

PENGARUH SERBUK LIMBAH GYPSUM SEBAGAI SUBSTITUSI SEMEN TERHADAP KUAT TEKAN DAN KARAKTERISTIK PORI BETON: ANALISIS MIKROSTRUKTUR DENGAN SEM

Ica Dewi Fitriyani¹, Sugeng Riyanto², Akhmad Suryadi³

Mahasiswa Manajemen Rekayasa Konstruksi, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang¹, Dosen Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang^{2,3}

Email: icadewi95@gmail.com¹, sugeng.riyanto@polinema.ac.id², akhmad.suryadi@polinema.ac.id³

ABSTRAK

Tingginya emisi CO₂ dari industri semen mendorong pemanfaatan limbah konstruksi, seperti gypsum, sebagai substitusi parsial semen. Meskipun gypsum dapat bertindak sebagai filler, kelebihan sulfat dapat memicu ekspansi ettringite sekunder yang merusak beton. Penelitian eksperimental deskriptif-kuantitatif ini mengkaji pengaruh substitusi serbuk limbah gypsum (3%, 5%, dan 7%) terhadap workability, kuat tekan, kuat tarik belah, dan mikrostruktur beton (fc' 20 MPa). Pengujian meliputi uji slump, kuat tekan dan tarik belah (umur 7, 14, 28 hari), XRF, serta SEM. Hasil menunjukkan workability stabil pada slump 7,00–7,33 cm. Namun, substitusi memicu penurunan progresif pada kuat tekan umur 28 hari: dari 23,14 MPa (0%), 20,31 MPa (3%), 17,14 MPa (5%), hingga 13,36 MPa (7%). Kuat tarik belah juga menurun dari 2,31 MPa menjadi 1,58 MPa. Analisis SEM mengonfirmasi degradasi matriks dan pertumbuhan masif ettringite sekunder pada kadar 5–7%. Secara ekonomi, penghematan biaya dari variasi 7% sangat marginal (Rp17.342,00/m³ atau <1% dari biaya beton normal). Kesimpulannya, substitusi limbah gypsum masih layak dipertimbangkan pada kadar di bawah 5%, sedangkan kadar 7% memicu degradasi struktural signifikan sehingga tidak direkomendasikan untuk elemen beton struktural.

Kata kunci : limbah gypsum; substitusi semen; kuat tekan beton; *Scanning Electron Microscope* (SEM); konstruksi berkelanjutan

ABSTRACT

Tingginya emisi CO₂ dari industri semen mendorong pemanfaatan limbah konstruksi, seperti gypsum, sebagai substitusi parsial semen. Meskipun gypsum dapat bertindak sebagai filler, kelebihan sulfat dapat memicu ekspansi ettringite sekunder yang merusak beton. Penelitian eksperimental deskriptif-kuantitatif ini mengkaji pengaruh substitusi serbuk limbah gypsum (3%, 5%, dan 7%) terhadap workability, kuat tekan, kuat tarik belah, dan mikrostruktur beton (fc' 20 MPa). Pengujian meliputi uji slump, kuat tekan dan tarik belah (umur 7, 14, 28 hari), XRF, serta SEM. Hasil menunjukkan workability stabil pada slump 7,00–7,33 cm. Namun, substitusi memicu penurunan progresif pada kuat tekan umur 28 hari: dari 23,14 MPa (0%), 20,31 MPa (3%), 17,14 MPa (5%), hingga 13,36 MPa (7%). Kuat tarik belah juga menurun dari 2,31 MPa menjadi 1,58 MPa. Analisis SEM mengonfirmasi degradasi matriks dan pertumbuhan masif ettringite sekunder pada kadar 5–7%. Secara ekonomi, penghematan biaya dari variasi 7% sangat marginal (Rp17.342,00/m³ atau <1% dari biaya beton normal). Kesimpulannya, substitusi limbah gypsum masih layak dipertimbangkan pada kadar di bawah 5%, sedangkan kadar 7% memicu degradasi struktural signifikan sehingga tidak direkomendasikan untuk elemen beton struktural.

Keywords : waste gypsum; cement substitution; concrete compressive strength; *Scanning Electron Microscope* (SEM), sustainable

1. PENDAHULUAN

Sektor konstruksi di Indonesia menunjukkan tren pertumbuhan yang signifikan seiring dengan program pembangunan infrastruktur nasional. Kondisi ini

berimplikasi pada peningkatan kebutuhan material konstruksi, khususnya beton yang hingga saat ini masih mendominasi penggunaan material struktural [1]. Dalam sistem beton, semen Portland memegang peranan vital

sebagai bahan pengikat yang menyatukan agregat halus dan kasar membentuk massa komposit yang padat. Namun demikian, produksi semen konvensional merupakan salah satu sumber emisi karbon terbesar di sektor industri material, berkontribusi sekitar 7–8% terhadap total emisi CO₂ global dengan konsumsi energi produksi berkisar 2–3 GJ per ton semen [2]. Tingginya dampak lingkungan tersebut mendorong berkembangnya pendekatan konstruksi berkelanjutan yang berfokus pada reduksi penggunaan semen melalui pemanfaatan material substitusi berbasis limbah industri maupun limbah konstruksi [3], [4].

Salah satu arus limbah konstruksi yang belum termanfaatkan optimal adalah limbah gypsum yang dihasilkan dari aktivitas pembongkaran gedung, pekerjaan partisi interior, dan sisa papan gypsum. Sebagian besar limbah gypsum di Indonesia berakhir di tempat pembuangan akhir tanpa proses daur ulang, sehingga berpotensi meningkatkan volume limbah padat dan menimbulkan permasalahan lingkungan jangka panjang [5]. Secara kimiawi, gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) mengandung kalsium sulfat yang memiliki peran ganda dalam sistem semen: sebagai pengatur waktu ikat dan sebagai material pengisi (filler) yang dapat memadatkan matriks mikrostruktur [6], [7]. Beberapa studi terkini melaporkan bahwa substitusi parsial semen dengan serbuk gypsum pada kadar rendah mampu mempertahankan bahkan meningkatkan kuat tekan beton akibat perbaikan distribusi pori dan peningkatan packing density pada skala mikro [7], [8].

Namun demikian, pemanfaatan gypsum sebagai bahan substitusi semen memiliki batasan teknis yang krusial. Kelebihan kandungan sulfat dalam campuran beton berpotensi memicu pembentukan ettringite ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) sekunder pada umur lanjut, yang bersifat ekspansif dan dapat menyebabkan peningkatan porositas, munculnya retak mikro, serta degradasi sifat mekanik beton [6], [9]. Perubahan struktur pori akibat reaksi sulfat tersebut secara langsung berkorelasi dengan penurunan kinerja mekanis, khususnya kuat tekan, dan meningkatkan kerentanan terhadap penetrasi air serta zat agresif dari lingkungan [8]. Sejumlah penelitian eksperimental menunjukkan bahwa penggunaan serbuk limbah gypsum sebagai substitusi semen pada kisaran 3–5% cenderung memberikan kinerja mekanik yang optimal, sementara peningkatan kadar hingga 7% atau lebih sering dilaporkan menyebabkan penurunan kuat tekan signifikan akibat ketidakseimbangan reaksi hidrasi [7], [5], [8].

Meskipun sejumlah penelitian telah mengkaji pemanfaatan serbuk gypsum sebagai substitusi semen, terdapat celah penelitian yang signifikan dalam literatur yang ada. Pertama, sebagian besar studi sebelumnya masih terbatas pada

evaluasi sifat mekanik makroskopik (kuat tekan dan workability) tanpa mengaitkan secara komprehensif perubahan kinerja mekanik dengan evolusi mikrostruktur material. Kedua, kajian mendalam terkait perubahan karakteristik pori dan morfologi produk hidrasi akibat substitusi limbah gypsum yang dianalisis menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM) masih relatif terbatas, padahal pemahaman mikrostruktural merupakan kunci untuk menjelaskan mekanisme degradasi atau peningkatan kekuatan pada level material. Ketiga, penelitian yang memfokuskan pada serbuk limbah gypsum dari aktivitas konstruksi bangunan dengan pendekatan kuantitatif terintegrasi antara data mekanis dan analisis mikrostruktur masih jarang dilakukan, terutama dalam konteks material lokal Indonesia.

Berdasarkan latar belakang dan research gap yang telah diuraikan, penelitian ini difokuskan untuk menganalisis pengaruh substitusi serbuk limbah gypsum terhadap workability beton pada variasi 0%, 3%, 5%, dan 7%; menganalisis pengaruh substitusi serbuk limbah gypsum terhadap kuat tekan dan kuat tarik belah beton; mengkaji perubahan karakteristik pori dan mikrostruktur beton akibat penambahan serbuk limbah gypsum menggunakan analisis SEM dan mengaitkannya dengan kinerja mekanik beton; serta mengevaluasi kelayakan ekonomi pemanfaatan serbuk limbah gypsum melalui analisis biaya produksi beton per m³.

2. METODE

2.1 Material dan Bahan

Material yang digunakan meliputi: (1) Semen Portland Composite Cement (PCC) Tipe I produksi PT Semen Gresik; (2) Agregat halus berupa pasir alam (pasir cor) dari Lumajang; (3) Agregat kasar berupa batu pecah (kerikil) dari Pasuruan dengan ukuran maksimum nominal 20 mm; (4) Air bersih dari Laboratorium Uji Bahan Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Malang; dan (5) Serbuk limbah gypsum yang diperoleh dari sisa material papan gypsum industri konstruksi di Dusun Menunggal, Desa Sekargadung, Pungging, Mojosari, Kabupaten Mojokerto. Limbah gypsum diolah dengan cara dikeringkan, digiling, dan disaring hingga diperoleh serbuk dengan ukuran butiran relatif halus dan seragam mendekati kehalusan semen.

2.2 Pengujian Karakteristik Material

Sebelum perancangan campuran, dilakukan pengujian karakteristik fisik material meliputi: kadar air agregat (SNI 1971:2011), gradasi agregat (SNI 1968:2008), berat jenis dan penyerapan agregat (SNI 1969:2016 untuk kasar; SNI 1970:2016 untuk halus), kadar lumpur agregat (SNI 03-4142-1996), berat isi agregat (ASTM C29-71), keausan agregat kasar dengan mesin Los Angeles (SNI 03-2417-2008),

kekerasan agregat kasar (SNI S-04-1989-F), serta berat jenis semen dan gypsum menggunakan alat Le Chatelier. Hasil pengujian menunjukkan seluruh material memenuhi persyaratan standar untuk perancangan campuran beton normal.

2.3 Perancangan Campuran Beton

Perancangan campuran mengacu pada SNI 7656:2012 dengan parameter sebagai berikut: mutu beton rencana f_c' 20 MPa; faktor air semen (FAS) 0,60; jenis semen PCC; ukuran maksimum agregat kasar 20 mm; dan nilai slump rencana 60–180 mm. Perhitungan mix design menghasilkan komposisi material per 1 m³ beton: air 155,76 kg; semen 341,67 kg; agregat halus 844,16 kg; dan agregat kasar 1045,92 kg. Variasi substitusi serbuk limbah gypsum dilakukan terhadap berat semen dengan persentase 0% (kontrol), 3%, 5%, dan 7%. Komposisi campuran disesuaikan dengan koreksi kadar air dan penyerapan agregat.

2.4 Pembuatan dan Perawatan Benda Uji

Benda uji berupa silinder beton Ø150×300 mm dengan jumlah total 48 silinder (4 variasi × 3 umur × 3 ulangan untuk kuat tekan, ditambah 4 silinder untuk uji SEM pada umur 28 hari). Proses pencampuran menggunakan mesin mixer dengan urutan: agregat kasar dan halus diaduk 30 detik, ditambahkan semen dan gypsum diaduk 30 detik, ditambahkan 50% air diaduk 1 menit, dan sisa air diaduk 2–3 menit hingga homogen. Workability beton segar diuji dengan slump test (SNI 1972:2008). Pengecoran dilakukan dalam tiga lapis dengan pemadatan masing-masing 25 kali pukulan batang pemadat. Perawatan beton (curing) dilakukan dengan perendaman dalam air bersih pada suhu $23 \pm 2^\circ\text{C}$ sesuai ASTM C192 hingga umur pengujian.

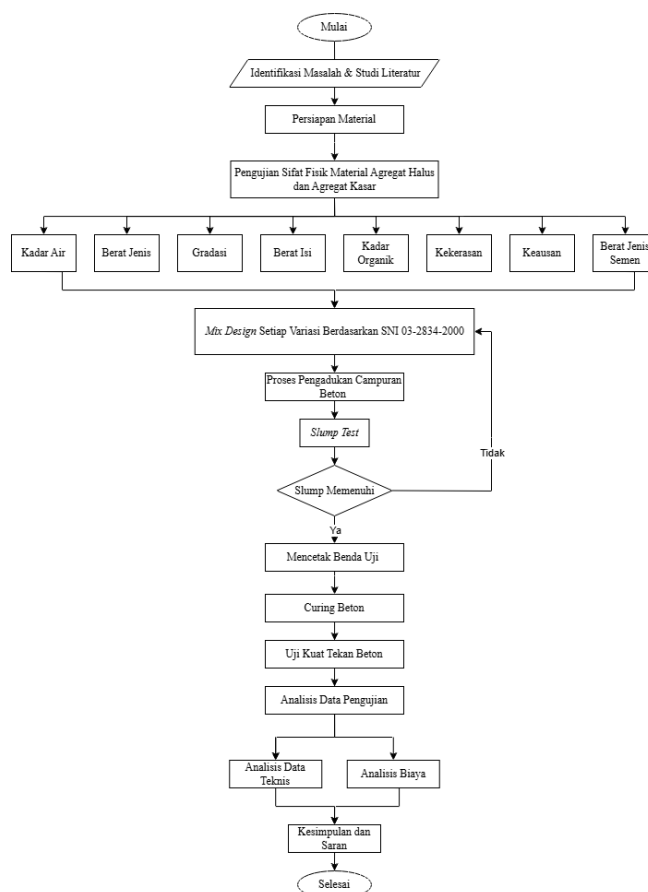
2.4 Pengujian Mekanis dan Mikrostruktural

Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada umur 7, 14, dan 28 hari menggunakan Compression Testing Machine (CTM) sesuai SNI 1974:2011. Pengujian kuat tarik belah dilakukan pada umur 28 hari dengan metode pembebanan diametral (splitting tensile strength) sesuai SNI 03-2491-2002. Analisis mikrostruktur menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM) pada sampel pasta semen umur 28 hari dengan preparasi meliputi penghentian reaksi hidrasi, pengeringan suhu rendah, pelapisan material konduktif (emas/karbon), dan pengamatan pada variasi perbesaran 1000×, 5000×, 8000×, dan 9000×. Analisis XRF dilakukan untuk karakterisasi komposisi kimia serbuk gypsum pada setiap variasi.

2.4 Analisis Data

Data kuat tekan dan tarik belah dianalisis secara statistik deskriptif dengan menghitung nilai rata-rata dan deviasi

standar. Analisis SEM dilakukan secara kualitatif dengan membandingkan morfologi pori, densitas matriks, dan identifikasi produk hidrasi antar variasi. Hubungan antara perubahan mikrostruktur dan kinerja mekanik dianalisis secara analitis untuk menjelaskan mekanisme degradasi atau peningkatan kekuatan. Analisis biaya dilakukan dengan menyusun Rencana Anggaran Biaya (RAB) per m³ beton untuk setiap variasi. Untuk memudahkan Analisa penelitian maka dibentuk diagram alir sebagai berikut.



Gambar 2 Alur Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Material dan Workability

Hasil pengujian sifat fisik agregat menunjukkan bahwa agregat halus (pasir Lumajang) memiliki kadar air 8,39%, berat jenis SSD 2,64, penyerapan 1,75%, dan gradasi zona II (sedang). Agregat kasar (kerikil Pasuruan) memiliki kadar air 1,75%, berat jenis SSD 2,71, penyerapan 2,07%, keausan 10,57%, dan kekerasan 24,08%. Seluruh parameter memenuhi persyaratan standar untuk beton normal. Berat jenis semen PCC adalah 2,94 gr/cm³, sedangkan berat jenis serbuk limbah gypsum adalah 2,261 gr/cm³.

Analisis XRF menunjukkan dominasi kalsium (Ca) pada serbuk gypsum dengan kandungan 81,75% (3%), 84,37%

(5%), dan 84,22% (7%), dengan kandungan belerang (S) masing-masing 0,61%, 1,80%, dan 2,20% yang menunjukkan peningkatan proporsional seiring kenaikan variasi substitusi.

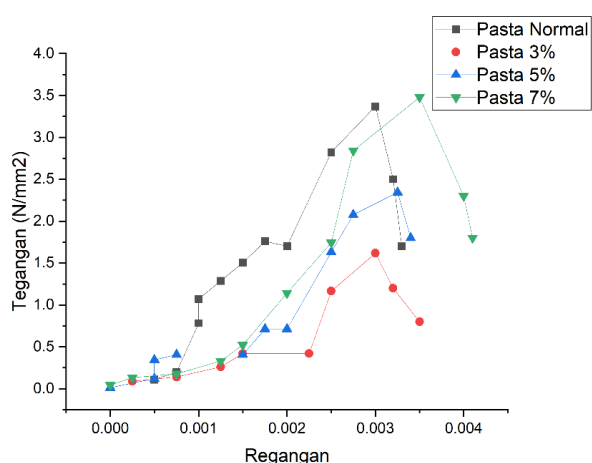
Hasil pengujian slump test menunjukkan nilai rata-rata 7,33 cm (0%), 7,00 cm (3%), 7,33 cm (5%), dan 7,33 cm (7%). Fluktuasi nilai slump yang sangat tipis (rentang 7,00–7,33 cm) mengindikasikan bahwa penambahan serbuk limbah gypsum hingga batas 7% tidak memberikan dampak signifikan terhadap workability beton segar. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui dua mekanisme yang saling berlawanan: secara negatif, partikel gypsum yang halus meningkatkan luas permukaan spesifik sehingga menyerap sebagian air campuran dan cenderung menurunkan workability; namun secara positif, partikel gypsum berfungsi sebagai filler yang memperbaiki kohesi campuran dan mengurangi segregasi [10]. Pada kadar substitusi yang diuji, kedua mekanisme tersebut tampaknya mencapai keseimbangan sehingga workability tetap dalam rentang yang dapat diterima untuk pelaksanaan di lapangan.

3.2 Kuat Tekan Beton

Hasil pengujian kuat tekan beton pada umur 7, 14, dan 28 hari disajikan pada Tabel 3.

Tabel 1 Tabel Hasil Uji Kuat Tekan

Variasi Gypsum	Umur 7 Hari (MPa)	Umur 14 Hari (MPa)	Umur 28 Hari (MPa)
0% (Kontrol)	20,42	21,30	23,14
3%	14,64	12,13	20,31
5%	12,04	11,19	17,14
7%	11,10	11,64	13,36



Gambar 3 Grafik Hasil Uji Kuat Tekan

Analisis tren kuat tekan menunjukkan pola yang konsisten pada seluruh variasi: peningkatan kekuatan seiring bertambahnya umur perawatan, yang mengkonfirmasi

kelangsungan proses hidrasi semen. Beton kontrol (0%) menunjukkan peningkatan kuat tekan dari 20,42 MPa (7 hari) menjadi 23,14 MPa (28 hari), dengan rasio kekuatan 7/28 hari sebesar 88,2% yang mengindikasikan laju hidrasi normal. Namun, terdapat anomali pada variasi 3% dan 7% di mana kuat tekan umur 14 hari lebih rendah dibandingkan umur 7 hari (3%: 12,13 vs 14,64 MPa; 7%: 11,64 vs 11,10 MPa). Fenomena ini dapat dijelaskan oleh mekanisme delayed ettringite formation (DEF) di mana reaksi sulfat dari gypsum pada fase awal belum sepenuhnya stabil, menyebabkan fluktuasi kekuatan sementara sebelum kondisi hidrasi mencapai ekuilibrium [6].

Pada umur 28 hari, terlihat tren penurunan kuat tekan yang progresif seiring kenaikan kadar substitusi gypsum. Dibandingkan dengan beton kontrol (23,14 MPa), penurunan kekuatan masing-masing sebesar 12,2% (3%), 25,9% (5%), dan 42,3% (7%). Penurunan ini dapat dijelaskan melalui tiga mekanisme utama. Pertama, dilution effect: penambahan gypsum mengurangi volume semen aktif yang berperan dalam produksi gel C-S-H sebagai penopang kekuatan utama. Kedua, filler effect: pada kadar rendah (3%), partikel gypsum masih efektif mengisi rongga mikro dan memadatkan matriks, sehingga penurunan kekuatan relatif moderat. Ketiga, ettringite expansion: pada kadar 5% dan 7%, kandungan sulfat berlebih memicu pembentukan ettringite sekunder yang ekspansif, menciptakan tegangan internal dan retak mikro yang merusak integritas matriks [7], [9].

Perbandingan dengan studi terdahulu menunjukkan kesesuaian tren. Li et al. [7] melaporkan kuat tekan optimal pada substitusi gypsum 5% untuk beton dengan fly ash, namun pada beton tanpa pozzolan tambahan (seperti pada penelitian ini), penurunan kekuatan lebih signifikan. Zhang et al. [8] menemukan kuat tekan maksimum pada rentang 4–6% substitusi gypsum, yang sejalan dengan temuan penelitian ini bahwa batas optimum berada di bawah 5%. Perbedaan nilai absolut kuat tekan antar penelitian dapat dijelaskan oleh variasi sumber gypsum, tingkat kehalusan, dan komposisi kimia semen yang digunakan.

3.3 Kuat Tarik Belah

Nilai kuat tarik belah diperoleh melalui pengujian tekan di laboratorium dengan membebani setiap benda uji silinder secara lateral sampai pada kekuatan maksimumnya yang dinyatakan dalam Mega Pascal (MPa) gaya tiap satuan luas.

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi \cdot L \cdot D}$$

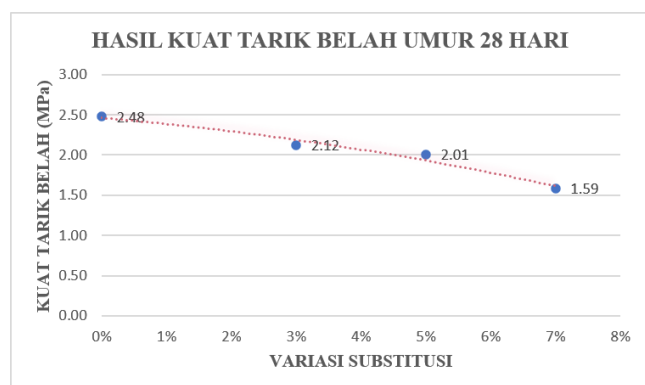
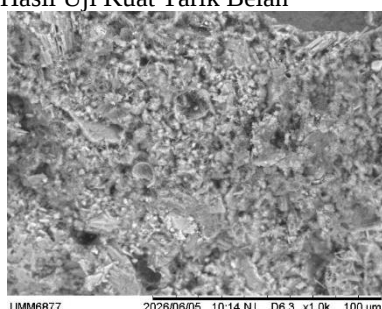
Dimana:

- f_{ct} = kuat tarik belah
- P = beban uji maksimum (beban belah / hancur) dalam newton (N) yang ditunjukkan mesin uji tekan.
- L = panjang benda uji dalam mm
- D = diameter benda uji dalam mm

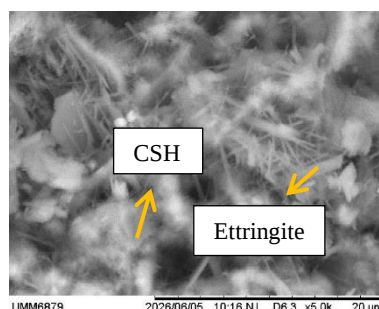
Hasil pengujian kuat tarik belah disajikan pada Tabel 2.

Tabel 1 Hasil Uji Kuat Tarik Belah

Variasi Serbuk Gypsum	Benda Uji	Kuat Tarik Belah (MPa)	Kuat Tarik Belah Rata-Rata (MPa)
0%	BU 1	2.48	2.31
	BU 2	1.98	
	BU 3	2.48	
3%	BU 1	2.12	1.89
	BU 2	1.71	
	BU 3	1.97	
	BU 4	1.77	
5%	BU 1	2.01	1.90
	BU 2	1.92	
	BU 3	1.76	
7%	BU 1	1.59	1.58
	BU 2	1.59	
	BU 3	1.57	

**Gambar 4** Grafik Hasil Uji Kuat Tarik Belah

a) x1000



b) x5000

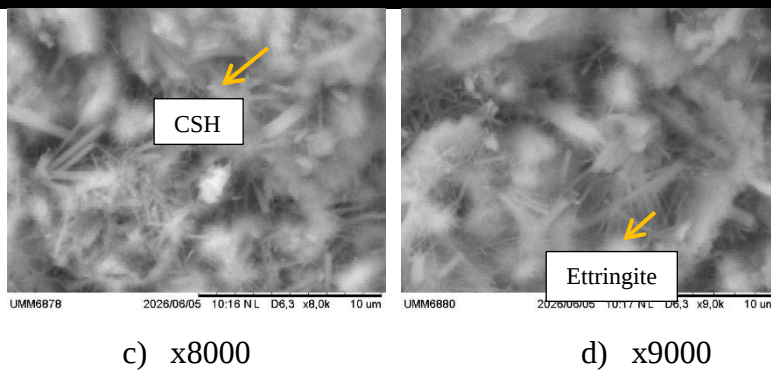
Rasio ini berada dalam rentang teoretis 8–15% yang umum ditemukan pada beton normal [1].

Tren penurunan kuat tarik belah yang konsisten dengan kuat tekan mengindikasikan bahwa mekanisme degradasi mekanis berlaku seragam untuk kedua parameter. Penurunan kuat tarik belah secara spesifik merefleksikan pelemahan *interfacial transition zone* (ITZ) antara pasta semen dan agregat akibat berkurangnya volume semen aktif. Pada kadar 7%, rasio kuat tarik/kuat tekan yang meningkat (11,83%) dibandingkan kontrol (9,98%) mengindikasikan bahwa beton menjadi lebih getas, di mana kemampuan menahan tegangan tarik relative lebih baik dibandingkan kapasitas tekan namun secara absolut kedua parameter menurun drastis. Kondisi ini berkorelasi dengan temuan SEM yang menunjukkan peningkatan porositas dan retak mikro pada variasi 7%.

3.4 Analisis Mikrostruktur dengan SEM

3.4.1 Pasta Normal (0%)

Citra SEM pada perbesaran 1000× menunjukkan matriks pasta yang relatif padat, masif, dan terdistribusi merata tanpa indikasi retak mikro signifikan. Pada perbesaran tinggi (5000×–9000×), teridentifikasi formasi kristal ettringite primer berbentuk jarum memanjang yang tumbuh secara proporsional dan stabil di dalam sela-sela pori kapiler. Di sekeliling kristal jarum tersebut, dominasi gel C-S-H bertekstur amorf yang memadat utuh menciptakan sistem interlocking yang rapat. Kondisi mikrostruktur ideal ini memberikan landasan fisis terhadap capaian kuat tekan tertinggi (23,14 MPa) dan kuat tarik belah optimal (2,31 MPa).

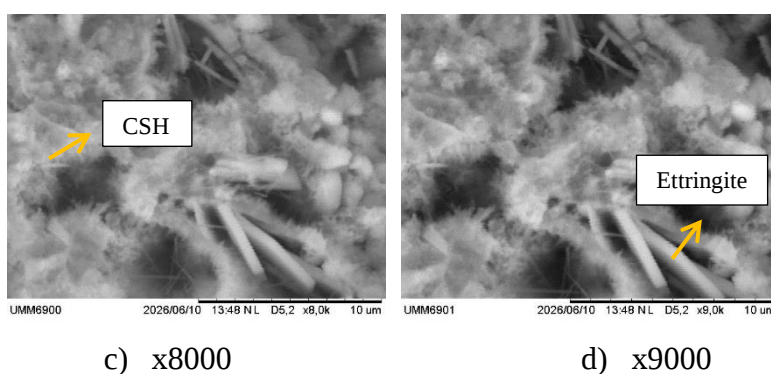
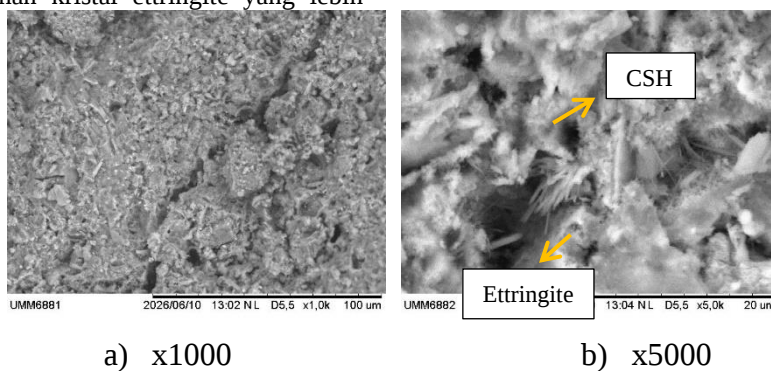


Gambar 5 Hasil Pengujian SEM Pasta Normal

3.4.2 Pasta Gypsum 3%

Transisi ke variasi 3% menampilkan pergeseran mikrostruktur yang terukur. Pada perbesaran 1000 $\times$, permukaan pasta tampak sedikit merenggang dengan kemunculan retakan mikro halus dan rongga kapiler yang sedikit melebar. Fenomena ini merupakan jejak visual dari dilution effect akibat reduksi 3% semen aktif yang mengurangi produk hidrasi utama. Pada perbesaran 5000 $\times$ –9000 $\times$, terlihat pertumbuhan kristal ettringite yang lebih

ekspresif dan menyebar melintasi ruang pori, disertai tekstur amorf gel C-S-H yang masih dominan namun dengan kontinuitas yang berkurang. Meskipun terjadi pelonggaran kepadatan, matriks masih mempertahankan stabilitas struktural yang cukup, sejalan dengan penurunan kuat tekan yang moderat (12,2%). Temuan ini mengkonfirmasi bahwa pada kadar 3%, gypsum masih berfungsi sebagai filler efektif meskipun efek pengenceran mulai terasa.



Gambar 6 Hasil Pengujian SEM Pasta Gypsum 3%

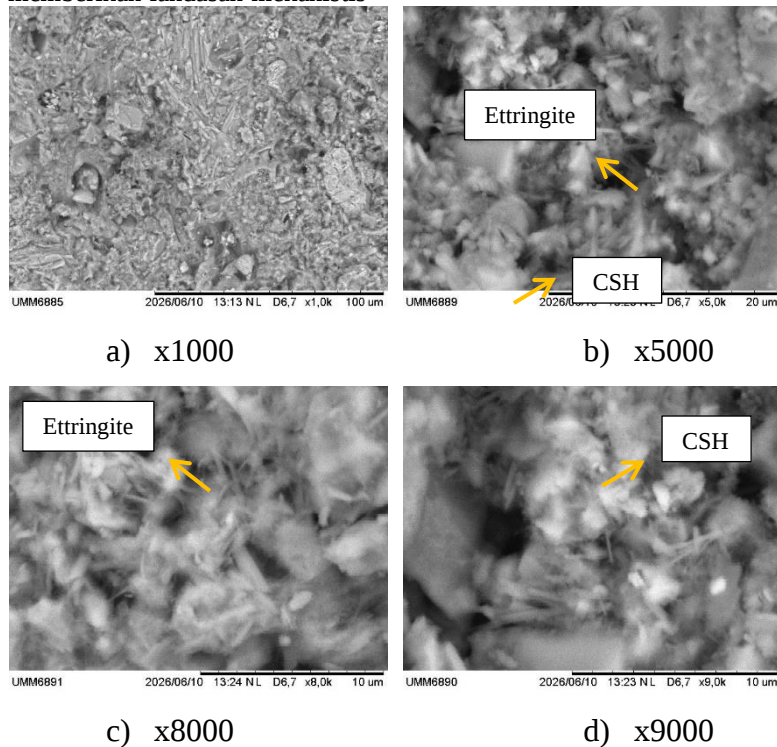
3.4.3 Pasta Gypsum 5%

Pada variasi 5%, degradasi mikrostruktur menjadi semakin kontras. Citra SEM pada perbesaran 1000 $\times$ memperlihatkan rongga-rongga kapiler yang lebih terbuka dan sebaran retak mikro yang tegas membelah permukaan matriks. Efek pengenceran telah mendominasi secara signifikan. Pada

perbesaran 5000 $\times$ –9000 $\times$, teridentifikasi pertumbuhan kristal ettringite yang masif, bertumpuk, dan saling mendesak—indikasi kuat awal terbentuknya ettringite sekunder. Volume gel C-S-H tampak menyusut signifikan, sehingga matriks kewalahan membungkus jaringan kristal yang terus menekan ruang internal. Ketidakseimbangan

antara produksi gel C-S-H yang merosot dan kristal ettringite yang berekspansi ini merusak sistem interlocking secara drastis. Temuan visual ini memberikan landasan mekanistik

terhadap penurunan kuat tekan yang signifikan (25,9%) pada variasi 5%.

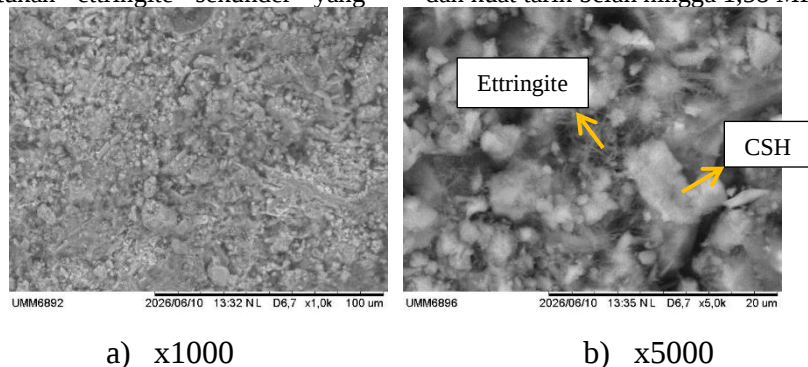


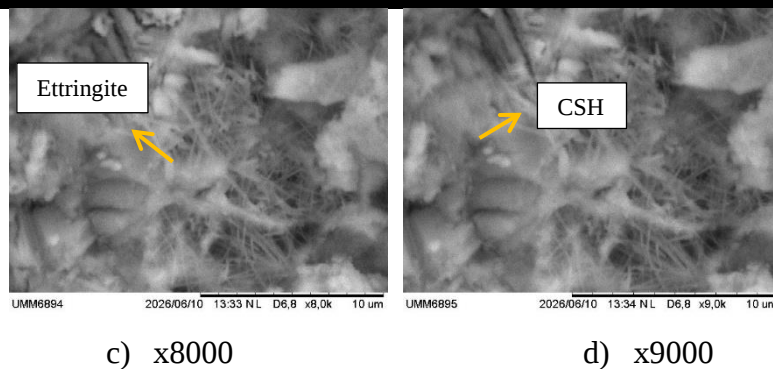
Gambar 7 Hasil Pengujian SEM Pasta Gypsum 5%

3.4.4 Pasta Gypsum 7%

Batas proporsi maksimal 7% menampilkan kondisi mikrostruktur paling parah. Pada perbesaran 1000 $\times$, permukaan pasta didominasi oleh rongga kapiler menganga lebar dan jaringan retak mikro yang panjang serta saling terhubung. Struktur material sangat keropos dan rapuh. Pada perbesaran 5000 $\times$ –9000 $\times$, terjadi "ledakan" pertumbuhan kristal ettringite berbentuk jarum yang sangat masif, acak, dan tidak terkendali. Akumulasi ion sulfat dari 7% gypsum memicu reaksi pembentukan ettringite sekunder yang

ekspansif secara masif. Kritisnya, ledakan volume kristal ini terjadi di saat produksi gel C-S-H berada di titik terendah akibat reduksi proporsi semen. Tanpa kehadiran gel C-S-H yang cukup untuk menyelimuti dan menahan desakan jaringan kristal, ekspansi ettringite berbalik menjadi agen perusak yang menghancurkan kohesi internal matriks. Sistem interlocking hancur berantakan, menyisakan struktur yang sangat kaku dan getas. Fakta visual ini menjelaskan anjloknya kuat tekan hingga 13,36 MPa (penurunan 42,3%) dan kuat tarik belah hingga 1,58 MPa.





Gambar 8 Hasil Pengujian SEM Pasta Gypsum 7%

3.5 Integrasi Temuan Mekanis dan Mikrostruktural

Hubungan antara kuat tekan dan karakteristik pori yang diobservasi melalui SEM mengikuti model teoretis yang telah dikembangkan. Pada beton normal, kepadatan mikrostruktur yang tinggi dengan pori yang terdistribusi secara homogen dan berukuran kecil menghasilkan kuat tekan maksimal. Penambahan gypsum 3% memicu peningkatan porositas namun masih dalam batas yang dapat ditoleransi, sehingga penurunan kekuatan moderat. Kadar 5% menandai titik kritis di mana porositas meningkat signifikan disertai munculnya retak mikro akibat tegangan ekspansif ettringite. Kadar 7% melampaui ambang batas kritis, menciptakan porositas berlebih dan retak yang saling terhubung membentuk jalur kegagalan (percolation path).

Temuan ini sejalan dengan penelitian Zhang et al. [8] yang melaporkan bahwa batas aman substitusi gypsum berada pada rentang 4–6% untuk beton normal tanpa pozzolan tambahan. Di atas batas tersebut, efek destruktif ettringite sekunder mendominasi efek benefisial filler. Perbedaan nilai batas optimum antar penelitian (penelitian ini menunjukkan batas di bawah 5%) dapat dijelaskan oleh variasi kandungan C_3A dalam semen PCC yang digunakan, di mana semen dengan kandungan C_3A lebih tinggi akan lebih reaktif terhadap sulfat sehingga ambang batas optimum gypsum lebih rendah [4].

3.5 Rencana Anggaran Biaya

Hasil rencana anggaran biaya disajikan pada Tabel 3.3.

Tabel 3 Biaya Produksi Per m^3

Variasi Gypsum	Biaya Material Dasar (Rp/ m^3)	Biaya Serbuk Limbah Gypsum (Rp/ m^3)	Total Biaya (Rp/ m^3)
0% (Kontrol)	1,797,960.80	0	1,797,960.80
3%	1,790,960.80	7,687.50	1,790,529.55
5%	1,797,960.80	12,810.00	1,785,577.80
7%	1,797,960.80	17,940.00	1,780,618.80

Analisis biaya produksi beton per 1 m^3 menunjukkan tren penghematan yang konsisten seiring kenaikan kadar substitusi gypsum. Biaya material dasar mengalami penurunan pada variasi 3% (Rp1.790.960,80/ m^3) akibat reduksi penggunaan semen PCC, namun tetap pada variasi 5% dan 7% karena proporsi agregat dan air yang konstan. Biaya serbuk limbah gypsum sebagai material substitusi relatif rendah, masing-masing sebesar Rp7.687,50/ m^3 (3%), Rp12.810,00/ m^3 (5%), dan Rp17.940,00/ m^3 (7%), mencerminkan posisi limbah konstruksi yang tidak memerlukan biaya produksi signifikan.

Berdasarkan Tabel 3, total biaya produksi mengalami penurunan progresif: Rp1.790.529,55/ m^3 pada variasi 3% (penghematan Rp7.431,25 atau 0,41%), Rp1.785.577,80/ m^3 pada variasi 5% (penghematan Rp12.383,00 atau 0,69%), dan Rp1.780.618,80/ m^3 pada variasi 7% (penghematan Rp17.342,00 atau 0,96%). Penghematan maksimal dicapai pada variasi 7% sebesar Rp17.342,00/ m^3 .

Tabel 2 Rekapitulasi Analisis Cost-Benefit Variasi Substitusi Gypsum

Variasi Gypsum	Total Biaya (Rp/ m^3)	Penurunan Biaya (Rp/ m^3)	Kuat Tekan 28 Hari (MPa)	Penurunan Kuat Tekan (%)
0% (Kontrol)	1,797,960.80	0	23,14	0
3%	1,790,529.55	7,687.50	20,31	12,23
5%	1,785,577.80	12,810.00	17,14	25,93
7%	1,780,618.80	17,940.00	13,36	42,26

Analisis cost-benefit pada Tabel 4 mengungkapkan trade-off yang krusial antara efisiensi biaya dan degradasi kinerja

mekanis. Meskipun substitusi gypsum memberikan penghematan biaya yang konsisten, variasi 3% menawarkan keseimbangan optimal dengan penurunan kuat tekan 12,23% yang masih dalam batas toleransi untuk aplikasi struktural, disertai penghematan Rp7.431,25/m³. Sebaliknya, variasi 5% dan 7% mengalami degradasi mekanik signifikan (25,93% dan 42,26%) yang melampaui ambang batas kelayakan struktural, meskipun penghematan biaya lebih besar.

Berdasarkan kriteria kuat tekan minimum 17,5 MPa untuk beton struktural kelas II [16], hanya variasi 0% (23,14 MPa) dan 3% (20,31 MPa) yang memenuhi persyaratan. Variasi 5% (17,14 MPa) berada pada ambang batas dengan margin keamanan tipis, sementara variasi 7% (13,36 MPa) jelas tidak memenuhi. Rekomendasi praktis adalah penerapan variasi 3% sebagai batas maksimal untuk elemen struktural, yang menawarkan keseimbangan optimal antara penghematan biaya dan penurunan kuat tekan yang masih dalam batas toleransi. Pemanfaatan limbah gypsum pada kadar 3% tidak hanya memberikan keuntungan finansial minimal tetapi juga berkontribusi pada pengurangan emisi CO₂ sebesar 10,25 kg semen/m³ beton, sejalan dengan prinsip konstruksi berkelanjutan [2], [3].

4. KESIMPULAN

Berdasarkan serangkaian pengujian, analisis data, dan pembahasan yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Pemanfaatan serbuk limbah gypsum sebagai substitusi semen dengan variasi 0%, 3%, 5%, dan 7% tidak memberikan pengaruh yang berarti terhadap workability beton segar. Hasil pengujian slump menunjukkan nilai rata-rata sebesar 7,33 cm pada beton normal, kemudian sedikit menurun menjadi 7,00 cm pada variasi 3%, lalu kembali stabil di angka 7,33 cm pada variasi 5% maupun 7%. Rentang fluktuasi yang sangat sempit ini, hanya sebesar 0,33 cm, menunjukkan bahwa partikel halus gypsum tidak banyak mengubah kebutuhan air dalam adukan sehingga tingkat keplastisan beton tetap terjaga dan adukan tetap mudah dikerjakan di lapangan hingga batas substitusi 7%.
2. Kuat tekan beton umur 28 hari mengalami penurunan progresif seiring kenaikan kadar substitusi gypsum: 23,14 MPa (0%), 20,31 MPa (3%), 17,14 MPa (5%), dan 13,36 MPa (7%). Kuat tarik belah menunjukkan tren serupa dengan nilai 2,31 MPa (0%) hingga 1,58 MPa (7%). Penurunan ini disebabkan oleh mekanisme *dilution effect* (pengurangan semen aktif) dan *ettringite expansion* (ekspansi kristal sulfat) yang semakin dominan pada kadar tinggi.
3. Analisis SEM mengonfirmasi degradasi mikrostruktur yang berkorelasi langsung dengan penurunan kinerja mekanis. Pada kadar 3%, terjadi pelonggaran kepadatan matriks dengan retak mikro minor. Pada kadar 5%, terjadi peningkatan porositas signifikan dan pertumbuhan ettringite sekunder.

Pada kadar 7%, terjadi ledakan pertumbuhan ettringite masif yang menghancurkan sistem interlocking dan menciptakan struktur yang sangat keropos dan getas.

4. Substitusi serbuk limbah gypsum pada variasi 3%, 5%, dan 7% mempertahankan workability beton (slump 7,00–7,33 cm), namun menurunkan kuat tekan progresif dari 23,14 MPa menjadi 13,36 MPa pada umur 28 hari. Analisis SEM mengonfirmasi degradasi mikrostruktur akibat pertumbuhan ettringite sekunder masif pada kadar $\geq 5\%$. Secara ekonomi, penghematan biaya produksi maksimal hanya Rp17.342,00/m³ (<1%) pada variasi 7%, yang tidak sebanding dengan penurunan kuat tekan >42%. Dengan demikian, substitusi gypsum direkomendasikan maksimal 3% untuk elemen struktural, sementara kadar tinggi lebih tepat untuk aplikasi non-struktural.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. M. Neville and J. J. Brooks, *Concrete Technology*, 2nd ed. Harlow, UK: Pearson Education Limited, 2010.
- [2] IEA, *Cement*. Paris, France: International Energy Agency, 2022.
- [3] G. Habert et al., "Environmental Impacts and Decarbonization Strategies in the Cement and Concrete Industries," *Nature Reviews Earth & Environment*, vol. 1, no. 11, pp. 559-573, 2020.
- [4] K. L. Scrivener, V. M. John, and E. M. Gartner, "Eco-efficient Cements: Potential, Economically Viable Solutions for a Low-CO₂ Cement-based Materials Industry," *Cement and Concrete Research*, vol. 114, pp. 2-26, 2018.
- [5] M. Singh and M. Garg, "Use of Waste Plasterboard Powder as Partial Cement Replacement in Concrete," *Journal of Building Engineering*, vol. 44, p. 103411, 2021.
- [6] S. H. Kang et al., "Utilization of Recycled Gypsum from Waste Plasterboard in Cement-based Materials," *Journal of Cleaner Production*, vol. 276, p. 123217, 2020.
- [7] J. J. Thomas, H. M. Jennings, and J. J. Chen, "Influence of Calcium Sulfate on Cement Hydration and Microstructure Development," *Cement and Concrete Research*, vol. 95, pp. 145-155, 2017.
- [8] Y. Li et al., "Utilization of Waste Gypsum in Cement-based Materials: A Review," *Construction and Building Materials*, vol. 253, p. 119865, 2020.
- [9] T. Zhang et al., "Effect of Gypsum on Hydration and Mechanical Properties of Cementitious Materials," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 15, pp. 4120-4132, 2021.

- [10] A. P. Basir, A. Sulfanita, and A. Muis, "Pengaruh Limbah Gypsum Sebagai Substitusi Semen Terhadap Kuat Tekan Beton," *Jurnal Konstruksi*, vol. 5, no. 2, pp. 651-660, 2025.
- [11] A. M. Maglad et al., "Synergistic Effect of Waste Gypsum Plasterboard and Fly Ash as Partial Cement Replacement on Foamed Concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 463, p. 140079, 2025.
- [12] J. Bensted and P. Barnes, *Structure and Performance of Cements*, 3rd ed. London, UK: CRC Press, 2021.
- [13] P. Hewlett and M. Liska, *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 5th ed. Oxford, UK: Elsevier, 2019.
- [14] E. S. S. Nascimento et al., "Sustainable Use of Gypsum Waste for Applications in Soil-cement Bricks," *Ceramics*, vol. 8, no. 3, p. 83, 2025.
- [15] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2014.