

EFEK KADAR LUMPUR TERHADAP KEKUATAN BETON GEOPOLIMER

Djedjen Achmad

Dosen Program Studi Teknik Sipil, Politeknik Negeri Jakarta

Email djedjen@gmail.com

Abstract

It has been tested the effects of clay content (material through sieve No. 200) on the coarse aggregate and fine aggregate on the characteristics of geopolymer concrete. Research done on aggregate with three variations content of clay, i.e 0.94%, 2.4%, and 4.8% by weight of the combined aggregate (fine aggregate and coarse aggregate). Geopolymer concrete made with the composition of the mixture of w/b = 0.25, 10M NaOH, and ratio of Na₂SiO₃: NaOH = 2: 1, and the ratio between coarse aggregate: fine aggregate = 65%: 35%. In the test the workability of fresh concrete with a slump, at the age of 7, 14 and 28 day compressive strength testing, while the split tensile strength test and flexural tensile strength was tested at 28 days.

From the result of research, the higher of clay content at the aggregate, the lower the compressive strength. With the clay content of 2.4% and 4.8% at 28 days compressive strength is differences compared with 0.94% clay content decreased by 27.52% and 50.15%. Similarly of tensile strength when compared to the tensile strength at content of 0.94% clay, the clay concentration of 2.4% and 4.8% the tensile strength decreased by 19.47 and 25.18% and flexural tensile strength at a content of 2.4% and 4.8% clay, decreased by 22.34 and 42.78%, compared to 0.94% clay content.

Keywords: Concrete. geopolymer, clay, characteristics, strength

Abstrak

Telah diuji efek kadar lumpur (material lolos saringan No. 200) pada agregat kasar dan agregat halus terhadap karakteristik beton geopolimer. Penelitian dilakukan terhadap agregat dengan kadar lumpur bervariasi 0.94%, 2.4%, dan 4.8% terhadap berat agregat gabungan (agregat halus dan agregat kasar). Beton geopolimer dibuat dengan komposisi campuran w/b = 0,25, NaOH 10 M, dan perbandingan Na₂SiO₃ : NaOH = 2 : 1, serta perbandingan antara agregat kasar : agregat halus = 65 % : 35 %. Pada beton segar dilakukan uji workability dengan alat slump, pada umur 7, 14 dan 28 hari dilakukan pengujian kuat tekan, sedangkan uji kuta tarik belah dan kuat tarik lentur diuji pada umur 28 hari.

Dari hasil penelitian, semakin tinggi kadar lumpur pada agregat, kuat tekannya semakin rendah. Dengan kadar lumpur 2,4% dan 4,8% pada umur 28 hari perbedaan kuat tekannya dibandingkan dengan kadar lumpur 0.94 % turun sebesar 21.3 % dan 45.8%. Demikian pula kuat tarik belahnya jika dibandingkan dengan kuat tarik pada kadar lumpur 0.94 %, pada kadar lumpur 2,4% dan 4,8% kuat tarik belahnya turun sebesar 19.47 dan 25.18 % dan kuat tarik lenturnya pada kadar lumpur 2,4% dan 4,8% turun sebesar 22.34 dan 42.78 %, dibandingkan kuat tarik lentur pada kadar lumpur 0.94 %.

Kata kunci : Beton. geopolimer, lumpur, karakteristik, kekuatan

PENDAHULUAN

Kadar lumpur atau bahan lolos saringan No 200, dalam agregat dibatasi jumlahnya, karena dapat menurunkan kuat tekan pada beton. Dalam agregat kasar maksimum 1% dan pada agregat halus maksimum 5%. Lumpur karena kehalusannya menyerupai semen, akan menghambat proses hidrasi pada semennya, akibatnya kekuatan pada beton akan lebih rendah dari kuat tekan yang ditargetkan

Dengan kuat tekan yang lebih rendah, maka dalam rancang campuran beton, factor air semen (fas) harus dikoreksi kembali, yaitu dengan memperkecil fas. Akibatnya adalah menambah kadar semen, menambah kadar semen berarti menambah biaya. Demikian dampak kadar lumpur terhadap kekuatan dan factor biaya dalam pembuatan beton semen.

Pada beton geopolimer tanpa menggunakan semen, hanya menggunakan fly ash dan alkali activator sebagai bahan

perekatnya, dan agregat sebagai bahan pengisinya, adakah efek dari kadar lumpur tersebut terhadap kekuatan betonnya. Beton geopolimer adalah beton masa depan karena dalam pembuatannya tidak menimbulkan masalah terhadap lingkungan, malah dapat mencegah polusi udara dan pencemaran lingkungan. Hal ini berbeda dengan pembuatan beton semen, dimana semen dalam proses produksinya menghasilkan CO₂ yang jumlahnya sebanding dengan berat semen yang diproduksi.

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah mendapatkan sifat mekanis, berupa kuat tekan, kuat tarik, dan kuat lentur pada beton geopolimer yang agregatnya tercemar oleh lumpur, sehingga dalam menggunakan agregat, terutama agregat yang kotor, dengan kadar lumpur yang tinggi akan lebih selektif dalam memilih dan menggunakan agregat tersebut, serta dalam menargetkan kekuatan pada beton, perlu diprediksi adanya penurunan tersebut, sehingga kuat tekan yang ditargetkan perlu diperbesar.

Tinjauan Pustaka

Geopolimer adalah sebuah senyawa silikat alumino anorganik yang disintesis dari bahan – bahan produk sampingan seperti abu terbang (*fly ash*) abu sekam padi (*risk husk ash*) dan lain – lain, yang banyak mengandung silikon dan aluminium (Davidovits, 1997)

Geopolimer merupakan produk beton *geosintetik* dimana reaksi pengikatan yang terjadi adalah reaksi polimerisasi. Dalam reaksi polimerisasi ini Aluminium (Al) dan Silika (Si) mempunyai peranan penting dalam ikatan polimerisasi (Davidovits, 1994) Reaksi Al dan Si dengan alkaline akan menghasilkan AlO₄ dan SiO₄.

Peranan unsur silikat dan aluminium sangat penting dalam proses polimerisasi. Hal ini ditunjukkan dalam bentuk rasio perbandingan Si/Al, semakin besar ratio Si/Al karakter polimer semakin terbentuk kuat.

Sifat Beton Geopolimer

Beton geopolimer memiliki sifat sebagai berikut. Pada saat beton segar, memiliki waktu pengikatan 10 jam pada suhu - 20°C dan 7 sampai 60 menit pada suhu 20 °C, penyusutan pada saat setting sebesar 0.05 %, dan kehilangan massa dari beton basah ke beton kering kurang dari 0.1 %. Sedangkan pada beton keras, dapat mencapai kuat tekan 90 Mpa dan kuat tarik 10 – 15 Mpa pada umur 28 hari. Atau ratio compressive strength : tensile strength antara 10 – 15. Penyerapan airnya kurang dari 3 %, tahan terhadap api, lingkungan korosif, dan reaksi alkali silika. Juga karena tidak menggunakan semen sebagai bahan perekatnya, maka dapat mengurangi polusi udara.

Bahan Geopolimer

Binder

Binder adalah bahan pengikat dalam campuran beton geopolimer yang terdiri dari fly ash, ukurannya sangat halus, sangat baik untuk mengisi rongga yang terdapat dalam beton. Fly ash adalah bahan yang berasal dari sisa pembakaran batu bara yang tidak terpakai. Komposisi dari fly ash sebagian besar terdiri dari Silikat Dioksida (SiO₂), Aluminium (Al₂O₃), Besi (Fe₂O₃) dan Kalsium (CaO), serta Magnesium, Potassium, Sodium, Titanium, Sulfur, dalam jumlah yang kecil. Jika tidak diolah lebih lanjut, fly ash dapat menyebabkan dampak negatif bagi lingkungan, dapat mengkontaminasi air tanah dengan kandungan pengotor seperti Arsenik, Barium, Berillium, Boron, Cadmium, Komium, Thallium, Selenium, Molibdenum dan Merkuri. Dengan adanya pemanfaatan fly ash sebagai bahan geopolimer, merupakan salah satu usaha dalam menyelamatkan lingkungan

Alkaline Activator (Sodium Silikat dan Sodium Hidroksida)

Sodium silikat dan sodium hidroksida digunakan sebagai alkaline activator (Hardjito Djuwantoro, dkk, 2004). Sodium

silikat berfungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi, sedangkan sodium hidroksida berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur Al dan Si yang terkandung dalam fly ash sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat.

Sodium silikat

Sodium silikat merupakan salah satu bahan tertua dan paling aman yang sering digunakan dalam industri kimia, hal ini dikarenakan proses produksi yang lebih sederhana, maka sejak tahun 1818 sodium silikat berkembang dengan cepat.

Sodium silikat terdapat dalam dua bentuk, yaitu berupa padat dan larutan. Untuk campuran beton lebih banyak digunakan dengan bentuk larutan. Sodium silikat atau yang lebih dikenal dengan nama *water glass*, pada mulanya digunakan sebagai campuran dalam pembuatan sabun. Tetapi dalam perkembangannya sodium silikat dapat digunakan untuk berbagai macam keperluan, antara lain untuk bahan campuran semen, pengikat keramik, coating, campuran cat serta dalam beberapa keperluan industri, seperti kertas, tekstil dan serat.

Sodium Hidroksida

Sodium hidroksida berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur Al dan Si yang terkandung dalam fly ash sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat.

Lumpur atau material halus lainnya yang lolos saringan 75 μm (No 200)

Pengertian lumpur adalah bagian yang berasal dari agregat alam (split dan pasir) yang dapat melalui ayakan 0,075 mm, dengan berat jenis kurang dari 2.0 (SK SNI S-04-1989-F). Bahan ini dapat menyebabkan terganggunya proses pengikatan pada beton serta pengerasan betonnya.

Kandungan lumpur yang berlebihan pada agregat akan mengurangi daya lekat agregat dengan pasta semen. Kadar lumpur yang berlebih pada agregat juga

dapat membuat kekuatan beton menjadi rendah, sehingga mutu beton yang ditargetkan tidak tercapai. Untuk itu diperlukan pemeriksaan mutu agregat (split maupun pasir) agar mendapatkan bahan-bahan campuran beton yang memenuhi syarat, sehingga beton yang dihasilkan nantinya sesuai dengan yang diharapkan. Material halus dalam agregat bisa dalam bentuk lumpur, debu atau partikel halus lainnya pada saat pemecahan batuan. Karena butirannya sangat halus menyerupai semen, maka akan menghambat proses hidrasi semen, sehingga kekuatan pada beton akan terhambat juga, untuk itulah kadar lumpur pada agregat dibatasi jumlahnya. Menurut SNI No 52 tahun 1980, kandungan lumpur dalam agregat halus maksimum 5 %, dan pada agregat kasar maksimum 1%. Demikian pula menurut BS 882 : 1973, maksimum 15 % dalam abu batu (*crushed stone sand*), 3 % dalam pasir alam atau pasir dari pemecah batu, dan 1 % dalam agregat kasar.

Dari hasil penelitian Purwantodan Yulita Arni Priastiwi(2012) pada beton semen, dengan agregat halus (pasir) katagorikadar lumpur bersih (1% & 2%), pasirdengan kadar lumpur sedang (4%) dan pasir dengankadar lumpur kotor (7% & 11%) sedangkan untukkadar lumpur yang terdapat pada agregat kasar adalah 0.70% (kurang dari 1%), didapat hasil, kadar lumpur mempengaruhi kuat tekan beton, semakin kecil kadar lumpur, kuat tekan beton semakin tinggi. Kuat tekan beton rata-rata kadar lumpur bersih (36.68 MPa) lebih besar dari kuat tekan beton rata-rata kadar lumpur sedang (33.92MPa) dan kotor (31.30 MPa). Dibandingkan dengankadar lumpur kotor terjadi kenaikan kuat tekan rata-rata untuk kadar lumpur sedang sebesar 2.62 MPa (8.37 %), dan kadar lumpur bersih sebesar 5.38 MPa (17.19 %).

Kandungan lumpur pada agregat kasar dan agregat halus diperiksa dengan menggunakan penyaringan basah. Pengujian dilakukan dengan cara

mengambil sampel agregat, kemudian mencucinya dalam suatu tempat (ember), lalu air cucuannya dicurahkan dalam saringan 0.075 mm dan 1.18 mm, isi kembali dengan air bersih, lalu aduk lagi, dan curahkan kembali dalam susunan saringan tadi, Lakukan berulang kali sampai air cucian bersih. Ambil agregat yang tertahan diatas saringan 0.075 mm, termasuk 1.18mm dan dalam tempat pencucian agregat. Setelah dicuci, agregat di oven sampai kering mutlak, kemudian ditimbang. Kadar lumpur dapat dihitung dengan menghitung selisih berat sebelum dicuci dengan setelah dicuci dibagi dengan berat sebelum dicuci

HASIL DAN PEMBAHASAN

Variasi dan Jenis Benda uji

Penelitian dilakukan dengan cara membuat benda uji berbentuk silinder diameter 150 mm, tinggi 300 mm untuk uji kuat tekan, uji kuat tarik belah dan balok ukuran 100 x 100 x 500 mm untuk uji lentur. Untuk meneliti kekuatan dari beton tersebut, dibuat benda uji beton geopolimer dengan komposisi perbandingan antara sodium silikat (*water glass*) dan sodium hidroksida (NaOH) 2.0, molaritas larutan NaOH 10 Molar dan perbandingan air dan binder (w/b) 0.25, serta perbandingan agregat kasar dan agregat halus 65% : 35%

Agregat kasar dari, Rumpin, agregat halus berasal dari Bangka Belitung, dan abu terbang (fly ash) dari Suralaya, sedangkan lumpur diambil dari Laboratorium Mekanika Tanah, Politeknik Negeri Jakarta.

Langkah pertama dalam penelitian ini adalah menguji kadar lumpur pada masing-masing agregat, lalu menghitung kadar lumpur gabungannya. Untuk variasi kadar lumpur pada agregat gabungan, kadar lumpur asli pada masing-masing agregat ditambah sesuai dengan kadar lumpur yang ditargetkan. Dari hasil perhitungan didapat kadar lumpur gabungan adalah sebagai berikut :

Untuk variasi 1, kadar lumpur asli pada agregat kasar adalah 0,924% dan agregat halus adalah 0,958%. Kadar lumpur gabungannya = $(0,35 \times 0,958) + (0,65 \times 0,924) = 0,94\%$

Untuk variasi 2, kadar lumpur yang ditargetkan pada agregat sesuai dengan syarat maksimum kadar lumpur pada agregat kasar, yaitu 1% dan agregat halus 5%. Kadar lumpur gabungannya = $(0,35 \times 5) + (0,65 \times 1) = 2,4\%$

Untuk variasi 3, kadar lumpur yang ditargetkan pada agregat adalah lebih besar 2 kali dari syarat kadar lumpur maksimum, yaitu untuk agregat kasar 2% dan agregat halus 10%. Kadar lumpur gabungannya = $(0,35 \times 10) + (0,65 \times 2) = 4,8\%$. Untuk rancang campurannya telah dihitung sebagai berikut

Tabel 1. Rancang Campuran Kebutuhan Bahan

| Kebutuhan bahan per m ³ | | | |
|------------------------------------|------|------|-------|
| w/b | 0.25 | | |
| Air | | 185 | Kg |
| Fly ash | | 740 | Kg |
| NaOH | 10 | | Molar |
| Berat NaOH | | 74 | Kg |
| NaSiO ₂ : NaOH | 2 | | |
| Berat NaSiO ₂ | | 148 | Kg |
| Berat agregat | | 1053 | Kg |
| agregat kasar | 65% | 684 | |
| agregat halus | 35% | 369 | |

Benda uji dicetak dengan bentuk sesuai dengan rencana pengujian. Kemudian diamkan dalam ruang tertutup dan terlindung sampai hari pengujian. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 7, 14, dan 28 hari, sedangkan pengujian kuat tarik belah, dan uji lentur, dilakukan pada umur 28 hari. Jumlah benda uji yang dibuat dapat dilihat pada Tabel 2.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian beton segar

Hasil pengujian pada beton segar geopolimer adalah :

Pengujian slump

Dari hasil pengujian slump pada berbagai kadar lumpur, nilai nya hampir sama yaitu berkisar antara 27 sampai 29 cm. Dengan nilai seperti ini, terlihat bahwa beton geopolimer sangat encer. Untuk pengecoran ke dalam cetakan harus ditunggu beberapa menit, supaya tidak terjadi pemisahan butiran (*segregasi*). Nilai slump tergantung dari bentuk konstruksi yang akan di cor. Makin tinggi nilai slump pada beton segar, beton semakin encer, tetapi semakin encer belum tentu semakin mudah dikerjakan. Jadi nilai slump yang baik adalah sesuai dengan syarat atau spesifikasi teknik. Nilai slump selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 3.

Pengujian beton keras

Dari hasil uji pada beton keras beton geopolimer di dapat hasil sebagai berikut :

Pengujian kuat tekan

Dari hasil pengujian kuat tekan umur 7, 14 dan 28 hari dapat dilihat pada Gambar 1. Dari gambar tersebut dapat dianalisis sebagai berikut. Kekuatan tekan beton geopolimer semakin meningkat sesuai dengan umur pengujian, tetapi semakin besar kadar lumpur pada beton geopolimer, kuat tekan pada umur pengujian cenderung menurun. Perbandingan antara kuat tekan beton dengan kadar lumpur 2.4 % dan 4.8 % pada umur 28 hari dibandingkan dengan kadar lumpur 0.94 %, penurunannya adalah 21.26 % dan 45.84 %. Jadi dari pengujian tersebut jelas kadar lumpur dalam agregat dapat menurunkan kekuatan beton. Walaupun kehalusan lumpur menyerupai fly ash sebagai bahan utama dalam pembuatan geopolimer, ternyata efeknya merugikan.

Pengujian kuat tarik belah

Pengujian dilakukan untuk mengetahui sifat beton geopolimer dalam menahan gaya tarik. Umumnya kekuatan tarik beton semen relative lebih rendah,

dibandingkan dengan kuat tekannya, besarnya sekitar ± 10 % dari kekuatan tekannya. Demikian pula pada beton geopolimer yang dicetak konvensional kekuatan tariknya juga rendah.

Dari hasil uji kekuatan tarik pada beton geopolimer dengan kadar lumpur berbeda hasilnya dapat dilihat pada Gambar 2

Dari grafik kuat tarik belah pada beton geopolimer dengan kadar lumpur berbeda, ternyata kekuatan tarik belahnya juga cenderung menurun, terlihat semakin besar kadar lumpur, semakin rendah kekuatan tariknya. Besaran kuat tarik belah pada beton geopolimer dengan kandungan lumpur 2.4 % dan 4.8 % jika dibandingkan dengan kuat tarik belah pada kadar lumpur 0.94 % masing-masing penurunan kuat tariknya adalah sebesar 19.47 % dan 25.18 %, dan dibandingkan dengan kuat tekannya berkisar antara 3 – 6%

Pengujian kuat tarik lentur

Kekuatan lentur dari beton mengidentifikasi sifat *ductilitas* dari bahan, artinya semakin besar kekuatan lentur, maka bahan tersebut semakin *ductile*. Dari hasil uji tarik lentur pada beton geopolimer pada berbagai kadar lumpur dapat dilihat pada Gambar 3.

Dari gambar tersebut dapat dianalisis sebagai berikut. Semakin besar kadar lumpur pada agregat, kekuatan lenturnya semakin rendah. Dengan kadar lumpur 2.4 % dan kadar lumpur 4.8%, terlihat kekuatan lenturnya dibandingkan dengan kadar lumpur 0.94 % cenderung menurun sebesar masing-masing 22.34 % dan 42.78 % .dan jika dibandingkan dengan kuat tekannya perbandingannya adalah antara 6% - 7 %.

Dari seluruh pengujian, ternyata efek kadar lumpur terhadap kekuatan beton geopolimer sangat merugikan, yaitu dapat menurunkan kekuatan. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dari hasil penelitian terhadap beton geopolimer pada berbagai kadar lumpur dapat disimpulkan sebagai berikut

- a. Nilai slump pada benda uji beton geopolimer, untuk berbagai kadar lumpur nilainya slump nya tidak jauh berbeda, berkisar antara 27 sampai dengan 29 sentimeter
- b. Kadar lumpur pada agregat dapat menurunkan kuat tekan, kuat tarik belah dan kuat tarik lentur pada umur 28 hari. Besarnya penurunan kuat tekan, kuat tarik belah dan kuat tarik lentur pada umur 14 hari berkisar antara 19 % sampai dengan 23 %, sedangkan pada umur 28 hari penurunan mencapai 25 % sampai dengan 46 %

Saran

Pemakaian agregat yang mengandung lumpur untuk beton geopolimer perlu diuji terlebih dahulu, karena dapat menurunkan kekuatan, baik kuat tekan, kuat tarik maupun kuat lentur

Karena penurunan kekuatan pada beton geopolimer sangat tinggi, maka usahakan agregat dalam keadaan bersih sebelum dicampurkan.

DAFTAR PUSTAKA

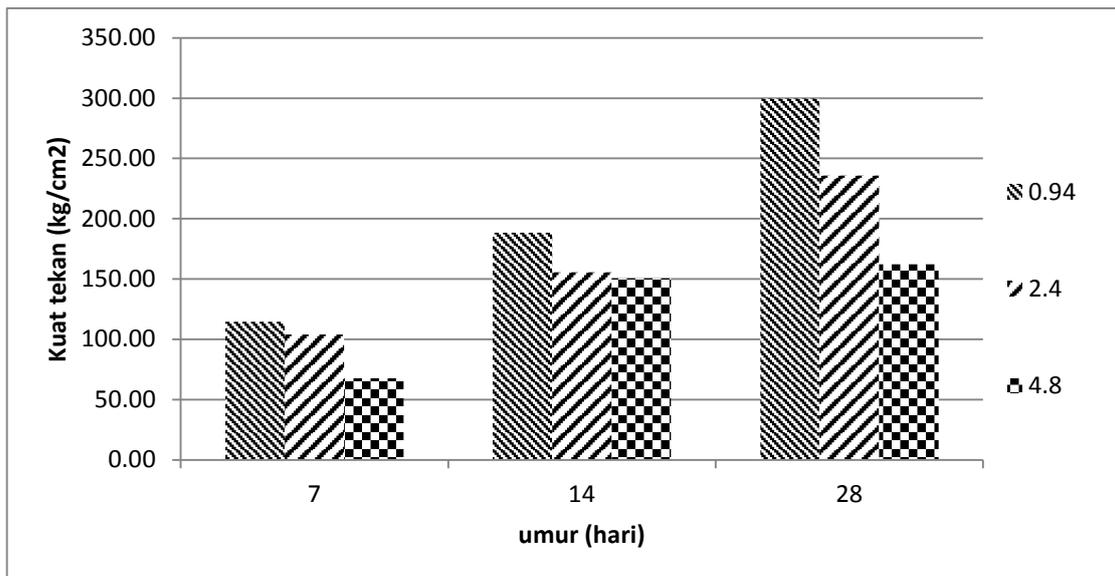
- [1] Achmad, D., Hidjan, AG 2011, Dampak Perawatan Terhadap Karakteristik Beton Geopolimer, *Laporan Penelitian*, Dana DIPA Program Penelitian (Skim Unggulan), Politeknik Negeri Jakarta, Depok.
- [2] Anonim, "Annual Book of ASTM Standards, 2002, Section4 Vol. 04.02 Concrete and Aggregates C – 33standart specication for concrete aggregates".West Conshohocken..
- [3] Davidovits, J ,1994 , "Properties of Geopolimer ", France, Geopolimer Institute
- [4] Davidovits, J ,1997 , "GeopolimerInorganic Polimer New Material ", France, Geopolimer Institute
- [5] Hardjito, D, Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J., & Rangan, B.V, 2004, "Fly Ash Based Geoplomer Concrete", Perth, Curtin University of Technologi
- [6] Hardjito, D, Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J., & Rangan, B.V, 2005, *Development and Properties of Low Calsium Fly Ash Based Geopolimer Concrete*, Perth, Curtin University of Technologi
- [7] Neville, Adam M,1988 " *Properties of Concrete* ", 3rd Edition, Longman Scientific and Technical, Singapore
- [8] *Peraturan Beton Bertulang Indonesia tahun, 1971*, Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan, Bandung,
- [9] Purwanto, Yulita Arni Priastiwi, 2012, *Pengaruh Kadar Lumpur Pada Agregat Halus dalam Mutu Beton*, Teknik – Vol. 33 No.2 Tahun 2012, ISSN 0852-1697
- [10] Wallah, S. E., dan Rangan B.V., 2006, *Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete:Long-Term Properties*. Research Report GC 2, Curtin University of Technology, Perth, Australia.

Tabel 2. Jumlah dan volume benda uji

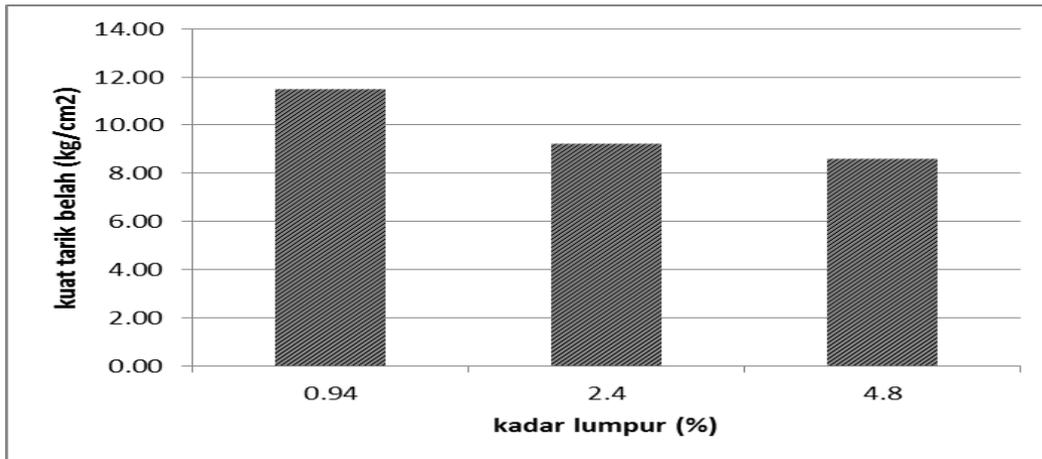
| Pengujian | Bentuk Sample | Jumlah | Dimensi | Volume (m ³) |
|------------------|---------------|--------|--------------------|--------------------------|
| Uji kuat tekan | Silinder | 27 | Ø150 x 300 mm | 0.1431 |
| Uji tarik belah | Silinder | 9 | Ø150 x 300 mm | 0.0477 |
| Uji tarik lentur | Balok | 9 | 100 x 100 x 500 mm | 0.0477 |
| TOTAL | | 45 | | 0.220755 |

Tabel 3. nilai slump pada beton geopolimer dengan kadar lumpur berbeda

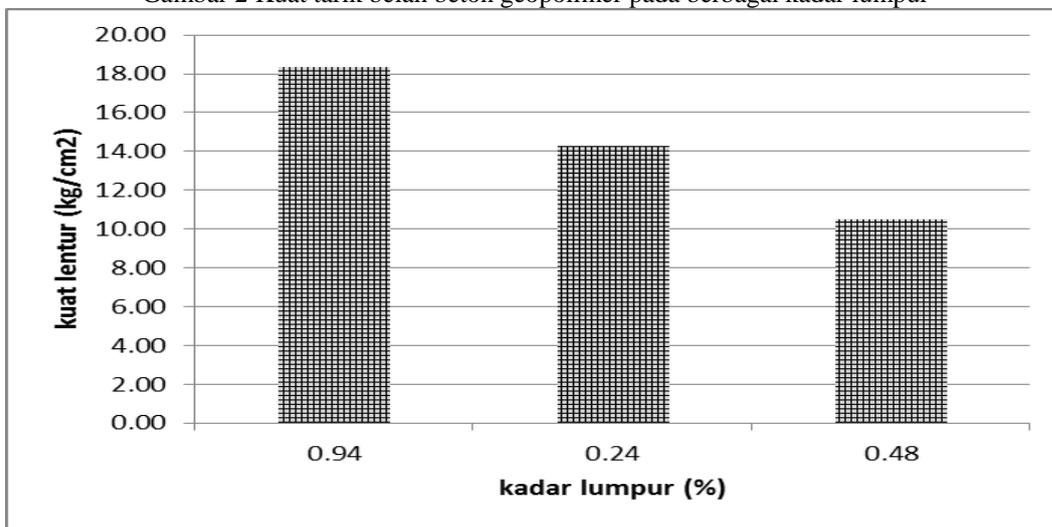
| Kadar Lumpur (%) | Nilai Uji Slump (cm) | |
|------------------|----------------------|-------|
| 0,94 | 1 | 28.4 |
| | 2 | 28 |
| | Rata-rata | 28.2 |
| 2,4 | 1 | 27.8 |
| | 2 | 28.2 |
| | Rata-rata | 28 |
| 4,8 | 1 | 28 |
| | 2 | 27.1 |
| | Rata-rata | 27.55 |



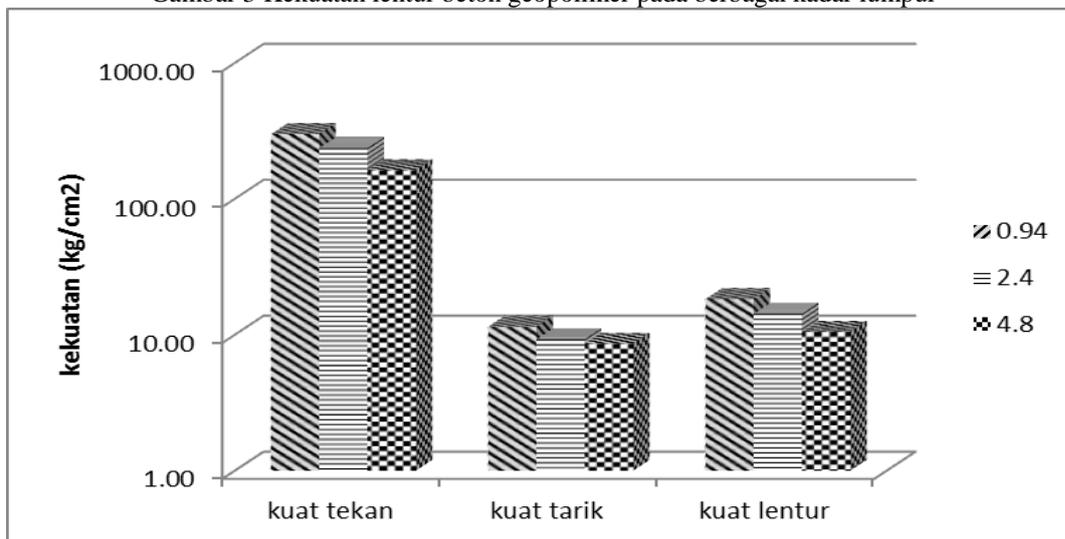
Gambar 1 Grafik kuat tekan beton geopolimer pada berbagai umur dan berbagai kadar lumpur



Gambar 2 Kuat tarik belah beton geopolimer pada berbagai kadar lumpur



Gambar 3 Kekuatan lentur beton geopolimer pada berbagai kadar lumpur



Gambar 4 Kekuatan beton geopolimer pada berbagai kadar lumpur