

Studi Parametrik Kuat Tekan Mortar Geopolimer Abu Terbang***Parametric Study of Compressive Strength Fly Ash Geopololymer Mortar*****Niko Rizaldi¹, Ali Imron Rusadi², Gunawan Wibisono³, Edy Saputra⁴, Monita Olivia^{5*}**

^{1,2,3,4,5}Jurusan Teknik Sipil-Fakultas Teknik-Universitas Riau
Alamat Korespondensi : Jl. Pekanbaru Bangkinang KM 12,5 Panam Pekanbaru
email: monita.olivia@lecturer.unri.ac.id

Abstract

Fly ash is a residue from coal-burning activities that is fine granules or powder, generally used for landfills and plant fertilizer. Fly ash can be used as partial replacement of cement in mortar. Materials that use fly ash are activated by a combination of sodium hydroxide and sodium silicate known as geopolymers. This studies were aimed to find out compressive strength the optimum composition of the parameters by sodium hydroxide concentration, modulus silicate, and additional OPC. Fly ash was used in class F and was used for the source material, a mortar for plaster. The mortar was made by mixing fly ash, sand, sodium hydroxide, and sodium silicate, and superplasticizer, then the mortar was moulded and rested for three days. Samples were cured in ambient condition, and compressive strength tests of mortar were carried out on 7, 14, and 28 days. The result of parametric studies showed the optimum composition of fly ash geopolimer mortar that can be made with a combination of 12M sodium hydroxide, modulus silicate 2, and additional OPC of 30% in ambient conditions.

Keywords: *fly ash, geopolimer; modulus silicate; sodium hydroxide; ambient curing.*

Abstrak

Abu terbang adalah limbah berbentuk butiran halus atau bubuk berasal dari aktivitas pembakaran batu bara. Abu terbang biasanya digunakan sebagai material timbunan dan pupuk tanaman, namun dalam penelitian lebih lanjut abu terbang dapat dimanfaatkan sebagai pengganti sebagian maupun semen pada mortar. Material abu terbang diaktifkan dengan kombinasi natrium hidroksida dan natrium silikat yang dikenal sebagai geopolimer. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan komposisi optimum kuat tekan mortar geopolimer abu terbang dari parameter konsentrasi natrium hidroksida, modulus silikat, dan tambahan OPC. Abu terbang yang digunakan adalah kelas F, dan dimanfaatkan sebagai bahan dasar mortar untuk plester. Mortar dibuat dengan mencampurkan abu terbang, pasir, natrium hidroksida dan natrium silikat serta *superplasticizer*, lalu mortar dicetak dan didiamkan selama tiga hari (*rest period*). Sampel dirawat pada suhu ruang dan dilakukan uji kuat tekan mortar umur 7, 14, dan 28 hari. Hasil pengujian studi parametrik menunjukkan komposisi optimum mortar geopolimer abu terbang dapat dibuat dengan kombinasi variabel natrium hidroksida 12M, modulus silikat 2 dan tambahan OPC sebesar 30% pada suhu ruang.

Kata kunci: abu terbang; geopolimer; modulu silikat; natrium hidroksida; suhu ruang.

Please cite this article as:

Rizaldi, N., Rusadi, A. I., Wibisono, G., Saputra, E., & Olivia, M. (2020). Studi Parametrik Kuat Tekan Motrar Geopolimer Abu Terbang. *Media Teknik Sipil*, 18(2). doi:<https://doi.org/10.22219/jmts.v18i2.12921>

PENDAHULUAN

Salah satu limbah industri hasil penggunaan energi batu bara adalah abu terbang (*fly ash*). Kandungan mineral seperti alumina, silika, kalsium, besi dan senyawa lainnya terdapat pada abu terbang (Hadi et al., 2018). Tiap abu terbang memiliki kandungan senyawa yang dipengaruhi oleh suhu pembakaran, lama pembakaran, dan asal dari batu bara. Sehingga abu terbang memiliki spesifikasi tersendiri dengan abu terbang lainnya dan tidak dapat disamakan (Olivia, 2015). Abu terbang diklasifikasikan dalam tiga kelas berdasarkan nilai senyawa yang dikandungnya, yaitu kelas C, N, dan F (ASTM-C618-05).

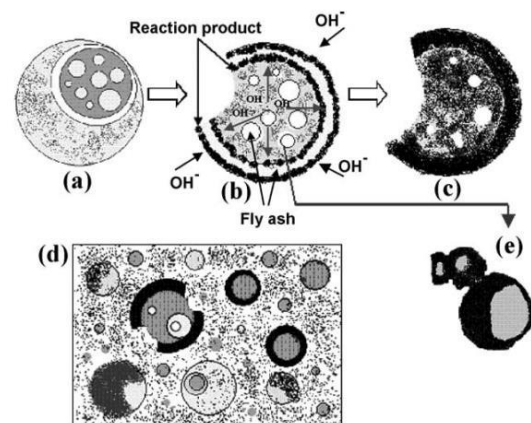
Abu terbang kelas C memiliki jumlah besi oksida, alumina, silika minimal 50%, abu terbang ini dikenal sebagai *high calcium-fly ash* karena memiliki CaO lebih besar dari 10%. Abu terbang kelas N atau natural-fly ash terbentuk dari aktivitas alami yakni gunung meletus, memiliki kandungan besi oksida, alumina, silika minimal 70%. Abu terbang kelas F dikenal dengan *low calcium-fly ash* dengan kandungan CaO rendah kurang dari 10%, dan jumlah kandungan besi oksida, alumina, silika lebih dari 70%. Umumnya abu terbang kelas F berasal dari kegiatan industri yakni pembakaran batu bara. Abu terbang kelas F memiliki sifat pozzolan sehingga dapat dimanfaatkan sebagai material perekat pada mortar, dan lebih ramah lingkungan daripada semen (Naghizadeh & Ekolu, 2019).

Jumlah produksi batu bara Indonesia cenderung meningkat per tahunnya, tahun 2018 tercatat 492 juta ton dan masih memiliki persediaan mencapai 37 miliar ton (Arinaldo et al., 2019). Dari proses penggunaan energi batu bara menghasilkan limbah abu terbang sebanyak 3 juta ton per tahunnya (Damayanti, 2018).

Pada tahun 1990-an, Joseph Davidovits menggagas sebuah temuan material perekat pengganti semen yang berasal dari abu terbang dikenal dengan istilah geopolimer. Awalnya penemuan geopolimer digunakan untuk material bangunan anti kebakaran, kemudian dilanjutkan sebagai perekat alternatif dari aktivasi unsur silika dan alumina, kombinasi larutan sodium hidroksida dan sodium silikat (Davidovits,

1994). Penemuan geopolimer menjadi salah satu solusi dalam mengurangi emisi gas CO₂ dalam perindustrian dan pemanfaatan limbah abu terbang. Baykara et al. (2020), menambahkan perindustrian atau pabrik khususnya dibidang konstruksi turut menyumbang pemanasan global sebanyak 7% dari total emisi gas CO₂ dunia.

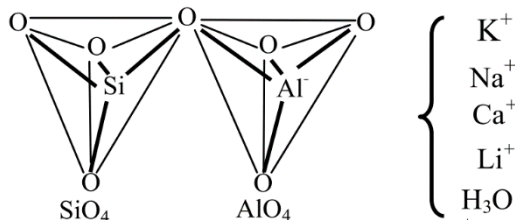
Mekanisme geopolimer dijelaskan oleh Fernandez-Jimenez et al. (2005), terdiri dari tahap pemutusan partikel abu terbang oleh ion hidroksida (OH⁻) dan proses pengikatan polimerase. Pada diagram reaksi geopolimer (Gambar 1) tahap pemutusan partikel abu terbang diawali dengan reaksi kimia ion OH⁻ dari larutan aktivator ke permukaan abu terbang (Gambar 1.a dan 1.b). Kemudian reaksi kimia berlanjut ke bagian dalam dan bergerak keluar secara bersamaan hingga seluruh atau sebagian partikel abu terbang bereaksi (Gambar 1.c). Reaksi dari larutan aktivator terus berlanjut hingga menembus bagian terkecil dalam bulatan partikel abu terbang (Gambar 1.d). Disisi lain, lapisan penghambat dari bulatan partikel tersebut terbentuk dan mencegah terjadinya proses lanjutan (Gambar 1.e). Pada tahap akhir mekanisme geopolimer akan terbentuk partikel abu terbang reaktif sempurna dan sebagian yang berbentuk gel serta dapat mengikat agregat. Gel tersebut dikenal dengan istilah gel aluminosilikat, yang terdiri dari kandungan pokok alumina dan silikat reaktif.



Gambar 1. Skema reaksi geopolimer

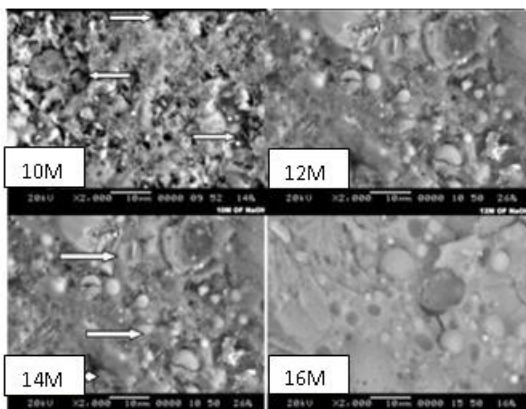
Ditinjau dari struktur kimia, gel aluminosilikat terbentuk dari ikatan polysialate -Si-O-Al-O. Senyawa tetrahedral SiO₄ (silika) dan AlO₄ (alumina) saling

terikat dan membutuhkan unsur O (oksigen) untuk reaksi. Ion positif (Na^+ , Li^+ , Ca^{2+} , K^+ dan H_3O^+) berada dalam jaringan reaksi dan berguna untuk menyeimbangkan muatan negatif dari Al dan O. Rincian ikatan senyawa kimia dari geopolimer terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Susunan tetrahedral (polysialate).

Menurut Assi et al. (2018), reaksi geopolimer dan kekuatannya dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu pertama komposisi kandungan mineralogi dari abu terbang dan karakteristik abu terbang. Faktor kedua adalah konsentrasi natrium hidroksida, modulus silikat (Ms) dan rasio alkali terhadap abu terbang. Faktor ketiga adalah pengaruh suhu, durasi dan kelembaman geopolimer abu terbang.



Gambar 3. Mikrostruktur geopolimer abu terbang dengan parameter NaOH.

Penelitian Bakri et al. (2011) menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscopy*) menjelaskan pengaruh dari konsentrasi NaOH pada campuran mortar geopolimer, Gambar 3. Pada kandungan NaOH 10 molar dan 14 molar terlihat retakan dan pori-pori yang ditandai dengan panah. Retakan dan pori-pori tersebut akan mengakibatkan matriks ikatan geopolimer lemah dan keropos sehingga menurunkan

kekuatan geopolimer. Berbeda dengan yang lain, pada konsentrasi 16 molar, NaOH yang digunakan sudah berlebih dan gel aluminosilikat terbentuk begitu banyak. Hal ini menyebabkan lamanya durasi ikat antar material dan nilai kuat tekan menjadi rendah. Geopolimer dengan konsentrasi NaOH 12 M, tergolong baik karena abu terbang yang reaktif sesuai kuantitasnya dan tidak berlebih untuk merekat dengan material lain.

Penelitian Chi (2015), menjelaskan bahwa modulus ratio silikat (Ms) dan karakteristik abu terbang mempengaruhi kekuatan mortar geopolimer, selain itu geopolimer juga dipengaruhi oleh suhu tinggi dalam masa perawatannya. Suhu tinggi akan mempercepat durasi ikat dan proses pengerasan pada umur awal sampel mortar, adapun nilai suhu berkisar $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan rentang waktu berjam hingga berhari-hari (İlkentapar et al., 2017). Oleh karena itu, mortar geopolimer akan sulit diaplikasikan langsung di lapangan, jika masih menggunakan metode suhu tinggi.

Metode perawatan geopolimer tanpa suhu tinggi yakni suhu ruang mulai dikembangkan pada tahun 2015 oleh Nath & Sarker. Pada penelitian tersebut, Nath menambahkan OPC sebagai pengganti metode suhu tinggi geopolimer sebesar 5% hingga 12% dari berat total sampel. Seiring tambahan OPC akan meningkatkan kuat tekan dan mengeluarkan suhu tinggi dari panas hidrasi, sehingga perawatan geopolimer abu terbang dapat dilakukan suhu ruang (Moradikhou et al., 2020).

Berdasarkan perbedaan pada kualitas, komposisi kimia dan jenis abu terbang, maka untuk mendapatkan komposisi optimum perlu dilakukan studi parametrik untuk parameter-parameter yang mempengaruhi kekuatan geopolimer mortar pada suhu ruang. Pada penelitian ini akan dikaji parameter yang mempengaruhi kuat tekan mortar geopolimer dari abu terbang kelas F dengan perawatan suhu ruang. Adapun parameter yang diteliti adalah molaritas natrium hidroksida, modulus silikat dan persentase tambahan OPC dalam campuran mortar geopolimer. Hasil kajian berupa komposisi optimum mortar dengan berbagai variabel yang mempengaruhi kuat tekan dan

tinjauan visual mortar geopolimer abu terbang.

METODE PENELITIAN

Abu terbang berasal PLTU Ombilin, Sumatera Barat. Sebelum digunakan abu terbang dikeringkan dalam oven dengan suhu 80 °C – 100 °C dan mencapai berat tetap, kemudian diayak dengan saringan no. 200.

Larutan aktivator pada penelitian ini menggunakan natrium silikat (Na₂SiO₃) dan natrium hidroksida (NaOH). Na₂SiO₃ yang digunakan bertipe II dengan mol rasio 2,26 dan densitas 1,56 gr/ml.

Agregat halus berasal dari Sungai Padangpura Kampar dan memiliki karakteristik lolos saringan No.4. Air yang digunakan tidak mengandung bahan perusak. *Superplasticizer* (SP) digunakan untuk mengurangi air dan meningkatkan *workability* geopolimer. *Ordinary Portland Cement* (OPC) atau semen tipe 1 yang digunakan berasal dari PT Semen Padang.

Tabel 1. Studi parametrik geopolimer abu terbang

Campuran	NaOH (Molar)	Modulus silikat (Ms)	Tambahan OPC (%)
1	8	1	15
2	10	1	15
3	12	1	15
4	14	1	15
5	16	1	15
6	12	1,5	15
7	12	2	15
8	12	2,5	15
9	12	3	15
10	12	2	10
11	12	2	20
12	12	2	25
13	12	2	30

Metode penelitian menggunakan studi parametrik dengan tiga parameter. Pertama, parameter kandungan NaOH yang digunakan adalah 8-16 molar. Kedua, modulus silikat (Ms) adalah perbandingan penggunaan larutan natrium silikat dan natrium hidroksida yakni sebesar 1-3. Ketiga, persentase tambahan OPC sebesar 10-30% yang dihitung dari nilai abu terbang. Studi parametrik mengenai detail campuran

geopolimer abu terbang campuran terdapat pada Tabel 1.

Total sampel yang dibuat pada penelitian ini adalah 39. Sampel berbentuk kubus kecil ukuran sisi 5 cm, sebelum digunakan cetakan kubus diolesi tipis pelumas agar campuran geopolimer mudah dilepas dari cetakan. Setiap 1 campuran terdiri dari 3 sampel yang diuji secara visual dan kuat tekan pada hari ke-7, 14 dan 28 hari.

Tabel 2. Komposisi campuran mortar geopolimer

Abu Terbang (kg/m ³)	Pasir (kg/m ³)	NaOH (kg/m ³)	Na ₂ SiO ₃ (kg/m ³)	Air (kg/m ³)	SP (kg/m ³)	OPC (kg/m ³)
321,85	1727,39	152,88	152,88	80	4,83	48,28
321,85	1727,39	152,88	152,88	80	4,83	48,28
321,85	1727,39	152,88	152,88	80	4,83	48,28
321,85	1727,39	152,88	152,88	80	4,83	48,28
321,85	1727,39	152,88	152,88	80	4,83	48,28
321,85	1727,39	122,3	183,45	80	4,83	48,28
321,85	1727,39	101,92	203,84	80	4,83	48,28
321,85	1727,39	87,36	218,40	80	4,83	48,28
321,85	1727,39	76,44	229,32	80	4,83	48,28
321,85	1727,39	101,92	203,84	80	4,83	32,19
321,85	1727,39	101,92	203,84	80	4,83	64,37
321,85	1727,39	101,92	203,84	80	4,83	80,46
321,85	1727,39	101,92	203,84	80	4,83	96,56

Perencanaan campuran (*mix design*) dianalisis dan didapatkan komposisi campuran, Tabel 2. Seluruh material ditimbang sesuai dengan komposisi. Agregat halus berada pada kondisi SSD (*saturated surface dry*), dan abu terbang yang digunakan kering lolos ayakan no. 200. Keduanya diaduk hingga merata. Larutan aktivator dicampur satu persatu yakni natrium silikat (Na₂SiO₃) dan natrium hidroksida (NaOH), kemudian ditambahkan air + SP serta diaduk hingga merata pula.

Material dimasukkan ke dalam mesin pencampur mortar dimulai dengan agregat halus dan abu terbang, selanjutnya ditambah campuran larutan aktivator dan dibiarkan teraduk selama 4 menit. Kemudian masukkan tambahan OPC ke dalam mesin pencampur dan diaduk selama 2 menit. Campuran geopolimer segar dimasukkan ke dalam cetakan mortar yang telah disediakan dengan dua lapisan sama tebal. Setiap lapisan ditumbuk dengan tongkat pemadat sebanyak 32 tumbukan. Sampel mortar geopolimer

dibiarkan selama 3x24 jam, masa ini disebut juga *rest period* yang mengacu kepada penelitian Hardjito & Rangan (2005).

Penelitian ini menguji kuat tekan dari mortar geopolimer yang merujuk kepada standar mortar ASTM C109M-02. Pengujian kuat tekan mengidentifikasi mutu struktur dengan gaya maksimum per satuan luas yang bekerja pada bidang tekan. Setelah masa perawatan suhu ruang, hari ke-7, 14 dan 28, sampel diuji dengan *compression machine test*. Data gaya maksimum hingga sampel hancur diinput dan dihitung, sehingga didapatkan nilai kuat tekan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Abu Terbang

Abu terbang dianalisis dan diperoleh komposisi kimia pada Tabel 3.

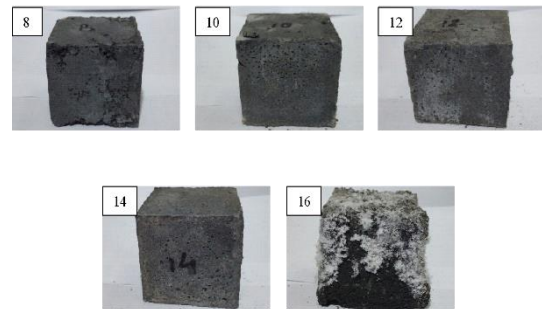
Tabel 3. Komposisi kimia abu terbang

No	Senyawa	Nilai (%)
1.	Alumina oksida (Al ₂ O ₃)	29,25
2.	Besi oksida (Fe ₂ O ₃)	5,45
3.	Kalsium oksida (CaO)	1,54
4.	Silika oksida (SiO ₂)	59,25

Konsentrasi CaO tidak lebih dari 10%, dan jumlah kandungan alumina, besi oksida dan silika sebesar 93,95% (besar dari 70%). Abu terbang dari Ombilin diklasifikasikan ke dalam kelas F, karena kandungan unsur kimianya dan berasal dari limbah industri pembangkit listrik tenaga uap.

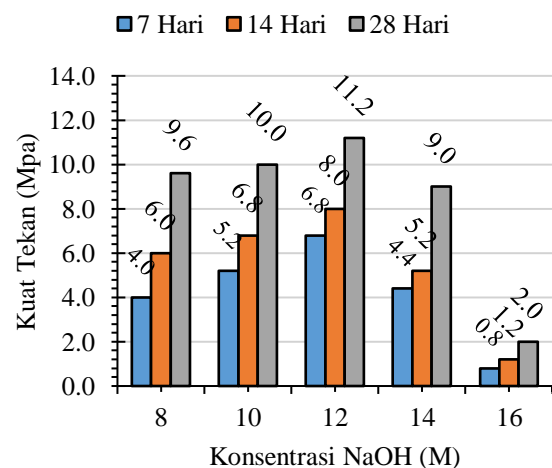
Parameter NaOH (Molar)

Kandungan natrium hidroksida (NaOH) pada geopolimer abu terbang memiliki pengaruh terhadap tampak visual maupun kuat tekan mortar. Secara visual terlihat pada Gambar 4, yakni sampel umur 28 hari perawatan suhu ruang dengan variasi NaOH. Secara visual sampel NaOH molaritas 12, dan 14 cenderung lebih cerah dibandingkan sampel NaOH molaritas lainnya. Faktor tingkat kecerahan terjadi karena reaksi geopolimer, jika masih berlangsung cenderung lebih gelap dan masih basah. Sebaliknya, jika cerah menunjukkan reaksi geopolimer telah terjadi sempurna dan kering (Abdulkareem et al. 2014).



Gambar 4. Tampak geopolimer abu terbang parameter NaOH (molar)

Kondisi fisik sampel juga terlihat perbedaan, sampel NaOH molaritas 8 dan 10 memiliki pori dan rekahan yang besar daripada sampel molaritas 12 dan 14. Rekahan dan pori yang besar akan menurunkan kinerja mortar sehingga nilai kuat tekan menjadi rendah. Disisi lain sampel NaOH molaritas 16 terdapat kristal yang menyelimuti permukaan dan lebih lunak. Hal ini dikarenakan dosis NaOH yang berlebihan, sehingga reaksi geopolimer tidak optimal, dan melepaskan energi ke udara luar dan membentuk kristal silikat (Husein et al., 2016).

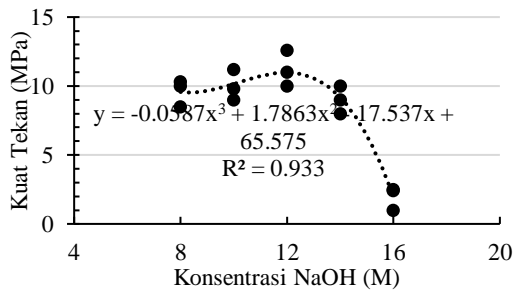


Gambar 5. Kuat tekan mortar geopolimer abu terbang parameter NaOH (M)

Hasil pengujian kuat tekan mortar geopolimer abu terbang dengan parameter NaOH terlihat pada Gambar 5, yakni kuat tekan semakin naik dari molaritas rendah hingga 12M. Sampel NaOH 14-16 M mengalami penurunan kuat tekan dan diperkirakan semakin banyak kandungan

NaOH nilai kuat tekan akan lebih rendah. Penggunaan NaOH mencapai optimum kuat tekan mortar pada 12M, dengan nilai 11,2 MPa. Sampel tersebut selaras dengan visualnya Gambar 4, yang cenderung lebih cerah dibandingkan yang lain. Nilai kuat tekan terendah terjadi pada sampel NaOH 16M yakni 0,8 MPa, 1,2 MPa dan 2 MPa sesuai umur pengujian.

Penelitian Hamidi et al., (2016) menambahkan pengaktifan silika dan alumina dari abu terbang dipengaruhi oleh NaOH. Meningkatnya kandungan NaOH, akan meningkatkan produksi ion OH⁻ yang membentuk jaringan gel aluminosilikat lebih banyak. Namun, jika konsentrasi berlebihan akan berdampak penurunan kuat tekan karena OH⁻ tidak efektif digunakan sehingga keluar dari sistem reaksi dan membentuk kristal menyelimuti mortar (Shill et al., 2020), seperti sampel 16M pada Gambar 4.



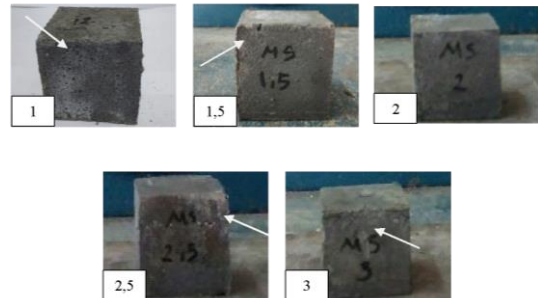
Gambar 6. Model regresi parameter NaOH (M)

Model regresi parameter NaOH yang digunakan adalah model regresi polynomial orde 3 dengan data kuat tekan pada umur 28 hari, Gambar 6. Nilai determinasi yang didapatkan sebesar 93,3%, artinya data yang diinput mampu menginterpretasikan model. Angka R² mendekati nilai 100%, hal ini juga menunjukkan keterkaitan yang kuat antara konsentrasi NaOH dengan kuat teka mortar geopolimer.

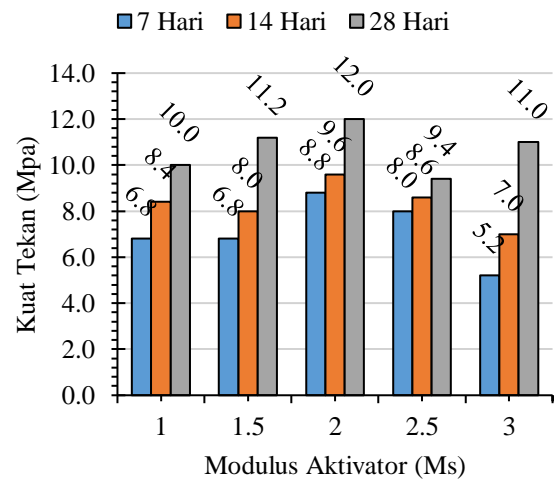
Persamaan regresi yang terbentuk adalah $y = -0,0587x^3 + 1,7863x^2 - 17,537x + 65,575$. Nilai puncak dihitung dari turunan pertama persamaan y, dan dicari nilai x melalui penyederhanaan persamaan kuadrat dan hasilnya adalah $11,96M \approx 12M$. Nilai kuat tekan dihitung dengan substitusi x 12M pada persamaan model yakni 10,92 MPa. Melalui analisis data regresi diperoleh nilai

kuat tekan optimum mortar parameter konsentrasi NaOH yakni 12M.

Parameter Modulus Silikat (Ms)



Gambar 7. Tampak geopolimer abu terbang parameter modulus silikat (Ms)

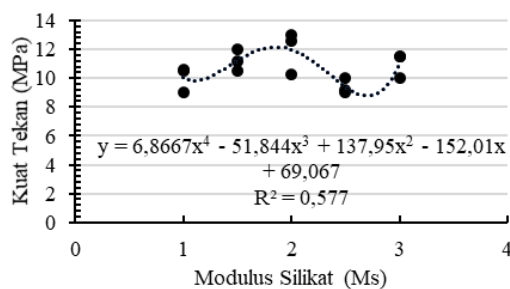


Gambar 8. Kuat tekan mortar geopolimer parameter modulus silikat (Ms)

Secara visual sampel mortar geopolimer abu terbang parameter Ms terlihat tidak berbeda satu sama lainnya. Warna sampel tidak gelap dan kondisinya kering, namun beberapa sampel terlihat memiliki rekahan yang besar ditunjukkan oleh panah Gambar 7. Nilai modulus silikat mempengaruhi tingkat kegetasan mortar, sehingga jika nilai tersebut diluar kapasitas reaksi akan membuat mortar menjadi semakin rapuh dan kuat tekan rendah (Baykara et al. 2020).

Hasil pengujian sampel kuat tekan parameter modulus silikat terlihat pada Gambar 8, yakni nilai kuat tekan semakin tinggi dari rasio Ms rendah hingga Ms 2. Besaran kuat tekan optimum sesuai dengan umur pengujiannya terdapat pada sampel Ms

2 yakni 8,8 MPa, 9,6 MPa dan 12 MPa. Besaran terendah terjadi pada sampel Ms 2,5 yakni 9,4 MPa hari ke-28. Berdasarkan *trendline* data pengujian tekan mortar, nilai sampel mengalami kenaikan dari Ms 1-2, dan mengalami penurunan pada Ms 2,5-3. Penelitian Joseph & Mathew (2012), menjelaskan semakin tinggi nilai modulus silikat akan meningkatkan nilai kuantitas dari Na_2SiO_3 dan mengurangi kuantitas NaOH. Hal ini berdampak berkurangnya produksi ion OH^- yang akan mengganggu proses geopolimerisasi, membuat geopolimer lebih getas-rapuh serta nilai kuat tekan menjadi rendah (Tenepalli & Neeraja, 2018).



Gambar 9. Model regresi parameter modulus silikat (Ms)

Model regresi yang digunakan untuk parameter modulus silikat adalah polynomial orde 4, karena nilai R^2 tertinggi didapatkan pada model tersebut, gambar 9. Keragaman data yang dapat diinterpretasikan oleh model sebesar 57%, dengan sisanya 43% merupakan variable bebas lain.

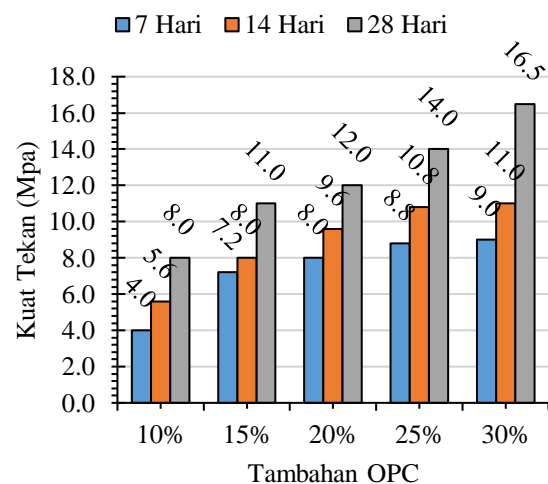
Persama regresi yang diperoleh adalah $y = 6,8667x^4 - 51,844x^3 + 137,95x^2 - 152,01x + 69,067$. Nilai puncak dihitung dengan turunan pertama persamaan dan penyederhanaan persamaan kubik dihasilkan nilai $x = 1,85 \approx 2$. Maka dengan mensubstitusikan nilai x (Ms) = 1,85, didapatkan nilai kuat tekan optimum sebesar $12,15 \approx 12$ MPa.

Parameter Tambahan OPC (%)

Pada penelitian ini tambahan OPC berfungsi sebagai pengganti metode suhu tinggi melalui panas hidrasi. Selain itu OPC juga mempunyai gel ikat yang terbentuk dari kalsium silikat hidrat (CSH) yang berfungsi meningkatkan ikatan antar material. Oleh karena itu, tambahan OPC juga turut

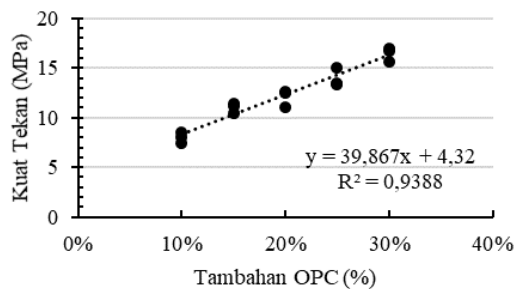
mempengaruhi nilai kuat tekan mortar geopolimer abu terbang.

Penelitian Ameri et al. (2019), menjelaskan dua binder yang berbeda dari geopolimer dan OPC bergabung akan membentuk gel baru yaitu kalsium aluminosilikat hidrat (CASH), secara bersamaan panas hidrasi semen akan terbentuk. Gel CASH dan panas hidrasi semen akan berperan lebih untuk menguatkan ikatan campuran geopolimer dengan metode perawatan suhu ruang (Khalil et al., 2020).



Gambar 10. Kuat tekan mortar geopolimer parameter tambahan OPC (%)

Pengaruh tambahan OPC dengan besaran kuat tekan sampel geopolimer terlihat pada Gambar 10, yakni semakin tinggi nilai tambahan OPC akan meningkatkan kuat tekan. Besaran tekanan terendah terjadi terdapat pada sampel OPC dengan tambahan 10% yakni 4 MPa, 5,6 MPa dan 8 MPa sesuai waktu pengujian. Sedangkan, besaran tekanan optimum terdapat pada sampel OPC dengan tambahan 30% yakni 16,5 M dengan umur pengujian hari ke-28. Semua sampel mortar geopolimer memperoleh perubahan kuat tekan yang meningkat dari sebelumnya dan dilakukan dengan perawatan suhu ruang. Perubahan kuat tekan yang stabil terjadi pada sampel OPC 30% dan nilai perubahan terbesar mencapai 50% dari umur 14 ke 28 hari.



Gambar 11. Model regresi parameter tambahan OPC (%)

Berdasarkan data kuat tekan yang diinput dengan parameter tambahan OPC pada umur 28 hari, maka diperoleh model regresi linier, Gambar 11. Nilai ini menunjukkan semakin tinggi tambahan OPC yang diberikan maka nilai kuat tekan semakin tinggi. Angka determinasi yang didapatkan sebesar 93,9%, dengan demikian interpretasi data oleh model sangat baik.

Persamaan yang didapatkan adalah $y = 39,867x + 4,32$. Jika dihitung setiap persen nilai x yang digunakan akan menghasilkan $y = 4,72$ MPa. Pada penelitian ini nilai OPC yang digunakan maksimal hanya 30%, dikarenakan *workability* yang cukup sulit jika melebihi nilai tersebut. Adapun hasil yang didapatkan apabila $x = 30\%$ adalah 16,28 MPa.

KESIMPULAN

Abu terbang dapat dimanfaatkan sebagai material konstruksi yakni mortar geopolimer. Adanya tambahan OPC mempermudah perawatan mortar dengan suhu ruang. Berdasarkan data studi parametrik didapatkan hasil komposisi kuat tekan optimum yakni 16,5 MPa, pada parameter:

1. Natrium hidroksida 12 M, dengan analisis regresi $y = -0,0587x^3 + 1,7863x^2 - 17,537x + 65,575$ dan $R^2 = 0,933$
2. Rasio modulus silikat = 2, dengan analisis regresi $y = 6,8667x^4 - 51,844x^3 + 137,95x^2 - 152,01x + 69,067$ dan $R^2 = 0,577$
3. Tambahan OPC sebesar 30%, dengan analisis regresi $y = 39,867x + 4,32$ dan $R^2 = 0,9388$

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai melalui Penelitian Berbasis Kompetensi DRPM

Kemenristekdikti tahun pelaksanaan 2018 dengan nomor kontrak 361/UN.19.5.1.3/PP/2018.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulkareem, O. A., Mustafa Al Bakri, A. M., Kamarudin, H., Khairul Nizar, I., & Saif, A. A. (2014). Effects of elevated temperatures on the thermal behavior and mechanical performance of fly ash geopolymer paste, mortar and lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 50, 377-387.
- Ameri, F., Shoaie, P., Zareei, S. A., & Behforouz, B. (2019). Geopolymers vs. alkali-activated materials (AAMs): A comparative study on durability, microstructure, and resistance to elevated temperatures of lightweight mortars. *Construction and Building Materials*, 222, 49-63.
- Arinaldo, D., Adiatma, J. C., Mursanti, E., Turmiwa, F., & Citraningrum, M. (2019). *Dinamika Batu Bara Indonesia* (Pertama). Institute for Essential Services Reform (IESR).
- Assi, L. N., Eddie Deaver, E., & Ziehl, P. (2018). Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly ash-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 167, 372-380.
- Bakri, A. M. M. Al, Kamarudin, H., Bnhussain, M., Nizar, I. K., & Rafiza, A. R. (2011). Microstructure of different NaOH molarity of fly ash-based green polymeric cement. 3(February), 44-49.
- Baykara, H., Cornejo, M. H., Espinoza, A., García, E., & Ulloa, N. (2020). Preparation, characterization, and evaluation of compressive strength of polypropylene fiber reinforced geopolymer mortars. *Heliyon*, 6(4).
- Chi, M. (2015). Effects of modulus ratio and dosage of alkali-activated solution on the properties and micro-structural characteristics of alkali-activated fly ash mortars. *Construction and Building Materials*, 99, 128-136.
- Damayanti, R. (2018). Abu Batubara dan Pemanfaatannya: Tinjauan Teknis Karakteristik Secara Kimia dan Toksikologinya. *Jurnal Teknologi*

- Mineral Dan Batubara, 14*(September), 213–231.
- Davidovits, J. (1994). Properties of Geopolymer Cements. *First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, 131–149.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A., & Criado, M. (2005). *Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model. 35*, 1204–1209.
- Hadi, M. N. S., Al-Azzawi, M., & Yu, T. (2018). Effects of fly ash characteristics and alkaline activator components on compressive strength of fly ash-based geopolymer mortar. *Construction and Building Materials, 175*, 41–54.
- Hamidi, R. M., Man, Z., & Azizli, K. A. (2016). Concentration of NaOH and the Effect on the Properties of Fly Ash Based Geopolymer. *Procedia Engineering, 148*, 189–193.
- Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-based Geopolymer Concrete. In *Research report GC*.
- Huseien, G. F., Mirza, J., Ismail, M., & Hussin, M. W. (2016). Influence of different curing temperatures and alkali activators on properties of GBFS geopolymer mortars containing fly ash and palm-oil fuel ash. *Construction and Building Materials, 125*, 1229–1240.
- İlkentapar, S., Atiş, C. D., Karahan, O., & Görür Avşaroğlu, E. B. (2017). Influence of duration of heat curing and extra rest period after heat curing on the strength and transport characteristic of alkali activated class F fly ash geopolymer mortar. *Construction and Building Materials, 151*, 363–369.
- Joseph, B., & Mathew, G. (2012). Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete. *Scientia Iranica, 19*(5), 1188–1194.
- Khalil, M. G., Elgabbas, F., El-Feky, M. S., & El-Shafie, H. (2020). Performance of geopolymer mortar cured under ambient temperature. *Construction and Building Materials, 242*, 118090.
- Moradikhou, A. B., Esparham, A., & Jamshidi Avanaki, M. (2020). Physical & mechanical properties of fiber reinforced metakaolin-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials, 251*, 118965.
- Naghizadeh, A., & Ekolu, S. O. (2019). Method for comprehensive mix design of fly ash geopolymer mortars. *Construction and Building Materials, 202*, 704–
- Olivia, M. (2015). Geopolimer sebagai Material Infrastruktur Berkelanjutan di Lingkungan Gambut. *Annual Civil Engineering Seminar*, 6.
- Shill, S. K., Al-Deen, S., Ashraf, M., & Hutchison, W. (2020). Resistance of fly ash based geopolymer mortar to both chemicals and high thermal cycles simultaneously. *Construction and Building Materials, 239*, 117886.
- Tenepalli, J. S., & Neeraja, D. (2018). Properties of class F fly ash based geopolymer mortar produced with alkaline water. *Journal of Building Engineering, 19*, 42–48.