



Penggunaan Geopolymer Berbahan Dasar Abu Terbang (*Fly Ash*) Untuk Meningkatkan Kuat Geser Tanah

Gilbert G. G. Sengkey^{#a}, Roski R. I. Legrans^{#b}, Alva N. Sarajar^{#c}

^{#a}Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia
^agilbertgeorge2001@gmail.com, ^blegransroski@unsrat.ac.id, ^calva_sarajar@yahoo.com

Abstrak

Pemanfaatan abu terbang sebagai bahan dasar geopolymer menjadi material substitusi parsial semen pada konstruksi beton telah banyak diteliti, dalam berbagai komposisi dan perilaku campuran untuk meningkatkan kekuatan beton. Berbagai penelitian telah menyimpulkan bahwa geopolymer telah berhasil meningkatkan kuat tekan beton. Penelitian ini memanfaatkan geopolymer untuk meningkatkan kuat geser niralir (undrained shear strength) tanah, dengan abu terbang sebagai bahan dasar geopolymer dan alkali aktivator yang terdiri dari Sodium Hidroksida (NaOH) 12M dan Sodium Silikat (Na_2SiO_3), dengan perbandingan 5:2. Perbandingan bahan penyusun geopolymer alkali aktivator dan abu terbang adalah 3:4. Rancangan percobaan penambahan geopolymer pada tanah menggunakan metode Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan 5 perlakuan, yakni i) tanah asli tanpa penambahan geopolymer (0%); ii) tanah asli dengan penambahan geopolymer 5%; iii) tanah asli dengan penambahan geopolymer 10%; iv) tanah asli dengan penambahan geopolymer 15% dan v) tanah asli dengan penambahan 20% geopolymer. Pengaruh penambahan geopolymer untuk meningkatkan kuat geser dianalisis menggunakan analisis keragaman (ANOVA). Hasil uji laboratorium untuk menentukan sifat indeks tanah menunjukkan bahwa jenis tanah yang digunakan dalam penelitian adalah tanah non-plastis (NP), memiliki berat jenis sebesar 2.68, kadar air tanah asli sebesar 34% dan berdasarkan klasifikasi USCS adalah tanah pasir bergradasi buruk (SP). Hasil uji tekan bebas menunjukkan peningkatan kuat geser dari 0.045 kg/cm² (0%) menjadi: 0.118 kg/cm² (5%), 0.134kg/cm² (10%), 0.279kg/cm² (15%) dan 0.401kg/cm² (20%). Hasil analisis keragaman (ANOVA) menunjukkan bahwa penambahan geopolymer berpengaruh secara sangat signifikan ($p < 0.01$) terhadap peningkatan kuat geser niralir, serta memiliki korelasi yang sangat kuat ($r^2 = 0.93$). Penelitian ini menyimpulkan bahwa penggunaan geopolymer berbahan dasar abu terbang dengan alkali aktivator dari Sodium Hidroksida (NaOH) 12M dan Sodium Silikat (Na_2SiO_3), dapat meningkatkan kuat geser niralir pada tanah pasir bergradasi buruk.

Kata kunci: kuat geser, abu terbang, geopolymer, alkali aktivator, tanah pasir bergradasi buruk

1. Pendahuluan

Geopolymer, pertama kali diperkenalkan oleh Joseph Davidovits, adalah reaksi aluminosilikat padat dengan larutan alkali hidroksida atau silikat berair pekat yang menghasilkan bahan alkali aluminosilikat sintesis. Geopolymer dapat menunjukkan beragam sifat dan karakteristik, termasuk kekuatan tekan yang tinggi, pengerasan yang cepat atau lambat, tahan asam, tahan api, dan konduktivitas termal yang rendah. Hal tersebut bergantung pada pemilihan bahan baku dan kondisi pemrosesan. Pemanfaatan geopolymer sebagai bahan substitusi semen banyak dilakukan pada penelitian beton.

Pengerasan pada geopolymer didasarkan pada mekanisme polimerisasi, dimana proses polimerisasi melibatkan reaksi kimia yang sangat cepat dalam kondisi basa pada mineral Si-Al, selanjutnya menghasilkan rantai polimer tiga dimensi dan struktur cincin yang terdiri dari Si-O-Al-O. Gel yang terbentuk mengandung kation alkali untuk memenuhi kekurangan aluminium-silikon. Fase kaya aluminium yang terbentuk menghasilkan produk gel tiga dimensi yang lebih stabil dan kaya silikon dalam bentuk Q^4 (nAl), dimana pembentukan ini tergantung pada kondisi

perawatan aktivator.

Geopolymer umumnya dibentuk melalui reaksi bubuk aluminosilikat dengan larutan alkali silikat dan dipadatkan melalui polimerisasi ketika ion logam (M^{m+}) yang keluar dari pengisi menjembatani asam asetat silikat melalui reaksi dengan komponen cairan (Si, O, H). Geopolymer kemudian terpadatkan sebagai kristal polimerisasi yang menyusut dengan mengambil ion logam (M^{m+}) ke dalam struktur jembatan silikat asam asetat. Proses ini dikenal dengan istilah solidifikasi.

Cairan alkali, atau aktivator alkali, digunakan untuk mengaktifkan bahan utama. Ini merupakan faktor terpenting dalam memproduksi semen geopolymer melalui proses geopolymerisasi. Aktivator mendorong pengendapan dan kristalisasi spesies silika dan alumina yang ada dalam larutan. Mekanisme awal reaksi didorong oleh kemampuan larutan basa untuk melarutkan bahan pozzolan dan melepaskan silikon dan aluminium reaktif ke dalam larutan. Aktivator yang paling banyak digunakan adalah campuran natrium atau kalium hidroksida (NaOH, KOH) dan cairan sodium ($nSiO_2Na_2O$) atau cairan potasium ($nSiO_2K_2O$).

Abu terbang adalah salah satu bahan utama penting yang digunakan untuk membuat geopolymer. Abu terbang terdiri dari abu halus yang dihasilkan dari pembakaran batu bara bubuk di pembangkit listrik. Komposisi kimianya tergantung pada komposisi mineral gangue batubara (bagian anorganik batubara). Silika biasanya bervariasi dari 40 hingga 60% dan alumina dari 20% hingga 30%. Kandungan zat besinya cukup bervariasi. Alkali hadir dalam jumlah yang cukup besar dan kalium lebih banyak dibandingkan natrium.

Berdasarkan ASTM C618, terdapat dua jenis abu terbang yaitu abu terbang kelas F dan abu terbang kelas C. Perbedaan utama antara kedua kelas ini adalah jumlah kandungan kalsium, silika, alumina dan besi dalam abu. Abu terbang kelas F biasanya merupakan produk sampingan dari pembakaran batubara antrasit dan bitumen yang lebih keras dan lebih tua. Abu terbang kelas F bersifat pozzolan dan mengandung kurang dari 20% kapur (CaO). Memiliki sifat pozzolan, silika kaca dan alumina dari abu terbang kelas F memerlukan bahan perekat, seperti semen Portland, kapur tohor, atau kapur terhidrasi, dengan adanya air agar dapat bereaksi dan menghasilkan senyawa semen. Alternatifnya, penambahan aktivator kimia seperti cairan natrium silikat ke abu terbang kelas F dapat menyebabkan pembentukan geopolymer.

Abu terbang kelas C yang dihasilkan dari pembakaran batubara lignit atau sub-bituminus yang lebih muda, selain memiliki sifat pozzolan, juga memiliki sifat self-cementing. Dengan adanya air, abu terbang kelas C akan mengeras dan bertambah kuat seiring berjalannya waktu. Abu terbang kelas C umumnya mengandung kapur (CaO) lebih dari 20%. Berbeda dengan kelas F, abu terbang kelas C yang melakukan self-cementing tidak memerlukan aktivator. Kandungan alkali dan sulfat (SO_4) umumnya lebih tinggi pada abu terbang kelas C.

Tabel 1. Perbandingan Unsur Kimia Berbagai Tipikal Bahan Pengikat (Binders) menurut ASTM C989 (dalam persentase)

Bahan Pengikat (sebagai oksida)	Semen Tipe I	Abu Terbang Kelas C	Abu Terbang Kelas F
SiO ₂	21.1	33.5	43.4
Al ₂ O ₃	4.6	22.9	18.5
CaO	65.1	27.4	4.3
MgO	4.5	4.6	0.9
Fe ₂ O ₃	2.0	6.1	29.9
SO ₃	2.8	2.8	1.2

Penggunaan geopolymer dengan beberapa bahan dasar pembentuk untuk proses solidifikasi tanah lunak telah diteliti sebelumnya. Sinolungan dkk (2008) telah meneliti penggunaan geopolymer berbahan dasar abu terbang pada proses solidifikasi tanah lempung lunak Ariake. Nishida dkk (2008) telah menggunakan geopolymer berbahan dasar abu terbang pada solidifikasi tanah lempung Bangkok. Legrans (2015) menggunakan abu Batubara PFBC (Pressurized Fluidized Bed Combustion) sebagai bahan dasar geopolymer untuk meningkatkan kuat geser niralir tanah lempung Ariake. Legrans dan Kondo (2015) menggunakan terak EAF (Electric Arc Furnace) sebagai bahan dasar geopolymer untuk meningkatkan kuat geser tanah kerukan dan tanah pasir lepas. Erfanto dkk (2020) menggunakan abu terbang dari PLTU sebagai bahan dasar geopolymer pada tanah pasir berlempung. Penelitian-penelitian tersebut menyimpulkan bahwa geopolymer berbahan dasar abu terbang dapat meningkatkan kuat geser

niralinir. Meskipun demikian, konsentrasi alkali aktivator dan rancangan campuran pembentuk geopolymer dari bahan dasar dan alkali aktivator dari penelitian-penelitian terdahulu berbeda sehingga berpengaruh terhadap besar capaian kuat geser niralinir tanah setelah proses solidifikasi. Penelitian ini menggunakan abu terbang sisa produksi PLTU sebagai bahan dasar geopolymer dan alkali aktivator dari campuran larutan natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na₂SiO₃), dengan tujuan untuk meningkatkan kuat geser niralinir.

2. Material dan Metode

2.1. Tanah

Tanah yang digunakan dalam penelitian adalah tanah pasir bergradasi buruk (SP), berdasarkan klasifikasi tanah USCS. Sifat fisik tanah disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Sifat Fisik Tanah

Sifat	Nilai
Kadar air tanah asli, <i>w</i> (%)	34.18
Berat jenis	2.68
Lolos No. 200 (%)	3.34
Batas Atterberg	NP

Sumber: Hasil Penelitian, 2024

2.2. Material Utama

Material utama dalam penelitian ini adalah abu terbang kelas C yang disuplai dari PLTU Amurang. Sifat-sifat abu terbang yang diperoleh dari uji laboratorium pada Badan Penelitian dan Standardisasi Industri di Indonesia yang bertempat di kota Manado, adalah sebagai berikut:

- SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ = 86,73%
- CaO = 25%
- Berat satuan (kg/m³) = 775,87

2.3. Aktivator

Cairan aktivator diperoleh dengan mencampurkan larutan natrium hidroksida (NaOH) 12M dan natrium silikat (Na₂SiO₃) dengan perbandingan NaOH terhadap Na₂SiO₃ adalah 5:2. Dengan demikian berat larutan natrium hidroksida adalah 2/5 berat larutan natrium silikat.

2.4. Geopolymer

Geopolymer terbentuk dari alkali aktivator dan material dasar abu terbang dengan perbandingan 3:4 atau alkali aktivator/abu terbang = 0.75. Aktivator terbentuk atas larutan natrium silikat dan larutan natrium hidroksida. Misalkan abu terbang = *x*, larutan natrium silikat = *y* dan larutan natrium hidroksida = 2/5 larutan natrium silikat = 0.4.*y*. Maka berat geopolymer adalah:

$$W_{geopolymer} = x + y + 0.4y \dots\dots\dots (1)$$

dan

$$\frac{Alkali\ Aktivator}{Abu\ Terbang} = 0.75 \dots\dots\dots (2)$$

Maka:

$$\frac{y+0.4y}{x} = 0.75 \dots\dots\dots (3)$$

$$x = (1.33 + 0.53)y = 1.87y \dots\dots\dots (4)$$

Substitusi *x* pada persamaan (1), sehingga:

$$W_{geopolymer} = 3.27y \dots\dots\dots (5)$$

y adalah berat larutan natrium silikat (Na₂SiO₃). Berikut ini adalah contoh perhitungan untuk menentukan kebutuhan bahan geopolymer yang akan digunakan sebagai material tambahan pada 1 sampel uji:

1. Hitung volume cetakan, dimana cetakan berbentuk silinder dengan diameter 6 cm dan tinggi 12 cm. Volume cetakan = 339.292 cm^3 ;
2. Hitung berat tanah (W) dengan terlebih dahulu menentukan berat isi (γ) rencana. Untuk penelitian ini, ditentukan berat isi sebesar 2 g/cm^3 . Sehingga berat/sampel adalah $W = \gamma \cdot V = 2 \times 339.292 = 678.584 \text{ g} \approx 700 \text{ g}$;
3. Tentukan berat geopolimer berdasarkan persentase penambahan yang ditentukan. Untuk penambahan geopolimer 5%, maka berat geopolimer adalah $5\% \times 700 \text{ g} = 35 \text{ g}$. Berdasarkan persamaan (5) maka berat larutan natrium silikat adalah:

$$y = \frac{W_{\text{geopolimer}}}{3.27} = \frac{35}{3.27} = 10.7 \text{ g}$$
4. Berat abu terbang dihitung menggunakan persamaan (4) adalah:
 $x = 1.87y = 1.87 \times 10.7 = 20.009 \text{ g} \approx 20 \text{ g}$
5. Berat larutan natrium hidroksida adalah $2/5$ berat natrium silikat = $0.4 \times 10.7 \text{ g} = 4.3 \text{ g}$
6. Ulangi langkah 2 sd. 6 untuk sampel-sampel yang lain pada persentasi penambahan yang sama;
7. Untuk persentasi penambahan yang berbeda, perhitungan berat tanah menggunakan langkah 2 dan berat geopolimer adalah persentase penambahan x berat tanah.

2.5. Tahapan Penelitian dan Rancangan Percobaan

Kegiatan Penelitian dilakukan dengan tahapan sebagai berikut: (i) percobaan sifat fisik; (ii) desain campuran; (iii) pembuatan geopolimer; (iv) campuran tanah dan geopolimer; (v) pengujian kuat tekan bebas dan (vi) analisis terhadap hasil uji. Pengujian sifat fisik tanah dilakukan menurut standar ASTM untuk setiap jenis pengujian, yang bertujuan untuk mengetahui kadar air alami, berat jenis, distribusi ukuran partikel dan batas-batas Atterberg.

Dalam desain campuran, komposisi pasta geopolimer dihitung. Perbandingan campuran tanah-Geopolimer ditentukan dengan komposisi sebagai berikut:

- Tanah asli + 0% Geopolimer
- Tanah asli + 5% Geopolimer
- Tanah asli + 10% Geopolimer
- Tanah asli + 15% Geopolimer
- Tanah asli + 20% Geopolimer

Penambahan geopolimer dihitung berdasarkan persentase berat tanah. Pengujian benda uji bertujuan untuk mengetahui kekuatan tanah-geopolimer pada setiap perlakuan. Instrumen uji tekan bebas digunakan untuk pengujian tersebut. Dalam menganalisis hasil, analisis statistik berupa analisis keragaman (ANOVA) digunakan untuk membantu dalam menarik kesimpulan sesuai dengan tujuan penelitian.

3. Hasil dan Pembahasan

Rata-rata kuat geser niralir pada masing-masing perlakuan ditampilkan pada Tabel 4. Konsistensi tanah ditunjukkan oleh nilai kuat geser niralir menurut Terzaghi dan Peck (Tabel 3). Tanah asli (SP) dengan rata-rata kuat geser niralir 0.05 kg/cm^2 (4.9 kPa) termasuk pada tanah berkonsistensi sangat lunak ($c_u = 0$ sd. 12.5 kPa). Tanah dengan penambahan 5% geopolimer dan 10% geopolimer, masing-masing dengan rata-rata kuat geser niralir 0.24 kg/cm^2 (23.5 kPa) dan 0.27 kg/cm^2 (26.5 kPa), termasuk pada tanah konsistensi lunak ($c_u = 12.5$ sd. 25 kPa). Tanah dengan penambahan 15% geopolimer dan 20% geopolimer, masing-masing dengan rata-rata kuat geser niralir 0.56 kg/cm^2 (55 kPa) dan 0.80 kg/cm^2 (78.5 kPa), termasuk pada tanah konsistensi kaku ($c_u = 50$ sd. 100 kPa).

Untuk mengetahui pengaruh penambahan geopolimer pada rancangan percobaan terhadap kuat geser niralir, dilakukan analisis keragaman (ANOVA). Dalam ANOVA, penambahan geopolimer dinyatakan memiliki pengaruh terhadap kuat geser niralir apabila probabilitas kesalahan $< 1\%$ dan/atau 5% . Artinya ANOVA digunakan untuk menguji hipotesis bahwa penambahan geopolimer berpengaruh terhadap peningkatan kuat geser niralir tanah asli. Apabila probabilitas kesalahan: $p < 0.01$, maka penambahan geopolimer dinyatakan secara sangat signifikan berpengaruh terhadap kuat geser niralir. Apabila probabilitas kesalahan: $p < 0.05$, maka

penambahan geopolymer dinyatakan secara signifikan berpengaruh terhadap kuat geser niralir. Sedangkan $p > 0.05$, penambahan geopolymer dinyatakan tidak berpengaruh terhadap kuat geser niralir. Hasil ANOVA ditampilkan pada Tabel 5. Prosedur ANOVA untuk mendapatkan nilai F dapat dilihat pada Principles and Procedures of Statistics: A Biometrical Approach (Steel dan Torrie, 1980).

Tabel 3. Kuat Geser Niralir berdasarkan Konsistensi Tanah (Terzaghi dan Peck, 1967)

Konsistensi	Kuat Geser Niralir, c_u (kPa)
Sangat Lunak	0 sd. 12.5
Lunak	12.5 sd. 25
Sedang	25 sd. 50
Kaku	50 sd. 100
Sangat Kaku	100 sd. 200
Keras	> 200

Tabel 4. Rata-rata Kuat Geser Niralir pada Perlakuan

Perlakuan	w (%)	q_u (kg/cm ²)	c_u (kg/cm ²)
Tanah (SP, 0%)	35	0.09	0.05
Tanah + 5% Geopolymer	28	0.24	0.24
Tanah + 10% Geopolymer	31	0.26	0.27
Tanah + 15% Geopolymer	30	0.56	0.56
Tanah + 20% Geopolymer	29	0.80	0.80

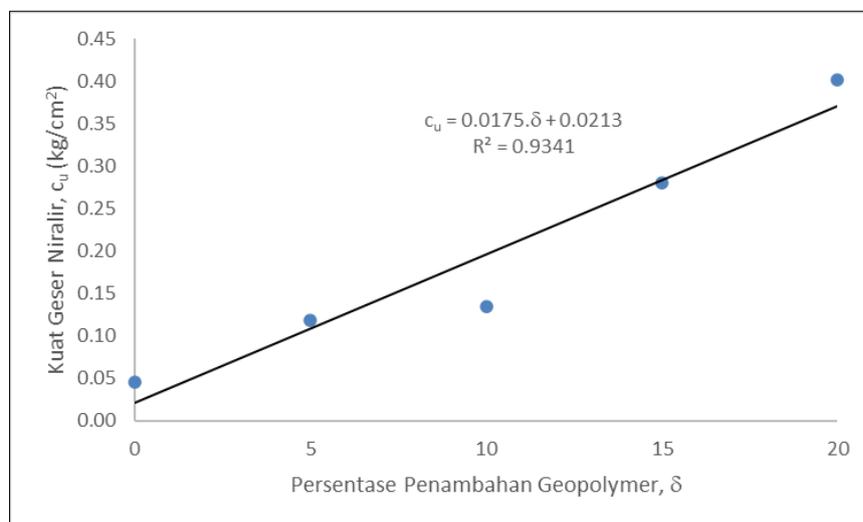
Sumber: Hasil Penelitian, 2024

Pada Tabel ANOVA terlihat bahwa nilai F hitung (*F Value*) lebih besar dari nilai tabel F pada probabilitas kesalahan 1% dan 5% menurut banyaknya perlakuan dan ulangan (replikasi) pada setiap perlakuan. Dengan demikian dinyatakan bahwa penggunaan geopolymer secara sangat signifikan berpengaruh terhadap peningkatan kuat geser niralir pada tanah pasir bergradasi buruk.

Tabel 5. Analisis Keragaman (ANOVA) (Steel dan Torrie, 1980)

Source of Variation	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Value	F Table		Remarks
					$p < 0.05$	$p < 0.01$	
Mixture Ratio	4	0.57	0.14	48.1557	2.69	4.020	**
Experimental Error	30	0.09	0.00				

Sumber: Hasil Analisis, 2024



Gambar 1. Kurva Hubungan Kuat Geser Niralir terhadap Persentase Penambahan Geopolymer

Sumber: Hasil Analisis, 2024

Tingkat keamatan hubungan antara kuat geser niralir dan penambahan geopolymer dinyatakan melalui suatu koefisien korelasi. Hasil analisis korelasi dan regresi dengan bantuan *spreadsheet* ditunjukkan pada Gambar 1. Koefisien korelasi sebesar 0.93 menunjukkan bahwa kuat geser niralir memiliki korelasi sangat kuat ($r^2 > 0.8$) terhadap penambahan geopolymer.

4. Kesimpulan

Penelitian ini memberikan kesimpulan bahwa penggunaan geopolymer melalui persentase penambahan terhadap berat tanah, secara signifikan berpengaruh terhadap peningkatan kuat geser niralir pada tanah pasir bergradasi buruk ($p < 0.01$) dan memiliki korelasi sangat kuat terhadap peningkatan kuat geser ($r^2 > 0.93$). Penambahan geopolymer telah merubah konsistensi tanah asli dari sangat lunak menjadi lunak (5% dan 10%) dan kaku (15% dan 20%). Penggunaan alkali activator yang terdiri larutan natrium hidroksida (NaOH) 12M dan natrium silikat (Na_2SiO_3) dan abu terbang (*fly ash*) kelas C sisa produksi PLTU, untuk membentuk geopolymer dapat meningkatkan kuat geser niralir pada tanah pasir bergradasi buruk.

Referensi

- Wallah, S.E., Rangan, B.V. (2006): Low Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Long Term Properties, Research Report GC2, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia.
- Rangan, B.V. (2008): Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, *Research Report GC4*, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia.
- Ikeda Ko., Mikuni Akira. (2006): Recent Development of Geopolymers from Viewpoint of Carbon Dioxide Emission and Waste Management Problems, *Trans. MRS-J.*, 31, 319-324.
- Sinolungan, M., Koumoto, T., Kondo F., Zhao Y. (2008): Solidification of Soft Ariake Clay by Mixing with Fly Ash-Based Geopolymer, *Journal of Transactions of The Japanese Society of Irrigation, Drainage and Rural Engineering*, Tokyo, 5(76), 257, 35-41.
- Khale Divya, Chaudhary Rubina. (2007): Mechanism of Geopolymerization and Factors Influencing Its Development: A Review, *Journal of Material Science*, 42, 729-746.
- Kong Daniel, L.Y., Sanjayan Jay, G. (2008): Damage Behavior of Geopolymer Composites Exposed to Elevated Temperatures, *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, 30, 986-991.
- Nishida, K., Koumoto, T., Suwanvitaya, P., Suwanvitaya, P., Kondo, F. (2008): Compressive Strength Characteristics of Soft Bangkok Clay Stabilized by Fly Ash-Based Geopolymer, *Proceeding of the 2nd Technology and Innovation for Sustainable Development Conference*, Thailand, 164-167.
- Legrans, R.R.I. (2015). "Strength Improvement of Soft Ariake Creek Clay Through Solidification by PFBC Coal Ash-based Geopolymer." *Tekno*, 13, No. 63, 99-101.
- Legrans, R. Kondo, F. (2015). "Strength improvement of dredged soil through solidification by Eaf Slag-based geopolymer." *Bulletin of Faculty of Agriculture, Saga University*, 100, 33-41.
- Legrans, R.R.I. (2015). "Solidification of Sand for Strength Improvement." *Tekno*, 13, No. 63, 81-85.
- Steel Robert G.D., Torrie James H. (1980): Principles and Procedures of Statistics: A Biometrical Approach, International Student Edition, *McGraw-Hill Kogakusha*, 2, 137-143, 153-158, 172-176, 185-189, 239-250, 272-278, 365-372, 577, 580, 588, 597.
- Erfanto, A., Legrans, R.R.I., Sarajar, A. N. (2020). Pengaruh Penambahan Geopolymer Berbahan *Fly Ash* Dari PLTU Terhadap Kuat Geser Pada Tanah Pasir Berlempung. *TEKNO – Volume 18 Nomor 76 – Desember 2020*, 15, 1-8.
- Parapaga, R. T., Sarajar, A. N., Legrans, R. R. I. (2018). PENGARUH PENAMBAHAN ZEOLITE TERHADAP KUAT. *Jurnal Sipil Statik Vol.6 No.7 Juli 2018*, 501-509.