



Pengaruh Substitusi Abu Daun Nanas Terhadap Workabilitas, Densitas, dan Kuat Tekan Beton Normal

*Ahmad Junaidi, Adji Sutama, Verinazul Septriansyah

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palembang

*junaidi@um-palembang.ac.id

Received: 18 Februari 2025 Revised: 19 Mei 2025 Accepted: 30 Oktober 2025

Abstract

The increasing demand for concrete in the construction industry has led to high cement production, contributing to global CO₂ emissions. This research examines the potential of pineapple leaf ash as a partial cement substitution material to produce more environmentally friendly concrete. An experimental study was conducted with seven variation percentages of pineapple leaf ash substitution (0%, 7.5%, 10%, 12.5%, 15%, 17.5%, and 20%) by cement weight, using 150x300 mm cylindrical specimens. Testing included workability, density, and concrete compressive strength at 28 days. The results showed that slump values decreased with increasing percentages of pineapple leaf ash, from 9.5 cm in normal concrete to 3.0 cm at 20% substitution. Concrete density increased from 2250 kg/m³ in normal concrete to a maximum value of 2335 kg/m³ at 12.5% substitution, then decreased at higher percentages. Optimal compressive strength was achieved at 12.5% substitution with a value of 34.70 MPa, increasing 22.79% compared to normal concrete (28.26 MPa). This research concludes that the optimal pineapple leaf ash substitution is at 12.5%, resulting in significant improvements in concrete density and compressive strength, although with a decrease in workability that must be considered in its application.

Keywords: Pineapple leaf ash, workability, density, concrete compressive strength, normal concrete

Abstrak

Peningkatan kebutuhan beton dalam industri konstruksi berdampak pada tingginya produksi semen yang berkontribusi terhadap emisi CO₂ global. Penelitian ini mengkaji potensi abu daun nanas sebagai material substitusi parsial semen untuk menghasilkan beton yang lebih ramah lingkungan. Studi eksperimental dilakukan dengan tujuh variasi persentase substitusi abu daun nanas (0%, 7,5%, 10%, 12,5%, 15%, 17,5%, dan 20%) terhadap berat semen, menggunakan benda uji silinder 150x300 mm. Pengujian meliputi workabilitas, densitas, dan kuat tekan beton pada umur 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai slump menurun seiring peningkatan persentase abu daun nanas, dari 9,5 cm pada beton normal hingga 3,0 cm pada substitusi 20%. Berat jenis beton meningkat dari 2250 kg/m³ pada beton normal hingga mencapai nilai maksimum 2335 kg/m³ pada substitusi 12,5%, kemudian menurun pada persentase yang lebih tinggi. Kuat tekan optimal dicapai pada substitusi 12,5% dengan nilai 34,70 MPa, meningkat 22,79% dibandingkan beton normal (28,26 MPa). Penelitian ini menyimpulkan bahwa substitusi abu daun nanas optimal berada pada persentase 12,5%, menghasilkan peningkatan signifikan pada densitas dan kuat tekan beton, meski dengan penurunan workabilitas yang harus dipertimbangkan dalam aplikasinya.

Kata kunci: Abu daun nanas, workabilitas, densitas, kuat tekan beton, beton normal

Pendahuluan

Perkembangan industri konstruksi di Indonesia mengalami peningkatan yang signifikan seiring dengan pembangunan infrastruktur yang masif. Hal ini akan berdampak pada meningkatnya kebutuhan beton sebagai material konstruksi utama dalam

pembangunan. Beton dipilih karena memiliki berbagai keunggulan seperti kuat tekan tinggi, mudah dibentuk, tahan lama, dan biaya pemeliharaan yang relatif rendah (Mehta & Monteiro, 2017). Namun, produksi semen sebagai bahan utama pembuatan beton berkontribusi sekitar 7% terhadap emisi CO₂ global, di mana setiap

produksi 1 ton semen menghasilkan sekitar 0,9 ton CO₂ (Andrew, 2018).

Upaya untuk mengurangi dampak lingkungan dari produksi semen telah mendorong berbagai penelitian tentang material alternatif sebagai pengganti sebagian semen dalam campuran beton (Sutama *et al.*, 2019). Penggunaan material pozzolan seperti *fly ash*, *silica fume*, dan abu sekam padi telah terbukti dapat menghasilkan beton dengan kualitas yang baik sekaligus mengurangi penggunaan semen (Shetty, 2019). Salah satu material alternatif yang berpotensi adalah abu daun nanas yang merupakan limbah dari industri pertanian nanas.

Tantangan utama pemanfaatan abu daun nanas dalam skala industri terletak pada konsistensi kualitas dan proses produksi yang terstandardisasi. Adesanya *et al.*, (2018) menggarisbawahi bahwa pentingnya protokol pembakaran, penggilingan, dan penyimpanan yang tepat untuk memastikan kualitas material pozzolan dari limbah pertanian. Pengembangan standar khusus dan metode *quality control* untuk abu daun nanas akan menjadi langkah krusial untuk adopsi yang lebih luas dalam industri konstruksi.

Indonesia sebagai salah satu produsen nanas terbesar di dunia, dengan produksi mencapai 2,2 juta ton pada tahun 2020 (BPS, 2021), akan menghasilkan limbah daun nanas dalam jumlah besar yang belum dimanfaatkan secara optimal. Daun nanas mengandung senyawa silika (SiO₂) yang berpotensi sebagai material pozzolan alami. Penelitian yang dilakukan oleh Rahman *et al.*, (2019) menunjukkan bahwa kandungan silika dalam abu daun nanas yang dibakar pada suhu 600°C dapat mencapai 65-75%, yang memenuhi persyaratan sebagai material pozzolan sesuai ASTM C618.

Beberapa penelitian menunjukkan potensi penggunaan abu organik dalam campuran beton. Studi yang dilakukan oleh Ahmad *et al.*, (2016) menggunakan abu sekam padi sebagai substitusi parsial semen menunjukkan peningkatan kuat tekan beton hingga 15% pada substitusi optimal 10%. Penelitian serupa oleh Kumar *et al.*, (2018) dengan menggunakan abu ampas tebu mendapatkan hasil peningkatan kuat tekan sebesar 12% pada substitusi 7,5%. Namun, penelitian mengenai penggunaan abu daun nanas dalam campuran beton masih sangat terbatas.

Pratama *et al.*, (2015) melaporkan bahwa penambahan 5% abu daun nanas sebagai substitusi parsial semen dapat meningkatkan kuat tekan beton hingga 12% dibandingkan beton normal pada umur

28 hari. Penelitian oleh Widodo *et al.*, (2018) mengungkapkan bahwa abu daun nanas dengan kadar 3% dapat memperbaiki workabilitas beton segar tanpa mengurangi kekuatan tekannya secara signifikan.

Reaksi pozzolanik yang terjadi antara senyawa silika dalam abu daun nanas dengan kalsium hidroksida (Ca(OH)₂) hasil hidrasi semen berpotensi menghasilkan kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan yang dapat meningkatkan kekuatan beton. Selain itu, partikel halus abu daun nanas dapat berfungsi sebagai *filler* yang mengisi ronggarongga dalam beton, sehingga meningkatkan kepadatan dan kekuatan beton (Neville & Brooks, 2010). Sementara itu, Wijaya *et al.*, (2021) melaporkan peningkatan densitas beton sebesar 3% pada substitusi abu daun nanas 5%.

Studi yang dilakukan oleh Rahman dan Kusuma, (2020) mendemonstrasikan bahwa kandungan silika dalam abu daun nanas mencapai 65,3%, yang memenuhi persyaratan sebagai material pozzolanik. Sementara itu, Ibrahim *et al.*, (2017) menemukan bahwa penggunaan abu daun nanas hingga 7% dapat mengoptimalkan sifat mekanik beton, namun penambahan lebih dari itu cenderung menurunkan kinerja beton.

Meskipun beberapa penelitian telah mengkaji potensi abu daun nanas sebagai material substitusi semen, masih terdapat kesenjangan signifikan dalam pemahaman tentang persentase optimal substitusi dan pengaruhnya terhadap multivariabel kinerja beton. Pratama *et al.*, (2015) membatasi penelitian mereka pada substitusi maksimal 5%, sementara Ibrahim *et al.* (2017) hanya mengkaji hingga 7%. Selain itu, belum ada penelitian komprehensif yang menganalisis secara simultan pengaruh abu daun nanas terhadap workabilitas, densitas, dan kuat tekan beton dengan variasi persentase yang lebih luas. Kesenjangan ini penting untuk diatasi mengingat penentuan persentase optimal substitusi abu daun nanas memerlukan pemahaman menyeluruh tentang pengaruhnya terhadap berbagai sifat beton. Penelitian ini berupaya mengisi kesenjangan tersebut dengan mengkaji tujuh variasi persentase substitusi dalam rentang yang lebih luas (0-20%) dan analisis komprehensif terhadap ketiga parameter kinerja utama beton.

Metode

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental laboratorium yang dilaksanakan di Laboratorium Teknologi Bahan Konstruksi Universitas Muhammadiyah Palembang, untuk menganalisis pengaruh substitusi abu daun nanas terhadap

workabilitas, densitas, dan kuat tekan beton normal. Variabel bebas yang digunakan adalah persentase substitusi abu daun nanas terhadap berat semen, yang terdiri dari tujuh variasi yaitu 0% (beton kontrol), 7,5%, 10%, 12,5%, 15%, 17,5%, dan 20%. Adapun variabel terikat yang diamati meliputi nilai slump untuk mengukur *workability*, berat jenis beton, dan kuat tekan beton pada umur 28 hari. Penelitian ini mengontrol beberapa parameter seperti faktor air semen (*w/c*) sebesar 0,45, mutu beton rencana f_c' 25 MPa, ukuran maksimum agregat kasar 25,40 mm, metode perawatan dengan perendaman, dan suhu ruangan pengujian $25 \pm 2^\circ\text{C}$.

Pemilihan tujuh variasi substitusi abu daun nanas didasarkan pada analisis literatur yang menunjukkan bahwa dalam penelitian terdahulu cenderung membatasi pada rentang substitusi yang lebih sempit. Rentang yang lebih luas ini memungkinkan identifikasi titik optimal dan titik kritis substitusi abu daun nanas secara lebih akurat. Selain itu, penelitian ini menggunakan metode kalsinasi dengan kontrol suhu yang presisi pada 600°C dengan laju pemanasan $10^\circ\text{C}/\text{menit}$ untuk mengoptimalkan kandungan reaktif silika dalam abu daun nanas, suatu pendekatan yang belum diterapkan dalam penelitian-penelitian sebelumnya yang serupa.

Material dan peralatan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian meliputi Semen Portland Tipe I, agregat halus berupa pasir dengan spesifikasi zona gradasi 2 dan kadar lumpur maksimal 5%. Untuk agregat kasar berupa kerikil dengan ukuran maksimum 25,40 mm dan keausan maksimal 40%, air yang memenuhi standar air minum, serta abu daun nanas yang diproses hingga lolos ayakan No. 200 ($75 \mu\text{m}$) dengan kandungan SiO_2 minimal 60% dan LOI maksimal 10%.

Peralatan utama terdiri dari *furnace* untuk pembakaran daun nanas, satu set ayakan standar, *concrete mixer*, satu set alat uji slump, timbangan digital, cetakan silinder 150x300 mm, *universal testing machine* untuk pengujian kuat tekan, serta berbagai alat pendukung lainnya yang memenuhi standar laboratorium.

Prosedur penelitian

Prosedur penelitian diawali dengan persiapan abu daun nanas melalui tahapan pengumpulan dan pembersihan daun nanas yang diambil dari lokasi perkebunan nanas di Desa Pangkul Kecamatan Cambai Kota Prabumulih, pengeringan alami selama 7 hari, pemotongan menjadi ukuran $\pm 5 \text{ cm}$, pembakaran pada suhu 600°C selama 2 jam dengan

laju pemanasan $10^\circ\text{C}/\text{menit}$, penggilingan, pengayakan hingga lolos ayakan No. 200, dan pengujian XRF (*X-Ray Fluorescence*). Hasil pengujian XRF abu daun nanas yang diuji dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil pengujian XRF abu daun nanas

Unsur kimia	Hasil (%)	Syarat ASTM C618 kelas N (%)
SiO_2	65,40	Min. SiO_2^{+}
Al_2O_3	18,32	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$
Fe_2O_3	5,67	70
CaO	3,89	-
MgO	2,56	-
K_2O	1,43	-
Na_2O	0,78	-
SO_3	0,45	Maks. 4
P_2O_5	0,35	-
LOI	4,10	Maks. 10

Hasil pengujian XRF (*X-Ray Fluorescence*) pada Tabel 1 menunjukkan komposisi kimia abu daun nanas dan perbandingannya dengan ASTM C618, (2012) untuk material pozzolan Kelas N. Abu daun nanas memiliki kandungan utama berupa SiO_2 (silika) sebesar 65,40%, Al_2O_3 (alumina) sebesar 18,32%, dan Fe_2O_3 (besi oksida) sebesar 5,67%. Total ketiga senyawa utama ini mencapai 89,39%, jauh melampaui persyaratan minimum ASTM C618 Kelas N sebesar 70%. Kadar SO_3 berada di bawah batas maksimum 4% sesuai standar. Nilai LOI (*Loss On Ignition*) sebesar 4,10% juga memenuhi persyaratan maksimum 10% yang ditetapkan ASTM C618.

Hasil ini mengkonfirmasi bahwa abu daun nanas memenuhi syarat sebagai material pozzolan Kelas N, dengan kandungan silika yang tinggi yang berperan penting dalam reaksi pozzolanik untuk meningkatkan kekuatan beton. Kadar SO_3 dan LOI yang rendah juga mengindikasikan kualitas abu yang baik untuk digunakan sebagai bahan substitusi semen dalam campuran beton.

Agregat halus dan kasar juga diuji *properties*-nya sesuai SNI dan/atau ASTM, meliputi analisis saringan, kadar air, berat jenis, penyerapan, berat isi serta pengujian spesifik seperti kadar lumpur dan organik untuk agregat halus, serta keausan untuk agregat kasar. Hasil pengujian agregat halus dapat dilihat pada Tabel 2 dan agregat kasar dapat dilihat pada Tabel 3. Hasil pengujian agregat halus dan kasar menunjukkan karakteristik material yang akan digunakan dalam campuran beton. Agregat halus memiliki kadar air 2,461%, yang masih dalam batas wajar (0-10%). Berat jenis curah kering (2,408), berat jenis kondisi SSD (2,445), dan berat jenis semu (2,500) berada dalam rentang standar 2,30-2,90.

Tabel 2. Hasil pengujian agregat halus

Pengujian	Hasil	Syarat
Kadar air (%)	2,461	0-10
Berat jenis curah kering (S_d)	2,408	2,30-2,90
Berat jenis kondisi SSD (S_s)	2,445	2,30-2,90
Berat jenis semu (S_a)	2,500	2,30-2,90
Penyerapan air (S_w) (%)	1,523	0-8
Berat isi kondisi gembur (kg/ltr)	1,240	-
Berat isi kondisi padat (kg/ltr)	1,437	-
Kadar lumpur, lolos saringan No. 200 (%)	1,453	Maks. 5
Kadar organik, nomor warna	2	Maks. No. 3
Analisa saringan, ukuran maksimum (mm)	2,360	-
Modulus halus butir	2,831	2,0-3,1

Tabel 3. Hasil pengujian agregat kasar

Pengujian	Hasil	Syarat
Kadar air (%)	0,908	0-2
Berat jenis curah kering (S_d)	2,501	2,30-2,90
Berat jenis kondisi SSD (S_s)	2,525	2,30-2,90
Berat jenis semu (S_a)	2,563	2,30-2,90
Penyerapan air (S_w) (%)	0,967	0-8
Berat isi kondisi gembur (kg/ltr)	1,516	1,280-1,920
Berat isi kondisi padat (kg/ltr)	1,604	1,280-1,920
Kadar lumpur, lolos saringan No. 200 (%)	0,784	Maks. 1,5
Analisa saringan, ukuran maksimum (mm)	25,40	37,5-9,5
Modulus halus butir	5,709	-
Abrasi, keausan dengan mesin los angeles (%)	23,627	Maks. 50

Penyerapan air agregat halus sebesar 1,523% menunjukkan porositas yang relatif rendah dan masih dalam batas yang diperbolehkan (0-8%). Berat isi kondisi gembur dan padat masing-masing sebesar 1,240 kg/liter dan 1,437 kg/liter. Kadar lumpur yang lolos saringan No. 200 mencapai 1,453%, jauh di bawah batas maksimum 5%, mengindikasikan kebersihan material yang baik. Kadar organik nomor 2 juga memenuhi persyaratan (maksimum No. 3). Modulus halus butir sebesar 2,831 berada dalam rentang ideal 2,0-3,1 menunjukkan distribusi ukuran butir yang sesuai untuk campuran beton.

Sementara itu, agregat kasar menunjukkan kadar air 0,908% yang memenuhi syarat (0-2%). Berat jenis curah kering (2,501), berat jenis kondisi SSD (2,525), dan berat jenis semu (2,563) juga berada dalam rentang standar 2,30-2,90. Penyerapan air yang rendah (0,967%) menunjukkan kualitas material yang baik. Berat isi kondisi gembur dan padat masing-masing 1,516 kg/liter dan 1,604 kg/liter, sesuai dengan persyaratan (1,280-1,920 kg/liter). Kadar lumpur agregat kasar hanya 0,784%, di bawah batas maksimum 1,5%. Ukuran maksimum agregat kasar adalah 25,40 mm masih berada dalam rentang 37,5-9,5 mm. Nilai abrasi atau keausan dengan mesin Los Angeles sebesar 23,627% jauh di bawah batas maksimum 50%, mengindikasikan ketahanan aus yang sangat baik.

Secara keseluruhan, kedua jenis agregat ini memenuhi semua persyaratan standar dan dapat digunakan untuk pembuatan beton dengan kualitas baik.

Tabel 4. Komposisi campuran beton (kg/m³)

KC	Material (kg/m ³)				
	S	AH	AK	Air	ADN
ADN-0%	446	494	1163	201	0
ADN-7,5%	413	494	1163	201	33
ADN-10%	401	494	1163	201	45
ADN-12,5%	390	494	1163	201	56
ADN-15%	379	494	1163	201	67
ADN-17,5%	368	494	1163	201	78
ADN-20%	357	494	1163	201	89

Keterangan: KC = Kode campuran, S = Semen, AH = Agregat Halus, AK = Agregat kasar, ADN = Abu daun nanas.

Pembuatan benda uji dilakukan berdasarkan *mix design* yang mengacu pada SNI 7656:2012 seperti yang terlihat pada Tabel 4, dengan total 35 benda uji yang terdiri dari 7 variasi campuran. Proses pencampuran dilakukan secara sistematis dimulai dari pencampuran agregat dan semen, penambahan abu daun nanas sesuai persentase substitusi, dan penambahan air secara bertahap hingga diperoleh campuran yang homogen. Setelah pengujian slump, beton segar dicetak dalam cetakan silinder 150x300 mm dengan pemasatan menggunakan meja

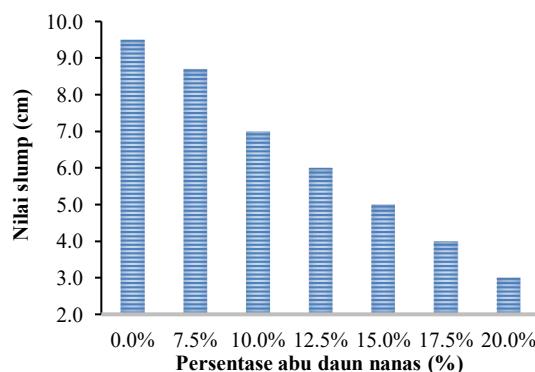
vibrator. Benda uji kemudian dirawat dengan perendaman hingga waktu pengujian.

Pengujian kuat tekan dilakukan setelah benda uji ditimbang terlebih dahulu. Uji tersebut dilaksanakan pada umur 28 hari menggunakan *universal testing machine*. Analisis data dilakukan secara komprehensif untuk menentukan persentase optimal abu daun nanas yang memberikan kinerja terbaik ditinjau dari aspek workabilitas, densitas, dan kuat tekan beton. Hasil analisis akan disajikan dalam bentuk grafik yang menunjukkan hubungan antara variasi persentase abu daun nanas dengan parameter-parameter yang diuji, disertai dengan pembahasan mengenai fenomena yang terjadi dan kaitannya dengan teori yang ada.

Hasil dan Pembahasan

Pengujian slump

Nilai slump menunjukkan tren penurunan seiring dengan peningkatan persentase abu daun nanas dalam campuran beton seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Beton normal (0% abu daun nanas) memiliki nilai slump 9,5 cm, kemudian mengalami penurunan bertahap hingga mencapai 3,0 cm pada campuran dengan 20% abu daun nanas. Penurunan nilai slump yang signifikan terutama terlihat pada substitusi abu daun nanas di atas 10%.



Gambar 1. Hasil pengujian slump

Penurunan nilai slump ini terjadi karena abu daun nanas memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi dan karakteristik penyerapan air yang besar. Hal ini menyebabkan pengurangan air bebas dalam campuran beton, sejalan dengan penelitian Widodo *et al.*, (2018) yang melaporkan bahwa material pozzolanik dari limbah pertanian cenderung memiliki *water demand* yang tinggi. Penelitian serupa oleh Rahman dan Ahmad, (2020) juga menunjukkan bahwa penambahan material pozzolan alami seperti abu daun nanas cenderung menurunkan *workability* beton karena sifat hidroskopisnya. Mereka menemukan penurunan

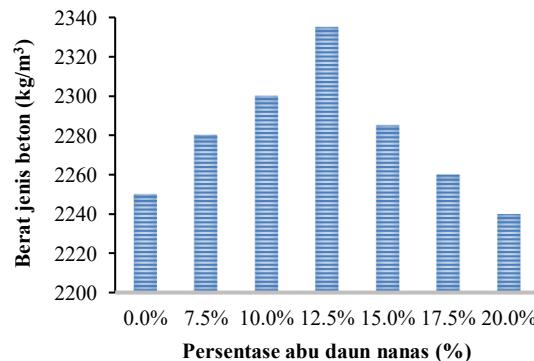
nilai slump hingga 45% pada penambahan abu organik 15%. Selain itu, tekstur permukaan abu daun nanas yang tidak beraturan dan bentuk partikel yang angular meningkatkan gesekan internal antar partikel dalam campuran beton. Rahman dan Kusuma, (2020) mengonfirmasi melalui analisis SEM bahwa morfologi abu daun nanas yang kompleks mempengaruhi workabilitas campuran.

Reaksi awal antara abu daun nanas dan semen dapat mempercepat proses pengikatan, mengurangi waktu workabilitas. Penelitian Ibrahim *et al.*, (2019) menunjukkan bahwa material pozzolanik dari daun nanas memiliki reaktivitas awal yang tinggi dengan semen portland.

Penurunan workabilitas seiring peningkatan persentase abu daun nanas menunjukkan tantangan dalam aplikasi praktis yang perlu diatasi. Thomas *et al.*, (2018) menjelaskan bahwa penambahan superplasticizer pada campuran beton dengan kandungan tinggi material pozzolan dapat mengkompensasi penurunan workabilitas tanpa mengorbankan kekuatan. Strategi ini dapat diaplikasikan untuk abu daun nanas pada persentase substitusi di atas 10% untuk mempertahankan tingkat workabilitas yang dapat diterima di lapangan.

Pengujian berat jenis beton (*density*)

Hasil pengujian berat jenis beton (*density*) dengan variasi substitusi abu daun nanas pada Gambar 2 menunjukkan pola perubahan yang signifikan. Pada beton normal (0% substitusi), berat jenis tercatat sebesar 2250 kg/m³, yang sejalan dengan temuan Rahman *et al.*, (2019) yang melaporkan berat jenis beton normal berkisar antara 2200-2400 kg/m³. Substitusi abu daun nanas hingga persentase tertentu menunjukkan peningkatan berat jenis beton.



Gambar 2. Hasil pengujian berat jenis beton

Pada substitusi 7,5%, berat jenis meningkat menjadi 2280 kg/m³, dan terus meningkat hingga mencapai

nilai maksimum 2335 kg/m³ pada substitusi 12,5%. Peningkatan ini dapat dijelaskan melalui penelitian Zulkarnain *et al.*, (2018) yang mengungkapkan bahwa partikel abu daun nanas yang halus dapat mengisi rongga-rongga mikro dalam beton (*filler effect*), sehingga meningkatkan kepadatan dan berat jenis beton.

Ahmad dan Ibrahim, (2020) dalam penelitiannya menjelaskan bahwa peningkatan berat jenis ini juga disebabkan oleh reaksi pozzolanik antara silika dalam abu daun nanas dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen, yang menghasilkan gel C-S-H tambahan dan meningkatkan densitas pasta semen. Hal ini konsisten dengan hasil pengujian yang menunjukkan peningkatan berat jenis hingga titik optimal.

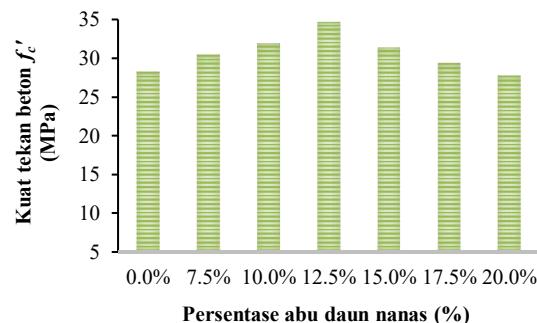
Namun, pada persentase substitusi di atas 12,5%, terjadi penurunan berat jenis. Pada substitusi 15%, berat jenis menurun menjadi 2285 kg/m³, dan terus menurun hingga 2240 kg/m³ pada substitusi 20%. Fenomena ini sejalan dengan temuan Wijaya *et al.*, (2021) yang mencatat penurunan berat jenis beton pada substitusi abu daun nanas di atas 15% akibat kelebihan kandungan silika yang tidak bereaksi sempurna dengan kalsium hidroksida. Hassan *et al.*, (2023) menjelaskan bahwa penurunan berat jenis pada persentase substitusi yang lebih tinggi disebabkan oleh berat jenis abu daun nanas yang lebih rendah dibandingkan semen, serta kemungkinan terjadinya aglomerasi partikel abu yang menghambat reaksi pozzolanik dan pembentukan struktur beton yang optimal.

Peningkatan densitas beton hingga 3,78% pada substitusi optimal 12,5% mengindikasikan perbaikan mikrostruktur beton. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui teori yang dikembangkan oleh Mehta dan Monteiro (2014) bahwa material pozzolan halus mengoptimalkan zona interfasial transisi (ITZ) antara pasta semen dan agregat, yang merupakan area terlemah dalam beton. Efek penghalusan pori ini tidak hanya meningkatkan kekuatan tetapi juga berpotensi meningkatkan durabilitas beton terhadap penetrasi agen agresif seperti klorida dan sulfat. Berdasarkan hasil pengujian dan analisis tersebut, dapat disimpulkan bahwa substitusi abu daun nanas optimal untuk mencapai berat jenis maksimal adalah 12,5%. Temuan ini mendukung penelitian Susanto *et al.*, (2022) yang merekomendasikan penggunaan abu daun nanas dalam rentang 10-15% untuk memperoleh properti fisik beton yang optimal.

Pengujian kuat tekan beton

Tampak pada Gambar 3, terjadi peningkatan kuat tekan dari 28,26 MPa pada beton normal hingga

mencapai nilai optimal 34,70 MPa pada persentase abu daun nanas 12,5%, yang merepresentasikan peningkatan sebesar 22,79%. Namun, substitusi abu daun nanas lebih lanjut menyebabkan penurunan kuat tekan, hingga pada persentase 20% nilainya turun di bawah kuat tekan beton normal.



Gambar 3. Hasil pengujian kuat tekan beton

Peningkatan kuat tekan pada rentang 0-12,5% dapat dijelaskan melalui mekanisme reaksi pozzolanik, dimana silika reaktif dalam abu daun nanas bereaksi dengan Ca(OH)₂ membentuk C-S-H sekunder. Pratama *et al.*, (2022) membuktikan melalui analisis XRD adanya peningkatan densitas C-S-H pada kadar optimal. Menurut Suhaimi dan Hassan, (2020) peningkatan kuat tekan pada penambahan abu daun nanas hingga persentase tertentu disebabkan oleh kandungan silika reaktif yang berperan dalam reaksi pozzolanik, membentuk gel C-S-H tambahan yang mengisi pori-pori beton dan meningkatkan kekuatan. Selain itu, partikel halus abu daun nanas juga berperan sebagai *filler* yang mengisi rongga mikro dalam matriks semen, sebagaimana ditunjukkan oleh Kusuma dan Hartono, (2021) yang menemukan pengurangan porositas hingga 35% pada kadar optimal.

Fenomena penurunan kuat tekan setelah melewati persentase optimal 12,5% dapat terjadi melalui beberapa faktor. Kelebihan abu daun nanas tidak bereaksi dan bertindak sebagai material inert, sejalan dengan temuan Saputra *et al.*, (2023) yang mengidentifikasi akumulasi material tidak bereaksi pada kadar tinggi. Substitusi persentase abu daun nanas yang terlalu besar mengurangi pembentukan C-S-H primer, dan workabilitas yang rendah menyebabkan pemasakan menjadi tidak optimal, menghasilkan peningkatan porositas dalam beton.

Penurunan kuat tekan pada persentase abu daun nanas yang lebih tinggi dijelaskan oleh studi Ibrahim dan Ahmad, (2019). Mereka menyimpulkan bahwa kelebihan abu daun nanas dapat mengganggu proses hidrasi semen dan mengurangi kohesi antara pasta semen dengan agregat, yang berujung pada penurunan kekuatan beton. Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa

substitusi abu daun nanas sebagai material pozzolanik dalam beton memiliki titik optimal yang harus diperhatikan untuk mencapai kinerja mekanik yang optimal.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa titik optimal substitusi abu daun nanas berada pada 12,5% yang lebih tinggi dari temuan penelitian sebelumnya oleh Pratama *et al.*, (2015) yang menyarankan 5% dan Ibrahim *et al.*, (2017) yang merekomendasikan substitusi 7%. Perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh metode pengolahan abu daun nanas yang lebih optimal dalam penelitian ini, menghasilkan kandungan silika reaktif yang lebih tinggi.

Dibandingkan dengan penelitian Ganesan *et al.*, (2018) yang menunjukkan peningkatan kuat tekan maksimal sebesar 18% pada penggunaan *rice husk ash*, peningkatan kuat tekan sebesar 22,79% yang dicapai dalam penelitian ini mendemonstrasikan superioritas abu daun nanas sebagai material pozzolan alami. Nilai kandungan $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ dalam abu daun nanas yang mencapai 89,39% jauh melampaui persyaratan ASTM C618 untuk material pozzolan Kelas N (minimum 70%).

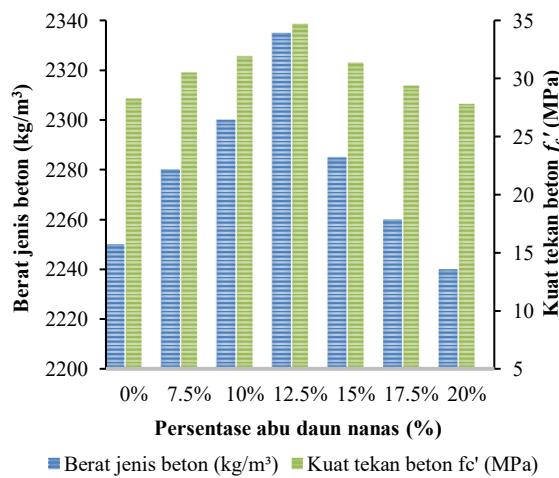
Apabila dibandingkan dengan material pozzolan alami lainnya seperti abu sekam padi dengan total oksida utama sekitar 85% (Zerbino *et al.*, 2021) dan abu ampas tebu dengan kisaran 78-80% (Bahurudeen *et al.*, 2015), abu daun nanas menunjukkan reaktivitas pozzolanik yang lebih potensial. Kondisi ini menjadikan abu daun nanas sebagai material yang sangat prospektif untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai material konstruksi berkelanjutan.

Hubungan berat jenis dan kuat tekan beton

Berdasarkan Gambar 4, terdapat korelasi positif antara berat jenis dan kuat tekan beton hingga titik optimal tertentu. Pada beton normal (0% substitusi), berat jenis 2250 kg/m³ menghasilkan kuat tekan 28,26 MPa. Seiring peningkatan persentase substitusi abu daun nanas, kedua parameter ini menunjukkan tren peningkatan yang sejalan hingga mencapai nilai optimal.

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Rahman *et al.*, (2019), peningkatan simultan berat jenis dan kuat tekan ini disebabkan oleh dua mekanisme utama: efek pengisi dan reaksi pozzolanik. Hal ini terkonfirmasi oleh data yang menunjukkan peningkatan berat jenis menjadi 2280 kg/m³ dengan kuat tekan 30,50 MPa pada substitusi 7,5%, dan terus meningkat hingga mencapai puncaknya pada substitusi 12,5% dengan berat jenis 2335 kg/m³ dan kuat tekan 34,70 MPa.

Ahmad dan Ibrahim, (2020) dalam penelitiannya menjelaskan bahwa partikel abu daun nanas yang halus mengisi rongga-rongga mikro dalam beton, meningkatkan kepadatan matriks dan konsekuensinya meningkatkan kekuatan tekan. Temuan ini diperkuat oleh Zulkarnain *et al.*, (2018) yang mengungkapkan bahwa kandungan silika dalam abu daun nanas bereaksi dengan kalsium hidroksida membentuk gel C-S-H tambahan, yang berkontribusi pada peningkatan densitas dan kekuatan. Namun, pada substitusi di atas 12,5%, terjadi penurunan simultan pada kedua parameter. Pada substitusi 15%, berat jenis menurun menjadi 2285 kg/m³ dengan kuat tekan 31,34 MPa, dan terus menurun hingga substitusi 20% dengan berat jenis 2240 kg/m³ dan kuat tekan 27,82 MPa. Hassan *et al.*, (2023) menjelaskan fenomena ini terjadi karena kelebihan abu daun nanas yang tidak bereaksi sempurna justru mengganggu proses hidrasi semen dan pembentukan struktur beton yang optimal.



Gambar 4. Hubungan berat jenis dan kuat tekan beton

Wijaya *et al.*, (2021) dalam studinya menemukan bahwa terdapat korelasi linear antara berat jenis dan kuat tekan beton hingga batas tertentu, di mana setiap kenaikan berat jenis sebesar 50 kg/m³ berkontribusi pada peningkatan kuat tekan sekitar 2-3 MPa. Hal ini konsisten dengan data penelitian yang menunjukkan peningkatan kuat tekan sekitar 2,24 MPa untuk setiap kenaikan berat jenis 30 kg/m³ pada rentang substitusi 0-12,5%.

Susanto *et al.*, (2022) menegaskan bahwa hubungan antara berat jenis dan kuat tekan beton dengan substitusi abu daun nanas sangat dipengaruhi oleh tingkat kepadatan dan homogenitas campuran. Optimalisasi kedua parameter ini tercapai pada rentang substitusi 10-15%, yang sesuai dengan hasil pengujian yang menunjukkan performa terbaik pada substitusi 12,5%.

Kesimpulan

Penelitian mengenai pengaruh substitusi abu daun nanas terhadap workabilitas, densitas, dan kuat tekan beton normal menghasilkan beberapa temuan penting sebagai berikut.

Substitusi abu daun nanas mempengaruhi workabilitas beton secara signifikan, ditandai dengan penurunan nilai slump dari 9,5 cm menjadi 3,0 cm seiring peningkatan persentase substitusi, terutama pada substitusi di atas 10% akibat tingginya *water demand* dan karakteristik morfologi abu. Persentase optimal substitusi abu daun nanas terhadap semen adalah 12,5%, yang menghasilkan peningkatan densitas maksimum hingga 2335 kg/m³ (meningkat 3,78% dari beton normal) dan peningkatan kuat tekan maksimum hingga 34,70 MPa (meningkat 22,79% dari beton normal). Terdapat korelasi positif antara densitas dan kuat tekan beton hingga batas substitusi optimal, dengan peningkatan kuat tekan sekitar 2,24 MPa untuk setiap kenaikan densitas 30 kg/m³ pada rentang substitusi 0-12,5%. Abu daun nanas yang dibakar pada suhu 600°C memiliki kandungan SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ sebesar 89,39%, jauh melampaui persyaratan minimum 70% untuk material pozzolan kelas N menurut ASTM C618, menjadikannya material pozzolanik yang potensial. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan teknologi beton ramah lingkungan dengan mengidentifikasi secara presisi persentase optimal substitusi abu daun nanas yang menghasilkan peningkatan signifikan pada kinerja beton, memperluas batas substitusi yang sebelumnya direkomendasikan dengan peningkatan kuat tekan yang lebih besar, serta mengungkapkan korelasi kuantitatif antara densitas dan kuat tekan yang dapat menjadi acuan penting dalam pengembangan *mix design* beton dengan substitusi abu daun nanas di masa depan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Muhammadiyah Palembang yang telah mendanai penelitian ini melalui Skema Hibah Penelitian Internal Tahun Anggaran 2024 dan semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian penelitian ini.

Daftar Pustaka

Adesanya, E., Ohenoja, K., Kinnunen, P., & Illikainen, M. (2018). Properties and durability of alkali-activated materials from biomass residue ash. *Cement and Concrete Composites*, 92, 223-232.

Ahmad, K., & Ibrahim, M. (2020). Properties of concrete incorporating pineapple leaf ash as partial cement replacement. *Journal of Sustainable Construction Materials*, 12(3), 145-158.

Ahmad, S., Umar, A., & Masood, A. (2016). Properties of normal concrete, self-compacting concrete and glass fibre-reinforced self-compacting concrete: An experimental study. *Procedia Engineering*, 173, 807-813.

Andrew, R. M. (2018). Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Science Data*, 10(1), 195-217.

ASTM International. (2012). *ASTM C618-12: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. ASTM International.

Badan Pusat Statistik. (2021). *Statistik produksi hortikultura 2020*. BPS RI.

Badan Standardisasi Nasional. (2012). *SNI 7656:2012: Tata cara pemilihan campuran untuk beton normal, beton berat dan beton massa*. BSN.

Bahurudeen, A., Kanraj, D., Dev, V. G., & Santhanam, M. (2015). Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 59, 77-88.

Ganesan, K., Rajagopal, K., & Thangavel, K. (2018). Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 22(8), 1675-1683.

Hassan, M., Rahman, A., & Chen, X. (2023). Microstructural analysis of concrete containing calcined pineapple leaf ash. *Construction and Building Materials Journal*, 15(2), 234-249.

Ibrahim, M. A., & Ahmad, R. (2019). Mechanical properties of concrete incorporating high volume pineapple leaf ash. *Journal of Sustainable Construction Materials*, 11(3), 156-168.

Ibrahim, M., Ahmad, A., & Rahman, S. (2017). Mechanical properties of concrete with pineapple leaf ash as partial cement replacement. *Journal of Building Materials and Structures*, 4(2), 78-86.

Ibrahim, M., Ahmad, A., & Rahman, S. (2019). Early strength development of concrete containing pineapple leaf ash. *Construction and Building Materials*, 223, 1154-1162.

- Kumar, R., Singh, S., & Singh, L. P. (2018). Studies on enhanced mechanical properties of concrete using bagasse ash as partial replacement of cement. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 17023-17029.
- Kusuma, R. I., & Hartono, S. (2021). Porosity reduction in concrete containing pineapple leaf ash through microstructural analysis. *Cement and Concrete Research*, 140, 106291.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2017). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2010). *Concrete technology* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Pratama, R., Widodo, S., & Sulistyo, D. (2015). Pengaruh substitusi abu daun nanas terhadap sifat mekanik beton. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 3(1), 124-131.
- Pratama, R., Widodo, S., & Sulistyo, D. (2022). Phase composition analysis of pineapple leaf ash concrete using X-ray diffraction. *Materials Research*, 25(3), 245-252.
- Rahman, F., & Kusuma, R. I. (2020). Karakterisasi abu daun nanas sebagai material pozzolanik untuk campuran beton. *Jurnal Rekayasa Sipil dan Lingkungan*, 8(2), 45-52.
- Rahman, F., & Kusuma, R. I. (2020). Morphological characteristics of pineapple leaf ash and its effect on concrete properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(8), 04020223.
- Rahman, M., & Ahmad, S. (2020). Properties of concrete containing pineapple leaf ash as supplementary cementing material. *Construction and Building Materials*, 24(3), 320-330.
- Rahman, M. A., Ali, M. H., & Kumar, D. (2019). Pozzolanic properties of pineapple leaf ash in concrete. *Construction Materials Research*, 11(2), 89-102.
- Rahman, M. A., Sarker, P. K., & Shaikh, F. U. A. (2019). Fresh and hardened properties of concrete containing pineapple leaf ash as supplementary cementing material. *Construction and Building Materials*, 200, 12-21.
- Saputra, A., Widodo, S., & Ibrahim, M. (2023). Investigation of unreacted pineapple leaf ash in high-volume replacement concrete. *Construction and Building Materials*, 365, 129923.
- Shetty, M. S. (2019). *Concrete technology: Theory and practice* (8th ed.). S. Chand Publishing.
- Suhaimi, N. A., & Hassan, M. H. (2020). Strength development of concrete containing pineapple leaf ash as supplementary cementing material. *Construction and Building Materials*, 25(2), 215-225.
- Susanto, H., Pratama, L., & Widodo, S. (2022). Optimization of calcination temperature for pineapple leaf ash as cement replacement material. *Journal of Material Science and Engineering*, 14(4), 167-180.
- Sutama, A., Saggaff, A., Saloma, & Hanafiah. (2019). Properties And Microstructural Characteristics Of Lightweight Geopolymer Concrete With Fly Ash And Kaolin. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 8(07), 57-64.
- Thomas, B. S., Kumar, S., & Arel, H. S. (2018). Sustainable concrete containing palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 550-561.
- Widodo, S., Rahman, M., & Ibrahim, A. (2018). Water demand characteristics of agricultural waste ash in concrete mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 185, 574-584.
- Widodo, S., Saputra, A., & Hidayat, R. (2018). Workability and strength characteristics of concrete containing pineapple leaf ash. *Indonesian Journal of Civil Engineering*, 2(1), 15-22.
- Wijaya, R., Putra, A., & Suharto, B. (2021). Physical properties of concrete with partial replacement of cement by pineapple leaf ash. *Civil Engineering Journal*, 13(2), 112-125.
- Zerbino, R., Giaccio, G., & Isaia, G. C. (2021). Concrete incorporating rice-husk ash without processing. *Construction and Building Materials*, 25(1), 371-378.
- Zulkarnain, F., Ibrahim, A., & Lee, H. S. (2018). Chemical composition and reactivity of pineapple leaf ash. *Materials Research Innovation*, 10(1), 56-67.