

KARAKTERISTIK BETON GEOPOLIMER BERBASIS METAKAOLIN TORAGET DENGAN PERAWATAN SUHU RUANG

Chichilya Selistye Pricilya Sondakh^{1*}, Samuel Butar-Butar¹, dan Mickson Pinori¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Prisma, Jl. Pomorow No.113, Manado, Indonesia

*chichilya.s.p.sondakh@gmail.com

Masuk: 19-07-2025, revisi: 23-07-2025, diterima untuk diterbitkan: 31-10-2025

ABSTRACT

North Sulawesi is reported to have kaolin deposit reserves reaching to 20 million tons. Metakaolin as a result of calcination of kaolin can be used as a basic material for making environmentally friendly concrete known as geopolymer concrete. The binding process of geopolymer concrete requires elevated temperature curing which in technical construction implementation can be a constraint, so efforts are needed to obtain geopolymer concrete with more practical curing without reducing the quality of the concrete. One alternative that can be done is ambient curing but it requires other materials in the mixture that in the process generate heat to help the polymerization process. The materials chosen as metakaolin substitutes in this study were portland cement and white portland cement by replacing 10% and 15% of the total weight of metakaolin, respectively. The purpose of this study is to obtain the characteristics of North Sulawesi's local metakaolin-based geopolymer concrete with ambient curing by reviewing 3 parameters: concrete compressive strength, then concrete strength against flexure and splitting tensile strength using quantitative research methods through experiments. The results of the study showed that metakaolin-based geopolymer concrete could be made with ambient curing without partial substitution of metakaolin, but with 15% portland cement or white portland cement substitution, geopolymer concrete experienced an increase in compressive strength even reaching 31.4 MPa, splitting tensile strength was obtained at an average of 3.8 MPa and flexural strength was obtained at an average of 0.126 MPa.

Keywords: Eco-concrete; geopolymer; metakaolin; ambient curing

ABSTRAK

Sulawesi Utara dilaporkan memiliki cadangan endapan kaolin mencapai 20 juta ton. Metakaolin sebagai hasil kalsinasi dari kaolin bisa dimanfaatkan sebagai material dasar pembuatan beton ramah lingkungan yang dikenal sebagai beton geopolimer. Proses pengikatan beton geopolimer memerlukan perawatan panas yang dalam teknis pelaksanaan konstruksi bisa menjadi kendala, sehingga diperlukan upaya untuk mendapatkan beton geopolimer dengan perawatan yang lebih praktis namun tidak mengurangi mutu beton. Salah satu alternatif yang bisa dilakukan yaitu dengan perawatan suhu ruang namun diperlukan material lain dalam campuran yang dalam prosesnya menghasilkan panas sehingga bisa membantu proses polimerisasi. Material yang dipilih sebagai substituen parsial metakaolin dalam penelitian ini adalah semen dan semen putih dengan mengganti masing-masing 10% dan 15% dari total berat binder. Tujuan penelitian ini yaitu mendapatkan karakteristik beton geopolimer berbasis metakaolin lokal Sulut pada perawatan suhu ruang. Parameter yang ditinjau yaitu kuat tekan beton, kemudian kekuatan beton terhadap lentur dan tarik belah dengan menggunakan metode penelitian kuantitatif melalui eksperimen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa beton geopolimer berbasis metakaolin bisa dilakukan dengan perawatan suhu ruang tanpa substitusi parsial metakaolin, namun dengan substitusi 15% semen atau semen putih beton geopolimer mengalami peningkatan kuat tekan bahkan mencapai 31,4 MPa, kuat tarik belah didapatkan rata-rata 3,8 MPa dan kuat lentur rata-rata 0,126 MPa.

Kata kunci: Beton ramah lingkungan; geopolimer; metakaolin; perawatan suhu ruang

1. PENDAHULUAN

Beton sebagai material konstruksi terbuat dari campuran agregat kasar, agregat halus, dan bahan pengikat yang kemudian membentuk massa yang keras seperti batu. Bahan pengikat yang umum digunakan adalah semen portland, namun penggunaan semen ternyata memberikan dampak buruk terhadap lingkungan, karena produksi semen itu sendiri turut berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca. Davidovits (1994) mengemukakan laporan lembaga penelitian Chatam House bahwa industri semen di seluruh dunia memberikan kontribusi sekitar 8% dari total emisi gas rumah kaca yang disebabkan manusia. Produksi semen diperkirakan akan semakin meningkat kedepannya. Total luas bangunan beton di dunia pada tahun 2016 terdata sekitar 235 Milyar meter kuadrat, dan diperkirakan jumlah ini akan menjadi 2 kali lipat dalam 40 tahun berikutnya (Olivier et al., 2016). Indonesia sendiri tercatat sebagai negara

ke-5 dengan kontribusi terbanyak dunia memproduksi semen portland (UN Environment and International Energy Agency, 2017). Oleh karena sebagai salah satu upaya melestarikan lingkungan global dari dampak produksi semen beberapa dekade terakhir mulai dikembangkan beton yang disebut lebih ramah lingkungan karena bahan pengikat yang digunakan bukan semen portland, melainkan material pengganti dengan karakteristik seperti semen yang kemudian lebih dikenal dengan beton geopolimer.

Joseph Davidovits adalah yang pertama kali memperkenalkan Geopolimer pada tahun 1978, saat meneliti struktur mineral dari piramid sebagai objek pertama dan ditemukan bahwa piramid dibangun menggunakan fabrikasi material yang sudah modern yaitu dengan mencampurkan metakaolinit dan larutan alkali. Campuran ini menjadi polimer alumina-silika anorganik dimana silika dan alumunium mengikat menjadi blok bangunan dalam proses polimerisasi, dan hasil strukturnya mirip dengan ikatan batu alam, sehingga kemudian dikenal dengan nama Geopolimer (Septia, 2015).

Xu dan van Deventer (2000) meneliti 15 jenis material sebagai prekursor *geopolymer*. Dilakukan investigasi ke semua prekursor tersebut dengan berbagai variasi kombinasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pengikatan polimer menjadikan geopolimer memiliki kuat tekan yang tinggi dengan kemungkinan *crack* yang lebih rendah. Adapun Septia (2015) menganalisis faktor-faktor yang mempengaruhi karakteristik beton geopolimer antara lain suhu dan waktu perawatan, jenis prekursor, konsentrasi NaOH, modulus aktivator dan rasio tambahan air/prekursor. Samadhi dan Pratama (2013) meneliti kelayakan teknis pemanfaatan material dari Indonesia yaitu kaolin dan fly ash sebagai bahan baku dan hasilnya memenuhi harapan.

Menurut laporan Silaban & Patandung (2019), Sulawesi Utara memiliki cadangan endapan kaolin diperkirakan mencapai 20 juta ton, termasuk diantaranya cadangan kaolin di Desa Toraget, Kecamatan Langowan Utara, Kabupaten Minahasa sebesar 1 juta ton. Endapan kaolin di Desa Toraget ini terjadi akibat pelapukan batuan *Pumice Vulcanic* oleh kegiatan hydrothermal dengan ketebalan rata-rata 3,71 meter yang diperkirakan meliputi daerah seluas 504 Ha, dan memiliki karakteristik kandungan silika 41,28%, alumina 38,97%; dan oksida besi 1,47%.

Penelitian beton geopolimer menggunakan metakaolin sebagai material dasar di Indonesia masih terbatas. Wulandari et al. (2016) melakukan kajian temperatur perawatan beton geopolimer yang menggunakan bahan dasar kaolin dan didapatkan suhu curing untuk kuat tekan optimum namun belum dilakukan tinjauan perawatan suhu ruang (ambient curing), sumber lainnya memberikan hasil komposisi campuran untuk mortar geopolimer berbasis metakaolin (Wulandari et al., 2016), bahkan sudah ada aplikasi mortar geopolimer untuk perbaikan non-struktural bangunan (Supit et al., 2022) namun belum meninjau secara keseluruhan karakteristik betonnya. Untuk kaolin lokal Sulawesi Utara pernah dilakukan tinjauan kuat tekan beton geopolimer dengan variasi perawatan (Waraba et al., 2023) namun belum menggunakan metakaolin melainkan kaolin murni tanpa kalsinasi sebagai material dasar. Dalam perkembangannya, mulai dikenal geopolimer hybrid yang didapatkan dengan mengkombinasikan geopolimer dengan bahan lain yang mengandung semen portland untuk membantu proses perawatan yang dapat dilakukan pada suhu ruangan dan tidak harus melakukan perawatan pada suhu tinggi. Geopolimer hybrid dibuat dengan proporsi campuran gabungan yang pas antara semen portland dan material yang memiliki kandungan silika dan alumina yang tinggi. Pada penelitian ini dipilih 2 jenis material campuran yang digunakan untuk mensubstitusi parsial metakaolin sebagai prekursor utama sebesar 10% dan 15% yaitu semen portland dan semen portland putih.

SNI 15-0129-2004 mendefinisikan semen putih sebagai semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling klinker putih yang penyusun utamanya kalsium silikat dicampur dengan bahan tambahan lainnya berupa kristal senyawa kalsium sulfat. Semen putih lebih murni dari semen abu, dengan kandungan besi oksida yang rendah dan digunakan untuk pekerjaan penyelesaian (*finishing*), seperti sebagai filler atau pengisi ataupun untuk kepentingan estetis. Namun dalam penelitian terdahulu oleh Hamad (1995) ditemukan bahwa semen putih memiliki kuat tekan yang lebih tinggi dan lebih cepat mencapai kuat tekan ultimit dibandingkan semen biasa. Bahkan dengan material dasar semen putih bisa mendapatkan beton putih yang kuat tekannya mencapai 60 MPa (Temiz et al., 2013).

Tulisan ini bertujuan untuk analisis karakteristik beton geopolimer berbasis metakaolin dengan cara mengurai proses produksi dan mengidentifikasi potensi beton geopolimer berbasis metakaolin memanfaatkan material lokal kaolin Toraget Sulawesi Utara pada perawatan suhu ruang dengan 2 jenis material substituen semen dan semen putih. Adapun parameter yang ditinjau yaitu kuat tekan beton, serta kekuatan beton terhadap lentur dan tarik belah.

2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian kuantitatif melalui eksperimen digunakan dalam penelitian ini untuk mengetahui korelasi antara variabel bebas (komposisi dan perlakuan) terhadap variabel terikat (kekuatan beton terhadap tekan, tarik belah dan lentur) dengan tahapan.

Persiapan bahan dan alat penelitian

Bahan-bahan penelitian:

- Kaolin dari Desa Toraget, Minahasa.
- Agregat kasar berupa batu pecah berasal dari Kema, Minahasa Utara.
- Agregat halus berupa pasir didapatkan dari Amurang, Minahasa Selatan.
- Natrium Hidroksida (NaOH) purity 99% dan Natrium Silikat (Na_2SiO_3) sebagai alkali aktivator.
- Superplasticizer SIKA Viscocrete 3115n.
- Air.

Alat-alat penelitian:

- Alat pemeriksaan karakteristik agregat dari Laboratorium Uji Material Jurusan Teknik Sipil Politeknik Manado.
- X-Ray Fluorescence (XRF) di Pusat Laboratorium Forensik Bareskrim Polri.
- Mesin Furnace untuk pembakaran kaolin di Laboratorium Teknik Mesin Politeknik Manado.
- Concrete Mixer.
- Alat pengujian kekuatan beton terhadap tekan, tarik belah dan lentur.

Preparasi kaolin dan proses kalsinasi kaolin menjadi metakaolin

Persiapan kaolin dilakukan dengan cara kaolin dikeringkan sampai berat tetap kemudian dihaluskan. Setelah halus kaolin dimasukkan dalam oven pada suhu 800°C selama 6 jam sudah termasuk waktu pemanasan oven dan pendinginan sebelum metakaolin dikeluarkan dari oven.

Pemeriksaan karakteristik agregat

Pemeriksaan ini dilakukan untuk mengetahui sifat fisik material dengan maksud menentukan kebutuhan material dalam komposisi campuran beton. Adapun pemeriksaan yang dilakukan adalah:

- Pemeriksaan gradasi (ASTM C136-06)
- Pemeriksaan berat jenis dan absorpsi (SNI 1969:2008).
- Pemeriksaan berat volume (ASTM C29/C29M-09).
- Pemeriksaan kadar air.
- Pemeriksaan keausan.

Pemeriksaan komposisi kimia metakaolin Toraget

Bertujuan untuk mendapatkan informasi komposisi unsur-unsur yang terkandung dalam metakaolin Toraget melalui pengujian XRF yang dilakukan di Laboratorium Forensik Bareskrim Polri.

Mix design beton geopolimer berbasis metakaolin

Komposisi campuran didapat berdasarkan pemeriksaan karakteristik agregat dan kaolin dengan acuan referensi peneliti sebelumnya Tambingon et al. (2018) dan Hartono et al. (2022) yang kemudian dimodifikasi dengan trial mix.

- Metakaolin dalam kondisi OD.
- Agregat kasar dan agregat halus dalam kondisi SSD.
- Konsentrasi molaritas NaOH 10M.
- Modulus aktivator 2,5.
- Rasio metakaolin/aktivator 0,8.
- Superplasticizer 1%.
- Substitusi semen 10% dan 15%; Substitusi semen putih 10% dan 15%.

Proses curing

Setelah pencampuran, beton dicetak dan dipadatkan kemudian dilakukan *ambient curing* (perawatan pada suhu ruang) dan dilakukan juga perawatan dalam oven pada suhu 90°C selama 6 jam sebagai kontrol.

Pemeriksaan kuat tekan beton

Pemeriksaan dilakukan terhadap benda uji beton geopolimer berbentuk silinder berukuran diameter 100 mm, tinggi 200 mm. Benda uji diletakkan dalam alat uji kemudian diberikan beban/ tekanan hingga benda uji runtuh, dicatat kekuatan saat runtuh dalam MPa.

Pemeriksaan kuat tarik belah beton

Pemeriksaan dilakukan terhadap benda uji beton geopolimer berbentuk silinder berukuran diameter 100 mm, tinggi 200 mm. Benda uji diletakkan dalam alat uji kemudian diberi tekanan tarik hingga benda uji runtuh terbelah, dicatat kekuatan saat terbelah dalam MPa.

Pemeriksaan kuat tarik lentur beton

Pemeriksaan dilakukan terhadap benda uji beton geopolimer berbentuk balok berukuran 100 mm x 100 mm x 400 mm. Benda uji diletakkan dalam alat uji kemudian diberikan beban gaya yang bekerja tegak lurus terhadap sumbu benda uji sampai terjadi keruntuhan patah, dicatat kekuatan saat patah dalam MPa.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemeriksaan komposisi kimia metakaolin Toraget

Kaolin yang digunakan berasal dari desa Toraget Kabupaten Minahasa Provinsi Sulawesi Utara. Metakaolin didapatkan dari hasil kalsinasi kaolin Toraget pada suhu pembakaran 800°C selama 6 Jam. Untuk mendapatkan komposisi metakaolin Toraget, dilakukan pengujian XRF yang dilaksanakan di Pusat Laboratorium Forensik Bareskrim Polri dengan hasil pengujian dalam Tabel 1.

Tabel 1. Hasil pemeriksaan komposisi metakaolin Toraget

Unsur Kimia	Metakaolin (%)
Si	66,75
Al	26,73
Ti	2,36
Fe	1,45
P	1,06
Ca	0,67
S	0,42
Sr	0
Cl	0,11
Ba	0,08
La	0,06
K	0,07
Lainnya	0,24

Berdasarkan hasil pemeriksaan komposisi melalui pengujian XRF, kaolin Toraget yang digunakan pada penelitian ini didominasi oleh unsur Silika dan Alumina yang merupakan unsur utama pembentuk geopolimer. Jika dijumlahkan ketiga senyawa pembentuk silikat, aluminat dan besi oksida persentasenya melebihi 70%, sehingga kaolin Toraget ini bisa digunakan sebagai bahan dasar pembentuk beton geopolimer dimana kaolin yang digunakan telah dihaluskan dan dikalsinasi terlebih dahulu menjadi metakaolin (ASTM C618-19).

Pemeriksaan karakteristik agregat

Pemeriksaan karakteristik dilakukan terhadap agregat halus dan agregat kasar yang digunakan dalam campuran beton, di Laboratorium Uji Material Jurusan Teknik Sipil Politeknik Manado. Agregat halus berupa pasir dari sungai Ranoyapo, Amurang dan agregat kasar berupa batu pecah diambil dari Kema, Minahasa Utara. Pemeriksaan karakteristik agregat dengan hasil pemeriksaan agregat halus di Tabel 2 dan pemeriksaan agregat kasar di Tabel 3.

Data hasil pemeriksaan karakteristik pada Tabel 2 menunjukkan bahwa agregat halus sudah memenuhi standar modulus kehalusan, berat jenis, absorpsi dan berat volume. Kadar air agak berlebihan namun ini tidak mempengaruhi proses pencampuran karena agregat halus dibuat dalam kondisi SSD untuk menjaga kestabilan kadar air selama proses pembuatan beton geopolimer. Untuk hasil pemeriksaan agregat kasar yang ditunjukkan Tabel 3 secara keseluruhan sudah memenuhi standar hanya ada kurang sedikit di berat volume keadaan gembur.

Tabel 2. Karakteristik agregat halus Amurang

No.	Jenis Pengujian	Hasil	Spesifikasi	Satuan
1	Modulus Kehalusan	2,5953	2,3 -3,1 (ASTM C33/C33M-08)	-
2	Kadar Air	6,1368	3,0 – 5,0	%
3	Berat Jenis			
	Bulk Specific Gravity on SSD	2,5102	2,56 - 2,86	-
	Absorpsi	5,3874	2,0 – 7,0	%
4	Berat Volume			
	Keadaan padat	1,4968	1,4 - 1,9	Gr/cm3
	Keadaan gembur	1,3284		

Tabel 3. Karakteristik agregat kasar Kema

No.	Jenis Pengujian	Hasil	Spesifikasi	Satuan
1	Modulus Kehalusan	2,8066	2,3 -3,1 (ASTM C33/C33M-08)	-
2	Kadar Air	2,5778	3,0 – 5,0	%
3	Berat Jenis			
	Bulk Specific Gravity on SSD	2,0394	2,56 - 2,86	-
	Absorpsi	2,8807	2,0 – 7,0	%
4	Berat Volume			
	Keadaan padat	1,4947	1,4 - 1,9	Gr/cm3
	Keadaan gembur	1,3284		
5	Keausan	18	< 40	%

Pemeriksaan kuat tekan beton geopolimer berbasis metakaolin Toraget

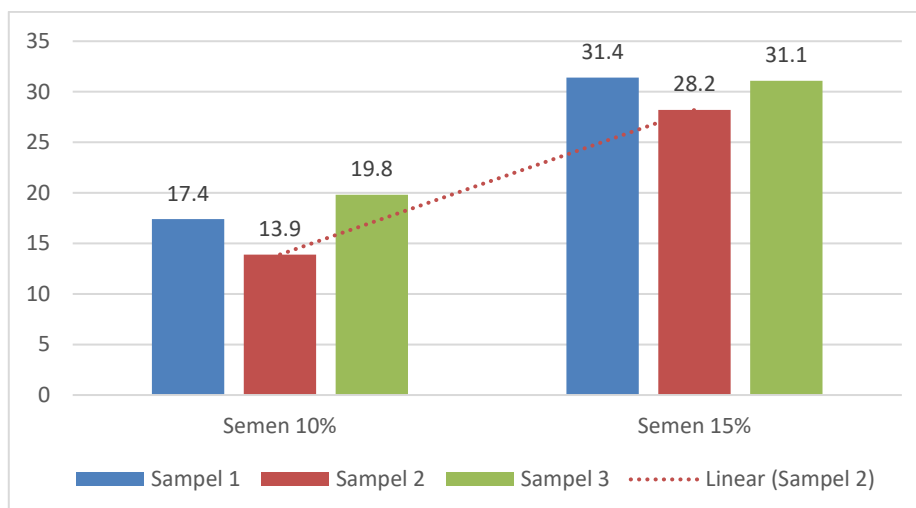
Metakaolin adalah hasil dehidroksilasi kaolin pada suhu tertentu yang terbentuk dari proses endotermis (Purbasari & Samadhi, 2021). Ini dilakukan karena reaktivitas kaolin dalam keadaan alaminya rendah sehingga perlu diubah menjadi reaktif. Pada penelitian ini kaolin dipanaskan pada suhu 800°C selama 6 jam sudah termasuk waktu pemanasan oven dan pendinginan sebelum metakaolin dikeluarkan dari oven.

Pengujian dilakukan terhadap beton geopolimer dengan 100% metakaolin, substitusi dengan semen sebesar 10% & 15% dan substitusi semen putih 10% & 15% dari berat binder dengan *ambient curing* atau perawatan suhu ruangan, juga dilakukan *elevated temperature curing* pada suhu 90°C selama 6 Jam sebagai kontrol.

Semen yang digunakan yaitu semen merek Tonasa, sedangkan semen putih menggunakan merek Tiga Roda. Setelah pengujian kemampuan beton terhadap tekanan pada umur 7 hari dengan substitusi semen dapat dilihat pada Tabel 4 dengan korelasi antara kuat tekan dengan variasi substitusi semen dalam Gambar 1.

Tabel 4. Kekuatan beton geopolimer berbasis metakaolin Toraget dengan substitusi semen

Kode Sampel	Parameter	Berat Benda Uji (Kg)	Kuat Tekan (Mpa)
MKS-10			
1	90% Metakaolin,	3,575	17,4
2	10% Semen	3,595	13,9
3		3,565	19,8
	Rata-rata		17,03
MKS-15			
1	85% Metakaolin,	3,589	31,4
2	15% Semen	3,508	28,2
3		3,550	31,1
	Rata-rata		30.23

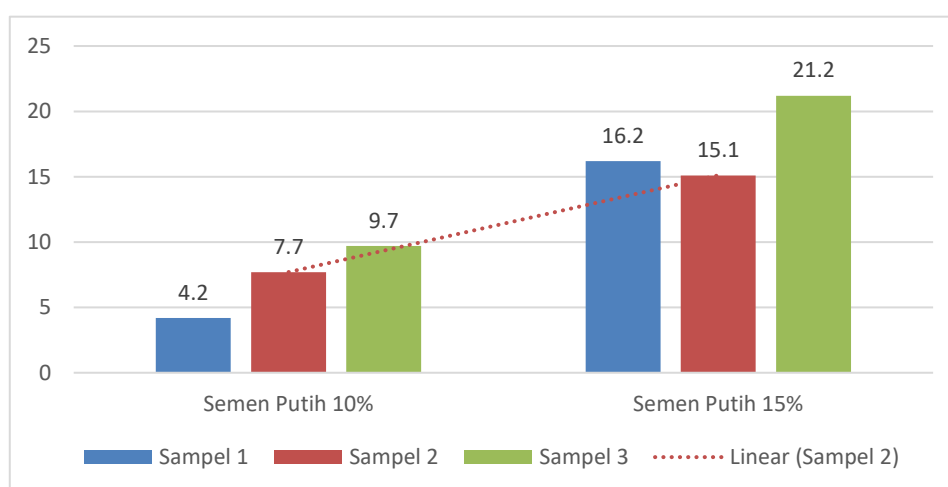


Gambar 1. Korelasi kuat tekan beton geopolimer berbasis metakaolin terhadap substitusi semen

Semakin tinggi kadar semen yang digunakan untuk mengganti sebagian metakaolin pada beton geopolimer dengan perawatan ruangan maka semakin tinggi pula kuat tekan yang dihasilkan. Pesik et al. (2018) juga mendapatkan hasil yang serupa yaitu terjadi peningkatan nilai kuat tekan sampai substitusi semen 10% untuk beton geopolimer berbasis abu terbang. Untuk variasi substitusi semen putih kuat tekan yang dihasilkan pada Tabel 5 dan korelasi antara kuat tekan terhadap substitusi semen putih dalam Gambar 2 berikut ini.

Tabel 5. Kekuatan beton geopolimer berbasis metakaolin Toraget dengan substitusi semen putih

Kode Sampel	Parameter	Berat Benda Uji (Kg)	Kuat Tekan (Mpa)
MKSP-10			
1	90% Metakaolin,	3,470	4,2
2	10% Semen	3,535	7,7
3	Putih	3,475	9,7
Rata-rata			7,2
MKSP-15			
1	85% Metakaolin,	3,294	16,2
2	15% Semen	3,061	15,1
3	Putih	3,457	21,2
Rata-rata			17,5

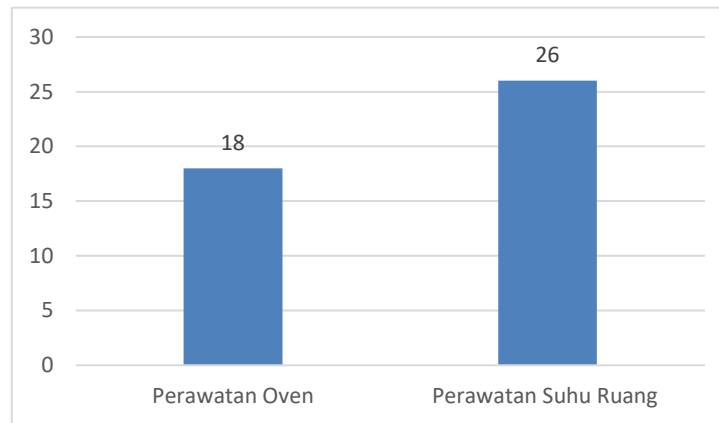


Gambar 2. Korelasi kuat tekan beton geopolimer berbasis metakaolin terhadap substitusi semen putih

Penggantian sebagian metakaolin dengan semen putih pada beton geopolimer berbasis metakaolin memberikan pola yang serupa dengan substitusi semen yaitu terjadi peningkatan kuat tekan seiring dengan bertambahnya kadar semen putih yang diberikan. Peningkatan kuat tekan seiring bertambahnya kadar semen putih pada beton geopolimer juga ditemukan pada penelitian Tjoanto et al. (2021) namun objeknya menggunakan abu terbang sebagai material dasar.

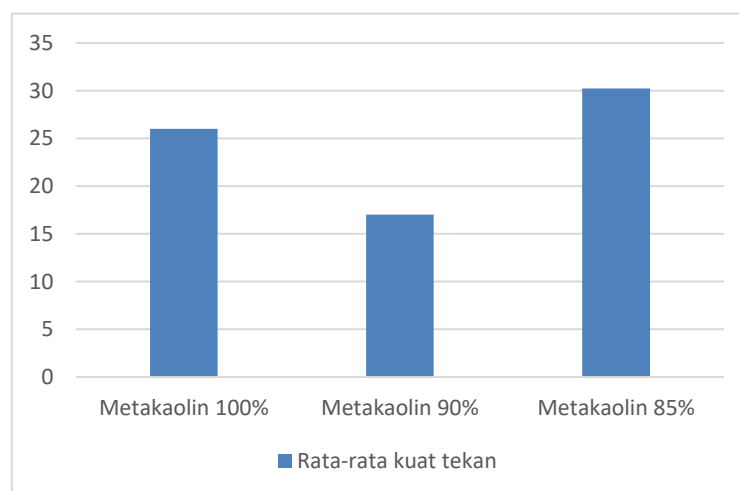
Peningkatan ini terjadi karena dalam proses hidrasi semen menghasilkan panas yang dibutuhkan dalam proses polimerisasi metakaolin sehingga tidak lagi memerlukan oven untuk membantu proses pengikatan dan bisa hanya dengan perawatan suhu ruang atau ambient curing.

Untuk perbandingan kuat tekan yang dihasilkan beton geopolimer berbasis metakaolin murni tanpa substitusi semen atau semen putih yang dirawat dalam suhu ruang terhadap perawatan dalam oven temperatur 90°C selama 6 Jam diperlihatkan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Perbandingan kuat tekan beton geopolimer berbasis metakaolin dengan *ambient curing* terhadap *elevated temperature curing*

Dari Gambar 3 dapat dilihat bahwa tanpa substitusi semen maupun semen putih, beton geopolimer berbasis metakaolin Toraget bisa dilakukan dengan perawatan suhu ruang bahkan bisa mencapai kuat tekan diatas 25 Mpa. Perawatan *elevated temperature* dalam oven mengalami penurunan dari yang diharapkan karena waktu pengikatan dalam oven tidak cukup sehingga beton geopolimer tidak mencapai kuat tekan optimalnya. Pemilihan temperatur dan waktu curing dalam oven mempengaruhi hasil yang didapatkan, seperti yang ditemukan juga oleh Achmad dan Hidjan (2012), kuat tekan beton geopolimer tanpa perawatan lebih tinggi dari perawatan dalam oven karena temperatur *curing* yang terlalu tinggi. Terjadi peningkatan kekuatan dan pengurangan porositas geopolimer yang dicampur dengan PCC pada perawatan suhu ruangan, karena panas yang dihasilkan dari lingkungan diserap oleh material polimerik untuk memulai reaksi (Nuruddin et al., 2011). Hal tersebut membuktikan bahwa penggunaan PCC membantu ikatan polimerisasi yang lebih cepat sehingga meningkatkan kekuatan pada perawatan suhu ruangan. Perbandingan kuat tekan tanpa maupun dengan bahan pengganti semen atau semen putih dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Komparasi kekuatan beton geopolimer berbasis metakaolin dengan variasi persentase substitusi

Gambar 4 menunjukkan bahwa dengan perawatan suhu ruang, beton geopolimer berbasis metakaolin 100% memiliki kuat tekan yang lebih tinggi dibanding beton geopolimer dengan binder metakaolin 90% + 10% diganti dengan semen atau semen putih dikarenakan keberadaan binder mempengaruhi proses polimerisasi. Selain itu proses pencetakan benda uji tidak sempat melakukan pemadatan seperti seharusnya karena *setting time* yang lebih cepat, sehingga secara visual beton terdapat banyak pori. Hal serupa juga ditemukan oleh Wurangian et al. (2022) pada tinjauannya terhadap komposisi campuran dan metode pembuatan mortar metakaolin geopolimer, dimana pada metakaolin geopolimer 100% lebih tinggi kuat tekannya dibanding metakaolin hibrida 95%+5% semen. Namun seiring bertambahnya material substituen semen maupun semen putih, kekuatan beton meningkat bahkan pada binder metakaolin 85% + 15% diganti dengan semen atau semen putih berpotensi mendapatkan kuat tekan yang lebih tinggi dibanding metakaolin 100%. Seperti yang ditemukan oleh Luntungan et al. (2019), dengan trend diagram yang sama yaitu terjadi penurunan kuat tekan pada substitusi semen atau kapur 12.5% dibanding 0% kemudian meningkat terus pada substitusi 15% - 20%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin bertambah variasi substitusi maka nilai kuat tekan juga meningkat sampai persentase tertentu tidak bisa dilanjutkan lagi karena setting time semakin cepat yang mempersulit pengerjaan beton.

Pemeriksaan kekuatan beton geopolimer berbasis metakaolin Toraget terhadap gaya tarik belah dan lentur

Kuat tarik belah adalah nilai kekuatan yang diperoleh dengan membebani benda uji berbentuk silinder yang diletakkan mendatar sejajar permukaan media penekan dimana gaya diberikan tegak lurus benda uji sampai terjadi keruntuhan belah. (SNI 03:2491, 2002). Faktor pembentuk kekuatan tarik sama dengan kuat tekan hanya besarnya kuat tarik untuk beton normal pada umumnya adalah antara 9% - 15% dari kuat tekannya (Supit et al., 2016). Kekuatan tarik dalam penelitian ini ditentukan dengan menggunakan percobaan belah silinder dimana silinder ukuran diameter 100 mm dan tinggi 200 mm diberikan beban tegak lurus terhadap sumbu longitudinalnya dengan silinder ditempatkan secara horisontal diatas pelat mesin percobaan. Benda uji terbelah dua pada saat dicapainya kekuatan tarik.

Kuat lentur adalah nilai kekuatan yang diperoleh dengan membebani benda uji berbentuk balok dengan ukuran 100 mm x 100 mm x 400 mm yang diletakkan mendatar sejajar permukaan media penekan dimana gaya diberikan tegak lurus benda uji sehingga terjadi deformasi akibat lentur sampai terjadi keruntuhan patah, atau juga didefinisikan sebagai hasil bagi antara momen lentur terhadap momen inersia balok beton (Gunawan et al., 2018).

Pemeriksaan dilakukan pada komposisi campuran yang dimodifikasi untuk mendapatkan kelecakan pasta beton yang lebih bagus dan setting time yang lebih lama. Metakaolin dalam kondisi kering oven, agregat kasar dan agregat halus dalam kondisi SSD, konsentrasi molaritas NaOH dipertahankan di 10 Molar, modulus aktivator menjadi 3.0, rasio metakaolin/aktivator menjadi 1.0, dosis superplasticizer 2% dari berat massa padat dan dilakukan substitusi semen 15% untuk perawatan suhu ruang. Pemeriksaan dilakukan pada umur beton 28 hari dengan hasil ditunjukkan dalam Tabel 6-7.

Tabel 6. Kuat tarik belah beton geopolimer berbasis metakaolin Toraget dengan perawatan suhu ruang

No Benda Uji.	Berat Volume	P_{max} (kN)	f_{ct} (Mpa)
1	2.238	33,715	4,3
2	2.213	30,171	3,8
3	2.220	26,750	3,4
Rata-rata	2.224	30,212	3,83

Tabel 7. Kuat lentur beton geopolimer berbasis metakaolin Toraget dengan perawatan suhu ruang

No Benda Uji.	Berat Volume	P_{max} (kN)	σ_f (Mpa)
1	2.238	7,515	0,187
2	2.250	4,775	0,119
3	2.238	2,844	0,071
Rata-rata	2.242	5,045	0,126

Berdasarkan Tabel 6-7, berat volume benda uji beton pada penelitian ini berkisar pada 2.200 kg/m³ sesuai klasifikasi SNI 03-2834-2000, sehingga beton geopolimer berbasis metakaolin Toraget ini termasuk jenis beton berbobot normal. Kuat tarik belah rata-rata didapatkan cukup tinggi yaitu sekitar 3,83 MPa pada umur beton 28 hari. Jika dibandingkan dengan kuat tekan rata-rata beton dengan substitusi semen 15% yaitu sekitar 30,23 MPa, maka nilai rata-rata kuat

tarik belah yaitu sebesar 12,67%, sedangkan untuk nilai kuat tarik lentur didapatkan sebesar 0.42% dari nilai kuat tekan rata-rata beton geopolimer berbasis metakaolin Toraget.

4. KESIMPULAN

Material dasar beton geopolimer pada penelitian ini menggunakan metakaolin yang berasal dari Toraget, Sulawesi Utara yang memiliki kandungan Silika dan Alumina yang tinggi ditunjukkan dari hasil pengujian XRF, oleh karena itu metakaolin Toraget berpotensi digunakan sebagai bahan baku beton geopolimer. Substitusi material semen memiliki nilai kekuatan yang lebih tinggi dibanding semen putih. Persentase substitusi semen ataupun semen putih 15% nilai kuat tekannya lebih tinggi dibanding substitusi 10% dari total berat binder, yang menunjukkan bahwa semakin tinggi persentase substitusi maka semakin tinggi pula kuat tekan yang didapatkan namun dibatasi oleh *setting time* yang semakin cepat dan mempersulit pengerjaan. Kuat tekan beton berbasis metakaolin Toraget murni tanpa substitusi parsial dengan semen atau semen putih yang dirawat suhu ruang bisa memberikan hasil diatas 25 MPa. Perawatan dengan suhu ruang bisa dilakukan dengan potensi kuat tekan beton geopolimer metakaolin dengan substitusi semen 15% mencapai 30 MPa. Secara keseluruhan, kuat tekan optimum beton geopolimer berbasis metakaolin terdapat pada variasi campuran dengan substitusi semen dengan kadar 15% dari berat binder. Kuat tarik belah dan kuat lentur masing-masing didapatkan rata-rata 12,67% dan 0,42% dari nilai kekuatan tekan rata-rata beton geopolimer berbasis metakaolin Toraget.

Acknowledgement

Penelitian ini didukung oleh Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi melalui Direktorat Riset, Teknologi, dan Pengabdian kepada Masyarakat (DRTPM) pada Program Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Tahun Anggaran 2024 skema Penelitian Dosen Pemula dengan nomor 0141/E5/AL.04/2024.

DAFTAR PUSTAKA

- Achmad, D., & Hidjan, A. G. (2012). Efek perawatan terhadap karakteristik beton geopolimer. *Poli-Teknologi*, 11(1), 79–86.
- ASTM International. (2019). *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete* (ASTM C618-19). <https://store.astm.org/c0618-19.html>
- ASTM International. (2006). *Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates* (ASTM C136-06). <https://store.astm.org/c0136-06.html>
- ASTM International. (2009). *Standard test method for bulk density ("unit weight") and voids in aggregate* (ASTM C29/C29M-09). https://store.astm.org/c0029_c0029m-09.html.
- ASTM International. (2008). *Standard Specification for Concrete Aggregates* (ASTM C33/C33M-08). https://store.astm.org/c0033_c0033m-08.html
- Badan Standarisasi Indonesia. (2002). Metode pengujian kuat tarik belah beton (SNI 03-2491-2002).
- Badan Standarisasi Indonesia. (2008). Cara uji berat jenis dan penyerapan air agregat kasar (SNI 1969:2008).
- Davidovits, J. (1994). Global warming impact on the cement and aggregates industries. *World Resource Review*, 6(2), 263–278.
- Gunawan, P., Budi, A. S., & Wicaksono, K. D. (2018). Kuat lentur, toughness, dan stiffness pada beton ringan teknologi foam dengan bahan tambah serat aluminium. *E-Jurnal Matriks Teknik Sipil*, 2(2), 109–116. <https://jurnal.uns.ac.id/matriks/article/download/37443/24673>
- Hamad, B. (1995). Investigations of chemical and physical properties of white cement concrete. *Advanced Cement Based Materials*, 2(4), 161–167. [https://doi.org/10.1016/1065-7355\(95\)00004-b](https://doi.org/10.1016/1065-7355(95)00004-b)
- Hartono, J., Fitria, L., Budi, A., & Teguh, H. (2022). Komparasi kuat tekan beton geopolimer berbahan dasar fly ash dengan metode curing oven dan suhu ruang. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, 12(2), 383. <https://doi.org/10.29103/tj.v12i2.714>
- Olivier, J. G. J., Maenhout, G. J., Muntean, M., & Peters, J. A. H. W. (2016). *Trends in global CO2 emissions: 2016 report*. The Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL). <https://www.pbl.nl/en/publications/trends-in-global-co2-emissions-2016-report>
- Luntungan, R. N., Sumajouw, M. D. J., & Pandaleke, R. E. (2019). Optimalisasi kuat tekan beton geopolimer dengan menambahkan semen atau kapur pada perawatan temperatur ruangan. *Jurnal Sipil Statik*, 7(7), 749–756.
- Nuruddin, M. F. N., Kusbiantoro, A. K., Qazi, S. Q., Darmawan, M. S. D., & Husin, N. A. H. (2011). Development of geopolimer concrete with different curing conditions. *IPTEK The Journal for Technology and Science*, 22(1), 24–28. <https://doi.org/10.12962/j20882033.v22i1.54>
- Pesik, J., Sumajouw, M. D. J., & Pandaleke, R. E. (2018). Karakteristik mekanik beton geopolimer dengan perawatan suhu ruangan (ambient curing). *Jurnal Tekno*, 16(69), 25–29.

- Purbasari, A., & Samadhi, T. W. (2021). Kajian dehidroksilasi termal kaolin menjadi metakaolin menggunakan analisis termogravimetri. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 17(1), 105. <https://doi.org/10.20961/alchemistry.17.1.47337.105-112>
- Samadhi, T. W., & Pratama, P. (2013). *Synthesis of geopolimer from Indonesian kaolin and fly ash as a green construction material*. Dalam *Moving Towards the New Chapter in Chemical Engineering amongst ASEAN Region*. The 5th Regional Conference on Chemical Engineering.
- Septia, P. (2015). *Studi literatur pengaruh konsentrasi NaOH dan Rasio NaOH:Na₂SiO₃, rasio air/prekursor, suhu curing, dan jenis prekursor terhadap kuat tekan beton geopolimer* [Skripsi, Universitas Indonesia].
- Silaban, D. P., & Patandung, P. (2019). Pengaruh substitusi kaolin toraget terhadap gipsium untuk profil dengan bahan pengisi serat sabut kelapa. *Jurnal Penelitian Teknologi Industri*, 11(2), 47–54.
- Supit, S., Makalew, F., Mandang, D., & Wurangian, Y. (2022). Karakteristik campuran metakaolin geopolimer sebagai material perbaikan non struktural bangunan. *Prosiding Seminar Nasional Terapan Riset Inovatif (SENTRINOV)*, 8(1), 359–366.
- Supit, F. V., Pandaleke, R., & Dapas, S. O. (2016). Pemeriksaan kuat tarik belah beton dengan variasi agregat yang berasal dari beberapa tempat di Sulawesi Utara. *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 6(2), 476–484.
- Tambingon, F. R., Sumajouw, M. D. J., & Wallah, S. E. (2018). Kuat tekan beton geopolimer dengan perawatan temperatur ruangan. *Jurnal Sipil Statik*, 6(9), 641–648.
- Temiz, H., Kose, M. M., & Genc, H. M. (2013). Mechanical behavior of white concrete. *TEM Journal*, 2(1), 73–79. <https://doi.org/10.18421/tem21-10>
- Tjoanto, R., Wallah, S. ., & Handono, B. . (2021). Pengujian kuat tekan beton geopolimer dengan penambahan semen putih pada perawatan suhu ruang. *Jurnal Sipil Statik*, 9(4), 755–762. <https://ejournal.unsrat.ac.id/v3/index.php/jss/article/view/39034>
- UN Environment and International Energy Agency. (2017). *Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector (global status report 2017)*. United Nations Environment Programme. <https://globalabc.org/sites/default/files/2020-09/2017%20GlobalABC%20GSR%20.pdf>
- Waraba, H. J., Wallah, S. E., & Windah, R. S. (2023). Pengaruh perawatan terhadap kuat tekan beton geopolimer berbasis kaolin. *Jurnal TEKNO*, 21(86), 1981–1990. <https://ejournal.unsrat.ac.id/v3/index.php/tekno/article/view/52442>
- Wulandari, T., Bachtiar, G., & Hadi, W. (2016). Kajian temperatur curing pada kuat tekan beton geopolimer berbahan dasar kaolin [Disertasi doktor, Universitas Negeri Jakarta].
- Wurangian, Y., Supit, S., Makalew, F., & Mandang, D. (2022). Komposisi campuran dan metode pembuatan mortar metakaolin geopolimer. *Prosiding Seminar Nasional Terapan Riset Inovatif (SENTRINOV)*, 8(1), 9–16. <https://proceeding.isas.or.id/index.php/sentrinov/article/view/1140>
- Xu, H., & van Deventer, J. S. J. (2000). The geopolimerisation of alumino-silicate minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 59(3), 247-266. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(99\)00074-5](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00074-5)