

Pengaruh Rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sebagai Alkali Aktivator Terhadap Hilang Pijar dan Kehalusan Butiran Semen (*Blaine Analysis*) Geopolimer Berbasis Tanah Napa

Vira Nilmania, Mawardi Mawardi*

^{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 — Geopolymer is a material or binder that synthesized by mixing alumina silicate source material and alkaline activator solution. One of the source materials for alumina silicate is napa soil that contained high amount of SiO_2 dan Al_2O_3 with percentage 62,70% and 31,16% of XRF analysis after calcination, that can be used as material based of geopolymer. The aims of calcination is to increase the surface area of the aluminasilica material so that it can increase the maximum solubility of aluminasilica by alkaline activator. This study reports lost of ignition and blaine analysis of napa soil-based geopolymer cement with variations in alkali activator ratio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ is 1, 1.5, 2, 2.5. The characterization of napa soil-based geopolymer cement indicated the optimum lost of ignition and blaine analysis on the ratio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ is 2,5 which is 6,63% and 725 m^2/kg , it is higher than ordinary cement based on SNI with minimum blaine analysis is 280 m^2/kg .

Keywords — Geopolymer, Napa Soil, Compressive Strength, Blaine Analysis

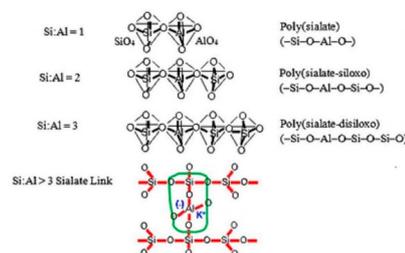
I. PENDAHULUAN

Tanah napa diproduksi secara alami, yang tidak mengalami perpindahan dari batuan induknya serta berasal dari pelapukan batuan yang dipengaruhi oleh tenaga endogen. Tanah ini tidak bergerak, maka sifatnya lebih murni, dalam arti tidak tercampur dengan jenis tanah dan material lain [1]. Tanah napa mengandung alumina silikat dengan perbandingan $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, yaitu sekitar 1,25:3,43. Selain itu juga mengandung SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO , K_2O dan Na_2O dengan persentase masing-masing 70.43, 20.52, 3.67, 0.40, 2.70, 1.26% dan trace [2]. Di Sumatera Barat, tanah napa terdapat di beberapa daerah seperti Kabupaten Solok, Tanah Datar, Lima Puluh Kota, dan Pesisir Selatan. 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 [2]. 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.

Geopolimer diperkenalkan pertama kali oleh seorang ilmuwan Prancis bernama Joseph Davidovits pada tahun 1978. Menurut Davidovits, bahan baku beton pembentuk piramida Giza di Mesir bukanlah batu kapur. Dari hasil penelitiannya, Davidovits menemukan bahwa struktur ikatan kimia dan mikrostruktur beton piramida memiliki kemiripan dengan beton geopolimer di laboratorium. Istilah geopolimer diperoleh dari proses pembentukan geopolimer yang dikenal sebagai geopolimerisasi. Geopolimer dapat dijelaskan sebagai

bahan yang dibentuk dari proses geosintesis polimer alumina-silikat dan larutan alkali aktivator sehingga menghasilkan polimer silika tetrahedral dengan ikatan alumina [3]. Dengan kata lain, geopolimer merupakan bahan atau material pengikat yang disintesa dengan mencampurkan material sumber aluminasilikat dan larutan alkali aktivator [4].

Geopolimer dibentuk dari material yang mengandung unsur silika dan alumina dalam jumlah tinggi. Berdasarkan rasio Si/Al, satuan struktur dasar geopolimer dibedakan menjadi poly(sialate), poly(sialate-siloxo), dan poly(sialate-disiloxo) [4].



Gambar 1. Struktur Dasar Geopolimer [4]

Geopolimerisasi merupakan reaksi kimia yang terjadi antara larutan alkali aktivator dengan sumber material yang mengandung aluminasilikat. Reaksi ini akan membentuk rantai dan cincin polimer tiga dimensi yang terdiri dari ikatan Si-O-Al- seperti gambar 2.

sudah dikalsinasi sesuai komposisi pada table 1, dan diaduk sehingga membentuk adonan geopolimer yang berbentuk *slurry*. Adonan semen geopolimer dituang ke dalam cetakan kubus dan dilakukan pre-curing dilingkungan ambient selama 24 jam. Setelah 24 jam, sampel dilepaskan dari cetakan kubus, lalu dilakukan curing selama 6 jam di dalam oven pada suhu 80°C. Setelah itu sampel semen padat dihancurkan hingga terbentuk semen halus [8].

TABEL 1.
KOMPOSISI SEMEN GEOPOLIMER BERBASIS TANAH NAPA

Sampel	Tanah Napa (gram)	Alkali Aktivator		
		Na ₂ SiO ₃ (gram)	NaOH (gram)	Na ₂ SiO ₃ /NaOH
G15	1000	500	500	1
G10	1000	600	400	1,5
G20	1000	666,67	333,33	2
G25	1000	714,29	285,71	2,5

[6]

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 [1].

E. Analisis Kehalusan Butiran Semen (Blaine Analysis)

Analisis kehalusan butiran semen diuji menggunakan alat *blaine* dengan cara menimbang sampel semen geopolimer sebanyak 2,8948 gram [9]. Kemudian dimasukkan dalam alat *blaine* menggunakan corong. Setelah menekan tombol *start*, alat akan bekerja secara otomatis dengan menunjukkan nilai dari luas permukaan butiran sampel semen yang diujikan.

F. Analisis Hilang Pijar (Lost of Ignition)

Analisis hilang pijar dilakukan dengan cara memanaskan cawan porselin kosong terlebih dahulu. Setelah didinginkan di dalam desikator, cawan porselin ditimbang untuk mengetahui beratnya. Kemudian ke dalam cawan porselin tersebut dimasukkan sampel semen geopolimer sebanyak 1 gram lalu cawan berisi sampel semen tersebut dipanaskan dalam furnace selama 15 menit pada suhu 1000°C [9]. Setelah didinginkan dalam desikator, maka cawan berisi sampel semen yang sudah dipijarkan itu ditimbang. Nilai LOI semen diperoleh dengan cara menghitung persentase selisih sampel sebelum dan sesudah dipijarkan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sintesis semen geopolimer berbasis tanah napa pesisir selatan dengan variasi rasio Na₂SiO₃/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 45 µm. Sedang kalsinasi tanah napa bertujuan untuk meningkatkan luas permukaan dari material aluminasilika sehingga dapat meningkatkan kelarutan aluminasilika oleh alkali aktivator secara maksimal [10].

A. Analisis XRF

Perbandingan komposisi senyawa kimia pada tanah napa sebelum dan sesudah kalsinasi ditunjukkan oleh tabel 2. 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% [8]. 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 [11].

TABEL 2
KOMPOSISI KIMIA TANAH NAPA SEBELUM DAN SESUDAH KALSINASI

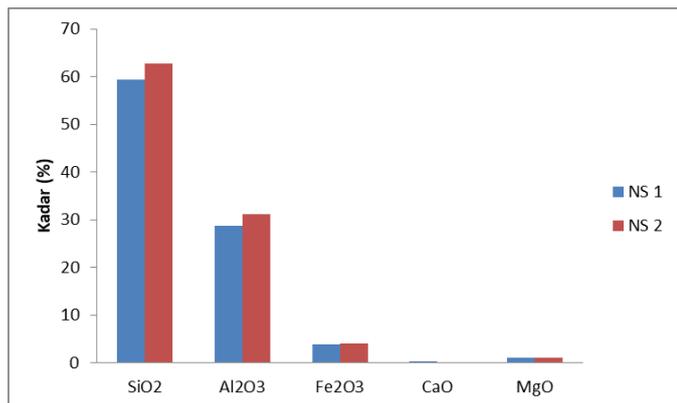
Sampel	Kadar (%)				
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
NS 1	59,38	28,78	3,96	0,37	1,08
NS 2	62,70	31,16	4,04	0,24	1,14

Keterangan:

NS 1 = Tanah Napa sebelum kalsinasi

NS 2 = Tanah Napa sesudah kalsinasi

Tabel 2. menunjukkan bahwa kadar SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ meningkat setelah kalsinasi sedangkan kadar CaO menurun setelah kalsinasi. Berikut adalah grafik perbandingan komposisi senyawa kimia pada tanah napa sebelum dan sesudah kalsinasi:



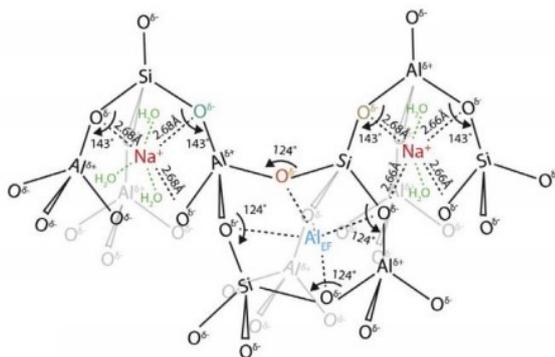
Gambar 3. Perbandingan Komposisi Kimia Tanah Napa Sebelum dan Sesudah Kalsinasi

Berdasarkan Tabel 2. dan Gambar 3, rasio Si/Al pada tanah napa pesisir selatan adalah 2, dimana tanah napa ini mampu membentuk poli(sialate-siloxo) seperti Gambar 4. berikut:



Gambar 4. Struktur Poly(sialate-siloxo) [7]

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. Kehadiran Na^+ sebagai kation penyeimbang berperan penting untuk mempertahankan kenetralan serta untuk menstabilkan struktur geopolimer. Struktur ikatan Si-O-Si dan Si-O-Al beserta kation penyeimbang ditunjukkan pada Gambar 5.



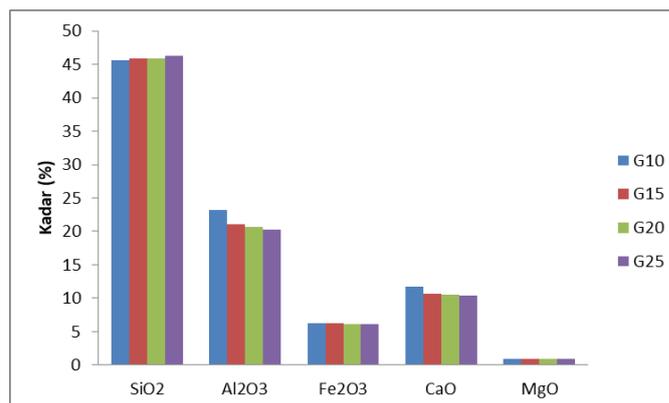
Gambar 5. Struktur Ikatan Si-O-Si dan Si-O-Al pada Geopolimer [12]

Hasil analisis senyawa kimia pada semen geopolimer yang menggunakan tanah napa dengan variasi rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ditunjukkan pada Tabel 3. berikut:

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

Sampel	Kadar (%)				
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
G10	45,67	23,13	6,27	11,69	0,9
G15	45,88	21,01	6,24	10,6	0,9
G20	45,91	20,67	6,17	10,52	0,89
G25	46,3	20,26	6,1	10,37	0,88

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 rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ mengakibatkan variasi kadar SiO_2 dan Al_2O_3 dalam semen geopolimer tersebut. Tabel 3. dapat digambarkan dalam grafik untuk menunjukkan perbandingan komposisi semen geopolimer sesuai variasi rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Perbandingan Komposisi Kimia Semen Geopolimer Berbasis Tanah Napa dengan Variasi Alkali Aktivator

Gambar 6. 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 rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 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 $\leq 6.0\%$ [9]. 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

Mg(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 Kehalusan Butiran Semen

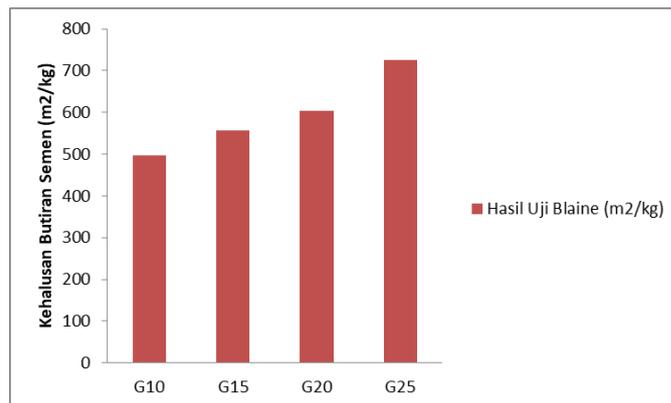
Analisis kehalusan butiran semen dilakukan untuk melihat kehalusan butiran dari semen yang dihasilkan. Semen yang halus memiliki ukuran partikel yang kecil dan mempunyai luas permukaan yang besar, semakin halus sebuah semen maka semakin besar luas permukaannya. Namun jika semen memiliki kehalusan butiran yang lebih kasar maka proses hidrasi akan berlangsung lambat dengan waktu pengikatan yang semakin lama. Nilai kehalusan butiran semen geopolimer berbasis tanah napa kabupaten Pesisir Selatan rata-rata yaitu 595,5 m²/kg. Kehalusan semen geopolimer berbasis tanah napa Pesisir Selatan ini memenuhi standar semen (SNI 2049 : 2015) yang minimal kehalusan semen yaitu 280 m²/kg [9].

Analisis kehalusan partikel semen geopolimer dilakukan dengan menggunakan instrumen Blaine yang diatur dalam Standar Nasional Indonesia SNI 2049:2015. Hasil analisis kehalusan butiran semen pada semen geopolimer yang menggunakan bahan baku tanah napa dengan variasi rasio Na₂SiO₃/NaOH sebagai alkali aktivator ditunjukkan pada Tabel 4. berikut:

TABEL 4
HASIL UJI KEHALUSAN BUTIRAN SEMEN GEOPOLIMER BERBASIS TANAH NAPA DENGAN VARIASI ALKALI AKTIVATOR

Sampel	Hasil Uji Blaine (m ² /kg)
G10	497
G15	557
G20	604
G25	725

Tabel 4. menunjukkan bahwa kehalusan semen bervariasi sesuai dengan variasi rasio Na₂SiO₃/NaOH sebagai alkali aktivator. Pengaruh variasi rasio Na₂SiO₃/NaOH sebagai alkali aktivator dalam semen geopolimer terhadap kehalusan butiran semen ditunjukkan pada Gambar 7. Kehalusan partikel semen dan luas permukaan semen meningkat seiring dengan meningkatnya rasio Na₂SiO₃/NaOH. Kehalusan maksimum didapatkan pada rasio Na₂SiO₃/NaOH sama dengan 2,5 yaitu sebesar 725 m²/kg. Kehalusan semen geopolimer jauh lebih tinggi daripada semen portland yang kehalusan rata-ratanya adalah 280 m²/kg [9]. Hal ini menyebabkan semen geopolimer mengalami proses hidrasi yang lebih cepat daripada semen portland. Kehalusan butiran semen ini akan mempengaruhi karakteristik semen lainnya, seperti kuat tekan dan *setting time* [13]. Semakin halus butiran semen, maka akan meningkatkan kekerasan dari pasta yang dihasilkan.



Gambar 7. Perbandingan Kehalusan Butiran Semen Geopolimer Berbasis Tanah Napa dengan Variasi Alkali Aktivator

C. Analisis Hilang Pijar (Lost Of Ignition)

Hilang pijar merupakan salah satu analisis kimia anorganik yang bertujuan untuk mengetahui kadar zat yang hilang saat pemijaran. Analisis hilang pijar dilakukan dengan cara memijarkan suatu sampel pada suhu tinggi yang menyebabkan beberapa zat yang mudah terbang akan terlepas pada keadaan konstan. Pada semen portland, nilai LOI menunjukkan kadar CO₂ yang berasal dari pembakaran CaCO₃. Sedangkan pada semen geopolimer nilai LOI menunjukkan kadar air. Nilai LOI yang tinggi dapat menyebabkan semen rusak hingga kualitas semen menurun. Oleh karena itu nilai LOI diharapkan seminimal mungkin [14].

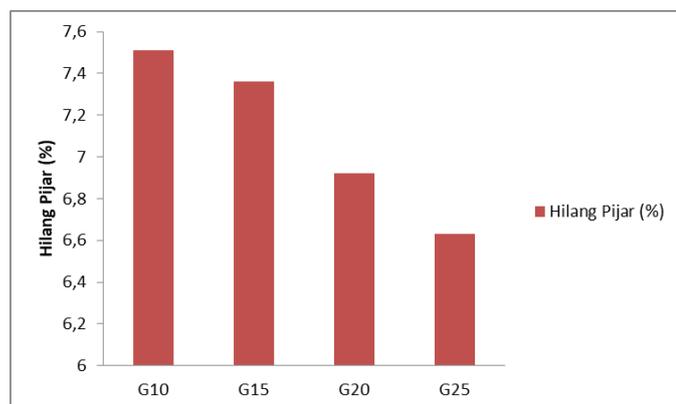
Hasil analisis *loi* semen geopolimer dengan bahan baku tanah napa dapat dilihat pada tabel 6.

TABEL 5
HASIL ANALISA HILANG PIJAR SEMEN GEOPOLIMER BERBASIS TANAH NAPA DENGAN VARIASI RASIO Na₂SiO₃/NaOH

Sampel	Hilang Pijar (%)
G10	7,51
G15	7,36
G20	6,92
G25	6,63

Berdasarkan tabel 5, rata-rata nilai hilang pijar dari semen geopolimer berbasis tanah napa adalah 7,1 %, nilai ini lebih tinggi dibandingkan dengan nilai hilang pijar pada semen portland komposit dengan tambahan tanah napa sebagai pozzolan yang rata-ratanya hanya 6,67% [1]. Hal ini dikarenakan semen geopolimer menggunakan larutan alkali aktivator, sehingga nilai hilang pijar tidak hanya menunjukkan kadar senyawa oksida yang terurai saat pemijaran, tapi juga menunjukkan kadar air dari sampel semen geopolimer [15]. Perbandingan hilang pijar semen geopolimer dengan bahan

baku tanah napa berdasarkan variasi $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ditunjukkan pada gambar 8.



Gambar 8. Perbandingan Hilang Pijar Semen Geopolimer Berbasis Tanah Napa dengan Variasi $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$

Nilai *Loss of Ignition* (LOI) harus minimal karena sebanding dengan kadar mineral yang dapat diurai dalam semen. Pengaruh variasi rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sebagai alkali aktivator dalam semen geopolimer dengan bahan baku tanah Napa pesisir selatan terhadap *Loss of Ignition* (LOI) ditunjukkan pada Gambar 11. Semen geopolimer dengan bahan baku tanah Napa berdasarkan variasi rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sama dengan 2,5 menunjukkan nilai LOI yang rendah, yang berarti jumlah mineral yang diurai rendah dikarenakan kandungan CaO yang rendah [15].

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sebagai alkali activator berpengaruh terhadap karakteristik semen geopolimer, baik hilang pijar maupun kehalusan butiran semen.
- 2) Hilang pijar menurun seiring dengan meningkatnya rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sedangkan kehalusan butiran semen meningkat seiring meningkatnya kekuatan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sebagai alkali activator.
- 3) Nilai hilang pijar dan kehalusan butiran semen optimum didapatkan pada semen geopolimer dengan $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 2,5.
- 4) Tanah Napa dapat dijadikan bahan baku semen geopolimer untuk pembuatan beton dan kebutuhan konstruksi lainnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada bapak Dr. Mawardi, M.Si yang telah memberikan banyak kritik dan saran sekaligus membimbing penulis dalam melakukan penelitian ini. Penulis juga 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 Bapak/Ibu beserta staf Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang atas bimbingan dan masukannya.

REFERENSI

- [1] M. Mawardi, I. Isa, A. Ulianas, E. Sintiar, F. Mawardi, and R. Z. Putra, "The Fabrication of Portland Composite Cement Based on Pozzolan Napa Soil," pp. 1–14, 2021.
- [2] M. Mawardi, D. Deyundha, R. Zainul, and P. R. Zalmi, "Characterization of PCC Cement by Addition of Napa Soil from Subdistrict Sarilamak 50 Kota District as Alternative Additional Material for Semen Padang," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 335, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/335/1/012034.
- [3] Saloma, Hanafiah, D. O. Elysandi, and D. G. Meykan, "Effect of $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ on mechanical properties and microstructure of geopolymer mortar using fly ash and rice husk ash as precursor," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1903, 2017, doi: 10.1063/1.5011552.
- [4] N. B. Singh, "Fly ash-based geopolymer binder: A future construction material," *Minerals*, vol. 8, no. 7, 2018, doi: 10.3390/min8070299.
- [5] B. Singh, G. Ishwarya, M. Gupta, and S. K. Bhattacharyya, "Geopolymer concrete: A review of some recent developments," *Constr. Build. Mater.*, vol. 85, pp. 78–90, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036.
- [6] Z. Yahya, M. M. A. B. Abdullah, K. Hussin, K. N. Ismail, R. A. Razak, and A. V. Sandu, "Effect of solids-to-liquids, Na_2SiO_3 -to- NaOH and curing temperature on the palm oil boiler ash (Si + Ca) geopolymerisation system," *Materials (Basel)*, vol. 8, no. 5, pp. 2227–2242, 2015, doi: 10.3390/ma8052227.
- [7] 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.
- [8] 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," *Curr. Sci.*, vol. 103, no. 11, pp. 1320–1327, 2012.
- [9] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 2049-2015. Standar Nasional Indonesia Semen portland," *Jakarta, Indonesia : Author*, pp. 1–147, 2015.
- [10] H. K. Tchakouté, C. H. Rüschler, E. Kamseu, J. N. Y. Djobo, and C. Leonelli, "The influence of gibbsite in kaolin and the formation of berillite on the properties of metakaolin-phosphate-based geopolymer cements," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 199, pp. 280–288, 2017, doi: 10.1016/j.matchemphys.2017.07.020.
- [11] M. B. Karakoç, I. Türkmen, M. M. Maraş, F. Kantarci, R. Demirboğa, and M. Uur Toprak, "Mechanical properties and setting time of ferrochrome slag based geopolymer paste and mortar," *Constr. Build. Mater.*, vol. 72, pp. 283–292, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.021.
- [12] R. V. R. San Nicolas, B. Walkley, and J. S. J. van Deventer, *Fly ash-based geopolymer chemistry and behavior*. Elsevier Ltd., 2017.
- [13] A. Leonard Wijaya, J. Jaya Ekaputri, and Triwulan, "Factors influencing strength and setting time of fly ash based-geopolymer paste," *MATEC Web Conf.*, vol. 138, 2017, doi: 10.1051/mateconf/201713801010.
- [14] I. Marzuki, "Analisis Penambahan Additive Batu Gamping Terhadap Kualitas Komposisi Kimia Semen Portland," *J. Chem.*, vol. 10, no. 1, pp. 64–70, 2009.
- [15] N. Chusilp, C. Jaturapitakkul, and K. Kiattikomol, "Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 12, pp. 3523–3531, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.06.046.