

KUAT TEKAN DAN KUAT LENTUR BETON GEOPOLIMER ABU TERBANG *HYBRID* DENGAN PECAMPURAN *PORTLAND COMPOSITE CEMENT*

Rizky Noviandri¹⁾, Monita Olivia²⁾, Iskandar Romey Sitompul³⁾

¹⁾Mahasiswa Jurusan teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

²⁾Dosen Jurusan Teknik Sipil, fakultas Teknik, Universitas Riau

Kampus Bina Widya Jl. HR Soebrantas KM 12,5 Pekanbaru, Kode 28293

Email : rizky.noviandri@student.unri.ac.id

ABSTRACT

The use of Portland Composite Cement (PCC) as a substitute material in fly ash geopolymer hybrid concrete will accelerate the geopolymer reaction since the geopolymer becomes more reactive. In this study, the fly ash geopolymer hybrid concrete used 12 M NaOH concentration, modulus of silicate (Ms) 2.5 and 15% PCC cement, and extra water 80 kg/m³. Geopolymer hybrid concrete treatment were carried out at room temperature. Tests carried out were compressive strength and flexural strength at 7 and 28 days. The results showed the compressive strength of geopolymer hybrid concrete against PCC concrete had a decreasing percentage of difference from 34,54% (6,68 MPa) at 7 days to 20,01% (4,49 MPa) at 28 days. Then, the percentage of flexural strength difference decreased from 31.09% (1.25 MPa) at seven days to 28.55% (1.39 MPa) at 28 days. It was concluded that fly ash did not significantly affect the split tensile strength of geopolymer hybrid concrete 28 at days. The results showed that the compressive strength and flexural strength of the geopolymer hybrid concrete were lower than these of PCC concrete.

Keywords : Mechanical properties, hybrid geopolymer concrete, PCC, room temperature.

A. PENDAHULUAN

Produksi semen Portland pada saat ini memiliki dampak yang cukup besar pada pencemaran lingkungan di Indonesia. Berdasarkan data tahun 1995, jumlah produksi semen Portland di dunia tercatat 1,6 miliar ton. Hal ini berarti produksi semen Portland telah melepaskan sebanyak 1,6 miliar gas karbon dioksida (CO₂) ke alam bebas (Kasyanto, 2012). Penggantian material pengikat semen Portland pada pembuatan beton dengan material lain dapat menjadi salah satu solusi dalam mengurangi tingkat pencemaran yang disebabkan oleh produksi semen Portland.

Beton geopolimer merupakan konstruksi yang relatif baru dikembangkan, yaitu beton yang dibuat tanpa menggunakan semen sebagai bahan pengikatnya (Tambingon et al., 2018). Beton geopolimer memiliki durabilitas

terhadap suhu tinggi dan asam, serta memiliki kuat tekan awal yang setara dengan beton semen Portland.

Salah satu material yang dapat dijadikan pengganti semen Portland pada campuran beton adalah abu terbang (*fly ash*). Abu terbang merupakan limbah hasil pembakaran batu bara sehingga dengan menggunakan abu terbang (*fly ash*) sebagai pengganti semen Portland pada komposisi campuran beton, dapat mengurangi jumlah produksi semen Portland.

Abu terbang sendiri sebenarnya tidak memiliki kemampuan mengikat material yang cukup baik untuk digunakan sebagai bahan pengganti semen sehingga diperlukan bahan tambahan berupa larutan alkali aktivator agar proses pengikatan berjalan dengan baik. Perawatan pada suhu ruangan yang tinggi juga dapat mempercepat proses pengikatan beton

geopolimer, tetapi jika hanya dilakukan perawatan pada suhu normal ruangan maka penambahan semen pada beton geopolimer juga dapat dilakukan sebagai upaya mempercepat proses pengikatan pada perawatan di suhu normal ruangan.

Penambahan semen PCC dapat meningkatkan segi durabilitas dari beton geopolimer *hybrid*. Lalu, semen PCC pada umur lanjut akan menunjukkan karakteristik kekuatan yang kurang lebih sama dengan penambahan semen OPC, karena kondisi *curing* yang secara terus-menerus dan reaksi geopolimer yang terjadi (Uddin et al., 2013).

B. TINJAUAN PUSTAKA

B.1 Beton

Menurut Karwur et al. (2013) beton didefinisikan sebagai campuran dari agregat halus dan agregat kasar dengan semen, yang dipersatukan oleh air dalam perbandingan tertentu. Sifat mekanik yang dimiliki beton adalah kuat tekan, kuat tarik belah dan kuat lentur. Sifat kuat tarik belah yang dimiliki beton pada umumnya relatif lebih rendah dari pada kuat tekannya, persentase perbandingannya kuat tarik belah beton berkisar antara 10% - 15% dari kuat tekannya (Paat et al., 2014).

B.2 Beton Geopolimer

Awalnya penemuan geopolimer digunakan untuk material bangunan anti kebakaran, kemudian material ini dikembangkan menjadi alternatif pengganti semen yang berasal dari aktivasi zat silika dan alumina dari limbah industri seperti abu terbang, abu sawit, dan abu sekam.

Pada umumnya material yang digunakan dalam pembuatan beton geopolimer merupakan material yang ramah terhadap lingkungan, yaitu material-material buangan industri. Beton geopolimer yang menggunakan material ramah lingkungan sebagai bahan dasarnya dapat mengurangi efek gas rumah kaca yang diakibatkan oleh gas karbon dioksida hasil dari produksi semen Portland.

B.3 Beton Geopolimer Hybrid

Beton geopolimer *hybrid* memiliki proporsi semen Portland yang rendah, yaitu kecil dari 30% dari total berat abu terbang dan proporsi yang tinggi dari bahan aluminosilikat seperti abu terbang. Penggunaan bahan limbah industri yang kaya aluminosilikat seperti abu terbang yang dilarutkan dengan larutan alkali kemudian terlarut dengan reaksi yang singkat lalu mengeras dan menghasilkan bahan dengan sifat semen yang baik (Palomo et al., 2013).

Berdasarkan penelitian Bocullo et al. (2017) menunjukkan penambahan semen Portland tersebut pada campuran beton geopolimer *hybrid* menunjukkan perkembangan sifat mekanik yang baik pada umur awal. Maka dari itu, beton geopolimer *hybrid* memerlukan penambahan semen Portland untuk meningkatkan kekuatan beton geopolimer *hybrid* pada umur awal.

B.4 Material Campuran Beton Geopolimer Abu Terbang Hybrid

B.4.1 Agregat

Agregat sebagai bahan isi pada beton memiliki komposisi yang besar antara 70% -75 % sehingga sifat-sifat agregat dapat berpengaruh pada perilaku beton yang sudah mengeras. Sifat agregat tidak hanya akan mempengaruhi sifat betonnya saja tetapi juga mempengaruhi daya tahan (*durable*) terhadap penurunan mutu beton. Maka dari itu, pemilihan agregat yang baik dapat mempermudah pengerjaan (*work ability*), daya tahan (*durable*) yang lama, dan ekonomis (Syaka, 2013).

B.4.2 Semen Portland

Semen Portland menjadi bahan utama bersama dengan air yang berfungsi mengikat dan menyatukan agregat. Semen Portland komposit merupakan bahan hasil penggilingan terak semen Portland dan *gips* dengan satu atau lebih bahan anorganik, bahan anorganik tersebut berupa terak tanur tinggi, pozzolan, batu kapur dengan kadar total bahan anorganik

6% - 35% dari massa semen Portland komposit (SNI 7064-2014). Semen PCC yang digunakan pada penelitian ini sebanyak 15% dari total berat abu terbang.

B.4.3 Air

Air sangat berpengaruh dalam proses pembuatan beton karena air dapat bereaksi dengan semen menjadi sebuah pasta pengikat agregat. Jumlah air yang digunakan pada campuran beton berpengaruh pada kekuatan beton. Jika, kelebihan air maka akan menurunkan kekuatan beton dan menyebabkan terjadinya pendarahan (*bleeding*), yaitu air bersamaan dengan semen naik ke atas permukaan sehingga mengurangi lekatan antar lapisan beton dan membuat beton menjadi lemah (Saifuddin dan Edison, 2001). Penggunaan air (*extra water*) pada beton geopolimer *hybrid* adalah sebanyak 80 kg/m^3 .

B.4.4 Abu Terbang (*Fly Ash*)

Abu terbang merupakan abu yang berasal dari sisa hasil pembakaran batu bara pada suhu tinggi (1400°C - 1700°C) pada pembangkit listrik seperti Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) (Mejia et al., 2015). Abu terbang termasuk bahan limbah industri yang kaya aluminosilikat dan mengandung sedikit kalsium, jika dilarutkan dengan media alkali maka akan terlarut dengan aktivasi yang singkat lalu mengeras serta menghasilkan bahan dengan sifat semen yang baik (Palomo et al., 2013). Lalu, abu terbang yang digunakan pada penelitian ini adalah kelas F.

B.4.5 Larutan Alkali Aktivator

Aktivator merupakan zat atau unsur yang menyebabkan zat atau unsur lain bereaksi. Larutan alkali aktivator yang digunakan pada penelitian ini adalah sodium silikat (NaOH) konsentrasi 12 M dan sodium silikat (Na_2SiO_3) dengan modulus silikat 2,5 Ms. Pemilihan larutan alkali aktivator karena kedua aktivator tersebut dapat menambah ion Na^+ pada

proses polimerisasi dan aktivator ini juga mudah didapatkan. Natrium hidroksida sebagai alkali aktivator berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur Al dan Si yang terkandung dalam abu terbang dan kapur sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat, sedangkan sodium silikat berfungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi (Tambingon et al., 2018).

B.4.6 Bahan Tambahan

Tambingon et al. (2018) menyatakan bahwa bahan tambahan (*superplasticizer*) adalah bahan kimia yang digunakan untuk meningkatkan *workability* pada saat pelaksanaan pengecoran dengan menggunakan air sedikit mungkin sehingga pekerjaan menjadi lebih mudah. Bahan tambah ini berfungsi untuk mengurangi jumlah air pencampur pada beton sekaligus meningkatkan nilai *slump*. Dosis yang berlebihan akan mengakibatkan menurunnya kekutan beton (Paat et al., 2014)

B.5 Pengujian Beton Geopolimer Abu Terbang *Hybrid*

B.5.1 Kuat Tekan

Berdasarkan SNI 1974-2011, kuat tekan benda uji dihitung dengan membagi beban maksimum yang diterima selama pengujian dengan luas penampang benda uji. Kuat tekan beton f'_c dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut.

$$f'_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Dengan :

f'_c = kuat tekan beton (MPa)

P = beban maksimum (kN)

A = luas penampang yang dibebani (mm^2)

B.5.2 Kuat Lentur

Kuat lentur beton adalah nilai tegangan tarik yang dibagi dengan momen penahan benda uji. Berdasarkan SNI 4431-2011, cara uji kuat lentur dengan dua titik pembebanan yang perhitungannya dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

1. Pengujian bidang patah terletak di daerah 1/3 dari titik perletakan bagian tengah.

$$f_r = \frac{P \cdot L}{b \cdot h^2} \quad (2)$$

Dengan:

f_r = kuat lentur benda uji (MPa)

P = beban tertinggi yang terbaca pada mesin uji (kN)

L = jarak antara dua gadis mesin uji (mm)

b = jarak lebar tampang arah horizontal (mm)

h = jarak lebar tampang arah vertikal (mm)

2. Pengujian bidang patah terletak di luar daerah 1/3 dari titik perletakan bagian tengah dan jarak antara titik pusat dan titik patah kurang dari 5 %.

$$f_r = \frac{3P \cdot a}{b \cdot h^2} \quad (3)$$

Dengan:

f_r = kuat lentur benda uji (MPa)

P = beban tertinggi yang terbaca pada mesin uji (kN)

L = jarak antara dua gadis mesin uji (mm)

b = jarak lebar tampang arah horizontal (mm)

h = jarak lebar tampang arah vertikal (mm)

3. Pengujian yang patahnya di luar daerah 1/3 jarak titik perletakan bagian tengah dan jarak antara titik pembebanan dan titik patahnya lebih dari 5% bentang maka hasil pengujian tidak digunakan.

C. METODOLOGI PENELITIAN

C.1 Pemeriksaan Material Beton

Agregat yang digunakan terdiri dari agregat kasar dan halus. Agregat yang digunakan berasal dari *quarry* Kabupaten Kampar, Riau. Agregat kasar yang berupa batu pecah disaring menggunakan saringan No. 4 (4,75 mm) yang kemudian diambil agregat yang tertahan saringan tersebut,

sedangkan agregat halus disaring menggunakan saringan No.4 (4,75 mm) dan diambil yang lolos saringan tersebut.

Setelah itu dilakukan pemeriksaan agregat kasar dan halus yang meliputi pemeriksaan analisa saringan, berat jenis, berat volume, kadar air, kadar organik, kadar lumpur, dan keausan agregat.

C.2 Perencanaan Benda Uji

Pada penelitian ini akan dibuat 24 benda uji beton geopolimer *hybrid* dan beton PCC dengan 12 benda uji berbentuk silinder dengan diameter 105 mm dan tinggi 210 mm untuk pengujian kuat tekan dan 12 benda uji berbentuk balok dengan panjang 150 mm, lebar 600 mm dan tinggi 150 mm untuk pengujian kuat lentur beton. Pada Tabel 1, berikut dapat dilihat jumlah benda uji yang akan dibuat pada penelitian ini.

Tabel 1. Jumlah Keseluruhan Benda Uji

| Tipe Campuran | Kuat Tekan | | Kuat Lentur | |
|--------------------------|-------------|----|-------------|----|
| | Umur (hari) | | | |
| | 7 | 28 | 7 | 28 |
| Beton | | | | |
| Geopolimer <i>Hybrid</i> | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Beton PCC | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Jumlah | 12 | | 12 | |
| Total | 24 | | | |

Kemudian, hasil pengujian karakteristik material dan *trial mix* yang dilakukan digunakan untuk memperoleh komposisi yang sesuai untuk digunakan dalam penelitian ini. Dapat dilihat pada Tabel 2, rancangan campuran beton PCC dan beton geopolimer *hybrid* untuk 1 m³.

Tabel 2. Rancangan Campuran Beton PCC dan Beton Geopolimer *Hybrid* dalam rasio

| Jenis Beton | Semen | Ag. Halus | Ag. Kasar | Air | <i>Fly Ash</i> |
|--------------------------|-------|-----------|-----------|------|----------------|
| Beton PCC | 1 | 1,61 | 2,13 | 0,48 | - |
| Geopolimer <i>Hybrid</i> | 0,19 | 1,33 | 2,48 | 0,19 | 1,09 |

C.3 Proses Pembuatan Benda Uji

Semua material penyusun ditimbang, lalu dilanjutkan dengan proses pengadukan beton dengan memasukkan material ke dalam *concrete mixer machine*. Tahapan urutan memasukkan material didahului dengan agregat kasar, lalu agregat halus, kemudian abu terbang dan larutan alkali. Larutan alkali dimasukkan secara bertahap selama 5 menit. Kemudian, 5 menit masukkan semen PCC ke dalam *concrete mixer machine*. Setelah semua tercampur secara merata maka dilakukan uji *slump* untuk mengetahui *workability* dari campuran beton. Lalu dilakukan proses pencetakan dengan memasukkan beton pada cetakan silinder dan balok yang telah diolesi minyak. Setelah cetakan terisi penuh, segera ratakan permukaan beton dengan menggunakan sendok semen. Lalu, diamkan selama 1 hari untuk beton PCC dan 3 hari untuk beton geopolimer *hybrid*. Setelah waktu *rest period* selesai maka beton sudah dapat dikeluarkan dari cetakan. Setelah itu benda uji direndam pada bak perendaman untuk beton PCC dan diletakkan pada ruangan dengan suhu sekitar 25°C untuk beton geopolimer *hybrid*.

C.4 Perawatan Benda Uji

Perawatan benda uji beton geopolimer *hybrid* dilakukan dengan meletakkan benda uji yang telah dibuat di ruangan yang bersuhu 25°C selama 28 hari dari pembukaan cetakan beton, sedangkan pada beton PCC dilakukan perendaman pada bak perendaman di Laboratorium Teknologi Bahan Fakultas Teknik Universitas Riau selama 28 hari dari pembukaan cetakan beton.

C.5 Pengujian Benda Uji

C.5.1 Pengujian Kuat Tekan

Sampel benda uji berupa silinder berukuran 105 mm x 210 mm. Tahapan pengujiannya adalah pertama ukur dimensi benda uji dan timbang benda uji. Lalu, kaping permukaan benda uji yang tidak

rata dengan menggunakan belerang. Setelah benda uji siap dikaping maka letakkan benda uji silinder tersebut ke mesin uji tekan. Atur posisi benda uji agar berada di tengah-tengah pembebanan. Lalu, letakkan plat tambahan jika bagian atas benda uji masih jauh dari plat pembebanan mesin uji tekan. Setelah plat diletakkan maka benda uji sudah bisa diuji dengan mesin uji tekan. Catat beban maksimum yang terjadi selama pengujian kuat tekan beton hingga terjadi kerusakan pada beton.

C.5.2 Pengujian Kuat Lentur

Sampel benda uji berupa balok berukuran 150 mm x 150 mm x 600 mm. Tahapan pengujiannya adalah pertama ukur dimensi penampang benda uji dan timbang benda uji. Setelah itu, letakkan bantalan perata pembebanan pada mesin uji lentur. Buat garis melintang sebagai tanda dan petunjuk titik-titik perletakan, titik-titik pembebanan dan titik sejauh 5% dari jarak bentang di luar titik perletakan. Kemudian, pasang dua buah perletakan dengan lebar bentang 3 kali jarak titik-titik pembebanan. Tempatkan benda uji yang sudah diberi tanda di atas perletakan dan atur pembebanannya. Lalu, benda uji sudah bisa diuji dengan mesin uji kuat lentur. Kemudian, catat beban maksimum yang terjadi selama pengujian kuat lentur beton hingga terjadi kerusakan pada beton.

D. HASIL DAN PEMBAHASAN

D.1 Hasil Pengujian Karakteristik Material

Pengujian dilakukan pada material agregat kasar dan agregat halus tersebut dilakukan di Laboratorium Teknologi Bahan, Fakultas Teknik, Universitas Riau. Serta, pengujian karakteristik abu terbang dianalisis di PT. Sucofindo Cabang Pekanbaru untuk mengetahui kandungan unsur kimia yang terdapat pada abu terbang yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 3. Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Kasar

| No. | Jenis Pengujian | Hasil | Spesifikasi |
|-----|--|-------|-------------|
| 1 | Kadar Air (%) | 1,80 | 2-5 |
| 2 | Berat Jenis | | |
| | a. <i>Bulk Specific Gravity on SSD</i> | 2,58 | 2,58 – 2,83 |
| | b. <i>Absorption</i> (%) | 2,30 | < 2 |
| 3 | Berat Volume (gr/cm ³) | | |
| | a. Kondisi Gembur | 1,30 | 1,4 – 1,9 |
| | b. Kondisi Padat | 1,42 | 1,4 – 1,9 |
| 4 | Modulus Kehalusan | 7,65 | 5 – 8 |
| 5 | Ketahanan Aus (%) | 40,70 | < 40 |

Hasil pengujian karakteristik dari agregat kasar yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3. di atas. Terdapat beberapa jenis pengujian yang tidak memenuhi standar spesifikasi, yaitu pengujian kadar air, *absorption*, berat volume kondisi gembur, dan ketahanan aus. Jadi, secara keseluruhan agregat kasar yang digunakan pada penelitian ini telah memenuhi standar spesifikasi. Maka dari itu, penggunaan agregat kasar tetap digunakan sebagai bahan campuran beton pada penelitian ini.

Tabel 4. Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Halus

| No. | Jenis Pengujian | Hasil | Spesifikasi |
|-----|--|-------|-------------|
| 1 | Kadar Air (%) | 2,20 | 2 – 5 |
| 2 | Berat Jenis | | |
| | a. <i>Bulk Specific Gravity on SSD</i> | 2,65 | 2,58 – 2,83 |
| | b. <i>Absorption</i> (%) | 0,20 | < 2 |
| 3 | Berat Volume (gr/cm ³) | | |
| | a. Kondisi Gembur | 1,63 | 1,4 – 1,9 |
| | b. Kondisi Padat | 1,72 | 1,4 – 1,9 |
| 4 | Modulus Kehalusan | 2,94 | 1,5 – 3,8 |
| 5 | Kandungan Organik | No. 3 | < No.3 |
| 6 | Kadar Lumpur (%) | 0,85 | < 5 |

Hasil pengujian karakteristik dari agregat halus yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4. di atas. Secara keseluruhan agregat halus yang digunakan pada penelitian ini telah memenuhi standar spesifikasi. Maka dari itu, penggunaan agregat halus tetap digunakan pada penelitian ini.

Tabel 5. Hasil Uji Analisa Abu Terbang

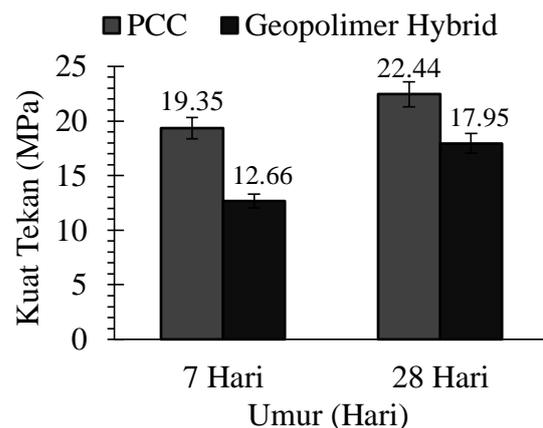
| No. | Parameter Uji | Hasil Analisa | Metode Uji |
|-----|--------------------------------|---------------|--------------|
| 1 | K ₂ O | 2,23 % | ASTM 6349-13 |
| 2 | SiO ₂ | 59,25 % | ASTM 6349-13 |
| 3 | Al ₂ O ₃ | 29,25 % | ASTM 6349-13 |
| 4 | Fe ₂ O ₃ | 5,45 % | ASTM 6349-13 |
| 5 | CaO | 1,54 % | ASTM 6349-13 |
| 6 | MgO | 0,31 % | ASTM 6349-13 |
| 7 | Na ₂ O | 0,68 % | ASTM 6349-13 |
| 8 | SO ₃ | 0,29 % | ASTM 5016-06 |
| 9 | P ₂ O ₅ | 0,04 % | ASTM 6349-13 |
| 10 | TiO ₂ | 0,83 % | ASTM 6349-13 |
| 11 | MnO ₂ | 0,01 % | ASTM 7348-13 |

Sumber : (PT. Sucofindo Cabang Pekanbaru)

Berdasarkan data PT. Sucofindo Cabang Pekanbaru pada Tabel 5 di atas, dari hasil persentase yang didapatkan pada Tabel 5. di atas dapat diketahui kelas abu terbang yang digunakan pada penelitian ini, yaitu abu terbang kelas F. yaitu kandungan minimum senyawa SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ lebih dari 70% yaitu 93,95% dan kandungan senyawa CaO kurang dari 10% yaitu 1,54%.

D.2 Hasil Pengujian Kuat Tekan

Hasil pengujian kuat tekan beton geopolimer hybrid dan beton PCC pada umur 7 dan 28 hari dapat dilihat pada Gambar 1. berikut:



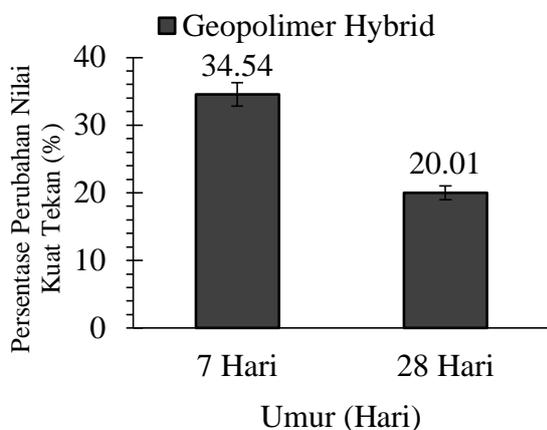
Gambar 1. Hasil Pegujian Kuat Tekan Beton

Nilai kuat tekan beton yang didapatkan pada beton PCC meningkat 3,09 MPa dari 19,35 MPa pada umur 7 hari menjadi 22,44 MPa pada umur 28

hari. Pada beton geopolimer *hybrid* juga terjadi peningkatan kuat tekan sebesar 5,29 MPa dari 12,66 MPa pada umur 7 hari menjadi 17,95 MPa pada umur 28 hari. Meskipun beton geopolimer *hybrid* memiliki nilai kuat tekan yang lebih rendah dari pada beton PCC, beton geopolimer *hybrid* memiliki peningkatan kuat tekan yang lebih tinggi dibanding beton PCC, yaitu 2,2 MPa lebih tinggi dibanding beton PCC.

Lambatnya proses pengikatan pada abu terbang menjadi salah satu faktor penyebab lebih tingginya nilai kuat tekan beton PCC dari pada beton geopolimer *hybrid* dan beton geopolimer *hybrid* baru akan mencapai kuat tekan optimum pada umur sekitar 91 hari (Yunus, 2010). Menurut Tjokrodimulyo (1996) hal tersebut terjadi karena kalsium aluminosilikat hidrat (CASH) yang dihasilkan dari reaksi geopolimerisasi abu terbang akan bertambah padat dan kuat seiring berjalannya waktu.

Pada Gambar 2. menunjukkan persentase selisih nilai kuat tekan beton geopolimer *hybrid* terhadap beton PCC pada umur 7 hari dan 28 hari. Selisih kuat tekan beton geopolimer *hybrid* terhadap beton PCC pada umur 7 hari adalah 34,54% (6,68 MPa). Selisih kuat tekan beton geopolimer *hybrid* terhadap beton PCC pada umur 28 hari adalah 20,01% (4,49 MPa).

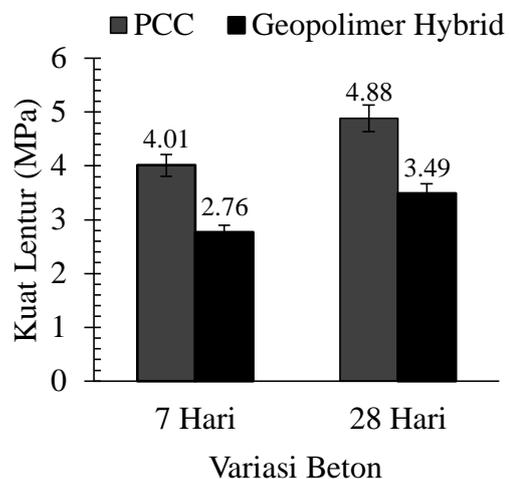


Gambar 2. Persentase Selisih Nilai Kuat Tekan Beton Geopolimer *Hybrid* Terhadap Nilai Kuat Tekan Beton PCC

Persentase selisih nilai kuat tekan yang semakin mengecil pada umur 28 hari, menunjukkan abu terbang pada beton geopolimer *hybrid* mengalami reaksi geopolimerisasi yang lambat pada umur awal 7 hari sehingga menyebabkan proses pembentukan kalsium aluminosilikat hidrat (CASH) sebagai perekat antar pasta dan agregat menjadi terhambat.

D.3 Hasil Pengujian Kuat Lentur

Hasil pengujian kuat lentur beton geopolimer *hybrid* dan beton PCC pada umur 7 dan 28 hari dapat dilihat pada Gambar 3. berikut:

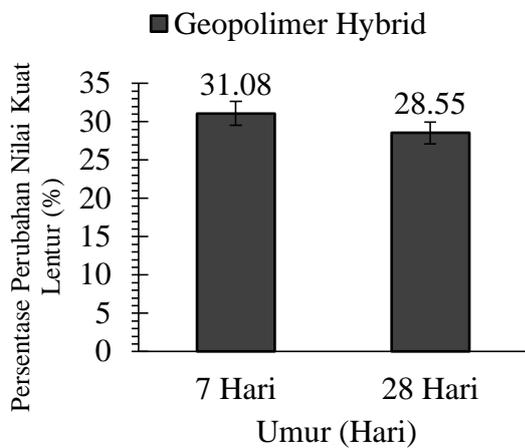


Gambar 3. Hasil Pegujian Kuat Lentur Beton

Nilai kuat lentur beton yang didapatkan pada beton PCC meningkat 0,87 MPa dari 4,01 MPa pada umur 7 hari menjadi 4,88 MPa pada umur 28 hari. Pada beton geopolimer *hybrid* juga terjadi peningkatan kuat tekan sebesar 0,73 MPa dari 2,76 MPa pada umur 7 hari menjadi 3,49 MPa pada umur 28 hari. Nilai kuat lentur beton geopolimer *hybrid* pada umur 7 hari dan 28 hari masih lebih rendah dari pada nilai kuat lentur beton PCC yang tidak menggunakan abu terbang sebagai bahan campuran beton.

Menurut Suryawan (2009) *flexural strength (modulus of rupture)* minimum di Indonesia ditetapkan sebesar 45 kg/cm² (4,5 MPa) dan kuat lentur beton

geopolimer *hybrid* pada umur 28 hari tidak memenuhi persyaratan kuat lentur minimum yang sebesar 4,5 MPa.



Gambar 4. Persentase Selisih Nilai Kuat Lentur Beton Geopolimer *Hybrid* Terhadap Nilai Kuat Lentur Beton PCC

Pada Gambar 4. menunjukkan persentase selisih nilai kuat lentur beton geopolimer *hybrid* terhadap beton PCC pada umur 7 hari dan 28 hari. Selisih kuat lentur beton geopolimer *hybrid* terhadap beton PCC pada umur 7 hari adalah 31,08% (1,25 MPa). Selisih kuat tekan beton geopolimer *hybrid* terhadap beton PCC pada umur 28 hari adalah 28,55% (1,39 MPa).

Persentase selisih kuat lentur beton geopolimer *hybrid* terhadap beton PCC yang semakin menurun menunjukkan reaksi geopolimerisasi dari abu terbang masih terus bereaksi hingga umur 28 hari dan abu terbang menjadi lebih reaktif akibat adanya semen PCC yang digunakan dalam beton geopolimer *hybrid*.

E. KESIMPULAN DAN SARAN

E.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian sifat mekanik beton geopolimer *hybrid*, yaitu pengujian kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur dengan penggunaan 15% semen PCC sebagai pengganti abu terbang, serta penggunaan NaOH molaritas 12 M dan modulus silikat (Ms) 2,5. Didapat kesimpulan bahwa :

1. Hasil pengujian kuat tekan beton geopolimer *hybrid* dan beton PCC mengalami peningkatan seiring bertambahnya umur beton. Persentase selisih nilai kuat tekan beton geopolimer *hybrid* terhadap beton PCC semakin menurun pada umur 28 hari, yaitu dari 34,54% (6,68 Mpa) pada umur 7 hari menjadi 20,01% (4,49 Mpa) pada umur 28 hari. Hal ini disebabkan lambatnya reaksi geopolimerisasi abu terbang pada umur awal 7 hari.
2. Hasil pengujian kuat lentur beton geopolimer *hybrid* dan beton PCC mengalami peningkatan seiring bertambahnya umur beton. Jika kuat lentur beton geopolimer *hybrid* dibandingkan dengan beton PCC maka memiliki perbedaan nilai kuat lentur yang tidak terlalu besar, dengan selisih 31,08% (1,25 Mpa) pada umur 7 hari dan 28,55% (1,39 Mpa) pada umur 28 hari. Persentase selisih yang menurun tersebut menunjukkan reaksi geopolimerisasi dari abu terbang masih terus bereaksi hingga umur 28 hari dan semen PCC membuat abu terbang menjadi semakin reaktif.

E.2 Saran

Berdasarkan pengalaman agar penelitian-penelitian selanjutnya dapat lebih baik. Adapun beberapa saran untuk penelitian lanjutan, yaitu :

1. Sebaiknya pembuatan benda uji dilakukan dalam jangka waktu yang tidak terlalu berjauhan agar perlakuan tiap benda uji tidak jauh berbeda.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mencari variasi optimum pada kuat lentur dan kuat tarik belah pada beton geopolimer *hybrid*.

F. DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. (1990). *SNI 03-1968-1990 Metode Pengujian Tentang Analisis Saringan Agregat Halus dan Kasar*. Bandung: Badan Standardisasi Nasional.

- Badan Standardisasi Nasional. (2002). *SNI 03-2847-2002 Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*. Bandung: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008). *SNI 2417-2008 Cara Uji Keausan Agregat dengan Mesin Abrasi Los Angeles*. Bandung: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). *SNI 1974-2011 Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder*. Bandung: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). *SNI 4431-2011 Cara Uji Kuat Lentur Beton Normal dengan Dua Titik Pembebanan*. Bandung: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2014). *SNI 2460-2014 Spesifikasi Abu Terbang Batubara dan Pozolan Alam Mentah atau yang Telah Dikalsinasi untuk Digunakan dalam Beton*. Bandung: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2014). *SNI 7064-2014 Semen Portland Komposit*. Bandung: Badan Standardisasi Nasional.
- Bocullo, V., Vaičiukynienė, D., Borg, R. P., & Briguglio, C. (2017). *Alkaline Activation of Hybrid Cements Binders Based on Industrial by-Products*.
- Karwur, H. Y., Tenda, R., Wallah, S. E., & Windah, R. S. (2013). Kuat Tekan Beton dengan Bahan Tambah Serbuk Kaca sebagai Substitusi Parsial Semen.
- Kasyanto, H. (2012). Tinjauan Kuat Tekan Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash dengan Aktivator Sodium Hidroksida dan Sodium Silikat. *Industrial Research Workshop and National Seminar*.
- Mejía, J. M., Rodríguez, E., Mejía De Gutiérrez, R., & Gallego, N. (2015). *Preparation and Characterization of A Hybrid Alkaline Binder Based on A Fly Ash With No Commercial Value*. *Journal of Cleaner Production*.
- Paat, F. E. S., Wallah, S. E., & Windah, R. S. (2014). Kuat Tarik Lentur Beton Geopolymer berbasis Abu Terbang (Fly Ash). *Jurnal Sipil Statik*.
- Palomo, Á., Maltseva, O., García-lodeiro, I., & Fernández-jiménez, A. (2013). *Cimenturi Hibride Alcaline . Partea a II-a : Factorul Clincher Hybrid Alkaline Cements . Part I: Fundamentals*. *Romanian Journal of Materials*.
- Saifuddin, M. I., & Edison, B. (2001). Pengaruh Penambahan Campuran Serbuk Kayu Terdahap Kuat Tekan Beton.
- Suryawan, A. (2009). Perkerasan Jalan Beton Semen Portland.
- Syaka, D. R. W. (2013). Pembuatan Beton Normal dengan Fly Ash menggunakan Mix Desain yang Dimodifikasi.
- Tambingon, F. R., Sumajouw, M. D. J., & Wallah, S. E. (2018). Kuat Tekan Beton Geopolymer dengan Perawatan Temperatur Ruangan. *Jurnal Sipil Statik*.
- Tjokrodimulyo, K., (1996). *Teknologi Beton*. Nafiri. Yogyakarta.
- Uddin, M. A., Jameel, M., Sobuz, H. R., Islam, M. S., & Hasan, N. M. S. (2013). *Experimental Study on Strength Gaining Characteristics of Concrete Using Portland Composite Cement*. *KSCE Journal of Civil Engineering*.
- Yunus, A. (2010). Kuat Tekan dan Kuat Lentur Beton dengan Bahan Tambah Fly Ash sebagai Bahan Perkerasan Kaku (Rigid Pavement).