

PENGARUH METAKAOLIN SEBAGAI PENGGANTI SEBAGIAN SEMEN TERHADAP KUAT TEKAN BETON RINGAN

Sultan Aditya Ananda Dalimunthe*, Denny Meisandy Hutauruk

Program Studi S1 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan
Jl. William Iskandar Ps. V, Kenangan Baru, Deli Serdang, Sumatera Utara 20221, Indonesia

*Corresponding author: sultan.dalth08@gmail.com

Abstract

Abstract- Sultan Aditya Ananda Dalimunthe: Effect of Metakaolin as a Partial Replacement of Cement on the Compressive Strength of Lightweight Concrete. Undergraduate Thesis. Faculty of Engineering, State University of Medan. 2025. With the rapid advancements in concrete technology within the construction industry, lightweight concrete has emerged as a highly promising alternative material, offering significant functional and practical benefits. Prior research indicates that adding metakaolin substantially enhances concrete's strength and durability compared to standard mixtures, demonstrating its positive impact on the mechanical properties of concrete. This study investigates the effect of metakaolin on the compressive strength and specific gravity of lightweight concrete. The experimental research was conducted at the Concrete Laboratory of the Faculty of Engineering, Universitas Negeri Medan. Four variations of metakaolin content (12.5%, 15%, 17.5%, and 20% by weight of cement) were tested to determine the compressive strength (in accordance with SNI 1974-2011) and specific gravity (using a weighing method) of the lightweight concrete. The results show that the optimum compressive strength for lightweight concrete, reaching 11.9 MPa, was achieved with a 20% metakaolin addition. This value meets the compressive strength requirements of lightweight structural concrete (6,89-17,24 MPa) according to SNI 03-3449-2002. Furthermore, the highest specific gravity of lightweight concrete (1787,23 kg/m³) was also observed at 20% metakaolin content, falling within the standard range for structural lightweight concrete specified by SNI 03-3449-2002 (1400-1850 kg/m³). In conclusion, this research indicates that increasing the percentage of metakaolin in lightweight concrete mixtures significantly improves both its compressive strength and specific gravity.

Keywords: *lightweight concrete, compressive strength, specific gravity, metakaolin*

Abstrak

Abstrak- Sultan Aditya Ananda Dalimunthe: Pengaruh Metakaolin Sebagai Pengganti Sebagian Semen Terhadap Kuat Tekan Beton Ringan. Skripsi. Fakultas Teknik Universitas Negeri Medan. 2025. Dengan pesatnya inovasi teknologi beton di industri konstruksi, beton ringan muncul sebagai material alternatif yang sangat menjanjikan, menawarkan fungsi dan manfaat signifikan. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penambahan metakaolin secara substansial meningkatkan kekuatan dan kekokohan beton dibandingkan campuran standar, menunjukkan dampak positifnya pada sifat mekanik beton. Studi ini menyelidiki pengaruh metakaolin terhadap kuat tekan dan berat jenis beton ringan. Penelitian eksperimental ini dilakukan di Laboratorium Beton Fakultas Teknik Universitas Negeri Medan. Empat variasi kadar metakaolin (12,5%, 15%, 17,5%, dan 20% dari berat semen) diuji untuk menentukan kuat tekan (sesuai SNI 1974-2011) dan berat jenis beton ringan (dengan metode penimbangan). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat tekan optimum beton ringan sebesar 11,9 MPa dicapai dengan penambahan metakaolin 20%. Nilai ini memenuhi persyaratan kuat tekan beton ringan struktural ringan (6,89-17,24 MPa) sesuai SNI 03-3449-2002. Selain itu, berat jenis beton ringan tertinggi (1787,23 kg/m³) juga ditemukan pada kadar metakaolin 20%, yang berada dalam rentang standar SNI 03-3449-2002 (1400-1850 kg/m³) untuk beton ringan struktural. Sebagai kesimpulan, penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan persentase metakaolin dalam campuran beton ringan secara signifikan meningkatkan baik kuat tekan maupun berat jenisnya.

Kata kunci : beton ringan, kuat tekan, berat jenis, metakaolin

PENDAHULUAN

Dalam konstruksi, beton memegang peranan krusial. Secara tradisional, beton normal dibuat menggunakan agregat kasar, semen, agregat halus, dan air (SNI 03-2834-2002). Meskipun beton normal memiliki kekuatan struktural yang tinggi, bobotnya yang besar menjadi kendala, terutama di daerah rawan gempa. Berat beton yang berlebihan dapat memperbesar dimensi elemen struktural vertikal dan menimbulkan tantangan desain arsitektur (Clarke, 2014; Nadesan & Dinakar, 2017).

Untuk mengatasi masalah bobot, pengembangan beton ringan menjadi solusi yang menjanjikan. Pamuji (2007) menjelaskan bahwa dalam perencanaan struktur, berat beton menjadi pertimbangan utama dalam beban struktural. Beton ringan mengurangi beban struktur secara signifikan karena memiliki berat jenis yang lebih rendah dari beton

konvensional. Ini berdampak positif pada fleksibilitas desain, efisiensi biaya, dan pengurangan kebutuhan baja tulangan. Dengan bobot yang lebih rendah, beton ringan dapat meningkatkan daya tahan struktur, mengurangi beban mati total pada bangunan, serta mempermudah proses instalasi.

Penggunaan beton ringan sangat menguntungkan, terutama dalam proyek gedung tinggi dan pembangunan infrastruktur di zona gempa (Sarjono Puro, 2014). Menurut SNI 03-2847-2002, beton struktural dengan agregat ringan memiliki berat jenis sekitar 1900 kg/m^3 dan kuat tekan antara 17 MPa hingga 41.360 MPa. Bobotnya yang ringan memungkinkan dimensi penampang dan kebutuhan pembesian yang lebih kecil (Rio Herdianto Rahamudin, dkk, 2016). Meskipun kuat tekan beton ringan bervariasi tergantung pada komposisi bahan, umumnya lebih rendah dibandingkan beton konvensional. Semen, sebagai bahan dasar beton, memiliki permintaan yang terus meningkat seiring laju pembangunan. Namun, produksi semen global, yang mencapai 2,8 miliar ton per tahun dan diproyeksikan meningkat hingga 4 miliar ton, berkontribusi signifikan terhadap emisi CO₂, membahayakan lingkungan (Oluwafemi Ezekiel Ige, dkk, 2024). Kenaikan harga semen akibat peningkatan penggunaan beton konvensional dapat diatasi dengan mengganti sebagian semen dengan material pozzolan, seperti metakaolin. Metakaolin bereaksi dengan kalsium hidroksida, hasil dari hidrasi semen, membentuk kalsium silikat yang bersifat pozzolanik.

Penelitian ini akan mengeksplorasi perilaku beton di mana sebagian semen digantikan oleh metakaolin. Metakaolin adalah pozzolan yang berasal dari kaolin, bahan lempung kaya besi. Ini adalah zat amorf berwarna putih atau sedikit yang dihasilkan dari dehidroksilasi kaolin melalui pemanasan pada suhu 600°C hingga 800°C, menghasilkan partikel berukuran 0,5–5 mikron yang sangat reaktif (Wibowo, dkk, 2019; Masri A Rivai, dkk, 2021). Kehalusan metakaolin berperan penting dalam mengurangi porositas dan meningkatkan kepadatan beton dengan mengisi celah mikro dan pori-pori pada pasta semen. Ini menghasilkan struktur beton yang lebih padat dan homogen, meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi zat agresif seperti sulfat dan klorida, sehingga memperpanjang umur struktur di lingkungan ekstrem. Metakaolin memiliki aktivitas pozzolanik tinggi, menjadikannya ideal untuk beton berkinerja tinggi (Claudia Hidayat, dkk, 2018).

Keunggulannya terletak pada kemampuannya bereaksi dengan kalsium hidroksida (CH) selama hidrasi semen, menghasilkan lebih banyak kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang esensial untuk kekuatan dan kepadatan beton. Reaksi ini secara substansial meningkatkan kekuatan, daya tahan, dan kekokohan beton, bahkan melampaui beton hanya dengan semen. Beton bermetakaolin juga lebih tahan terhadap serangan kimia berbahaya (klorida dan sulfat) dan efektif mengurangi reaksi alkali-agregat yang dapat menyebabkan retakan. Namun, studi oleh Sains Satria Nurkhasan dan timnya (2020) menunjukkan bahwa penggantian semen dengan metakaolin pada kadar 20% justru menurunkan kekuatan tekan dibandingkan dengan kadar 17,5%, meskipun masih lebih baik dari beton tanpa metakaolin. Pada kadar 22,5%, kekuatannya bahkan lebih rendah dari beton normal. Penurunan ini disebabkan oleh berkurangnya semen sebagai bahan pengikat utama seiring peningkatan metakaolin, dan interaksi yang belum maksimal antara metakaolin dengan hasil hidrasi semen pada kadar tinggi (Hidayat, 2018). Penelitian lain oleh Wibowo dkk. (2018) menemukan bahwa penggantian semen dengan 17,5% metakaolin menghasilkan kuat tekan tertinggi (71,33 MPa), jauh di atas campuran tanpa metakaolin (43,5 MPa).

Penggunaan *superplasticizer* dapat membantu meningkatkan workabilitas beton ketika metakaolin digunakan, karena metakaolin cenderung meningkatkan kekentalan. *Superplasticizer*, yang sebagian besar mengandung air (sekitar 70%), dapat meningkatkan workabilitas serta kuat tekan dan modulus elastisitas beton jika digunakan dalam kadar yang tepat. Kusnadi dkk. menunjukkan bahwa penambahan *superplasticizer* dapat meningkatkan kuat tekan sebesar 17,37% dan nilai slump hingga 507% pada beton ringan.

Luas permukaan dan reaktivitas kimia metakaolin yang lebih tinggi dibandingkan kaolin membuatnya sering digunakan sebagai bahan tambahan pada semen, beton, dan keramik untuk meningkatkan kekuatan dan kinerja material. Metakaolin mengisi rongga-rongga dan meningkatkan kepadatan beton. Pozzolanitasnya yang efektif mengubah struktur pasta semen, meningkatkan ketahanan terhadap transportasi air dan difusi ion berbahaya, serta membuatnya lebih tahan abrasi dan erosi ideal untuk lantai industri, dermaga, atau struktur hidrolik. Dengan mengurangi porositas dan permeabilitas, metakaolin mencegah penetrasi ion korosif, memperpanjang umur layanan struktur secara signifikan dan mengurangi biaya perbaikan (Gameiro et al., 2012).

Penambahan metakaolin terbukti meningkatkan kekuatan dan kekokohan beton secara substansial dibandingkan campuran standar, dengan dampak positif pada sifat mekaniknya. Selain itu, metakaolin juga memungkinkan produksi beton yang ramah lingkungan. Dengan demikian, beton ringan struktural yang diproduksi dengan metakaolin tidak hanya kuat dan tahan lama, tetapi juga ramah lingkungan. Oleh karena itu, penelitian ini akan membahas "PENGARUH METAKAOLIN SEBAGAI PENGGANTIAN SEBAGIAN SEMEN TERHADAP KUAT TEKAN BETON RINGAN".

Hidayat (2012) menjelaskan bahwa batu apung banyak digunakan sebagai agregat beton ringan karena bobotnya yang rendah dan kemampuannya untuk terapung. Mineral utamanya meliputi kuarsa, tridimit, feldspar, dan kristobalit, serta banyak ditemukan di Sumatera dan Jawa. Metakaolin adalah pozzolan yang dihasilkan dari kalsinasi kaolin, bahan lempung putih yang melimpah di Indonesia (Renaldy Universitas ITS, 2018). Utami dan Irawati (2013) menjelaskan bahwa proses kalsinasi pada 600°C-800°C (RMC Group, 1996) mengaktifkan SiO₂ dan Al₂O₃ kaolin menjadi fasa amorf yang lebih reaktif. Siddique (2008) menyebut "meta" sebagai indikasi perubahan sifat melalui dehidroksilasi. Metakaolin meningkatkan kuat tekan beton melalui reaksi pozzolanik, di mana ia bereaksi dengan kalsium hidroksida (Ca(OH)₂ atau CH) hasil hidrasi semen, membentuk lebih banyak kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang merupakan komponen utama kekuatan dan kepadatan beton. CH menyusun sekitar 25% massa pasta semen, dan metakaolin mengubahnya menjadi C-S-H yang lebih stabil (Antonius Mediyanto, dkk, 2011; Tjokrodinuljo, 1996).

Metakaolin juga memperbaiki struktur pori-pori beton sebagai bahan pengisi (*filler effect*), mengurangi volume pori-pori kapiler dan permeabilitas. Ini meningkatkan ketahanan terhadap reaksi alkali-silika (ASR), penetrasi klorida, dan korosi tulangan, sehingga memperpanjang durabilitas beton (Masri A Rivai, dkk, 2021). Berbagai studi mengkonfirmasi manfaatnya; RMC Group (1996) dan P.A.M Basheer (1999) menemukan peningkatan kuat tekan beton dengan metakaolin hingga 10%, dengan efek maksimal reaksi pozzolanik pada 7-14 hari pertama (5%-30% metakaolin). B.B. Sabir (2001) menunjukkan bahwa curing pada suhu 50°C menghasilkan kekuatan awal yang lebih tinggi, dengan kadar optimum penggantian metakaolin sekitar 10% untuk FAS 0,35 pada curing 20°C, atau 5% untuk FAS 0,45 pada curing 50°C.

Metakaolin yang reaktif akan melepaskan Ca(OH)₂ dari beton. Keunggulan metakaolin meliputi peningkatan kekuatan dan ketahanan, pengurangan biaya perawatan dan jangka panjang, peningkatan nilai jual bangunan, serta pengurangan dampak lingkungan melalui pengurangan penggunaan semen. Bahan tambah (admixture) adalah material yang digunakan untuk memodifikasi sifat beton (ASTM C.494; SNI-03-2847-2002). Bahan ini diklasifikasikan menjadi *air-entraining agent*, *chemical admixture*, mineral admixture (seperti metakaolin, fly ash, silika fume), dan *miscellaneous admixture*. *Chemical admixture* dibagi menjadi tujuh tipe, seperti Water-Reducing Admixtures (tipe A), *Retarding Admixtures* (tipe B), dan *Accelerating Admixtures* (tipe C). *Superplasticizer* Tipe F, seperti Master Glenium Ace 8590 dari BASF, adalah *Water Reducing, High Range Admixtures* yang sangat efektif mengurangi air campuran (12% atau lebih), meningkatkan *workability*, kekuatan awal dan akhir, serta cocok untuk beton pracetak dan pengecoran di cuaca panas. Manfaatnya termasuk peningkatan *workability*, pengurangan air, tanpa segregasi atau bleeding, pemadatan mudah, dan permukaan beton halus.

Pengujian beton dilakukan untuk memastikan kualitasnya. Pengujian semen meliputi kehalusan (SNI 03-2530-1991; SNI 15-2049-1994), berat jenis (SNI 03-2531-1991), dan konsistensi normal (SNI 03-6826-2002). Pengujian agregat kasar mencakup analisa saringan dan gradasi (SK SNI-08-1989-F), berat jenis (SNI 03-1969-2008), berat isi/volume (SNI 03-4804-1998), kadar lumpur (ASTM C.142-78), dan keausan (SNI 2417:2008). Pengujian agregat halus meliputi analisa saringan dan gradasi (SNI 03-1968-1990), berat jenis dan penyerapan air (SNI 03 1970 – 1990), serta kadar lumpur (SNI 03-4142-1996).

Slump test adalah metode standar untuk menilai konsistensi dan *workability* beton segar (SNI 1974-2011). Prosedur ini melibatkan pengisian kerucut Abrams tiga lapis, pemadatan dengan tusukan, dan pengukuran penurunan tinggi beton setelah cetakan diangkat. Toleransi slump pada beton segar sekitar 2 cm. Pengujian kadar udara dalam beton segar bertujuan mengukur volume udara yang terkandung, karena kadar udara yang berlebihan (>6,5%) dapat mengurangi kekuatan beton (Arifal Hidayat, 2020).

Pengujian kuat tekan beton mengukur kemampuannya menahan gaya tekan per satuan luas (Mulyono, 2003). Benda uji silinder (tinggi 30 cm, diameter 15 cm) digunakan sesuai SNI 1974-2011, dengan rumus $f_c = P/A$. Faktor-faktor

yang memengaruhi kuat tekan meliputi proporsi bahan, metode perancangan, perawatan (curing), dan kondisi lingkungan pengecoran. Rasio air-semen optimum (Duff dan Abrams, 1919), umur beton (kekuatan meningkat cepat hingga 28 hari, Mulyono, 2003), jenis semen, dan jumlah semen juga krusial.

Pengujian berat jenis beton menentukan massa beton per volume, memengaruhi kekuatan struktur dan efisiensi material. Ini dilakukan dengan mengukur berat dan volume sampel beton, menggunakan rumus $\gamma = W/V$. Akurasi pengukuran cetakan silinder sangat penting.

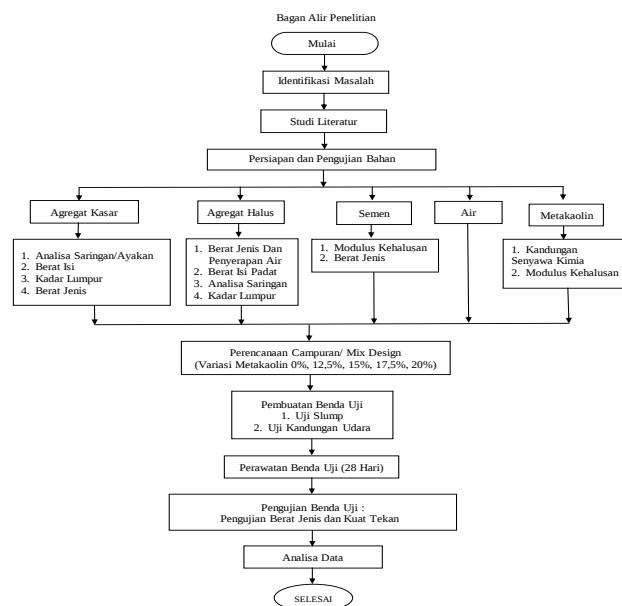
Dalam analisis statistik, ANOVA (*Analysis of Variance*) digunakan untuk membandingkan lebih dari dua rata-rata variabel, menguji generalisasi data sampel ke populasi (Riduwan, 2004). Keuntungan *one-way* ANOVA meliputi perbandingan rata-rata, pemahaman signifikansi perbedaan, kemudahan analisis multi-kelompok, minimisasi risiko kesalahan, penanganan data hilang, dan deteksi interaksi faktor. Sebelum ANOVA, uji normalitas (misalnya Kolmogorov-Smirnov atau Shapiro-Wilk) dan uji homogenitas variansi harus dilakukan untuk memastikan validitas data. Beberapa penelitian relevan telah meneliti pengaruh metakaolin pada beton. Wibowo dkk. menemukan kuat tekan tertinggi 71,33 MPa pada 17,5% metakaolin. Sains Satria Nurkhasan dkk. (2020) juga mencatat 17,5% metakaolin menghasilkan kuat tekan maksimal 59,79 MPa. Anrico Boy Riansyam (2017) melaporkan 42,275 MPa kuat tekan maksimum pada 12,5% metakaolin. Prof. Nada M. Fawzi dkk. (2013) mencapai kuat tekan 47,1 MPa pada 15% metakaolin di beton ringan. Masri A Rivai dkk. (2021) menemukan kuat tekan optimum dengan 10% metakaolin dan 3% Polikarboxilat. Praveen dan Niharika (2023); dan Ubojiekere dkk (2018) melaporkan peningkatan kuat tekan hingga 9% penggantian metakaolin, tetapi menurun pada 12%. Studi-studi ini menunjukkan potensi metakaolin sebagai pengganti semen parsial untuk meningkatkan sifat mekanik beton.

METODE

Untuk menunjang kualitas kajian maka penelitian pembuatan beton dijalankan di Laboratorium Beton Fakultas Teknik Universitas Negeri Medan. Waktu yang dihabiskan oleh peneliti untuk studi ini sejak izin penelitian diberikan adalah sekitar 4 (empat) bulan. Dalam periode tersebut, waktu sudah mencakup kegiatan pengumpulan dan pengolahan data, berisi penyusunan skripsi serta proses bimbingan.

Diagram Alur Penelitian

Tahapan penelitian ini disusun secara sistematis untuk memperoleh hasil yang akurat dan terarah. Proses penelitian dimulai dari identifikasi masalah, studi literatur, persiapan material, perancangan campuran beton, hingga pengujian serta analisis data. Secara ringkas, alur kegiatan penelitian ditunjukkan pada diagram Gambar 1 berikut.



Gambar 1 Proses penelitian

Jumlah Benda Uji

Penelitian ini menggunakan beberapa variasi campuran beton dengan penambahan metakaolin dan *superplasticizer* untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kuat tekan dan berat jenis beton. Setiap variasi campuran memiliki

komposisi berbeda sesuai persentase metakaolin yang ditetapkan. Jumlah dan rincian benda uji yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1 Jumlah benda uji

Kode Benda Uji	Metakaolin	Superplasticizer	Pengujian	Jumlah sampel
V0	0%			10
V1	12,50%			10
V2	15%	2%	Kuat tekan dan	10
V3	17,50%		Berat jenis	10
V4	20%			10
Jumlah				50

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Material Di Laboratorium

Sebelum dilakukan proses perancangan campuran beton, terlebih dahulu dilakukan serangkaian pengujian terhadap material penyusun beton di laboratorium untuk mengetahui karakteristik fisik dan kesesuaiannya dengan standar yang berlaku. Pengujian ini meliputi agregat kasar (batu apung), agregat halus (pasir vulkanik atau pasir Malang), serta semen sebagai bahan pengikat.

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memastikan bahwa setiap material memenuhi persyaratan mutu sesuai dengan standar nasional (SNI) maupun standar internasional (ASTM/ACI), sehingga dapat digunakan dalam proses perancangan campuran beton ringan secara optimal. Hasil lengkap dari pengujian karakteristik material disajikan pada Tabel 2, yang memuat nilai hasil pengujian, standar acuan, serta keterangan kesesuaian terhadap syarat yang berlaku beserta alternatif penanganan jika tidak memenuhi ketentuan.

Tabel 2 Hasil uji material (Data Peneliti, 2025)

No.	Jenis pengujian	Hasil	Standart	SNI/ASTM/ACI	Keterangan	Alternatif
Agregat kasar (Batu apung)						
1.	Analisis saringan	6,0	-	SNI 03-2461-2002	Memenuhi syarat	-
2.	Berat isi	644	880	ASTM C3 30	Memenuhi syarat	-
3.	Kandungan lumpur	2,7	<1	SNI 03-2816-2014	Tidak memenuhi syarat	Pencucian agregat terlebih dahulu
	Berat jenis	1,47	1-1,8	SNI 03-2461-2002	Memenuhi syarat	-
4.	Daya serap	30,98	20%	SNI 03-2461-2002	Tidak memenuhi syarat	Menggunakan agregat SSD
Agregat halus (Pasir malang/vulkanik)						
1.	Modulus kehalusan	3,0	2,4-3,0	ACI 211.2-98	Memenuhi syarat	-
2.	Berat isi	1122	1120	ASTM C3 30	Memenuhi syarat	-

3.	Kandungan lumpur	1,6	<5%	SNI 03-2461-2002	Memenuhi syarat	-
Semen						
1.	Kehalusan semen	93,2	>90%	SNI 15-2531-1991	Memenuhi syarat	-
2.	Berat jenis semen	3,11	<3,20	SNI 15-2531-1991	Memenuhi syarat	-

Hasil Pengujian Senyawa Kimia Metakaolin

Bahan kimia metakaolin yang digunakan berasal dari PT. Arthafajar Mitrasedjati, Serpong Utara, Kota Tangerang selatan, Banten. Berdasarkan Pengujian senyawa kimia di Laboratorium Penguji Balai Standardisasi Dan Pelayanan Jasa Industri Medan dengan hasil pada Tabel 3, sebagai berikut :

Tabel 3 Hasil uji senyawa kimia metakaolin (Data Peneliti LP-BSPJI Medan, 2025)

No.	Parameter	Unit	Hasil uji	Metode uji
1.	Kalsium Oksida (CaO)	%	0,9	AAS
2.	Silikat (SiO ₂)	%	73,8	Gravimetri
3.	Aluminium Oksida (Al ₂ O ₃)	%	4,53	AAS
4.	Ferro Oksida (Fe ₂ O ₃)	%	0,65	AAS

Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan beton telah dilakukan menggunakan mesin uji kuat tekan di Laboratorium Beton Teknik Sipil Universitas Negeri Medan dengan hasil pada Tabel 4, sebagai berikut :

Tabel 4 Hasil uji kuat tekan beton ringan (Data Peneliti, 2025)

Variasi campuran metakolin	Usia beton (hari)	Berat benda uji	Kuat tekan	Jumlah sampel
		rata – rata (kg)	rata – rata (MPa)	
MK 0%	28	8,656	5,1	10
MK 12,50%	28	9,105	8,9	10
MK 15%	28	9,166	9,1	10
MK 17,50%	28	9,174	10,8	10
MK 20%	28	9,472	11,9	10
Jumlah				50

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengujian kuat tekan beton ringan pada hari ke-28 dengan benda uji silinder (30 cm x 15 cm) mengalami peningkatan seiring bertambahnya persentase penggantian semen dengan metakaolin. Berdasarkan data Tabel 4, kuat tekan rata-rata beton tanpa penggantian (0%) sebesar 5,1 MPa, sedangkan pada variasi 12,5%, 15%, 17,5%, dan 20% berturut-turut mencapai 8,9 MPa, 9,1 MPa, 10,8 MPa, dan 11,9 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan metakaolin dapat meningkatkan kuat tekan beton ringan.

Hasil Pengujian Berat Jenis Beton

Pengujian berat jenis beton telah dilakukan di Laboratorium Beton Teknik Sipil Universitas Negeri Medan dengan hasil pada Tabel 5, sebagai berikut :

Tabel 5 Hasil uji berat jenis beton ringan (Data Peneliti, 2025)

Variasi campuran metakolin	Usia beton (hari)	Berat benda uji	Berat jenis	Jumlah sampel
		rata – rata (kg)	rata - rata (kg/m ³)	
MK 0%	28	8,656	1633,25	10
MK 12,50%	28	9,105	1717,98	10
MK 15%	28	9,166	1729,34	10
MK 17,50%	28	9,174	1730,89	10
MK 20%	28	9,472	1787,23	10
Jumlah				50

Hasil penelitian di Laboratorium Beton Teknik Sipil Universitas Negeri Medan menunjukkan bahwa penggantian sebagian semen dengan metakaolin berpengaruh terhadap berat jenis beton ringan berbentuk silinder (30 cm x 15 cm) yang diuji pada hari ke-28. Berdasarkan Tabel 5, beton tanpa penggantian semen (0%) memiliki berat jenis 1633,25 kg/m³. Pada variasi penggantian 12,5%, 15%, 17,5%, dan 20%, berat jenis berturut-turut meningkat menjadi 1717,98 kg/m³, 1729,34 kg/m³, 1730,89 kg/m³, dan 1787,23 kg/m³. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa semakin besar persentase metakaolin yang digunakan, semakin tinggi pula berat rata-rata dan berat jenis beton ringan yang dihasilkan.

Uji Normalitas

Pengujian uji normalitas pada kuat tekan beton ringan telah dilakukan di Laboratorium Beton Teknik Sipil Universitas Negeri Medan dengan hasil pada Tabel 6, sebagai berikut :

Tabel 6 hasil uji normalitas pada kuat tekan beton ringan (Data Peneliti, 2025)

Test Of Normality

Variasi		Kolmogorov-Smirnov			Shapiro - Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Nilai kuat tekan	Metakaolin 0%	.227	10	.153	.879	10	.126
	Metakaolin 12,5%	.182	10	.200	.956	10	.743
	Metakaolin 15%	.225	10	.163	.913	10	.304
	Metakaolin 17,5%	.155	10	.200	.938	10	.535
	Metakaolin 20%	.169	10	.200	.936	10	.513

Pada Tabel 6 uji normalitas berdasarkan hasil signifikasi pada uji normalitas berada di atas $\alpha = 0.05$, yang dimana nilai tersebut pada pengujian kuat tekan beton ringan sudah terdistribusi secara Normal.

Pengujian uji normalitas berat jenis beton ringan telah dilakukan di Laboratorium Beton Teknik Sipil Universitas Negeri Medan dengan hasil pada Tabel 7, sebagai berikut :

Tabel 7 Hasil uji normalitas berat jenis beton ringan (Data Peneliti, 2025)

Test Of Normality

Variasi		Kolmogorov-Smirnov			Shapiro - Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Nilai kuat tekan	Metakaolin 0%	.202	10	.200	.926	10	.410
	Metakaolin 12,5%	.125	10	.200	.960	10	.788
	Metakaolin 15%	.186	10	.200	.947	10	.638
	Metakaolin 17,5%	.164	10	.200	.915	10	.319
	Metakaolin 20%	.153	10	.200	.943	10	.585

Pada Tabel 7 uji normalitas berdasarkan hasil signifikansi pada uji normalitas berada di atas $\alpha = 0.05$, yang dimana nilai tersebut pada pengujian berat jenis beton ringan sudah terdistribusi secara Normal.

Uji Homogenitas

Pengujian uji normalitas kuat tekan beton ringan telah dilakukan di Laboratorium Beton Teknik Sipil Universitas Negeri Medan dengan hasil pada Tabel 8, sebagai berikut :

Tabel 8 Hasil uji homogenitas kuat tekan beton ringan (Data Peneliti, 2025)

		Leavene Statistic	Df1	Df2	Sig.
Nilai kuat tekan	Based on Mean	.544	4	45	.704
	Based on Median	.623	4	45	.648
	Based on Median and with Adjusted df	.623	4	38.697	.649
	Based on trimmed mean	.568	4	45	.687

Berdasarkan Levene's Test, kami menemukan bahwa varians data bersifat homogen. Hal ini dikonfirmasi oleh semua nilai signifikansi (Sig.) pada tabel *Test of Homogeneity of Variances* yang lebih besar dari 0,05. Karena nilai Sig. melebihi 0,05, hipotesis nol (H_0) diterima, menandakan bahwa asumsi homogenitas varians terpenuhi. Dengan demikian, variabilitas kuat tekan antar kelompok yang menggunakan metakaolin seragam dan tidak berbeda signifikan secara statistik.

Pengujian uji homogenitas berat jenis beton ringan telah dilakukan di Laboratorium Beton Teknik Sipil Universitas Negeri Medan dengan hasil pada Tabel 9, sebagai berikut :

Tabel 9 Hasil uji homogenitas berat jenis beton ringan (Data Peneliti, 2025)

		Leavene Statistic	Df1	Df2	Sig.
Nilai berat jenis	Based on Mean	1.516	4	44	.214
	Based on Median	.876	4	44	.486
	Based on Median and with Adjusted df	.876	4	35.074	.488
	Based on trimmed mean	1.380	4	44	.356

Data penelitian ini dinyatakan memiliki varians yang homogen di seluruh kelompok perlakuan. Kesimpulan ini didasarkan pada hasil Levene's Test, di mana nilai signifikansi untuk uji berdasarkan Mean, Median, maupun Trimmed Mean seluruhnya melampaui ambang batas 0,05, sehingga H_0 diterima.

Uji ANOVA Kuat Tekan Beton Ringan

Pengujian uji ANOVA kuat tekan beton ringan telah dilakukan di Laboratorium Beton Teknik Sipil Universitas Negeri Medan dengan hasil pada Tabel 10, sebagai berikut :

Tabel 10 Hasil uji ANOVA kuat tekan beton ringan (Data Peneliti, 2025)

<i>One way</i>		Anova			
	<i>Sum of squares</i>	df	<i>Mean square</i>	F _{Hitung}	F _{Tabel}
<i>Between groups</i>	266.942	4	66.736	15.152	2.58
<i>Within groups</i>	198.200	45	4.404		
Total	465.142	49			

Berdasarkan uji ANOVA satu arah pada Tabel 10, perbandingan antara nilai Fhitung (15,152) Karena nilai ini lebih besar dari nilai FTabel yaitu 2,58 $F_{hitung} \geq F_{Tabel}$ maka hipotesis nol (H_0) ditolak dan hipotesis alternatif (H_1) diterima. Hal ini membuktikan bahwa terdapat perbedaan rata-rata yang signifikan pada kuat tekan beton antar kelompok perlakuan yang menggunakan variasi metakaolin sebagai pengganti sebagian semen (0%, 12,5%, 15%, 17,5%, dan 20%).

Pengujian uji *homogeneous subsets* SPSS pada kuat tekan beton ringan telah dilakukan di Laboratorium Beton Teknik Sipil Universitas Negeri Medan dengan hasil pada Tabel 11, sebagai berikut :

Tabel 11 Uji *homogeneous subsets* SPSS pada kuat tekan beton ringan (Data Peneliti, 2025)

<i>Homogeneous Subsets</i>				
Kelompok	N	Subset for alpha = 0,05		
		1	2	3
Metakaolin 0%	10	50.870		
Metakaolin 12,5%	10		88.850	
Metakaolin 15%	10		91.070	
Metakaolin 17,5%	10		107.560	107.560
Metakaolin 20%	10			118.950
Sig.		1.000	.286	.744

Substitusi sebagian semen dengan metakaolin terbukti secara statistik meningkatkan kuat tekan beton secara signifikan, di mana tingkat optimalnya adalah pada variasi 17,5%. Temuan ini didasarkan pada analisis ANOVA satu arah yang valid (karena asumsi normalitas dan homogenitas terpenuhi). Menurut uji *homogeneous subsets*, variasi 17,5% dan 20% menghasilkan kekuatan yang setara. Namun, variasi 17,5% dianggap paling baik karena memberikan hasil kekuatan yang sama dengan biaya material yang lebih rendah, menjadikannya pilihan yang paling ekonomis.

Uji ANOVA Berat Jenis Beton Ringan

Pengujian uji ANOVA berat jenis beton ringan telah dilakukan di Laboratorium Beton Teknik Sipil Universitas Negeri Medan dengan hasil pada Tabel 12, sebagai berikut :

Tabel 12 Hasil uji ANOVA berat jenis beton ringan (Data Peneliti, 2025)

<i>One way</i>		Anova			
	<i>Sum of squares</i>	df	<i>Mean square</i>	F _{Hitung}	F _{Tabel}
<i>Between groups</i>	3.442.499.600	4	860.624.900	10.530	2.58
<i>Within groups</i>	3.677.796.400	45	81.728.809		
Total	7.120.296.00	49			

Hasil uji ANOVA satu arah Tabel 12 menunjukkan bahwa penggunaan metakaolin sebagai pengganti semen berpengaruh signifikan terhadap berat jenis beton ringan. Hal ini dibuktikan dengan nilai F-hitung (10,530) yang jauh lebih besar dari nilai F-tabel (2,58). Karena $F_{hitung} \geq F_{Tabel}$, maka H_0 ditolak, yang berarti terdapat perbedaan nyata pada rata-rata berat jenis di antara semua kelompok variasi (0% hingga 20%) dan menegaskan bahwa metakaolin mampu mengubah karakteristik beton.

Pengujian uji *Homogeneous Subsets* SPSS pada berat jenis beton ringan telah dilakukan di Laboratorium Beton Teknik Sipil Universitas Negeri Medan dengan hasil pada Tabel 13, sebagai berikut :

Tabel 13 Uji *Homogeneous Subsets* SPSS pada berat jenis beton ringan (Data Peneliti, 2025)

<i>Homogeneous Subsets</i>				
Kelompok	N	Subset for alpha = 0,05		
		1	2	3
Metakaolin 0%	10	8656.20		
Metakaolin 12,5%	10		9105.30	
Metakaolin 15%	10		9165.50	9165.50
Metakaolin 17,5%	10		9173.70	9173.70
Metakaolin 20%	10			9472.30
Sig.		1.000	.983	.134

Maka dapat disimpulkan bahwa penggunaan metakaolin terbukti memengaruhi karakteristik beton ringan, baik dari segi kuat tekan maupun berat jenis. Menurut analisis *Homogeneous Subsets*, meskipun variasi 15%, 17,5%, dan 20% memiliki berat jenis yang setara secara statistik, variasi 15% menjadi pilihan paling optimal dari sudut pandang ekonomis.

Kesimpulan umumnya adalah, baik kuat tekan maupun berat jenis menunjukkan tren peningkatan seiring bertambahnya persentase metakaolin. Semua hasil dalam penelitian ini telah memenuhi standar SNI 03-3449-2002, di mana seluruh variasi (0% hingga 20%) berhasil melampaui standar kuat tekan minimum (6,89 MPa) dan juga memenuhi kriteria berat jenis untuk beton ringan struktural.

Hasil dapat dinyatakan dalam narasi, tabulasi, grafik, dan atau gambar. Usahakan untuk menampilkannya seringkas dan sekomprensif mungkin. Pembahasan harus terfokus pada hasil dan bagaimana hasil tersebut dapat menjawab masalah yang diangkat.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa penambahan metakaolin (12,5% hingga 20%) terbukti meningkatkan kuat tekan dan berat jenis beton ringan pada umur 28 hari, dengan kinerja paling optimal dicapai pada variasi 20% yang menghasilkan kuat tekan 11,9 MPa dan berat jenis 1787,23 kg/m³. Jika ditinjau dari klasifikasi SNI 03-3449-2002, beton yang diuji telah memenuhi syarat sebagai Beton Ringan Struktural Ringan karena kuat tekannya melampaui 6,89 MPa, namun belum mencapai standar Beton Ringan Struktural yang mensyaratkan minimal 17,24 MPa. Di sisi lain, dari segi berat jenis, seluruh variasi masuk dalam kategori Beton Ringan Struktural (1400-1850 kg/m³), tetapi tidak memenuhi kriteria Beton Ringan Struktural Ringan karena melampaui batas atasnya. Simpulkan apa yang telah dihasilkan dalam riset, bukan semata-mata apa yang dibayangkan akan dilakukan. Nyatakan dengan jelas apa kontribusi (unik) yang diberikan dalam bidang kajian ini. Simpulan dinyatakan dalam bentuk narasi.

SARAN

Menyadari adanya keterbatasan dalam penelitian ini, diajukan beberapa saran untuk pengembangan riset selanjutnya:

1. Menjalankan studi lanjutan dengan menggunakan persentase metakaolin yang lebih tinggi (di atas 20%) untuk mencari kadar optimum yang mampu mencapai kuat tekan kategori Beton Ringan Struktural.
2. Melakukan penelitian selanjutnya dengan kontrol yang lebih ketat terhadap ukuran agregat kasar yang digunakan untuk meningkatkan konsistensi hasil.

- Memastikan penerapan standar pengujian material yang lebih saksama untuk agregat kasar pada penelitian berikutnya.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih penulis tujuhan kepada seluruh dosen dan mahasiswa di Program Studi Teknik Sipil Universitas Negeri Medan yang telah membantu dalam kegiatan penelitian dan penulisan artikel ini.

REFERENSI

- Anrico, B.R. (2017). Pemanfaatan Kalsinasi Kaolin (Metakaolin) sebagai Substitusi Sebagian Semen dengan Bahan Tambah *Superplasticizer* terhadap Sifat Mekanik Beton.
- Antoni & Nugraha, P. (2007). Teknologi Beton. C.V. Andi Offset, Yogyakarta.
- Clarke, J.L. (2014). Structural Lightweight Aggregate Concrete. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Claudia, H., Wibowo, Endah, S. (2018). Kajian Pengaruh Variasi Metakaolin terhadap Kuat Tekan Beton Memadat Mutu Tinggi, 6(3).
- Dobrowolski, A.J. (1998). Concrete Construction Handbook. The McGraw-Hill Companies, Inc., New York.
- Hidayat, A. (2020). Penurunan Mutu Beton Struktural Akibat Pemakaian Air Sungai yang Tercemar Oleh Limbah. Jurnal Aplikasi Teknologi (APTEK), 12(1).
- Ige, O.E., Kallon, D.V.V., & Desai, D. (2024). Carbon emissions mitigation methods for cement industry using a systems dynamics model. Springer, 579–591
- Masri, A.R., Sri, M.E., & Erdin, D.T.K. (2021). Pengaruh Penambahan Metakaolin dan *Superplasticizer* terhadap Kuat Tekan Beton pada Mutu K-400. 7(1), 43–49.
- Mulyono, T. (2003). Teknologi Beton. Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta, Jakarta.
- Nadesan, M.S., & Dinakar, P. (2017). Mix design and properties of fly ash waste lightweight aggregates in structural lightweight concrete. Case Studies in Construction Materials, 7, 336–347.
- Neville, A.M. (1995). Properties of Concrete (4th ed.). Pearson Education Ltd., Harlow, Essex, England.
- Neville, A.M., & Brooks, J.J. (1987). Concrete Technology. John Wiley & Sons, New York.
- Praveen, K.S., & Niharika, P. (2023). Study On The Effect Of Metakolin As A Partial Replacement Of Cement On The Fresh And Hardened Properties Of Concrete. International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science, 5(5), 2547–2552.
- Rio, R., Rahamudin, H., Manalip, H., & Mondoringin, M. (2016). Pengujian Kuat Tarik Belah dan Kuat Tarik Lentur Beton Ringan Beragregat Kasar (Batu Apung) dan Abu Sekam Padi Sebagai Substitusi Parsial Semen. Jurnal Sipil Statik, 4(3), 225–231.
- Tjokrodimuljo, K. (1996). Teknologi Beton. Nafiri, Yogyakarta. Fakultas Teknik UGM.
- Tjokrodimuljo, Kardiyo. (1992). Teknologi Beton. Yogyakarta: Fakultas Teknik UGM.
- Tri, M. (2003). Perancangan Campuran Beton, Pengolahan dan Pengujian Beton Segar. Fakultas Teknik Universitas Jakarta.
- Ubojiekere, E.O, Barisua, E.N, Godfrey, W.G.J, Chimene, O. (2018). Workability and Mechanical Properties of High-strength Self-Compacting Concrete blended with Metakaolin. International Journal of Civil Engineering. 5, 2348 – 8352
- Wibowo, Antonius Mediyanto, Tengku Reiva Syaufina. (2019). Kajian Kuat Tarik Belah pada Beton Mutu Tinggi Memadat Mandiri dengan Variasi Komposisi Metakaolin dan Superplasticizer Masterease 3029. Fakultas Teknik Jurusan Sipil, Universitas Sebelas Maret. Surakarta.