

Kajian Hubungan Tegangan dan Regangan pada Beton dengan Metakaolin sebagai Pengganti Sebagian Semen

Satrio Kiat Widodo¹, Wibowo², Endah Safitri³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret, Indonesia
satriowidodo120@student.uns.ac.id, wibowo@ft.uns.ac.id, endahsafitri@staff.uns.ac.id

ABSTRAK

Faktor kemajuan pertumbuhan ekonomi suatu negara tidak lepas dari pembangunan infrastruktur. Pembangunan infrastruktur bertujuan untuk memudahkan mobilisasi orang maupun barang. Infrastruktur yang dibutuhkan seperti pembangunan gedung bertingkat, jalan, dan jembatan yang memiliki material beton, yaitu bahan bangunan yang terbuat dari campuran agregat halus, agregat kasar, semen, air dan bahan tambah lainnya untuk meningkatkan kemampuannya. Penggunaan beton dapat memudahkan pengerjaan karena beton merupakan solusi untuk membuat bangunan secara kuat dan awet. Penelitian ini mengkaji pengaruh penambahan Metakaolin dari penggunaan sebagian semen untuk mengetahui hubungan tegangan dan regangan pada beton. Metode yang diterapkan pada penelitian ini adalah eksperimental dengan benda uji silinder dengan ukuran 15×30 cm dengan jumlah 20 benda uji dan menggunakan alat uji Compression Testing Machine Digital. Pengujian dilakukan saat benda uji berumur 28 hari. Hasil pengujian ini diperoleh nilai tegangan beton normal dengan variasi kadar metakaolin 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% senilai 15,18 MPa; 16,07 MPa; 18,19 MPa; 15,79 MPa; dan 15,56 MPa. Regangan beton normal dengan variasi metakaolin 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% senilai 0,0034; 0,0036; 0,0034; 0,0037; dan 0,0028. Pada penelitian ini beton mengalami nilai tegangan dan regangan secara optimum pada saat variasi metakaolin 10% dengan masing-masing nilai 18,19 MPa dan 0,0034.

Kata kunci:

Beton Normal
Metakaolin
Tegangan
Regangan

Keywords:

Normal Concrete
Metakaolin
Stress
Strain

The progress factor of a country's economic growth cannot be separated from infrastructure development. Infrastructure development aims to facilitate the mobilization of people and goods. Infrastructure needed such as the construction of multi-storey buildings, roads, and bridges that have concrete material, which is a building material made from a mixture of fine aggregate, coarse aggregate, cement, water and other additives to increase its ability. The use of concrete can facilitate workmanship because concrete is a solution to make buildings strong and durable. This study examines the effect of the addition of Metakaolin from the use of a portion of cement to determine the stress and strain relationship in concrete. The method used in this research is experimental with cylindrical test objects with a size of 15 × 30 cm with a total of 20 test objects and using Digital Compression Testing Machine test equipment. Testing was carried out when the test specimens were 28 days old. The results of this test obtained normal concrete stress values with variations in metakaolin content of 0%, 5%, 10%, 15%, and 20% worth 15,18 MPa; 16,07 MPa; 18,19 MPa; 15,79 MPa; and 15,56 MPa. The strain of normal concrete with metakaolin variations of 0%, 5%, 10%, 15%, and 20% was 0,0034; 0,0036; 0,0034; 0,0037; and 0,0028. In this study, concrete experienced optimum stress and strain values at the time of the 10% metakaolin variation with values of 18,19 MPa and 0,0034, respectively.

*Ini adalah artikel akses terbuka di bawah lisensi [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).
This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.*

PENDAHULUAN

Kemajuan pembangunan infrastruktur di Indonesia mengalami peningkatan secara pesat di seluruh pelosok negeri. Hal tersebut menyebabkan kebutuhan beton sebagai material konstruksi mengalami peningkatan (Slat et al., 2022). Beton merupakan campuran agregat halus, agregat kasar, semen, air dan bahan lain dengan proporsi tertentu (ASTM C127-15, 2013). Beton memiliki kemampuan menahan gaya tekan yang kuat, namun memiliki kemampuan menahan gaya tarik yang rendah yang akan mempengaruhi nilai tegangan dan regangan pada beton, maka dari itu perlu dilakukan inovasi untuk menghasilkan beton yang lebih baik dan memiliki kualitas yang unggul dan awet salah satunya mensubstitusi mix design dengan bahan tambah metakaolin (Hidayat et al., 2018). Beton normal memiliki berat volume satuan 2.200-2.500 kg/m³ dan terdiri dari agregat kasar, agregat halus, semen, air dan memiliki karakteristik kandungan air semen yang tinggi. Penambahan metakaolin diharapkan mampu untuk mengurangi penggunaan semen secara berlebihan serta dapat mengurangi nilai *workability* pada beton (Murdock, 1999).

Metakaolin dihasilkan melalui proses pembakaran kaolin dengan temperatur 600-900°C selama 12 jam dan berbentuk butiran halus berukuran 0,5-5 mikron dan berwarna putih (Suwindu & Sandy, 2020). Penambahan *Metakaolin* pada campuran beton konvensional memiliki fungsi sebagai bahan untuk mengisi pori-pori beton dan menambah kepadatan beton (SNI 03-1974-1990, 1990), selain itu kandungan unsur senyawa pada metakaolin akan saling bereaksi sehingga menghasilkan reaksi hidrasi semen dan akan membentuk ikatan gel yang mampu memperkuat ikatan pada beton (Oktarinata et al., 2021). Metakaolin adalah bahan yang berasal dari alam kemudian diproses secara spesifik sebagai bahan tambah semen (Nurwikaningtyas, 2021). Metakaolin adalah sebuah substansi dengan partikel-partikel kecil yang menunjukkan sifat reaktif yang laten terhadap proses hidrolitik (Maryoto et al., 2018), sehingga mampu mengatasi efek penipisan yang berperan dalam mengurangi perubahan panas dan kekuatan tekan pada tahap awal (Wibowo et al., 2019). Kontribusi positif yang ditimbulkan oleh metakaolin terhadap proses hidrasi semen Portland (PC) sangat signifikan (Nurkhasan et al., 2020). Ketika PC mengalami proses hidrasi, sekitar 20-30% dari massa pasta semen akan menjadi senyawa kalsium hidrat (CH). Tetapi, ketika digunakan, metakaolin akan segera berinteraksi dengan CH yang baru terbentuk, mengakibatkan tambahan senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) (Justice, 2005).

Kemampuan beton dalam menanggung beban tekan pada satu luas tertentu dikenal sebagai kekuatan tekan beton (Dady, 2015). Nugraha (2015) menyatakan bahwa semakin besar kekuatan struktur yang dicapai, semakin tinggi nilai kualitas beton yang dihasilkan. Pemeriksaan kekuatan tekan beton akan menghasilkan variabel berupa nilai tegangan dan regangan pada beton (Yanti et al., 2019). Pengujian hubungan tegangan dan regangan beton menggunakan alat *Compression Testing Machine Digital* dengan sampel dari hasil *mix design* dengan cetakan berbentuk silinder (Wibowo et al., 2018). Menurut Tjokrodinuljo (2007), beton normal bernilai kekuatan tekan 15 MPa hingga 30 MPa.

METODE

Metode yang diterapkan dalam penelitian ini adalah eksperimen. Dimulai dengan serangkaian pengujian pada agregat halus, yaitu pasir alam, yang mencakup penilaian kandungan lumpur, zat organik, *specific gravity*, gradasi agregat halus, serta analisis metakaolin menggunakan teknik XRF (X-ray Fluorescence). Setelah agregat lulus pengujian sesuai standar, langkah selanjutnya adalah pembuatan benda uji beton, diikuti oleh pengujian sifat aliran slump beton segar dan proses perawatan curing beton. Pengujian kekuatan beton yang telah mengeras, termasuk pengukuran tegangan dan regangan, dilaksanakan ketika beton mencapai usia 28 hari. Data hasil uji akan dievaluasi dengan perangkat Microsoft Office Excel. Gambar 1 menggambarkan benda uji yang digunakan, yakni silinder beton berukuran 15 cm x 30 cm, yang mengacu pada pedoman SNI 1974-2011.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Komponen Pembentuk Beton Normal

Parameter pengujian untuk agregat halus dan agregat kasar yang telah dilakukan melibatkan sejumlah aspek, termasuk pengujian kandungan lumpur, evaluasi kandungan zat organik, pengukuran *specific gravity*, analisis gradasi, serta pengujian modulus kehalusan dan tingkat abrasi. Untuk menguji metakaolin, digunakan perangkat X-Ray Fluorescence (XRF) di UPT Laboratorium Terpadu Universitas Diponegoro. Hasil dari seluruh pengujian ini telah dirangkum dan disajikan dalam Tabel 1, 2, dan 3.

Tabel 1. Hasil Pengujian Agregat Halus

No.	Jenis Pengujian	Hasil Pengujian	Standar	Kesimpulan
1	Kadar Lumpur	4%	≤ 5% (SNI S-04-1989-F)	Memenuhi
2	Zat Organik	Kuning Kemerahan	Prof. Ir. Rooseno	Memenuhi
3	<i>Bulk Specific Gravity</i>	2.48	-	-
4	<i>Bulk Specific Gravity SSD</i>	2.53	2.5-2.7 (SNI 03-2834-2000)	Memenuhi
5	<i>Apparent Spesific Gravity</i>	2.61	-	-
6	<i>Absorbtion</i>	2.04%	-	-
7	Modulus Kehalusan	1.93	1.5-3.8 (SNI 03-1750-1990)	Memenuhi

Tabel 2. Hasil Pengujian Agregat Kasar

No.	Jenis Pengujian	Hasil Pengujian	Standar	Kesimpulan
1	Kadar Lumpur	1%	£ 5% (SNI 03-4142-1996)	Memenuhi
2	Abrasi	32.20%	£ 50% (SNI-2417-2008)	Memenuhi
3	<i>Bulk Specific Gravity</i>	2.54	-	-
4	<i>Bulk Specific Gravity SSD</i>	2.57	2.5-2.7 (SNI -T-15-1990-03)	Memenuhi
5	<i>Apparent Spesific Gravity</i>	2.69	-	-
6	<i>Absorbtion</i>	1.47%	-	-
7	Modulus Kehalusan	3	< 7 (SNI 03-2461-2002)	Memenuhi

Tabel 3. Hasil Pengujian Metakaolin

<i>Component</i>	<i>Result</i>	<i>Unit</i>	<i>El, Line</i>	<i>Intensity</i>	<i>Analyzing depth</i>
Total	684	mg/cm ²			
Al ₂ O ₃	4,11	mass%	Al-KA	1,9373	0,0044
SiO ₂	45,4	mass%	Si-KA	21,7819	0,0061
K ₂ O	0,719	mass%	K-KA	1,191	0,0251
CaO	0,153	mass%	Ca-KA	0,3803	0,0331
TiO ₂	0,69	mass%	Ti-KA	0,4196	0,0556
MnO	0,0281	mass%	Mn-KA	0,0834	0,1166
Fe ₂ O ₃	1,15	mass%	Fe-KA	5,045	0,1481
ZrO ₂	0,0579	mass%	Zr-KA	3,7631	1,8914
<i>Balance</i>	47,7	mass%	Pd-KAC	9,4854	

Hasil Pengujian Kekuatan Tekan Beto

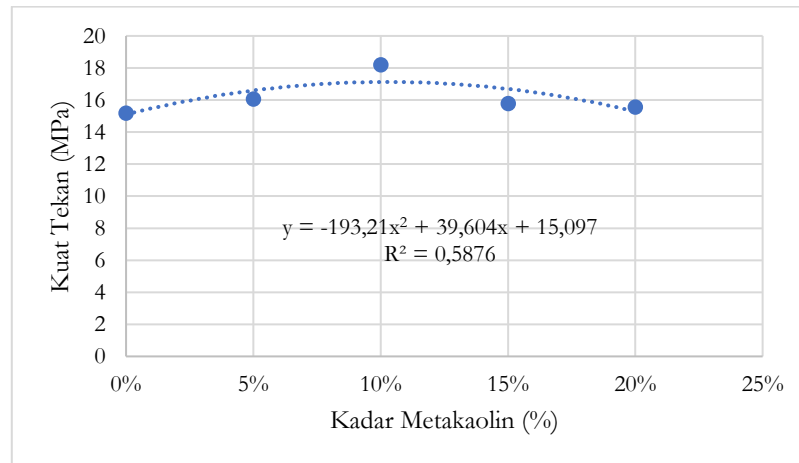
Pengujian kekuatan tekan beton dilaksanakan ketika beton telah mencapai usia 28 hari menggunakan peralatan Concrete Testing Machine Digital. Data hasil pengujian mencakup berbagai parameter, termasuk nilai beban maksimum (kN), perpindahan (mm), tegangan (kg/cm²), tegangan puncak (MPa), regangan, dan modulus elastisitas (MPa). Rangkuman hasil pengujian untuk beton normal dengan variasi kandungan metakaolin telah disajikan dalam Tabel 7, dan perbandingan persentase peningkatan antar berbagai variasi ditampilkan dalam Tabel 5 serta Gambar 3.

Tabel 4. Rekapitulasi Pengujian Kekuatan Tekan Beton Normal dengan Variasi Metakaolin

No.	Kode Benda Uji	Sampel	Pmax	at Peak	Stress	Tegangan	Regangan	E alat
			(kN)		(Kg/cm ²)	σ (Mpa)	ϵ	(Mpa)
1	NC MK 0%	1	266	10,21	184,93	15,05	0,0034	1769,15
		2	270	9,46	187,71	15,28	0,0032	1938,12
		3	268	10,19	186,32	15,17	0,0034	1785,95
		4	269	10,39	187,02	15,22	0,0035	1758,11
		Rata-Rata					15,18	0,0034
2	NC MK 5%	1	278	10,34	193,27	15,73	0,0034	1825,72
		2	277	12,01	192,58	15,67	0,0040	1566,19
		3	294	9,91	204,40	16,64	0,0033	2014,57
		4	287	11,44	199,53	16,24	0,0038	1703,59
		Rata-Rata					16,07	0,0036
3	NC MK 10%	1	316	9,79	219,69	17,88	0,0033	2191,86
		2	328	10,99	228,04	18,56	0,0037	2026,68
		3	304	9,78	211,35	17,20	0,0033	2110,78
		4	338	10,31	234,99	19,13	0,0034	2226,21
		Rata-Rata					18,19	0,0034
4	NC MK 15%	1	277	11,83	192,58	15,67	0,0039	1590,02
		2	283	11,31	196,75	16,01	0,0038	1699,15
		3	271	11,54	188,41	15,34	0,0038	1594,68
		4	285	10,01	198,14	16,13	0,0033	1933,39
		Rata-Rata					15,79	0,0037
5	NC MK 20%	1	274	8,91	190,49	15,51	0,0030	2088,25
		2	281	7,68	195,36	15,90	0,0026	2484,59
		3	275	8,46	191,19	15,56	0,0028	2207,35
		4	270	8,11	187,71	15,28	0,0027	2260,75
		Rata-Rata					15,56	0,0028

Tabel 5. Presentase Kenaikan Nilai Kuat Tekan Beton

Benda Uji	Kadar	$f'c$	Persentase Kenaikan
	Metakaolin	rata-rata (MPa)	
NC MK 0%	0%	15,18	0,00%
NC MK 5%	5%	16,07	5,87%
NC MK 10%	10%	18,19	19,85%
NC MK 15%	15%	15,79	4,01%
NC MK 20%	20%	15,56	2,52%

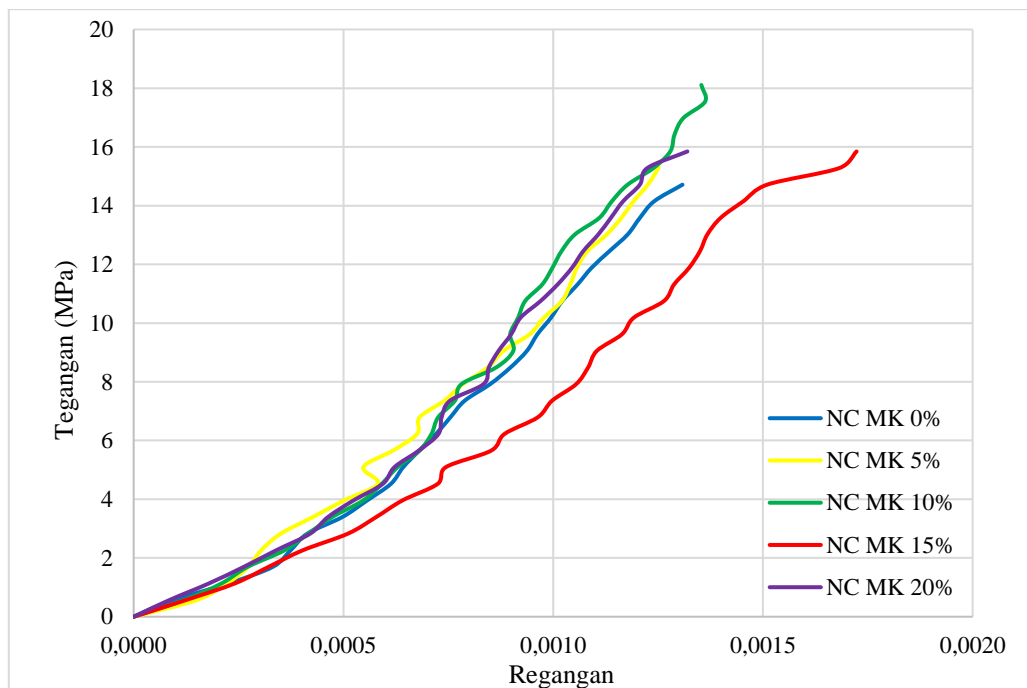


Gambar 8. Grafik Hubungan Kuat Tekan Beton dengan Variasi Kadar Metakaolin

Berdasarkan Tabel 6., terjadi kenaikan nilai kuat tekan dari beton NC MK 0%; NC MK 5%; dan NC MK 10% sebesar 15,18 MPa; 16,07 MPa; 18,19 MPa kemudian mengalami penurunan pada beton NC MK 15% dan NC MK 20% sebesar 15,79 MPa dan 15,56 MPa. Persentase kenaikan beton dengan variasi metakaolin 5%; 10%; 15%; 20% terhadap 0% (beton normal) yaitu sebesar 5,87%; 19,85%; 4,01%, 2,52%. Nilai tertinggi diperoleh beton NC MK 10% yaitu sebesar 18,19 MPa.

Hubungan Tegangan-Regangan Beton

Data berupa perubahan deformasi seiring pertambahan beban yang bekerja pada beton hingga beton mengalami keruntuhan kemudian data tersebut diolah menjadi grafik hubungan tegangan-regangan untuk menghitung nilai modulus elastisitas beton.



Gambar 9. Kurva Tegangan-Regangan Beton dengan Variasi Metakaolin

Berdasarkan Gambar 9., tegangan beton bertambah dari beton beton kontrol (NC MK 0%) di semua variasi penambahan metakaolin, namun kenaikan tegangan tidak seiring dengan penambahan metakaolin. Terdapat kadar paling maksimum untuk menghasilkan tegangan maksimum, yaitu 10% dari berat semen. Tegangan beton juga naik sampai dengan kadar maksimum kemudian mengalami penurunan tegangan pada

kadar 15% dan 20% sehingga nilai kuat tekan beton mengalami penurunan pada umur pembebanan yang sama, yaitu 28 hari.

KESIMPULAN

Penambahan metakaolin pada campuran beton normal dapat menambah kekuatan tekan dan tegangan beton meskipun nilai peningkatan tidak signifikan dengan umur 28 hari apabila dibandingkan dengan beton normal tanpa metakaolin. Nilai tegangan dan regangan optimum beton normal dicapai saat substitusi kadar metakaolin sebesar 10% dari berat semen dengan nilai tegangan dan regangan beton yang optimum sebesar 18,19 MPa dan 0,0034. Penambahan variasi metakaolin untuk menggantikan sebagian berat semen dapat menaikkan nilai tegangan pada beton normal maksimum sebesar 19,85% pada variasi metakaolin 10% dari beton variasi metakaolin 0%.

REFERENSI

- Astm C127-15. (2013). Astm C127-15: Standard Test Method For Density , Relative Density (Specific Gravity), And Absorption Of Coarse Aggregate. *Astm Standard Book, C*.
- Dady, Y. T. (2015). Pengaruh Kuat Tekan Terhadap Kuat Lentur Balok Beton Bertulang. *Jurnal Sipil Statik*, 3(5).
- Hidayat, C., Wibowo, W., & Safitri, E. (2018). Kajian Pengaruh Variasi Metakaolin Terhadap Kuat Tekan Beton Memadat Mandiri Mutu Tinggi. *Matriks Teknik Sipil*, 6(3). <https://doi.org/10.20961/Mateksi.V6i3.36558>
- Maryoto, A., Lie, H. A., & Purwanto. (2018). Pengantar Teknologi Beton. In *Boyolali*.
- Murdock, L. J. (1999). Bahan Dan Praktek Beton. In *Erlangga: Vol. Edisi Ke-4*.
- Nurkhasan, S. S., Wibowo, W., & Safitri, E. (2020). Pemenuhan Kriteria Beton Memadat Mandiri Dengan Variasi Metakaolin Terhadap Kajian Kuat Tekan Tinggi Dan Modulus Elastisitas. *Matriks Teknik Sipil*, 8(1). <https://doi.org/10.20961/Mateksi.V8i1.41518>
- Nurwikaningtyas, N. (2021). Kajian Serapan Co2 Pada Beton Mutu Tinggi Memadat Mandiri Dengan Bahan Tambah Metakaolin Menggunakan Variasi Aktivator Naoh Dan Na2sio3. *Matriks Teknik Sipil*, 9(2). <https://doi.org/10.20961/Mateksi.V9i2.53975>
- Oktarinata, Y., Gunawan, I., & Manalu, D. F. (2021). Kapasitas Lentur Balok Komposit Beton Dengan Baja. *Fropil (Forum Profesional Teknik Sipil)*, 8(2). <https://doi.org/10.33019/Fropil.V8i2.2003>
- Slat, M. H., Sondakh, F., & Assa, V. (2022). Pengaruh Penambahan Steel Fibre Pada Komposisi Campuran Terhadap Kuat Tekan Dan Kuat Lentur Beton. *Jurnal Teknik Sipil Terapan*, 4(2). <https://doi.org/10.47600/Jtst.V4i3.456>
- Sni 03-1974-1990. (1990). Sni 03-1974-1990 Metode Pengujian Kuat Tekan Beton. In *Badan Standardisasi Nasional Indonesia*.
- Suwindu, K. S., & Sandy, D. (2020). Karakteristik Beton Mutu Tinggi Dengan Substitusi Slag Baja Dan Slag Nikel Sebagai Agregat Kasar. *Paulus Civil Engineering Journal*, 2(1). <https://doi.org/10.52722/Pcej.V2i1.115>
- Wibowo, W., Al Afif, A. F., & Supardi, S. (2018). Kajian Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi Memadat Mandiri Dengan Variasi Bahan Tambah Metakaolin Dan Superplasticizer. *Matriks Teknik Sipil*, 6(3). <https://doi.org/10.20961/Mateksi.V6i3.36561>
- Wibowo, W., Mediyanto, A., & Syaufina, T. R. (2019). Kajian Kuat Tarik Belah Pada Beton Mutu Tinggi Memadat Mandiri Dengan Variasi Komposisi Metakaolin Dan Superplasticizer Masterease 3029. *Matriks Teknik Sipil*, 7(3). <https://doi.org/10.20961/Mateksi.V7i3.36494>
- Yanti, G., Zainuri, Z., & Megasari, S. W. (2019). Peningkatan Kuat Tekan Dan Kuat Lentur Beton Dengan Variasi Penambahan Serat Daun Nanas. *Teknik*, 40(1). <https://doi.org/10.14710/Teknik.V40i1.23390>