

Pengaruh Variasi Konsentrasi NaOH Sebagai Alkali Aktivator Terhadap Kuat Tekan Semen Geopolimer Berbasis Tanah Napa

Aufa Rahmi¹, Mawardi Mawardi*²

^{1,2}Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang
Jln. Prof. Dr. Hamka, Air Tawar Padang, Indonesia Telp. 0751 7057420

*mawardianwar@fmipa.unp.ac.id

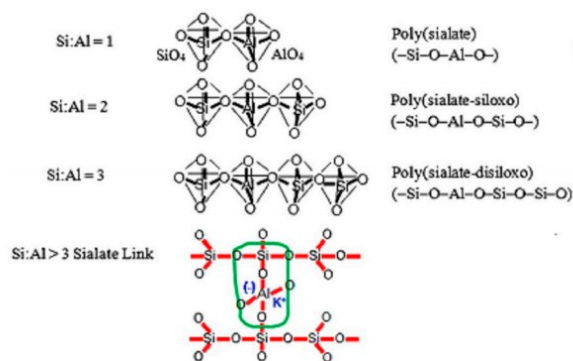
Abstract — In 1970, Davidovits discovered an alternative binder called geopolimer. Geopolymer is a material or binder material synthesized by mixing alumina silicate source material and alkaline activator solution. One of them is Napa land. Napa soil contains high levels of SiO₂ and Al₂O₃ with percentages of 62.70% and 31.16% based on the XRF test. NaOH solution mixed with Na₂SiO₃ was used as an activator whose concentration varied from 8M to 14M. The ratio of the weight of Na₂SiO₃ to the importance of the NaOH solution is 1.5. The characteristics of the geopolimer cement based on napa soil showed that the analysis of optimum compressive strength was achieved at a concentration of 14M. Compressive strength tests of cylindrical specimens, splitting tests, and porosity tests were carried out comprehensively to compare the samples from each composition. The higher the concentration of NaOH, the higher the compressive strength produced.

Keywords — Geopolymer, Napa Soil, Alkali Activator, compressive strength

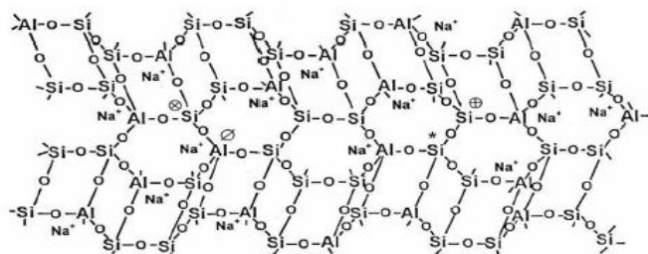
I. PENDAHULUAN

Pada tahun 1970, Davidovits telah menemukan pengikat alternatif yang disebut geopolimer. Geopolimer memberikan solusi terhadap kekurangan dari semen Portland yang tidak ramah lingkungan. Keunggulan dari Geopolimer ini yaitu memiliki kuat tekan yang tinggi, tahan terhadap panas dan asam dan penyusutan yang rendah. Bahan – bahan ini biasanya didasarkan pada prekursor alumina-silikat yang diaktifkan dalam larutan alkali hidroksida pekat yang sering ditambahkan alkali silikat untuk mengontrol komposisi kimia akhir [1]. Material yang digunakan untuk pembuatan geopolimer adalah material yang mengandung unsur-unsur silica dan alumina seperti kaolinit, lempung, zeolite, tanah liat, abu terbang, asap silica, dan sekam padi [2].

poly (sialate), poly (sialate-siloxo), dan poly (sialate-disiloxo)[4].



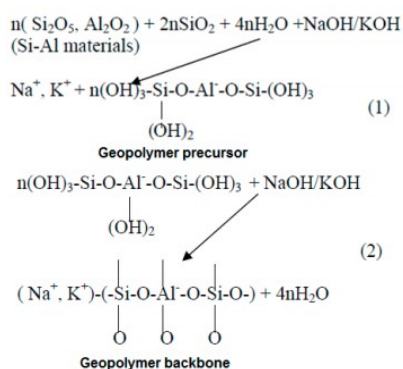
Gambar 2. Struktur Dasar Geopolimer [3]



Gambar 1. Struktur Geopolimer [3]

Geopolimer dibentuk dari material yang mengandung unsur silika dan alumina dalam jumlah tinggi. Berdasarkan rasio Si/Al, satuan struktur dasar geopolimer dibedakan menjadi

Geopolimer mempunyai struktur yang mirip dengan zeolit tetapi memiliki mikrostruktur yang amorf dan sering disebut sebagai zeolite Kristal. Struktur 2 atau 3 dimensinya didasarkan pada alumina (AlO₄) dan silica (SiO₄) tetrahedral yang bergabung bersama atom oksigen. Muatan negative (AlO₄) dikompensasikan dengan keberadaan ion alkali (misalnya Na atau K). sintesis geopolimer melibatkan reaksi kimia antara bahan kaya alumina dan silikat dengan adanya activator alkali yaitu NaOH dan KOH.



Gambar 3. Reaksi Geopolimerisasi [5]

Dari reaksi diatas dapat dilihat bahwa dalam pembuatan semen geopolimer material utama yang digunakan adalah mineral alumina silikat. Pada reaksi pertama alumina silikat bereaksi dengan larutan alkalin aktivator yaitu natrium silikat dalam natrium hidroksida membentuk prekursor geopolimer yang bermuatan negatif. Pada reaksi kedua prekursor geopolimer bereaksi dengan natrium hidroksida. Ion natrium bereaksi dengan prekursor geopolimer membentuk kerangka geopolimer dan melepaskan molekul air. Reaksi yang terjadi yaitu reaksi kimia pembentukan polimer dengan melepaskan molekul kecil yang disebut dengan reaksi polikondensasi[5].

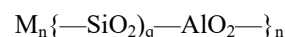
Indonesia memiliki banyak dataran tinggi dan berbukit sehingga kaya akan jenis bebatuan dan mineral. Batuan yang kaya akan mineral ini sedikit sekali dimanfaatkan baik sebagai bahan komersil maupun digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Salah satu jenis bebatuan yang kaya akan mineral adalah Tanah napa. Ciri khas dari tanah napa adalah berwarna abu-abu kecoklatan dan tersusun atas beberapa lapisan sehingga kita dapat dengan mudah membedakannya dengan jenis tanah yang lain.

Tanah napa merupakan bahan alam yang memiliki kandungan silika dan alumina dalam jumlah besar dengan persentase SiO₂ sebanyak 63,20% dan Al₂O₃ sebanyak 16,55% [6]. Di Sumatera Barat, tanah napa terdapat di beberapa daerah, akan tetapi pemanfaatan tanah napa di Sumatera Barat masih sangat minim, monoton, dan tidak bernilai ekonomis. Masyarakat Sumatera Barat hanya memanfaatkan tanah napa sebagai obat diare dan sakit perut. Oleh karena itu, penelitian terkait geopolimer berbasis tanah napa perlu dikembangkan, sehingga tanah napa menjadi material anorganik berharga dan memiliki nilai tambah dari segi ekonomi[7].

Pembuatan semen geopolimer dengan menggunakan bahan tanah napa yang kaya akan silika dan alumina [3] dan dapat bereaksi dengan cairan alkali dan dilakukan pembuatan dengan dicetak bentuk kubus dengan ukuran 15x15x15. Semen geopolimer akan memberikan efek pengerasan yang lebih cepat dibandingkan semen konvensional dan mampu memberikan kuat tekan yang baik karena adanya bahan-bahan polimer seperti water glass, epoksi dan resin.

Mineral aluminasilikat seperti tanah napa dapat diaktivasi oleh campuran alkali aktivator. Studi mengenai bahan pengikat yang diaktivasi oleh alkali aktivator ini sudah dimulai semenjak tahun 1940 oleh Purdon dengan menggunakan larutan natrium hidroksida (NaOH) untuk mengaktivasi terak tanur (*furnace slag*) Untuk larutan alkali aktivator basa, kombinasi larutan NaOH dengan Natrium Silikat (Na₂SiO₃) akan menghasilkan produk geopolimer yang lebih baik dibandingkan dengan yang menggunakan NaOH saja. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukannya pada tahun 2000, Xu dan Van Deventer menjelaskan bahwa proses geopolimerisasi membutuhkan tambahan silika (Si). Oleh karena itu, alkali hidroksida digunakan untuk melarutkan aluminasilikat, sedangkan larutan Na₂SiO₃ berperan sebagai pengikat dalam proses polimerisasi[8].

Saat alumina silikat yang terdapat dalam material kaya unsur silika dan alumina diaktifkan oleh larutan alkali aktivator, akan terbentuk sebuah polimer anorganik yang dikenal sebagai geopolimer ini. Adapun rumus kimianya dapat ditulis sebagai berikut:



Dimana M melambangkan kation alkali, n melambangkan derajat polikondensasi, sedangkan q melambangkan rasio Si/Al. Komposisi bahan baku serta sifat dan konsentrasi larutan alkali yang digunakan akan mempengaruhi geopolimer yang dihasilkan, baik dari segi mikrostruktur maupun sifat mekanik. Konsentrasi NaOH merupakan salah satu faktor yang penting didalam sintesis geopolimer.

Kelarutan aluminasilika meningkat dengan adanya konsentrasi hidroksida NaOH berfungsi untuk melarutkan alumina silika sedangkan natrium silikat berperan sebagai pengikat dalam proses polimerisasi. Variasi konsentrasi NaOH sebagai alkali aktivator mempengaruhi kualitas beton geopolimer yang dihasilkan. Oleh karena itu perlu, dalam penelitian ini akan dilakukan variasi konsentrasi NaOH untuk menghasilkan produk geopolimer berbasis tanah napa yang optimum. Sementara tanah napa yang digunakan dalam penelitian ini adalah tanah napa yang berasal dari Kabupaten Pesisir Selatan[9].

II. METODA PENELITIAN

A. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam pembuatan semen geopolimer adalah mini mill, furnace, neraca analitik, crusher, oven, dan X-ray fluorescence (XRF) model Epsilon3 PANanalytical Netherlands, gelas kimia 250 mL dan 400 mL, corong, hot plate, spatula, cawan porselen. Adapun bahan-bahan yang digunakan adalah Tanah napa yang berasal dari Kabupaten Pesisir Selatan, NaOH, Na₂SiO₃, dan aquades.

B. Preparasi Tanah Napa

Sampel tanah napa yang berupa bongkahan terlebih dahulu dihancurkan menggunakan palu sehingga

berbentuk kerikil, kemudian dikeringkan di bawah terik matahari selama lebih kurang lebih delapan jam hingga kadar airnya berkurang. Sampel yang sudah kering dimasukkan ke dalam crusher dan digiling hingga menghasilkan sampel berbentuk bubuk, kemudian diayak menggunakan ayakan 90 μm lalu dipanaskan menggunakan furnace pada suhu 750°C selama 4 jam.

C. *Persiapan Sampel Semen*

Bahan yang perlu dipersiapkan sebelum melakukan pembuatan adonan geopolimer dalam penelitian ini adalah tanah napa yang sudah dikalsinasi, NaOH, Na₂SiO₃, dan aquades. Pertama dilakukan pembuatan larutan NaOH dengan beberapa variasi konsentrasi 8M, 10M, 12M, dan 14M, karena pelarutan ini merupakan reaksi eksoterm maka diperlukan pendinginan hingga mencapai suhu ruang. Kemudian dilakukan pencampuran homogen antara larutan NaOH dengan Na₂SiO₃, yang juga merupakan reaksi eksoterm. Setelah larutan alkali aktivator mencapai suhu ruang, adonan geopolimer dibuat dengan cara mencampurkan dengan campuran larutan alkali aktivator berdasarkan komposisi pada tabel 1, dan diaduk hingga membentuk *slurry*. Adonan semen geopolimer dituang ke dalam cetakan kubus sehingga terbentuk 6 mortar kubus untuk masing-masing sampel. Kemudian dilakukan pre-curing dilingkungan ambient selama 24 jam. Setelah 24 jam, sampel dilepaskan dari cetakan kubus, lalu dilakukan *curing* selama 6 jam di dalam furnace pada suhu 80°C.

TABEL 1
KOMPOSISI SEMEN GEOPOLIMER BERBASIS TANAH NAPA

Sampel	Tanah Napa (gram)	Alkali Aktivator		
		Na ₂ SiO ₃ (gram)	NaOH (gram)	Variasi NaOH
G8	1000	600	400	8
G10	1000	600	400	10
G12	1000	600	400	12
G14	1000	600	400	14

D. *Analisis Komposisi Kimia (XRF Analysis)*

Analisa XRF dilakukan untuk mengetahui komposisi kimia sampel, yaitu semen geopolimer dan tanah napa. Sampel ditimbang 15 gram dan ditambahkan 1 butir herzog pill, lalu digiling dan dimasukkan kedalam cincin XRF dan dipress hingga berbentuk tablet dan selanjutnya diuji kandungan materialnya.

E. *Analisis Kuat Tekan (Compressive Strength Analysis)*

Pengujian kuat tekan dilakukan pada hari ke-7 dan hari ke-28 menggunakan mesin uji kuat tekan. Benda uji yang berbentuk kubus harus ditimbang terlebih dahulu, lalu diletakkan di dalam mesin kuat tekan yang sudah dinyalakan. Kemudian tekan tombol *start* dan biarkan alat berhenti,

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sintesis semen geopolimer berbasis tanah napa pesisir selatan dengan variasi konsentrasi NaOH sebagai alkali aktivator dilakukan dengan dua tahap. Tahap pertama yaitu preparasi tanah napa pesisir selatan, dan tahap kedua adalah pencampuran tanah napa pesisir selatan dengan larutan alkali aktivator yang terdiri dari Na₂SiO₃ dan NaOH. Tanah napa dipreparasi dengan beberapa tahapan yaitu tahap penggerusan dan tahap kalsinasi tanah napa. Penggerusan bertujuan untuk mengubah bentuk fisik tanah dari bongkahan menjadi serbuk halus dengan kehalusan 90 μm. Sedang kalsinasi tanah napa bertujuan untuk meningkatkan luas permukaan dari material aluminasilika sehingga dapat meningkatkan kelarutan aluminasilika oleh alkali aktivator secara maksimal.

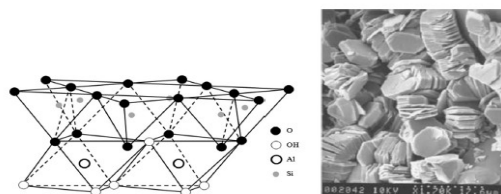


Fig. 3. (a) Structure of kaolinite and (b) microstructure of kaolinite [27].

Gambar 4. Struktur kaolin dan mikrostruktur kaolin [10].

Tanah napa terdiri atas mineral kaolinite dan beberapa mineral kuarsa [11]. Tanah napa merupakan mineral aluminasilikat yang memiliki kandungan silika dan alumina dalam jumlah tinggi sehingga dapat digunakan sebagai bahan dasar pembuatan semen geopolimer. Bahan dasar geopolimer yang diberikan perlakuan panas atau dikalsinasi menghasilkan produk geopolimer yang lebih baik [12]. Kalsinasi dapat merubah fase kristal menjadi fase amorf reaktif. Temperatur kalsinasi kaolinit berkisar antara 600-900°C. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Rowles [13], suhu kalsinasi optimal kaolin didapatkan pada suhu 750°C.

A. *Analisis XRF*

Kadar SiO₂ dan Al₂O₃ pada tanah napa tidak jauh berbeda dengan kadar SiO₂ dan Al₂O₃ pada fly ash yang sering dijadikan sebagai bahan baku semen geopolimer. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Sabitha tahun 2012, kadar SiO₂ dan Al₂O₃ pada fly ash berturut-turut adalah 62,12% dan 27,44% [14]. Kadar SiO₂ dan Al₂O₃ tanah napa setelah kalsinasi lebih tinggi daripada kadar fly ash. Semakin tinggi kadar SiO₂ dan Al₂O₃ dalam sumber bahan baku, maka akan semakin banyak juga jumlah gel aluminasilikat yang terbentuk saat diaktivasi oleh alkali aktivator. Kekuatan semen geopolimer sangat bergantung terhadap jumlah aluminasilikat yang terbentuk dalam proses geopolimerisasi.

TABEL 2.
KOMPOSISI KIMIA TANAH NAPA SEBELUM DAN SESUDAH KALSINASI.

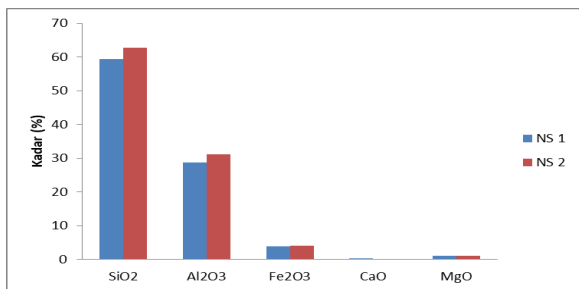
Sampel	Kadar (%)				
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
NS 1	59,38	28,78	3,96	0,37	1,08
NS 2	62,70	31,16	4,04	0,24	1,14

Keterangan:

NS 1 = Tanah Napa sebelum kalsinasi

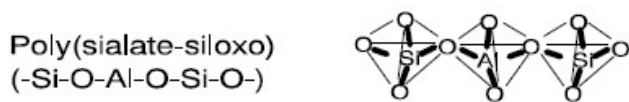
NS 2 = Tanah Napa sesudah kalsinasi

Tabel 2. menunjukkan bahwa kadar SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 meningkat setelah kalsinasi sedangkan kadar CaO menurun setelah kalsinasi. Berikut adalah grafik perbandingan komposisi senyawa kimia pada tanah napa sebelum dan sesudah kalsinasi:



Gambar 5. Perbandingan Komposisi Kimia Tanah Napa Sebelum dan Sesudah Kalsinasi

Berdasarkan Tabel 2. dan Gambar 5, rasio Si/Al pada tanah napa pesisir selatan adalah 2, dimana tanah napa ini mampu membentuk poli(sialate-siloxo) seperti Gambar 5. berikut:



Gambar 6. Struktur Poly(sialate-siloxo) [15]

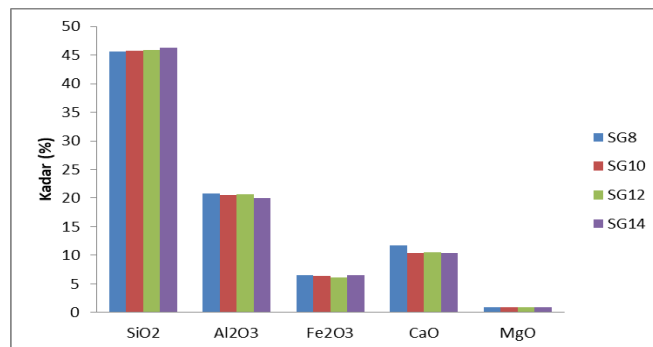
Geopolimer memiliki komposisi kimia menyerupai zeolit tetapi memiliki bentuk struktur 3 dimensi yang amorf sampai semi-kristal dengan jaringan polimerik Si-O-Al. Tetrahedral SiO_4 dan AlO_4 secara alternatif berikatan dengan berbagi atom oksigen, dengan Al yang memiliki bilangan koordinasi 4. Hal tersebut akan membuat Al memiliki muatan negatif. Larutan $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sebagai larutan alkali pada geopolimer berbasis tanah napa ini, selain berfungsi sebagai pelarut unsur Al untuk membentuk $[\text{AlO}_4]^-$ dan Si membentuk $[\text{SiO}_4]$, juga berfungsi sebagai ion penyeimbang pada polimer.

TABEL 3. KOMPOSISI KIMIA SEMEN GEOPOLIMER BERBASIS TANAH NAPA DENGAN PENAMBAHAN ALKALI AKTIVATOR

Sampel	Kadar (%)				
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO
SG8	45,59	20,74	6,45	11,69	0,91
SG10	45,70	20,50	6,38	10,43	0,89
SG12	45,91	20,67	6,17	10,52	0,89
SG14	46,30	19,94	6,58	10,34	0,87

Tabel 3. menunjukkan bahwa kandungan utama dari semen geopolimer adalah senyawa oksida Silika (SiO_2) dan Alumina (Al_2O_3). Kedua senyawa ini berperan sebagai

prekursor yang mengalami reaksi polikondensasi dengan larutan basa kuat membentuk geopolimer. Tabel 3. juga menunjukkan bahwa variasi NaOH mengakibatkan variasi kadar SiO_2 dan Al_2O_3 dalam semen geopolimer tersebut. Tabel 3. dapat digambarkan dalam diagram



Gambar 7. Perbandingan Komposisi Kimia Semen Geopolimer Berbasis Tanah Napa dengan penambahan alkali aktivator

Gambar 7. menunjukkan bahwa peningkatan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ dalam semen geopolimer berbasis tanah napa juga meningkatkan kandungan silika (SiO_2). Hal ini disebabkan oleh NaOH yang bervariasi, artinya semakin banyak Na_2SiO_3 daripada NaOH dalam pembentukan semen geopolimer, maka kandungan silika dalam semen geopolimer yang dihasilkan juga akan semakin tinggi. Selain SiO_2 dan Al_2O_3 , senyawa lain yang memiliki kandungan cukup besar dalam semen geopolimer berbasis tanah napa ini adalah Fe_2O_3 dengan presentase rata-rata 6,19 %. Selanjutnya yaitu CaO dan MgO dengan presentase rata-rata 10,79% dan 0,89%.

Kadar MgO dalam standar semen yang diperbolehkan yaitu sekitar $\leq 6.0\%$ [16]. Apabila kadar senyawa ini besar dari 6.0%, maka dapat mempengaruhi kualitas dari semen yang dihasilkan dan berwujud *periclase* atau *free MgO*. *Periclase* dalam semen dapat bereaksi dengan air membentuk $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Reaksi ini apabila berkelanjutan dapat meningkatkan volume $\text{Mg}(\text{OH})_2$ sehingga menyebabkan keretakan pada beton yang dihasilkan. Secara umum komposisi senyawa MgO dalam semen geopolimer berbasis tanah napa ini masih jauh dari kadar maksimum persentase MgO yang disyaratkan oleh semen standar.

B. Analisis Kuat Tekan

Kuat tekan adalah kemampuan mortar dalam menahan beban tekan. Kuat tekan adalah karakteristik yang paling utama dan paling penting untuk semen [17]. Hasil pengujian kuat tekan semen geopolimer dengan variasi rasio alkali aktivator ditunjukkan pada Tabel 5.

TABEL 4. HASIL UJI KUAT TEKAN

Sampel	Kuat Tekan (MPa)	
	7 Hari	28 Hari
SG8	18,96	20,52
SG10	19,61	21,01

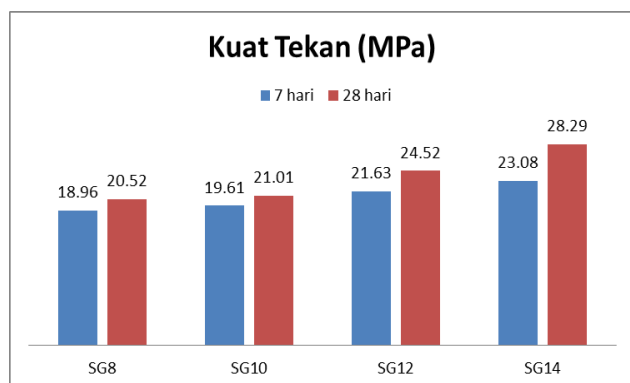
SG12	21,63	24,52
SG14	23,08	28,49

Pada penelitian ini mengujian kuat tekan dikerjakan pada hari ke 7 dan 28 untuk melihat perkembangan mortar. . Kuat tekan mortar akan naik secara linear hingga umur 28 hari, tetapi setelah itu akan mengalami penurunan. Pada umur 28 hari, mortar telah mengalami proses kondensasi secara sempurna, sehingga dapat dikatakan mortar mencapai kuat tekan optimum jika dibandingkan dengan hari-hari sebelum dan sesudahnya.

Berdasarkan data yang disajikan, mortar geopolimer pada hari ke-7 dengan variasi konsentrasi 10M, 12M dan 14M memenuhi standar mutu sebesar 19,6 MPa. Pada hari ke-28 hanya konsentrasi 14M saja yang memenuhi standar mutu sebesar 27,4 MPa [18]. Dapat kita simpulkan bahwa kuat tekan yang paling tinggi yaitu pada variasi konsentrasi NaOH 14M karena NaOH berfungsi sebagai larutan pengaktif yang bisa melarutkan Si dan Al sehingga terjadinya proses geopolimerisasi. NaOH berperan dalam pembentukan formasi zeolite hal ini juga sesuai dengan penelitian Provis pada tahun 2005[19].

Larutan alkali aktivator yang digunakan akan melarutkan aluminasilikat membentuk $[\text{SiO}_4]^-$ dan $[\text{AlO}_4]^-$. Selama proses curing, monomer-monomer tersebut akan membentuk ikatan rantai polimer tiga dimensi silang, itulah sebabnya Na_2SiO_3 atau waterglass disebut sebagai bahan perekat sedangkan ion Na^+ sendiri bertindak sebagai penetral muatan untuk tiap molekul $[\text{AlO}_4]^-$

Jika konsentrasi NaOH nya terlalu tinggi mengakibatkan banyaknya spesies Na^+ membentuk mineral Sodalit ($\text{Al}_6\text{Na}_8(\text{SiO}_4)_6(\text{Cl})_2$) sehingga kekuatan geopolimer rendah dan menyebabkan semen menjadi rapuh dan kurang kuat[9]. Dengan demikian, untuk pembuatan semen geopolimer berbasis tanah napa ini direkomendasikan menggunakan NaOH dengan konsentrasi antara 8M – 14M. Faktor yang mempengaruhi hasil dari kuat tekan adalah komposisi kimia pada semen,kehalusan butiran semen dan suhu[20]



Gambar 8. Perbandingan Kuat Tekan Mortar Geopolimer Berbasis Tanah Napa dengan Variasi Rasio Alkali Aktivator

IV. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

- 1) Variasi konsentrasi NaOH sebagai alkali activator berpengaruh terhadap kuat tekan pada semen geopolimer berbasis tanah napa
- 2) Kuat tekan optimum didapatkan pada semen geopolimer dengan konsentrasi NaOH 14M dengan nilai kuat tekan pada hari ke-7 sebesar 23,08 MPa dan hari ke-28 sebesar 27,4 MPa.
- 3) Semakin tinggi konsentrasi NaOH maka semakin tinggi pula nilai kuat tekan yang dihasilkan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Kimia Universitas Negeri Padang, Laboratorium Quality Assurance PT. Semen Padang dan Laboratorium Bahan Bangunan dan Mekanika Tanah Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang yang telah menyediakan fasilitas laboratorium untuk pengujian. Selanjutnya, ucapan terima kasih juga tertuju kepada orang tua, Bapak/Ibu beserta staf Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang atas bimbingan dan masukannya.

REFERENSI

- [1] S. Z. and E. Z. Xueying Li, Xinwei Ma, "Mechanical Properties and Microstructure of Class (I).pdf," 2013.
- [2] N. B. Singh, "Fly Ash-Based Geopolymer Binder : A Future," 2018, doi: 10.3390/min8070299.
- [3] J. Davidovits, "PROPERTIES OF GEOPOLYMER CEMENTS Joseph Davidovits Geopolymer Institute, 02100 Saint-Quentin, France," pp. 1–19, 1994.
- [4] J. J. Ekaputri, "Analisa sifat mekanik beton geopolimer berbahan dasar fly ash jawa power paiton sebagai material alternatif," no. April, 2014.
- [5] J. Davidovits and S. France, *Geopolymer Chemistry and Applications*, no. April. 2020.
- [6] Mawardi, "Pengaruh Variasi Konsentrasi NaOH Terhadap Analisis Hilang Pijar dan Kehalusan Butiran Semen Geopolimer Berbasis Tanah Napa Lintau," vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2019, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [7] M. Mawardi, U. N. Padang, R. Zainul, and U. N. Padang, "Characterization of napa soil and adsorption of Pb (II) from aqueous solutions using on column method Characterization of napa soil and adsorption of Pb (II) from aqueous solutions using on column method," no. January 2016, 2015.
- [8] J. J. Ekaputri and T. Triwulan, "Sodium sebagai Aktivator Fly Ash, Trass dan Lumpur Sidoarjo dalam Beton Geopolimer," *J. Tek. Sipil*, vol. 20, no. 1, p. 1, 2013, doi: 10.5614/jts.2013.20.1.1.
- [9] P. Abu, V. Gunung, M. Sebagai, S. Polimer, and A. Aluminosilikat, "Pemanfaatan Abu Vulkanik Gunung Merapi SEbagai Geopolimer (," vol. 35, no. 1, 2012.
- [10] L. Yun-ming, H. Cheng-yong, M. Mustafa, A. Bakri, and K. Hussin, "Structure and Properties of Clay-based Geopolymer Cements : A Review Progress in Materials Science Structure and properties of clay-based geopolymer cements : A review," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 83, no. March 2021, pp. 595–629, 2016, doi: 10.1016/j.pmatsci.2016.08.002.
- [11] H. Sanjaya and R. Zainul, "Characterization of napa soil and adsorption of Pb (II) from aqueous solutions using on column method," vol. 7, no. 12, pp. 905–912, 2018, doi: 10.31227/osf.io/t8fh9.

- [12] J. G. S. Van Jaarsveld, J. S. J. Van Deventer, and G. C. Lukey, "<Vanjaarsveld2002.Pdf>," *Chem. Eng. J.*, vol. 89, pp. 63–73, 2002.
- [13] M. R. Rowles, J. V. Hanna, K. J. Pike, M. E. Smith, and B. H. O'Connor, "²⁹Si, ²⁷Al, ¹H and ²³Na MAS NMR study of the bonding character in aluminosilicate inorganic polymers," *Appl. Magn. Reson.*, vol. 32, no. 4, pp. 663–689, 2007, doi: 10.1007/s00723-007-0043-y.
- [14] D. Sabitha, J. K. Dattatreya, N. Sakthivel, M. Bhuvaneshwari, and S. A. J. Sathik, "Reactivity, workability and strength of potassium versus sodium-activated high volume fly ash-based geopolymers," vol. 103, no. 11, 2012.
- [15] Y. M. Liew, C. Y. Heah, A. B. Mohd Mustafa, and H. Kamarudin, "Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 83, pp. 595–629, 2016, doi: 10.1016/j.pmatsci.2016.08.002.
- [16] Badan Standarisasi Nasional, "SNI 2049-2015. Standar Nasional Indonesia Semen portland," *Jakarta, Indonesia : Author*, pp. 1–147, 2015.
- [17] F. P. Istomo, N. Nurlela, J. Kh, S. Iskandar, and T. Sereal, "KARAKTERISASI DAN PROPORSI ABU TERBANG (FLY ASH) DALAM PEMBUATAN PCC (PORTLAND COMPOSITE CEMENT) Bahan dan Alat Metode Penelitian ini menggunakan blanko semen dengan abu terbang . Sampel abu terbang sebelumnya di keringkan dalam oven (105 ± 5) °C selama 24 jam . Sebelum dilakukan pencampuran , abu terbang di analisis komposisi kimianya dengan XRF ."
- [18] SNI, "SNI 2049 : 2015 Standar Nasional Indonesia Semen portland," pp. 1–147, 2015.
- [19] 2009 Provis, "Activating solution chemistry for geopolymers," pp. 50–71, doi: 10.1533/9781845696382.1.50.
- [20] J. Davidovits and S. France, "NEW MATERIALS," no. November, pp. 1–2, 2018, doi: 10.1007/BF01912193.