

FAKTOR - FAKTOR PENYEBAB PEMUAIAN DALAM PEMBUATAN AGREGAT RINGAN GEOPOLIMER BERBASIS LUMPUR SIDOARJO

Hilda Utami Citra¹, Crystie Angelina Leuw², Antoni³, Djwantoro Hardjito⁴

ABSTRAK: Semburan lumpur Sidoarjo merupakan bencana sekaligus permasalahan yang dihadapi oleh bangsa Indonesia, karena semburan lumpur yang tak kunjung berhenti sehingga menyebabkan volume lumpur semakin banyak dan tidak berguna. Makalah ini membahas upaya pemanfaatan lumpur tersebut sebagai agregat ringan buatan melalui proses geopolimerisasi khususnya pada faktor - faktor penyebab pemuaian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan larutan sodium silikat yang melebihi 50% massa lumpur membuat benda uji mengalami pemuaian sehingga menghasilkan berat jenis yang lebih kecil. Larutan sodium silikat yang digunakan bervariasi dari 50%, 55%, 60%, serta 70% dari massa lumpur. Molaritas NaOH yang digunakan sebesar 2M serta suhu *curing* divariasikan pada 60°, 85°, dan 110°C. Untuk menghasilkan berat jenis yang lebih kecil maka ditambahkan serbuk aluminium yang di variasikan sebanyak 0,5%, 1%, 1,5%, dan 2% dari massa lumpur. Pengujian kuat tekan dilakukan pada sample berukuran 5×5×5 cm³, sedangkan uji berat jenis, stabilitas serta absorpsi pada pelet berdiameter ± 1cm. Hasil terbaik yang diperoleh adalah agregat ringan buatan dengan berat jenis 0,97 gr/cm³ dan kuat tekan sebesar 4,02 MPa pada usia 7 hari.

KATA KUNCI: agregat ringan buatan, geopolimer, lumpur Sidoarjo, serbuk aluminium, pemuaian.

1. PENDAHULUAN

Volume lumpur Sidoarjo yang sangat melimpah menyebabkan potensi lumpur untuk dapat diolah menjadi sesuatu yang bermanfaat. Nuruddin et.al., (2010) memaparkan bahwa setelah mengalami pembakaran dengan suhu tinggi maka lumpur Sidoarjo dapat digunakan sebagai material pengganti atau dapat meminimalkan penggunaan semen hingga kadar tertentu.

Lumpur Sidoarjo ini sangat kaya akan kandungan silika (SiO₂) dan alumina (Al₂O₃) sehingga dapat digunakan sebagai bahan baku material geopolimer (Al Bakri et.al., 2012). Lumpur Sidoarjo juga dapat digunakan sebagai bahan utama pembuatan agregat ringan buatan. Sebagai bahan dasar untuk pembuatan pasta geopolimer yang akan dijadikan agregat ringan, lumpur Sidoarjo harus bersifat reaktif (amorf), yang dapat diperoleh setelah melalui proses pembakaran pada suhu tinggi (Triwulan et.al., 2007).

Penelitian yang telah dilakukan oleh Budisetiawan et.al (2014) dengan menerapkan metode pembakaran pada tahap akhir, telah memberikan hasil yang cukup memuaskan dari segi kuat tekan dan berat jenisnya, yaitu sebesar 3,3 MPa dan 0,93 g/cm³.

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, m21410100@john.petra.ac.id

² Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, m21410104@john.petra.ac.id

³ Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Krsiten Petra, antoni@petra.ac.id

⁴ Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra djwantoro.h@petra.ac.id

Adakalanya didapati, material geopolimer yang dihasilkan mengalami pemuaihan. Pemuaihan ini merupakan salah satu yang diharapkan terjadi agar agregat buatan yang dihasilkan makin ringan. Namun, hingga saat ini faktor - faktor penyebab pemuaihan belum pernah diungkapkan.

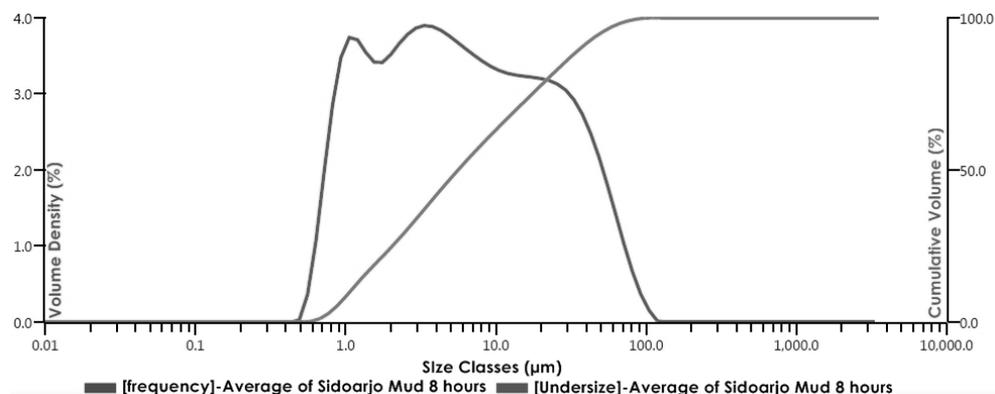
Dalam penelitian ini, faktor - faktor penyebab pemuaihan dipelajari secara terstruktur. Faktor - faktor yang ditinjau adalah kadar larutan sodium silikat, temperatur *curing* serta penambahan serbuk aluminium. Penggunaan larutan sodium silikat dengan kadar tinggi merupakan salah satu faktor penyebab pemuaihan pada pasta / mortar geopolimer (Fansuri et.al, 2012). Serbuk aluminium juga sudah lazim digunakan untuk pembuatan bata ringan. Suhu *curing* juga berpengaruh terhadap sifat / karakteristik material geopolimer yang dihasilkan.

Dengan adanya penelitian ini, diharapkan agar lumpur Sidoarjo dapat dimanfaatkan sebagai bahan dasar pembuatan agregat ringan geopolimer yang ramah lingkungan dan bermanfaat bagi dunia konstruksi di Indonesia. Dengan berat jenis yang lebih kecil, beton yang dihasilkan dapat berkurang beratnya, yang selanjutnya berakibat pada berkurangnya massa suatu bangunan.

2. RANCANGAN PENELITIAN

Bahan

Bahan yang digunakan adalah lumpur Sidoarjo, padatan NaOH, larutan sodium silikat, serbuk aluminium dan air. Lumpur Sidoarjo yang dipakai adalah lumpur yang diambil dari titik koordinat lokal 25 yang dibentuk menyerupai batu bata dengan tebal ± 1 cm, kemudian dioven pada suhu 110°C selama 2 hari untuk menghilangkan kadar air, selanjutnya dibakar dalam *furnace* dengan suhu 700°C selama 6 jam dan digiling menggunakan mesin giling selama 8 jam sehingga hasil gilingan lolos ayakan $63\mu\text{m}$. Hasil *Particle Size Analysis* yang telah dilakukan terhadap lumpur Sidoarjo yang telah digiling selama 8 jam dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Hasil *Particle Size Analysis* Lumpur Sidoarjo yang Telah Digiling selama 8 Jam

Padatan NaOH yang digunakan memiliki kemurnian sebesar 98% yang kemudian dibuat menjadi larutan NaOH dengan molaritas sebesar 2M. Sedangkan larutan sodium silikat yang digunakan memiliki komposisi Na_2O 17,14% dan SiO_2 36,17%, dengan rasio 2,14. Sebelum ditambahkan serbuk aluminium, lumpur dicampurkan dengan sodium silikat dan larutan NaOH 2M terlebih dahulu.

Metode Penelitian

Awalnya, lumpur dioven, dibakar, dan digiling terlebih dahulu, setelah itu dilakukan pencampuran adonan untuk membuat 3 benda uji sebesar $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ dari setiap variabelnya. Lumpur yang digunakan sebanyak 600 gr, larutan sodium silikat yang digunakan bervariasi dari 50% (300gr), 55% (330gr), 60% (360gr), dan 70% (420gr) dari massa lumpur yang digunakan. NaOH *flake* dilarutkan di dalam air (sejumlah yang ditentukan) hingga terbentuk larutan NaOH 2M serta kelecakan yang diinginkan sehingga memudahkan dalam pembuatan pelet.

Larutan NaOH dan larutan sodium silikat dicampurkan terlebih dahulu, kemudian lumpur yang sudah dibakar dan digiling ditambahkan dan diaduk hingga merata. Adonan kemudian dicetak dalam bentuk kubus $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ dan dalam bentuk pelet dan kemudian *curing* di dalam oven pada suhu 60°C selama 24 jam. Pengujian berat jenis, kuat tekan, stabilitas dan absorpsi dilakukan pada umur 7 hari. Persyaratan agregat ringan yakni memiliki berat jenis antara 1,0-1,8 g/cm^3 dan kuat tekan minimal sebesar 2 MPa (SNI 03-2461-2002, 2002). Selain itu, agregat ringan juga harus memenuhi persyaratan stabilitas yaitu tidak mengalami perubahan bentuk, larut, atau hancur setelah direndam dalam air selama 24 jam (Pimraksa et al., 2011), serta memiliki daya absorpsi atau penyerapan air yang tidak melebihi 20% (SNI 03-2461-2002, 2002).

Pada tahap selanjutnya, dari hasil terbaik pada penelitian tahap pertama dilakukan variasi suhu *curing* yakni pada suhu 60°C , 85°C , dan 110°C untuk melihat pengaruh suhu terhadap pemuaihan benda uji. Semua benda uji dari setiap variabel setelah di *curing* selama 24 jam kemudian diukur pemuaiannya dengan menggunakan jangka sorong. Setelah 7 hari barulah dilakukan pengujian kuat tekan, berat jenis, stabilitas dan absorpsi.

Pada tahap terakhir dari penelitian ini, hasil terbaik dari komposisi pada tahap kedua kemudian dicampurkan dengan serbuk aluminium dengan variasi penambahan sebesar 0,5% (3gr), 1% (6gr), 1,5% (9gr) dan 2% (12gr) dari massa lumpur yang digunakan. Setelah dicampurkan dengan serbuk aluminium, pasta kemudian dicetak dan di *curing* pada suhu 60°C selama 24 jam. Setelah 7 hari, dilakukan pengujian kuat tekan, berat jenis, stabilitas dan absorpsi.

3. HASIL DAN ANALISA

Pengaruh Penggunaan Larutan Sodium Silikat dalam Jumlah Banyak terhadap Berat Jenis, Kuat Tekan, Pemuaihan, Stabilitas, dan Absorpsi

Pada penelitian tahap pertama ini dibuat 3 benda uji untuk tiap komposisi, dengan ukuran benda uji yang sama yaitu $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$. Variabel bebas pada tahap ini adalah jumlah sodium silikat yang dipakai dalam membuat campuran pasta geopolimer. Hasil uji penelitian tahap pertama ini dapat dilihat pada **Tabel 1** dan **Tabel 2**.

Tabel 1. Hasil Uji Berat Jenis dan Kuat Tekan

No	Lumpur (gr)	NaOH flake (gr)	Air (gr)	Sodium silikat (gr)	Berat Kering (gr)	Volume (cm^3)	Berat Jenis (gr/cm^3)	Kuat Tekan (MPa)
1	600	3,2	40	50% (300 gr)	230	131	1.76	11,28
2	600	2,4	30	55% (330 gr)	231	134	1.72	11,90
3	600	2,0	25	60% (360 gr)	228	137	1.66	14,88
4	600	0,8	10	70% (420 gr)	228	142	1.61	7,08

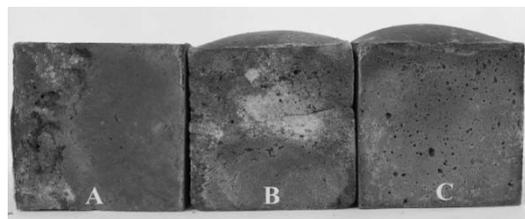
Tabel 2. Hasil Uji Stabilitas dan Absorpsi

No	Lumpur (gr)	NaOH flake (gr)	Air (gr)	Sodium silikat (gr)	Berat Kering (gr)	Stabilitas	Absorpsi (%)
1	600	3,2	40	50% (300 gr)	230	OK	4,23
2	600	2,4	30	55% (330 gr)	231	OK	4,45
3	600	2,0	25	60% (360 gr)	228	OK	4,56
4	600	0,8	10	70% (420 gr)	228	OK	4,82

Hasil dari uji kuat tekan dan berat jenis ini memperlihatkan bahwa seiring dengan bertambahnya sodium silikat pada campuran pasta geopolimer membuat pasta tersebut menjadi lebih kuat hingga komposisi tertentu, yaitu sodium silikat 60% dari massa lumpur. Setelah itu kuat tekan mengalami penurunan cukup drastis. Pemuaiian tidak terjadi kemungkinan karena suhu *curing* yang digunakan terlalu rendah yang membuat sodium silikat tidak dapat bereaksi dengan baik.

Pengaruh Suhu *Curing* terhadap Berat jenis, Kuat Tekan, Pemuaiian, Stabilitas, dan Absorpsi

Pada tahap ini, penelitian dilakukan dengan menggunakan variasi suhu *curing* antara 60° C - 110° C selama 24 jam untuk mengamati pemuaiian yang terjadi karena pada tahap pertama benda uji tidak mengalami pemuaiian. Kemungkinan hal ini dikarenakan suhu yang rendah tidak dapat membuat sodium silikat memuai dengan baik, dan karena itu perlu dilakukan variasi suhu *curing* untuk mengetahui pemuaiian yang paling optimal. Komposisi campuran pasta yang digunakan adalah 600gr lumpur, NaOH 2M dengan NaOH *flake* 2 gr, dan air sebanyak 25 gr, dan sodium silikat sebesar 60% dari massa lumpur. Pengaruh suhu *curing* terhadap pemuaiian pada benda uji dapat dilihat pada **Gambar 2. Gambar 2(A)** merupakan benda uji dengan suhu *curing* 60°C yang tidak mengalami pemuaiian. **Gambar 2(B)** merupakan benda uji yang yang di *curing* pada suhu 85°C serta **Gambar 2(C)** merupakan benda uji dengan suhu *curing* 110°C yang menghasilkan pemuaiian paling besar.



Gambar 2. Pengaruh Suhu *Curing* terhadap Pemuaiian pada Benda Uji

Hasil uji serta pengamatan pemuaiian pada tahap kedua ini dapat dilihat pada **Tabel 3** dan **Tabel 4**.

Tabel 3. Hasil Uji Berat Jenis dan Kuat Tekan

No	Sodium silikat (gr)	Suhu <i>Curing</i> (°C)	Berat Kering (gr)	Volume (cm ³)	Berat Jenis (gr/cm ³)	Kuat Tekan (MPa)
1	360 gr	60	228	137	1.66	14.88
2	360 gr	85	224	144	1.56	17.50
3	360 gr	110	221	149	1.48	20.00

Tabel 4. Hasil Uji Stabilitas, Absorpsi, dan Pemuai

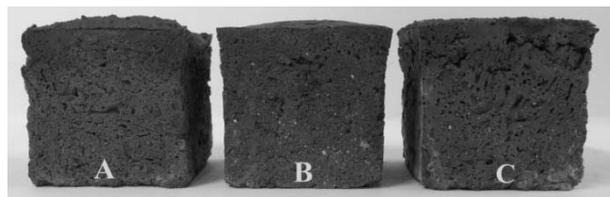
No	Sodium silikat (gr)	Suhu <i>Curing</i> (°C)	Berat Kering (gr)	Stabilitas	Absorpsi (%)	Pemuai / Pengembangan Δ (mm)
1	360 gr	60	228	OK	4,87	-
2	360 gr	85	224	OK	5,43	1.80
3	360 gr	110	221	OK	5,85	2.50

Hasil yang paling optimal dari percobaan di atas dilihat dari faktor pemuai, kuat tekan serta berat jenis yaitu dengan menggunakan suhu *curing* 110° C. Dengan adanya suhu yang tinggi ini maka pemuai yang dihasilkan juga semakin besar kemungkinan karena suhu tinggi dapat membuat sodium silikat bereaksi dengan baik. Hal ini dapat dilihat dari Δ yang semakin besar yang tentunya juga membuat berat jenis yang dihasilkan semakin kecil karena adanya pemuai.

Pengaruh Penambahan Serbuk Aluminium terhadap Berat jenis, Kuat Tekan, Stabilitas, dan Absorpsi

Penelitian pada tahap ketiga ini mencoba metode baru dengan menggunakan penambahan serbuk aluminium setelah pencampuran lumpur dengan bahan kimia. Komposisi campuran yang digunakan adalah lumpur 600 gr, larutan sodium silikat 60% dari massa lumpur, NaOH 2M dengan NaOH *flake* 8 gr, dan air 100 gr. Benda uji sengaja dibuat lebih cair dikarenakan ketika serbuk aluminium bereaksi dengan NaOH dan Si yang terkandung di dalam lumpur membuat pasta menjadi lebih cepat memuai dan mengeras. Apabila tidak dibuat lebih cair, maka pasta tidak sempat dimasukkan ke bekisting.

Ketika serbuk aluminium ditambahkan, variasi suhu *curing* menunjukkan tidak ada perbedaan yang signifikan terhadap pemuai. Hal ini mungkin disebabkan karena setelah ditambahkan serbuk aluminium, faktor pemuai sebagian besar disebabkan oleh reaksi serbuk aluminium dengan silika (Si) dan NaOH, sehingga menyebabkan terciptanya rongga-rongga dan pemuai pada pasta bahkan sebelum dimasukkan ke dalam oven. Sehingga untuk penghematan energi maka digunakan suhu *curing* 60° C. Pengaruh suhu *curing* terhadap pemuai dapat dilihat pada **Gambar 3**. **Gambar 3(A)** merupakan benda uji yang di *curing* pada suhu 60°C, **Gambar 3(B)** benda uji di *curing* pada suhu 85°C dan **Gambar 3(C)** adalah benda uji yang di *curing* pada suhu 110°C.



Gambar 3. Pengaruh Suhu *Curing* terhadap Pemuai Benda Uji setelah Ditambahkan Serbuk Aluminium

Ketika serbuk aluminium ditambahkan, pemuai segera terjadi pada benda uji. Oleh sebab itu, setelah campuran pasta dimasukkan ke dalam bekisting, harus didiamkan terlebih dahulu agar benda uji dapat memuai terlebih dahulu. Pada tahap ini peneliti juga telah mencoba untuk mendiamkan benda uji selama 2 jam, 4 jam dan 6 jam sebelum di masukkan oven untuk di *curing*. Hasilnya ialah variasi waktu tunggu 2 jam, 4 jam dan 6 jam tidak menunjukkan adanya perbedaan pemuai yang signifikan. Oleh sebab itu, peneliti kemudian menggunakan waktu tunggu minimal selama 2 jam sebelum benda uji di *curing* agar benda uji memuai terlebih dahulu. Apabila tidak didiamkan terlebih dahulu, maka benda uji tidak dapat memuai dengan baik dan rongga-rongga tidak terbentuk dengan sempurna.

Penambahan serbuk aluminium menghasilkan pemuaihan serta banyak rongga pada benda uji. Akan tetapi pemuaihan yang dihasilkan tidak dapat diukur dengan tepat. Kemungkinan hal ini disebabkan oleh reaksi yang terjadi terlalu cepat antara serbuk aluminium dengan Si serta larutan NaOH yang membuat pemuaihan menjadi tidak merata dan bergelombang. Benda uji dengan pemuaihan yang tidak merata dan bergelombang dapat dilihat pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Benda Uji dengan Pemuaihan yang Tidak Merata dan Bergelombang

Hasil uji berat jenis, kuat tekan, stabilitas dan absorpsi pada penelitian tahap ketiga ini dapat dilihat pada **Tabel 5** dan **Tabel 6**.

Tabel 5. Hasil Uji Berat Jenis dan Kuat Tekan

No	Lumpur (gr)	NaOH flake (gr)	Air (gr)	Sodium silikat (gr)	Serbuk Aluminium (%)	Berat Kering (gr)	Volume (cm ³)	Berat Jenis (gr/cm ³)	Kuat Tekan (MPa)
1	600	8	100	360 gr	0,5	160	140	1.14	5.75
2	600	8	100	360 gr	1	150	150	1.00	4.45
3	600	8	100	360 gr	1,5	145	150	0.97	4.02
4	600	8	100	360 gr	2	144	150	0.96	2.02

Tabel 6. Hasil Uji Stabilitas, Absorpsi dan Pemuaihan

No	Lumpur (gr)	NaOH flake (gr)	Air (gr)	Sodium silikat (gr)	Serbuk Aluminium (%)	Stabilitas	Absorpsi (%)	Pemuaihan / Pengembangan Δ (mm)
1	600	8	100	360 gr	0,5	OK	9,80	1,5
2	600	8	100	360 gr	1	OK	10,3	2,6
3	600	8	100	360 gr	1,5	OK	10,2	2,5
4	600	8	100	360 gr	2	OK	10,3	2,6

Dari **Tabel 5** dan **Tabel 6** dapat dilihat bahwa penambahan serbuk aluminium memberikan hasil yang cukup baik dari segi berat jenis, tetapi mengalami penurunan drastis terhadap kuat tekannya.

Dari seluruh percobaan ini, didapatkan agregat ringan dengan komposisi 600 gram lumpur yang telah melalui proses *treatment*, NaOH *flake* 8 gram dan air 100 ml untuk menghasilkan larutan NaOH 2M, 360 gram (60% terhadap massa lumpur) sodium silikat, serta serbuk aluminium sebanyak 9 gram (1,5% terhadap massa lumpur) merupakan agregat ringan paling optimal baik dari segi kuat tekan sebesar 4,02 MPa maupun berat jenisnya 0,97 gr/cm³. Agregat ringan dapat dilihat pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Agregat Ringan

4. KESIMPULAN

1. Seiring dengan bertambah banyaknya kandungan sodium silikat pada campuran pasta geopolimer, agregat geopolimer mengalami pemuaihan sehingga berat jenisnya semakin kecil dan kuat tekannya semakin besar. Akan tetapi pada titik tertentu yaitu sodium silikat 60% dari massa lumpur, penambahan sodium silikat tidak lagi menambah kuat tekan agregat, sebaliknya menghasilkan kuat tekan yang lebih rendah. Pemuaihan tidak terjadi kemungkinan karena suhu yang digunakan terlalu rendah yang membuat sodium silikat tidak dapat bereaksi dengan baik.
2. Pemuaihan dan kuat tekan pada agregat ternyata juga dipengaruhi oleh suhu *curing*. Dari variasi suhu *curing*, yaitu 60° C, 85° C, 110° C menghasilkan pemuaihan serta kuat tekan yang paling baik yakni pada suhu 110°C, kemungkinan hal ini disebabkan sodium silikat dapat bereaksi dengan baik menggunakan suhu yang tinggi.
3. Penambahan serbuk aluminium pada campuran pasta geopolimer segera menghasilkan rongga-rongga / pemuaihan pada pasta dan pasta segera mengalami pengerasan. Oleh sebab itu, pada saat menggunakan serbuk aluminium, campuran agregat harus dibuat lebih cair sehingga masih dapat dicetak / dibentuk terlebih dahulu. Pemuaihan yang dihasilkan tidak dapat diukur dengan tepat kemungkinan karena reaksi yang terjadi terlalu cepat antara serbuk aluminium dengan Si yang terkandung di dalam lumpur.
4. Suhu *curing* tidak lagi mempengaruhi pemuaihan pada pasta geopolimer yang ditambahkan serbuk aluminium. Hal ini dikarenakan faktor pemuaihan sebagian besar disebabkan oleh reaksi serbuk aluminium dengan silika (Si) yang terkandung dalam lumpur, reaksi tersebut menyebabkan terciptanya rongga-rongga pada pasta sehingga pasta mengalami pemuaihan bahkan sebelum dimasukkan ke dalam oven.
5. Seiring dengan bertambah banyaknya serbuk aluminium pada campuran pasta geopolimer, akan menghasilkan berat jenis yang semakin kecil. Hal ini dikarenakan banyaknya rongga-rongga yang dihasilkan pada campuran agregat. Akan tetapi hal ini juga menyebabkan kuat tekan menjadi semakin berkurang, dan hasil paling optimal ditinjau dari segi kuat tekan dan berat jenisnya adalah serbuk aluminium sebanyak 1.5% dari massa lumpur.
6. Agregat yang diproduksi kali ini memiliki berat jenis 0,97 gr/cm³ dan memiliki kuat tekan sebesar 4,02 MPa. Berat jenis agregat sudah memenuhi target yang ingin dicapai peneliti yaitu dengan berat jenis dibawah 1,0 gr/cm³.

DAFTAR PUSTAKA

- Al Bakri, A. M. M., Rafiza, A. R., Hardjito, D., Kamarudin, H., & Nizar, I. K. (2012). Characterization of LUSI Mud Volcano as Geopolymer Raw Material. *Advanced Materials Research*, 548, 82–86.
- Budisetiawan, E., Go, A. P., Hardjito, D., & Antoni. (2014). Agregat Ringan Geopolimer Berbahan Dasar Lumpur Sidoarjo. *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil*, 3, 1–5.

- Fansuri, H., Prasetyoko, D., Zhang, Z., & Zhang, D. (2012). The Effect of Sodium Silicate and Sodium Hydroxide on the Strength of Aggregates Made from Coal Fly Ash Using the Geopolymerisation Method. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 7, 73–79.
- Nuruddin, M., Bayuaji, R., Masilamani, M., & Biyanto, T. (2010). Sidoarjo Mud: A Potential Cement Replacement Material. *Civil Engineering Dimension*, 12(1), 18–22.
- Pimraksa, K., Chindapasirt, P., Rungchet, A., Sagoe-Crentsil, K., & Sato, T. (2011). Lightweight Geopolymer Made of Highly Porous Siliceous Materials with Various Na₂O/Al₂O₃ and SiO₂/Al₂O₃ Ratios. *Materials Science and Engineering*, 528, 6616–6623.
- SNI 03-2461-2002. (2002). *Spesifikasi Agregat Ringan untuk Beton Ringan Struktural*.
- Triwulan, Ekaputri, J. J., & Adiningtyas, T. (2007). Analisa Sifat Mekanik Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash dan Lumpur Porong Kering sebagai Pengisi. *Jurnal Teknologi Dan Rekayasa Sipil*, 33, 33–45.