., Wise, R. M., Hansen, H., & Sams, L. (2017). The Sustainable Development Goals: A Case Study. *Marine Policy*, 86, 84-103. doi:<https://doi.org/10.1016/J.MARPOL.2017.09.019>
- Gapur, A. (2014). Pemanfaatan Cangkang Kerang Darahdan Remis Sebagai Katalis Heterogen Untuk Produksi Biodisel.

- Gracia, A., Martinez, J., & Lopez, M. (2021). Application of X-Ray Fluorescence Spectroscopy for the Characterization of Geological Samples. *Journal of Geochemical Exploration*, 220, 106-115. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106115>
- Hairunisa. (2019). Sintesis Kalsium Oksida dari Cangkang kerang Ale-ale (Meretrix Meretrix) Pada Suhu Kalsinasi 700 C. *Jurnal Kimia Khatulistiwa*, 8(1), 36-40.
- Halim, A., Rahman, F., & Sari, D. (2022). Assessment of Fly Ash Properties for Sustainable Concrete Production. *Journal of Sustainable Construction Materials*, 11(1), 67-75.
- Hamada, H. M., Abed, F., Tayeh, B. A., Al Jawahery, M. S., Majdi, A., & Yousif, S. (2023). Effect of Recycled Seashells on Concrete Properties: A Comprehensive Review of the Recent Studies. *Construction and Building Materials*, 376, 1-16. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131036>
- Haryono, H., Natanael, C. L., Rukiah, R., & Yulianti, Y. B. (2018). Kalsium Oksida Mikropartikel dari Cangkang Telur Sebagai Katalis pada Sintesis Biodisel dari Minyak Goreng Bekas. *Jurnal Material dan Energi Indonesia*.
- Helmer-Denzel, A., & Bouscatie, E. (2022). Evolution of Structural and Mechanical Properties of Concrete Exposed to High Concentration CO₂. *Construction and Building Materials*, 343, 128077-128077.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.12807>

7

- Huwaina, A., Prabawati, A., & Dewi, A. (2024). Konflik Pembangunan Pabrik Semen di Pegunungan Kendeng, Jawa Tengah (Analisis Konflik Tenurial Menggunakan Teori Konflik Karl Marx). *Environment Conflict*, 1(1), 1-16.
- Imani, R. N. & Susiwa, M. (2019). Pengaruh Penambahan Abu Cangkang Kerang Darah (Anadara Granosa) Sebagai agregat Halus Terhadap Kuat Tekan Beton. *Maj. Ilm UPI YPTK*, 26(1), 14-23.
- Irfai, M. A., Prihanto, A., Muryanto, S., Jamari, J., Ismail, R., & Bayuseno, A. P. (2022). Precipitated Calcium Carbonate Derived from Green Mussel Shells Extracted from Magnesium Chloride Containing Solution. *IOP Conference Series*, 1098(1). doi:<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1098/1/012021>
- Ismail, R., Fitriyana, D. F., Fitriyana, D. F., Santosa, Y. I., Nugroho, S., Hakim, A. J., Al Mulqi, M. S., Jamari, J., & Bayuseno, A. P. (2021). The Potential Use of Green Mussel (*Perna Viridis*) Shells for Synthetic Calcium Carbonate Polymorphs in Biomaterials. *Journal of Crystal Growth*. doi:<https://doi.org/10.1016/J.JCRYSGRO.2021.126282>
- John, J. P. (2020). Parametric Studies of Cement Production Processes. *Journal of Energy*, 1--17. doi:<https://doi.org/10.1155/2020/4289043>

- Karimah, R., Rusdianto, Y., & Susanti, D. P. (n.d.). Pemanfaatan Serbuk Kulit Kerang Sebagai Pengganti Agregat Halus Terhadap Kuat Tekan Beton. *Jurnal Teknik Sipil*.
- Kavas, T., Kurtuluş, R., & Kurtuluş, C. (2021). Partial Clinker Replacement by Calcined Clays for Green Cement Production. *Emerging Materials Research*, 10(2), 145-150. doi:<https://doi.org/10.1680/JEMMR.20.00278>
- Kesic, Z., Lukic, I., Zdujic, M., Mojovic, L., & Skala, D. (2016). Calcium Oxide Based Catalyst for Biodiesel Production: A Review. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 22(4), 391-408.
- Khalaf, E. M., Mohammadi, M. J., Sulistiyani, S., Ramírez-Coronel, A. A., kiani, F., Jalil, A. T., Almulla, A. F., Asban, P., Farhadi, M., & Derikondi, M. (2024). Effects of Sulfur Dioxide Inhalation on Human Health: a Review. *Reviews on Environmental Health*, 39(2), 331-337. doi:<https://doi.org/10.1515/reveh-2022-0237>
- Khusnia, K. (2024). Resolusi Konflik Pembangunan Pabrik Semen di Kecamatan Gunem Kabupaten Rembang. *Jurnal Ilmu Pemerintahan*.
- Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., & Tangpagasit, J. (2000). Effect of Insoluble Residue on Properties of Portland Cement. *Cement and Concrete Research*, 30, 1209-1214.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. (2016). Design and Control of Concrete Mixtures, 15th Edition. *Portland Cement Association*.

- Kumar & Singh, R. (2021).). Ordinary Portland Cement: A Review on Its Properties and Applications. *Materials Today; Proceedings*, 45, pp. 123-128.
- Kumar, A., Singh, R., & Sharma, P. (2020). Advances in X-ray Fluorescence Spectroscopy: A Review. *Analytical Methods*, 12(5), 678-693.
doi:<https://doi.org/10.1039/C9AY01845A>
- Kurniawan, A. (2021). Analisis Kadar Karbon Dioksida pada Cangkang Kerang Menggunakan Metode Loss on Ignition. *Jurnal Kimia dan Pendidikan Kimia*, 5(2), 45-52.
- Kurniawan, A., Nizar, M., Rijal, M., Bagas, R., Setyarsih, W. (2014). Studi Pengaruh Variasi Suhu Kalsinasi Terhadap Kekerasan Bentuk Morfologi dan Analisis Porositas Nanokomposit CaO/SiO₂ Untuk Aplikasi Bahan Biomaterial. *Jurnal Pendidikan Fisika dan Aplikasinya*, 4(2), 25.
- Lee, W., Rival, X., & Yang, H. (2022). Smoothness Analysis for Probabilistic Programs with Application to Optimised Variational Inference. 7, 335-366.
doi:<https://doi.org/10.1145/3571205>
- Lesbani, A., Susi, Y., Verawaty, M., & Mohadi, R. (2015). Calcium Oxide Decomposed from Chicken's and Goat's Bones As Catalyst for Converting Discarded Cooking Oil To Be Biodiesel. *International Journal of Science and Technology*, 4(1), 7-13.
- Li, Z., Tian, B., Li, L., Ge, L., Quan, L., & Li, D. (2022). Effect of Phosphates on Early-age Hydration Process and Products of Calcium Aluminate Cement at -10 °C.

- Construction and Building Materials*, 346.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128405>
- Liao, X., Huang, H., He, F., & Yang, C. (2021). Microstructural Characterization of Cement in the Presence of Alkanolamines. *Materials Today Communications*, 27, 1-9.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102386>
- Liao, Y., Wang, X., Wang, L., Yin, Z. S., Da, B., & Chen, D. (2022). Effect of Waste Oyster Shell Powder Content on Properties of Cement-Metakaolin Mortar. *Studies in Construction Materials*, 16. doi:
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01088>
- Liemawan, A. E., Tavo, T., & Raka, I. G. P. (2015). Pemanfaatan Limbah Canagkang Kerang Hijau (Perna Viridis L.) Sebagai Bahan Campuran Kadar Optimum Agregat Halus Pada Beton Mix Design Dengan Metode Substitusi. *Jurnal Teknik ITS*, 4(1), 128-133.
- Litofsky, J. H. (2022). Improvement of Exotic Material Verification Using XRF. *Materials Evaluation*, 80(3), 24-29. doi:<https://doi.org/10.32548/2022.m3-04268>
- Liu & Teng, Y. (2018). XRF (X-Ray Fluorescence) Spectral Analysis System Method.
- Liu, S. L., Wang, Y., Liu, B., Zou, Z., Teng, Y., Ji, Y. N., Zhou, Y., Zhang, L. V., & Zhang, Y. (2022). Sustainable Utilization of Waste Oyster Shell Powders with Different Fineness Levels in a Ternary Supplementary Cementitious Material System. *Sustainability*, 14(10). doi:<https://doi.org/10.3390/su14105981>

- Lukman, M., Yudyanto., & Hartatiek. (2012). Sintesis Biomaterial Komposit CaO.SiO₂ Berbasis Material Alam (Batuan Kapur dan Pasir Kuarsa) dengan Variasi Suhu Pemanasan dan Pengaruhnya Terhadap Porositas, Kekerasan, dan Mikrostruktur. *Journal Sains*, 2(1), 1-7.
- Manuilova, K. V. (2022). Utilization of seashells to improve mechanical properties of cement. 2394. AIP Conference Proceedings. doi:<https://doi.org/10.1063/5.0121740>
- Meddah, M. S., Abedi, M., & Hago, A. W. (2023). Mortar and concrete with lime-rich calcined clay pozzolana: A sustainable approach to enhancing performances and reducing carbon footprint. *Construction and Building Materials*, 393. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132098>
- Muin, N., Subaer, dan Nurhayati. (2023). Pengaruh Penambahan Semen Portland Terhadap Sifat Mekanik Geopolimer Berbasis Fly Ash. *Jurnal Fisika dan Terapannya*, 10(2), 98-111.
- Musfiroh, N. (2021). *Pengaruh Penambahan Batu Kapur Terhadap Hilang Pijar Semen PCC Pada PT. Semen Bosowa Maros*. Tugas Akhir , Politeknik ATI Makassar , MAKassar.
- Mustakim. (2017). Pendidikan Lingkungan Hidup dan Implementasinya dalam Pendidikan Islam (Analisis Surat Al-A'raf Ayat 56-58 tafsir Al Misbah Karya M. Quraish Shihab). *Journal of Islamic Education*, 2(1), 1-27.

- Nehdi, M. L. & Yassine, A. (2020). Mitigating Portland Cement CO₂ Emissions Using Alkali-Activated Materials: System Dynamics Model. *Materials*, 13(20), 46-85.
doi:<https://doi.org/10.3390/MA13204685>
- Nguyen, T.A., Thach, N.T., & Phan, T.K. (2020). The Influence of Water Content and Compaction on the Unconfined Compression Strength of Cement Treated Clay. *International Conference Green Technology*, 175-179. doi:doi: 10.1109/GTSD50082.2020.9303168
- Nika, J. W., Anisah, A., & Saleh, R. (2020). Pemanfaatan Limbah Cangkang Kerang Hijau Dengan Variasi Suhu Pembakaran Sebagai Bahan Pengganti Sebagian Semen Pada Pembuatan Beton.
- Nisa, F., Astuti, K. D., Maryani, A., Taqila, A. S., Noviyanti, N., & Affanti, C. C. P. (2021). Pemanfaatan Limbah Cangkang Kerang Hijau Sebagai Kerupuk Kemplang dalam Upaya Peningkatan Kesejahteraan Masyarakat Desa Domas Kecamatan Pontang Provinsi Banten. *Abdimas Indonesia*, 1(2), 103-108.
- Nuemann, F. (2023). *Durability Characterization of Concrete Using Seashell Co-products as Aggregate Replacement*. Rilem Bookseries.
doi:https://doi.org/10.1007/978-3-031-33211-1_52
- Nur, A. J. (2017). Pemanfaatan Abu Sabut Kelapa Sawit dan Pengaruhnya Terhadap Karakteristik Batako. *Inersia*, 8.
- Nurhamzah, R. (2024). Karakterisasi Kitosan dan Nanokitosan dari Cangkang Kerang. *Jurnal UIM*, 12(2), 78-85.

- Ochowiak, M., Krupińska, A., Włodarczak, S., Matuszak, M., Czernek, K., & Witczak, S. (2022). Comparative Analysis of the Hydraulics of Columns Filled with Natural (Eco) or Waste Materials. *Desalination And Water Treatment*, 253, 166-176.
doi:<https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28296>
- Pradana, T., Olivia, M., Sitompul, I. (2017). Kuat Tekan dan Porositas Beton Semen OPC, PCC, dan OPC Pofa Dilingkungan Gambut. *Jom FTEKNIK*, 3(2), 1-10.
- Prisecaru, T., Adam, A., Mihaescu, L., Pisa, I., Pop, E., Prisecaru, M., Berbece, V., & Dragne, M. (2020). Combustion Experiments On A Solid Fuel With Low Sulphur Content. *E3S Web of Conference*, 180, p. 6. Romania.
doi:<https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202018001015>
- Purnamasari, D., Nafisyah, A., & Sari, L. (2024). Inovasi Pemanfaatan Limbah Cangkang Kerang Darah (Andara Granosa) sebagai Media Pertumbuhan *Nitzschia* sp. *Journal of Marine and Coastal Science*, 13(3), 137-143.
- Putra, M. M., Bayuseno, A. P., dan Ismail, R. (2024). Sintesis dan Karakterisasi Precipitated Calcium Carbonate (PCC) dari Limbah Ekstraksi Aspal Buton Menggunakan Pelarut Hydrochloric Acid (HCl) dengan Metode Karbonasi Menggunakan Amonium Bikarbonat (NH_4HCO_3). *Jurnal Teknik Mesin*, 10(2), 35-40.
- Putri, S. D. (2020). Studi Pengaruh Lama Waktu Penggilingan dan Faktor Pengaruh Lain Terhadap Tingkat

Kehalusan Semen OPC dan Lime Stone Sugar Pada
Preparasi Sampel Untuk Analisis X-Ray.

- Qu, L. H., Meng, X., Mo, L., Chang, W. C., & Xiao, Y. (2023). Effect of Hydration Products on the Interfacial Bonding Properties between Asphalt Binder and Steel Slag Coarse Aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(2). doi: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0004596](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0004596)
- Rahman, M. M., Law, D. W., Patnaikuni, I., Gunasekara, C., & Yamchelou, M. T. (2021). Low-Grade Clay as an Alkali-Activated Material. *Applied Sciences*, 11(4), 1648. doi: <https://doi.org/10.3390/APP11041648>
- Rahmawati, D., & Setiawan, A. (2020). Studi Dekomposisi Kalsium Karbonat pada Suhu Tinggi. *Jurnal Sains dan Teknologi*, 8(1), 15-22.
- Rani, S., & Isnaini, N. (2020). Pengaruh Penambahan CaCO_3 Sebagai Filler pada Semen OPC (Ordinary Portland Cement) Terhadap Performa Setting Time dan Kuat Tekan (Study Kasus PT. Semen Indonesia). *Jurnal Fisika dan Terapannya*, 7(2), 97-106.
- Rausis, K., Cwik, A., Casanova, I., & Zarebska, K. (2021). Carbonation of High-Ca Fly Ashes under Flue Gas Conditions: Implications for Their Valorization in the Construction Industry. *Journal Crystals*, 11(11). doi:<https://doi.org/10.3390/cryst11111314>
- Ribeiro, U., & santos, D. F. (2020). Physical-Mechanical Potential Properties of Wastes from Glass Lapping to Produce Mortar as Partial Replacement of the Conventional Aggregate. *Revista IBRACON de*

Estruturas e Materials, 13(1), 146-53.
doi:<https://doi.org/10.1590/S1983-41952020000100010>

- Rmdan Amer, A. A., Al Bakri Abdullah, M. M., Yun Ming, L., Mohd Tahir, M. F., Wazien Ahmad Zailani,. (2020). Low Density, High Compressive Strength: Experimental Investigation with Various Particle Sizes of Sand for Different Mix Designs of Cement Mortar Manufacturing. 864(1). doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/864/1/012010>
- Sahin, D. (2024). Evaluation of Cherts in Gumushane Province in Terms of Alkali Silica Reaction. *Journal Buildings*, 14(873), 1-32.
- Santoso, H. A. (2023). Karakterisasi B-Tricalcium Phosphate yang Disintesis dari Sumber Kalsium Cangkang Kerang Hijau (*Perna Viridis* Linn) (Variasi Molaritas).
- Sarah, D., & Purwanti, E. (2020). Karakterisasi Limbah Cangkang Kerang Melalui Kalsinasi. *Chemical: Jurnal Teknik Kimia*, 7(2), 135-141.
- Sari & Saputra, M. (2021). *Analisis Bentuk Mikroplastik pada Kerang Hijau (Perna Viridis) di Alue Naga Kecamatan Syah Kuala Kota Banda Aceh*. Aceh.
- Sari, M., & Yusuf, Y. (2018). Synthesis and characterization of hydroxyapatite based on green mussel shells (*perna viridis*) with the variation of stirring time using the precipitation method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 432. IOP Publishing.

- Sari, R., Partiwi, N., & Junaidi, A. (2022). The Effect of Green Mussel Shells on The Mechanical Properties of Cement. *International Journal of Civil engineering*, 14(3), 45-58.
- Seis, M., Isbilir Kula, B., Ozdal, V., Marasli, M., Subasi, S., & Dehghanpour, H. R. (2022). Investigation of Different Superplasticizers Effect on Workability and Strength Parameters in Ultra High Performance Concretes. *Gazi Universitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(3), 519-531. doi: <https://doi.org/10.29109/gujsc.1085848>
- Serfas, H. (2022). Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) Technique for Food Analysis and Authentication. 103-142. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-19-5422-1_6
- Setiati, N., & Halim, H. A. (2018). Pemanfaatan Semen Portland Slag Untuk Meningkatkan Sifat Mekanik dan Durabilitas Beton. 13(2), 77-89. doi: <http://jurnalpermukiman.pu.go.id/index.php/JP/article/download/236/pdf>
- Sheheryar, M., Rehan, R., & Nehdi, M. L. (2021). Estimating CO2 Emission Savings from Ultrahigh Performance Concrete: A System Dynamics Approach. *Materials*, 14(4), 995. doi: <https://doi.org/10.3390/MA14040995>
- Shetty, P., Rao, A. U., Pai, B. H. V., & Kamath, M. V. (2023). Performance of High-Strength Concrete with the Effects of Seashell Powder as Binder Replacement and Waste Glass Powder as Fine Aggregate. *Journal of Composites Science*, 7(3). doi: <https://doi.org/10.3390/jcs7030092>

- Shin, T. Y., & Kim, J. H. (2022). First Step in Modeling the Flow Table Test to Characterize the Rheology of Normally Vibrated Concrete. *Cement and Concrete Research*, 152, 1-11.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106678>
- Silva, B. A., Pinto, A. P. F., Gomes, A., & Candeias, A. (2023). . Influence of Water Content and Mixing Conditions on the Properties of Lime-Based Materials. *Journal Buildings*, 13(6).
doi:<https://doi.org/10.3390/buildings13061530>
- SNI-2049. (2015). *Semen Portland*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Sokoltsov, V., Tokarchuk, V., & Sviderskyi, V. (2018). Influence of Silicons of Different Structures on the Hydration of Compositional Cements. *Technology Audit and Production Reserves*, 6(3), 4-8.
doi:<https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.148312>
- Suhardin, A., Ulum, M. S., & Darwis, D. (2018). Penentuan Komposisi Serta Suhu Kalsinasi Optimum CaO dari Batu Kapur. 2(1).
- Sulasmi, S., Hasanbasri, M., & Rustamaji. (2022). Identifikasi Dampak Industri Semen yang Merugikan Masyarakat. *Isu-isu Strategis Sains, Lingkungan, dan Inovasi Pembelajarannya*, 280-289.
- Sumarlin, L., Zidni, A., Nurhasni, N., Hendrawati, H., Wulandari, M. (2023). Kadar Logam Merkuri (Hg) dan Batas Aman Konsumsi Kerang Hijau (*Perna viridis* L.) di Kalibaru Timur dan Muara Kamal. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(1), 264-269.

- Sunarsih, T., Marzuki, H., Anaser, N., & Safaruddin. (2024). Pengaruh Penambahan Dosis Cemnet Grinding Aid (CGA) Terhadap Setting Time dan Kuat Tekan Mortar pada Semen PCC Di PT. Semen Baturaja TBK. : *Journal Of Multidisciplinary Research and Innovation*, 2(2), 124-141. doi:<https://doi.org/10.62668/paradigm.v2i02.1192>
- Surya, W. & Widiawati, W. (2023). Pengaruh Penambahan Bottom Ash Terhadap Karakteristik dari Semen OPC (Ordinary Portland Cement) PT Semen Indonesia TBK. *Jurnal Multidisiplin Saintek*, 1(7), 97-104.
- Susanti, F. (2020). Pengaruh Kuat Tekan Beton dengan Menggunakan Campuran Cangkang Kerang Sebagai Penambah Agregat Halus. *Concrete Design Journal*, 1(1), 29-37.
- Susanti, N., Sari, S. M., & Maulana, F. (2019). A Study of Strength Activity Index of Pozzolan and Silica Sand with Ordinary Portland Cement Using ASTM C595/C595M-12 Method. *Journal of Technomaterial Physics*, 1(2), 148-155.
- Susilawati, S., & Sachroudi, M. R. (2023). Pengaruh Penambahan Sabut Kelapa Sebagai Material Serat Terhadap Kuat Tekan Beton. *Jurnal Kacapuri: Jurnal Keilmuan Teknik Sipil*, 6(1), 23. doi:<https://doi.org/10.31602/jk.v6i1.10997>
- Tangboriboon, N., Rortchanakharn, S., & Petcharoen, K. (2015). Effects of Foaming Agents and Calcium Carbonate on Thermo-Mechanical Properties of Natural Rubber Foams. *Journal Polimeri*, 35(1), 10-17.

- Tanggu, G. F., Santoso, G. T., Antoni, A., & Hardjito, D. (2018). Efek Material Pengisi Kalsium Karbonat dan Limbah Debu Marmer Terhadap Sifat Mekanik Mortar. *Semantic Scholar*. From <https://www.semanticscholar.org/paper/EFEK-MATERIAL-PENGISI-KALSIUM-KARBONAT-DAN-WASTE-Tanggu-Santoso/6409dbea78f6f35a22574696d6dc6f445b4c8d3d>
- Tioris, F., & Elvina, D. (2018). Pemanfaatan Limbah Kulit Kerang sebagai Elemen Dekorasi Ruang Penelitian Potensi Produk Lokal dari Limbah Sebagai Industri Kreatif di Sentra UKM Kenjeran Surabaya. (pp. 180-187). Surabaya: Seminar Nasional Seni dan Desain.
- Tisdale, K. A., Maladeniya, C. P., Lopez, C. V., Tennyson, A. G., & Smith, R. C. (2023). Sustainable Composites from Waste Sulfur, Terpenoids, and Pozzolan Cements. *Journal of Composites Science*, 7(1), 35. doi:<https://doi.org/10.3390/jcs7010035>
- Ubay, J., Hartati, R., & Redjeki, S. (2021). Morfometri Dan Hubungan Panjang Berat Kerang Hijau (*Perna veridis*) dari Perairan Tambak Lorok, Semarang Dan Morosari, Demak, Jawa Tengah. *Journal of Marine Research*, 10(4), 535-544.
- Wan, S. B., Ibrahim, N. H., Rahim, M. A., Shahidan, S., & Rahman, R. (2017). A Review on Seashells Ash as Partial Cement Replacement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 271(1), 1757-1765. doi:<https://doi.org/10.1088/1757-899X/271/1/012059>

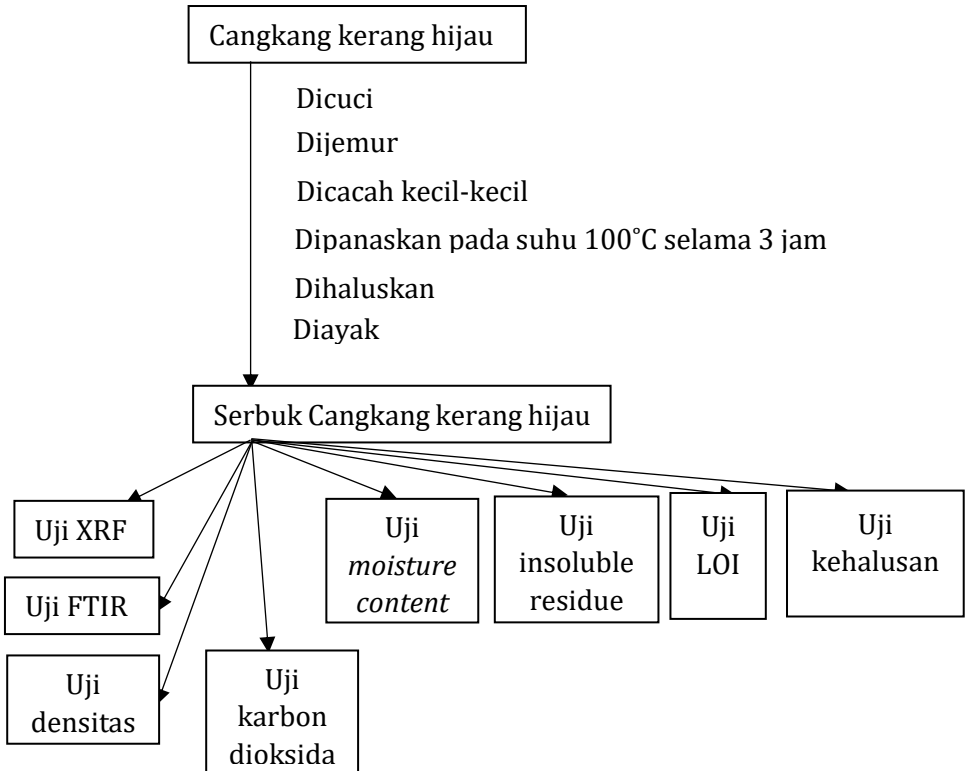
- Wang & Gao, W. (2022). Effect of Clam Shell from Kitchen Waste on the Synthesis, Performance, and Hydration of Cementitious Clinker. *Construction and Building Materials*, 323. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126588>
- Wang & Li, L. (2019). Characterization On The Recycling of Waste Seashells with Portland Cement Towards Sustainable Cementitious Materials. *J. Clean Prod*, 220, 2335-252.
- Wang & Zhang, X. (2023). Environmental Monitoring Using FTIR Spectroscopy. *Environmental Science and Technology*, 57(4), 234-245.
- Wardani., D. A. (2022). Pengaruh Pemanfaatan Serbuk Cangkang Kerang Hijau (*Perna Viridis* L.) Sebagai Bahan Substitusi Sebagian Semen Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Tarik Belah Beton.
- Widiarti, N., Ni'mah, Y., Bahruji, H., Prasetyoko, D. (2019). Development of CaO from natural calcite as a heterogeneous base catalyst in the formation of biodiesel: Review. *Journal of Renewable Materials*, 7(10), 951-939.
- Xia, J., Chen, K., Hu, S., Chen, J., Wu, R., & Jin, W. (2023). Experimental and Numerical Study on the Microstructure and Chloride Ion Bransport Behavior of Concrete-to-concrete Interface. *Construction and Building Materials*, 367, 1-12. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130317>

- Zhang, H., Mu, S., Cai, J., Liu, J., & Hong, J. X. (2023). The Role of Iron in Cement Hydration Process: From Perspective of Chemical Admixture. *Thermochimica Acta*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tca.2023.179457>
- Zhang, Wang, Y., & Li, J. (2022). Environmental Impact of Ordinary Portland Cement Production: A Review. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129-135. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129135>
- Zhao, Z., Lu, J., Lin, W. J., Wang, X., Bai, J., Zheng, X., Xie, R., Shi, G., Li, H., & Wang, C. (2022). Highly Efficient Hydration of Epoxides under Atmospheric Pressure and Low Water/Epoxide Ratios by a Tunable Azolate Ionic Liquid through Anion–Cation Synergetic Catalysis. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(44), 16402-16407. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c02012>
- Zulkarnain, H., Fitriani, N., Miftahussurur, M., Fianto, B., Irfan, W., Heriqbaldi, U., Cahyani, P., & Karnanta, K. (2023). *Handbook of SDGs Series: Pilar Lingkungan*. Surabaya. From <https://sdgscenter.unair.ac.id/wp-content/uploads/2023/12/SDGs-Series-Pilar-Lingkungan>

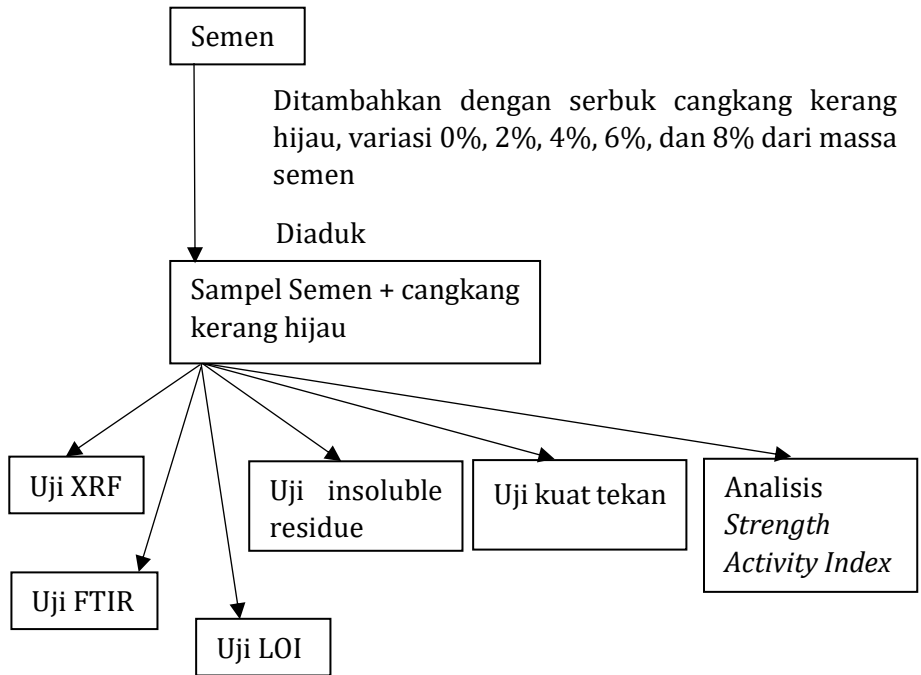
DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1: Skema Prosedur Kerja

1. Pembuatan serbuk cangkang kerang hijau



2. Pembuatan sampel semen yang ditambahkan serbuk cangkang kerang hijau



3. Uji moisture content

Cangkang kerang hijau

Ditimbang massa awal cangkang kerang hijau

Dipanaskan dalam oven dengan suhu 100°C selama 3 jam

Ditimbang massa akhir cangkang kerang hijau setelah dipanaskan

Dihitung dengan persamaan 2.1

Hasil

4. Uji insoluble residue cangkang kerang hijau dan sampel semen+cangkang kerang hijau

Sampel

Ditimbang 1 g dilarutkan dengan 5 mL HCl pekat dan ditambahkan aquades hingga volume 50 mL

Dipanaskan diatas *hotplate* suhu 200°C selama 5 menit

Disaring dan dicuci dengan aquades panas

Kertas saring dan residu dimasukkan ke dalam 100 mL NaOH 1% panas dan dipanaskan 15

Ditambahkan metil red 3 tetes

Ditambahkan 5-10 tetes HCl dipanaskan selama 15 menit

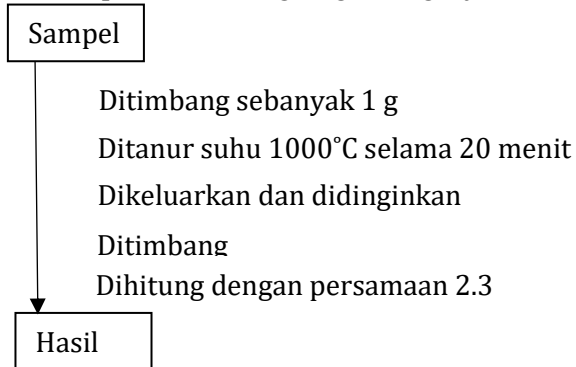
Disaring dan dicuci dengan NH_4Cl

Endapan dan kertas saring ditanur pada suhu 900°C selama 1 jam 30 menit

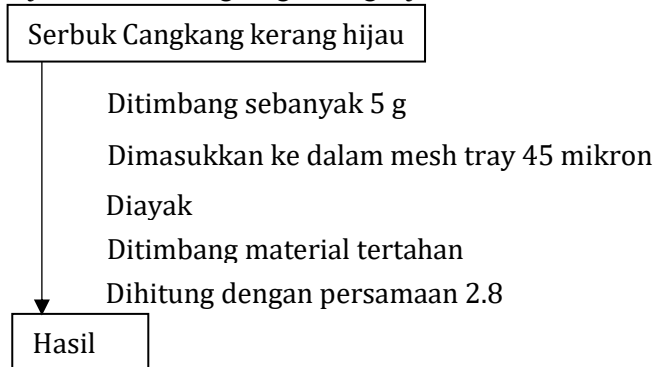
Dihitung dengan persamaan 2.2

Hasil

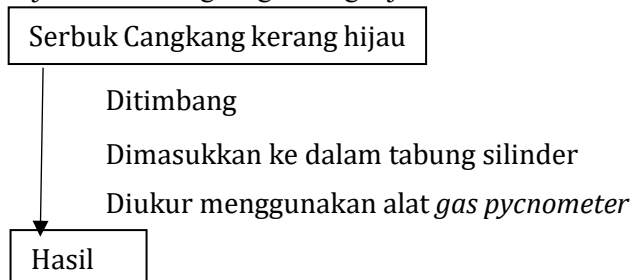
5. Uji *Loss On Ignition* (LOI) cangkang kerang hijau dan sampel semen+cangkang kerang hijau



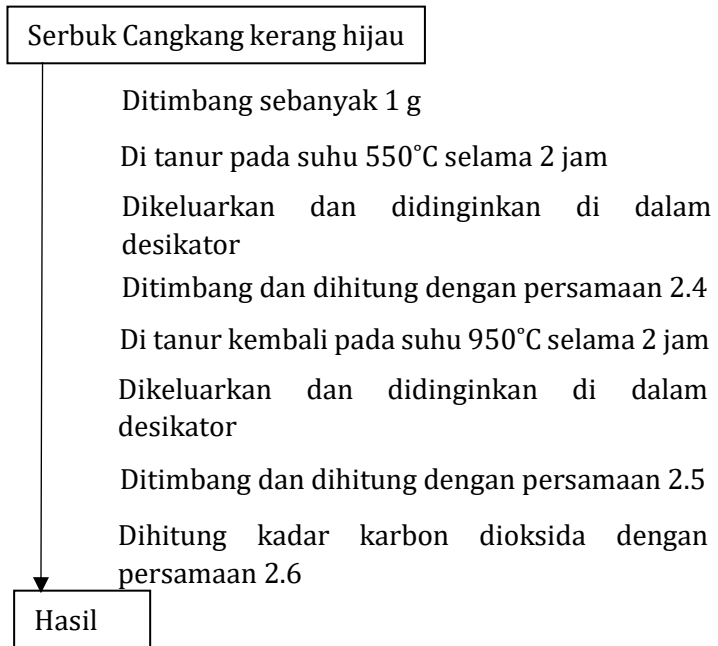
6. Uji kehalusan cangkang kerang hijau



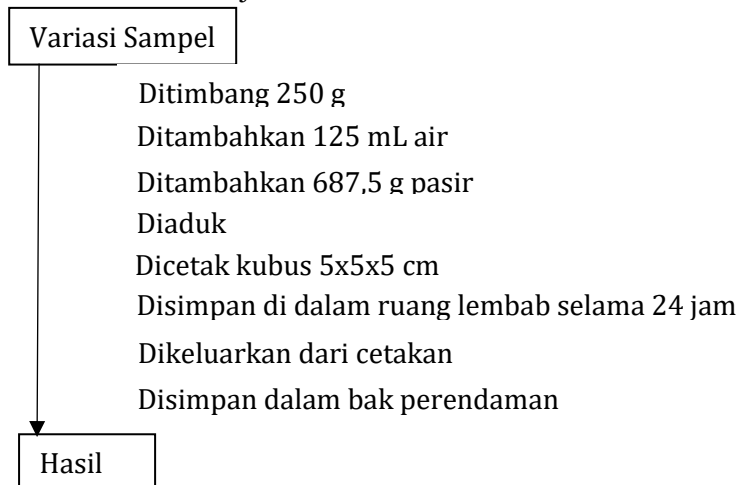
7. Uji densitas cangkang kerang hijau



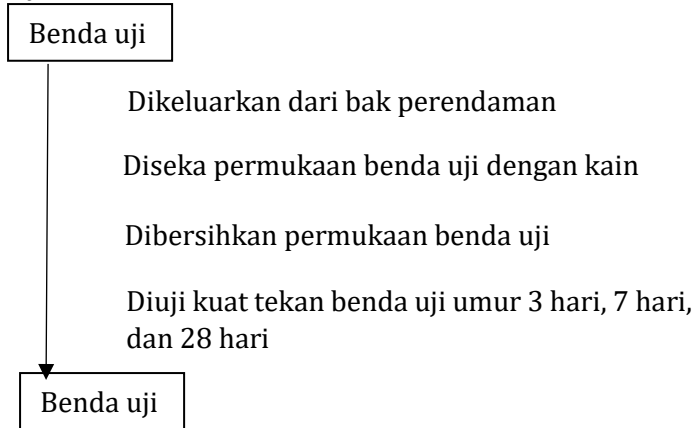
8. Uji kadar karbon dioksida cangkang kerang hijau



9. Pembuatan benda Uji kuat tekan



10. Uji kuat tekan



LAMPIRAN 2: Analisis Data Cangkang Kerang Hijau

1. Uji *Moisture Content*

$$\text{moisture content} = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \times 100\%$$

$$\text{moisture content} = \frac{1000 \text{ g} - 982,7 \text{ g}}{1000 \text{ g}} \times 100\% = 1,73\%$$

2. Uji *Insoluble Residue*

$$\%IR = \frac{w_2 - w_0}{w_1} \times 100\%$$

$$\%IR = \frac{20,8482 \text{ g} - 20,8441 \text{ g}}{1,0004 \text{ g}} \times 100\% = 0,4098\%$$

3. Uji Hilang pijar/LOI

$$\%HP = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \times 100\%$$

$$\%HP = \frac{1,0002 \text{ g} - 0,5251 \text{ g}}{1,0002 \text{ g}} \times 100\% = 47,5\%$$

4. Uji Kehalusan

$$\% \text{ tertahan} = \frac{\text{berat tertahan}}{\text{berat total}} \times 100\%$$

$$\% \text{ tertahan} = \frac{1,0145 \text{ g}}{5 \text{ g}} \times 100\% = 20,29\%$$

$$\% \text{ lolos} = 100\% - 20,29\% = 79,71\%$$

5. Uji karbon dioksida

$$\%HP\ 550^{\circ}C = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \times 100\%$$

$$\%HP = \frac{1,0003\ g - 0,6296\ g}{1,0003\ g} \times 100\% = 37,058\%$$

$$\%HP\ 950^{\circ}C = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \times 100\%$$

$$\%HP = \frac{1,0003\ g - 0,5056\ g}{1,0003\ g} \times 100\% = 49,455\%$$

Carbon dioxide = Hilang pijar 950°C-Hilang pijar 550°C

Carbon dioxide = 49,455% - 37,058%= 12,397%

Lampiran 3: Analisis Data Sampel Semen yang Ditambahkan Cangkang Kerang Hijau

1. Uji *Insoluble Residue*

$$\%IR = \frac{w_2 - w_0}{w_1} \times 100\%$$

a. Sampel S-CK0%

$$\%IR = \frac{21,3022 \text{ g} - 21,2925 \text{ g}}{1,0000 \text{ g}} \times 100\% = 0,97\%$$

b. Sampel S-CK2%

$$\%IR = \frac{20,7569 \text{ g} - 20,7492 \text{ g}}{1,0007 \text{ g}} \times 100\% = 0,7694\%$$

c. Sampel S-CK4%

$$\%IR = \frac{21,1907 \text{ g} - 21,1841 \text{ g}}{1,0001 \text{ g}} \times 100\% = 0,6599\%$$

d. Sampel S-CK6%

$$\%IR = \frac{21,0868 \text{ g} - 21,0808 \text{ g}}{1,0002 \text{ g}} \times 100\% = 0,5998\%$$

e. Sampel S-CK8%

$$\%IR = \frac{21,2992 \text{ g} - 21,2925 \text{ g}}{1,0002 \text{ g}} \times 100\% = 0,5898\%$$

2. Uji Hilang Pijar/LOI

$$\%HP = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \times 100\%$$

a. Sampel S-CK0%

$$\%HP = \frac{1,0009 \text{ g} - 0,9739 \text{ g}}{1,0009 \text{ g}} \times 100\% = 2,697\%$$

b. Sampel S-CK2%

$$\%HP = \frac{1,0008 \text{ g} - 0,9653 \text{ g}}{1,0008 \text{ g}} \times 100\% = 3,547\%$$

c. Sampel S-CK4%

$$\%HP = \frac{1,0004 \text{ g} - 0,9511 \text{ g}}{1,0004 \text{ g}} \times 100\% = 4,928\%$$

d. Sampel S-CK6%

$$\%HP = \frac{1,0008 \text{ g} - 0,9494 \text{ g}}{1,0008 \text{ g}} \times 100\% = 5,135\%$$

e. Sampel S-CK08%

$$\%HP = \frac{1,0006 \text{ g} - 0,9379 \text{ g}}{1,0006 \text{ g}} \times 100\% = 6,266\%$$

3. *Strength Activity Index* (SAI) Benda Uji Umur 7 Hari

$$AIWPC = \frac{a}{b} \times 100\%$$

a. SAI S-CK2%

$$AIWPC = \frac{305,915 \text{ kg/cm}^2}{364,038 \text{ kg/cm}^2} \times 100\% = 84,0336\%$$

b. SAI S-CK4%

$$AIWPC = \frac{222,298 \text{ kg/cm}^2}{364,038 \text{ kg/cm}^2} \times 100\% = 61,0643\%$$

c. SAI S-CK6%

$$AIWPC = \frac{195,7855 \text{ kg/cm}^2}{364,038 \text{ kg/cm}^2} \times 100\% = 53,7815\%$$

d. SAI S-CK8%

$$AIWPC = \frac{181,5095 \text{ kg/cm}^2}{364,038 \text{ kg/cm}^2} \times 100\% = 49,8599\%$$

Lampiran 4: Dokumentasi

1. Uji *Moisture Content*

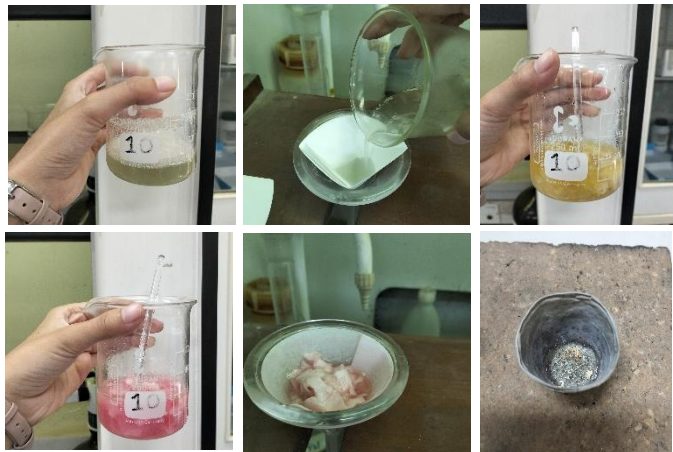


2. Penghalusan Cangkang Kerang Hijau



3. Uji *Insoluble Residue*

a. Cangkang Kerang Hijau



b. Sampel Semen



4. Uji Hilang Pijar/LOI

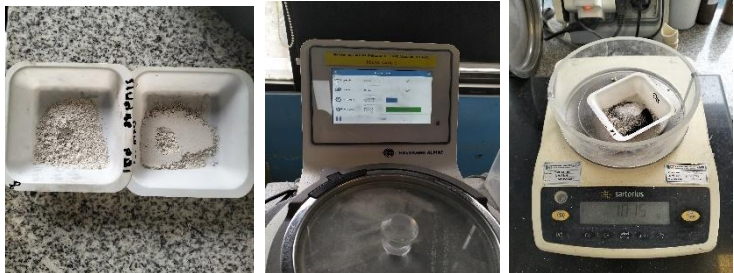
a. Cangkang Kerang Hijau



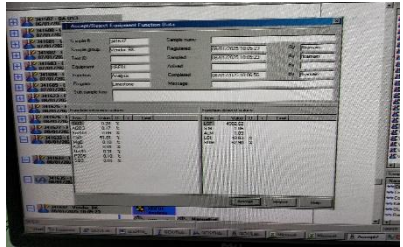
b. Sampel Semen



5. Uji Kehalusan



6. Uji X-Ray Fluorescence (XRF)



7. Uji Kadar Karbon Dioksida



8. Uji Densitas



9. Pembuatan Benda Uji Kuat Tekan



10. Uji Kuat Tekan



RIWAYAT HIDUP

A. Identitas Diri

1. Nama : Ansia Aulia Dina
2. TTL : Rembang, 20 Agustus 2002
3. Alamat rumah : Desa Tulung, RT 04/RW 01, Kec.
Pamotan, Kab. Rembang, Jawa
Tengah
4. No. Telepon : 081226318321
5. E-mail : ansiaandin@gmail.com

B. Riwayat Pendidikan

1. SDN Tulung
2. MTs N Lasem (MTs N 1 Rembang)
3. MAN 2 Rembang
4. UIN Walisongo Semarang