

TESIS

MODEL PERSAMAAN KUAT TARIK BELAH DAN KUAT TEKAN BETON GEOPOLIMER DENGAN VARIASI SUHU PERAWATAN

Tesis ini Disusun Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh
Gelar
Magister Teknik Sipil dari Universitas Tama Jagakarsa



Oleh :

MUHAMMAD NAFHAN ISFAHANI

1951 060 027

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL
UNIVERSITAS TAMA JAGAKARSA
2021**

HALAMAN PENGESAHAN
TESIS

**MODEL PERSAMAAN KUAT TARIK BELAH DAN KUAT TEKAN
BETON GEOPOLIMER DENGAN VARIASI SUHU PERAWATAN**

MUHAMMAD NAFHAN ISFAHANI

1951 060 027

Telah diperbaiki berdasarkan masukan,
koreksi Tim Penguji dan memenuhi syarat akademik

Disyahkan

Ketua Program Studi Megister Teknik



(Dr. Pio Ranap Nahibaho, ST, MT)

Pembimbing



(Dr. Ir. Jonbi, MT, MM, Msi)

LEMBAR PERSETUJUAN

TESIS

MODEL PERSAMAAN KUAT TARIK BELAH DAN KUAT TEKAN BETON GEOPOLIMER DENGAN VARIASI SUHU PERAWATAN

MUHAMMAD NAFHAN ISFAHANI

1951 060 027

Dipertahankan di depan Tim Penguji
pada tanggal 3 September 2021
Telah dinyatakan lulus dan memenuhi syarat mendapatkan gelar Megister Teknik
, Fakultas Teknik Universitas Tama Jagakarsa

Disetujui Tim Penguji dan Pembimbing Tesis

Penguji



(Dr. Ir. Jonbi, MT, MM, Msi)

Penguji



(Dr. Ir. Moh. Azhar, M.Sc)

Ketua Penguji



(Dr. Pio Ranap Nahibaho, ST, MT)

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam Tesis dengan judul Model Persamaan Kuat Tarik Belah dan Kuat Tekan Beton Geopolimer dengan Variasi Suhu ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di perguruan tinggi manapun. Sepanjang sepengetahuan saya, juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Jika dikemudian hari diketahui saya telah melakukan plagiat, maka saya secara sukarela akan melepaskan gelar saya dan menerima sanksi hukum yang berlaku tanpa melibatkan pihak Universitas Tama Jagakarsa.

Jakarta 03 September 2021

Pembuat pernyataan,



(Muhammad Nafhan Isfahani)

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah, Tuhan Yang Maha Esa, atas Rahmat dan Hidayah Nya maka Tesis dapat diselesaikan dengan baik. Tesis ini telah diperbaiki dan disempurnakan berdasarkan masukan dan koreksi Tim Penguji pada saat sidang Thesis yang dilaksanakan pada 3 September 2021, Thesis ini diajukan sebagai syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik Sipil di Universitas Tama Jagakarsa.

Pada kesempatan yang berbahagia ini, penulis mengucapkan terima kasih yang sedalam-dalamnya pada semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian skripsi ini terutama kepada :

- 1) Dr Mardiaman ST, MT, menjabat Dekan Fakultas Teknik Sipil Universitas Tama Jagakarsa
- 2) Dr Pio Ranaptuo Naibaho, ST, MT, Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Tama Jagakarsa.
- 3) Dr Ir Jonbi MT, MM, MSi., Pembimbing.
- 4) Dr. Ir. Moh. Azhar, M.Sc, Penguji Thesis
- 5) Dra Kristina Sembiring, ST, MT, Sekretariat Fakultas Teknik Sipil Universitas Tama Jagakarsa
- 6) Bapak/Ibu Dosen dan Karyawan dilingkungan Program Studi Teknik Sipil , Universitas Tama Jagakarsa.

Akhir kata semoga Tesis ini dapat bermanfaat bagi rekan-rekan mahasiswa masyarakat pada umumnya dan penyusun pada khususnya.

Jakarta, 3 September 2021

Penulis,



Muhammad Nafhan Isfahani

ABSTRAK

Kekuatan beton atau kualitas beton ditunjukkan dengan seberapa besar nilai kuat tekan padahal beton merupakan material yang tidak kuat menahan kekuatan tarik, untuk itu perlu dilakukan penelitian model persamaan kuat tekan beton dan kuat Tarik belah dengan variasi suhu perawatan, yang oleh peneliti terdahulu belum dilakukan. Untuk itu tujuan penelitian ini untuk memperoleh model matematis (regresi korelasi) perilaku kuat tarik belah terhadap kuat tekan beton geopolimer dengan suhu perawatan suhu ruangan, suhu 60°C, 90°C selama 24 jam. Penelitian ini dilakukan secara eksperimental di laboratorium.

Hasil penelitian ini diperoleh Rata rata kenaikan kuat tekan beton dari suhu ruangan ke perawatan suhu 60 sebesar : 32,7% dari suhu 60 ke perawatan suhu 90 sebesar: 22,5%. Rata rata kenaikan kuat tarik belah beton dari suhu ruangan ke perawatan suhu 60 sebesar : 34,4% dari suhu 60 ke perawatan suhu 90 sebesar: 4,7%. Model hubungan kuat Tarik belah dengan kuat tekan beton geopolimer umur 28 hari perawatan suhu ruangan ditunjukkan dengan persamaan $0,708 f_c^{0,5}$. Perawatan suhu 60° ditunjukkan dengan persamaan $f_r = 0,808 f_c^{0,5}$. Perawatan suhu 90° ditunjukkan dengan persamaan $f_r = 0,764 f_c^{0,5}$,

Kata kunci: Kuat Tarik belah, kuat tekan beton geopolimer.

DAFTAR ISI

| | |
|---|-----|
| KATA PENGANTAR..... | i |
| ABSTRAK | ii |
| DAFTAR ISI | iii |
| DAFTAR TABEL | v |
| DAFTAR GAMBAR | vii |
| | |
| I. PENDAHULUAN | |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Identifikasi Masalah | 3 |
| 1.3 Rumusan Masalah | 3 |
| 1.4 Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.5 Batasan Masalah..... | 4 |
| 1.6 Manfaat Penelitian..... | 4 |
| 1.7 Signifikasi Penelitian dan Originalitas | 4 |
| | |
| II. Tinjauan Pustaka | |
| 2.1 Beton Geopolimer | 5 |
| 2.2 Bahan Pembentukan Geopolimer..... | 5 |
| 2.2.1 Material FlyAsh | 5 |
| 2.2.2 Aktivator Alkali | 8 |
| 2.2.3 Konsentrasi Larutan NaOH..... | 10 |
| 2.2.4 Rasio Berat Sodium Silikat Terhadap Sodium Hidraoksida..... | 10 |
| 2.2.5 Rasio Berat Aktivator Alkali Terhadap FlyAsh..... | 11 |
| 2.3. Suhu Perawatan..... | 11 |
| 2.4 Agregate..... | 11 |
| 2.4.1 Kegunaan Agregate dalam Beton..... | 12 |
| 2.4.2 Berdasarkan butirannya aggregate | 12 |
| 2.4.3 Syarat Agregate yang Baik untuk Bahan Susun Beton | 12 |
| 2.4.4 Syarat Agregate Halus | 12 |

| | |
|---|----|
| 2.5 Sifat Mekanik | 14 |
| 2.6 Penelitian Terdahulu..... | 15 |
| 2.7 Gap Penelitian | 18 |
| 2.8 Kerangka Pemikiran | 18 |
| | |
| III METODE PENELITIAN | |
| 3.1 Metodologi..... | 20 |
| 3.2 Perancangan Campuran | 20 |
| 3.3 Komposisi Bahan Campuran Beton Geopolimer | 20 |
| 3.4 Pengujian Kuat Tekan | 24 |
| 3.5 Pengujian Tarik Belah | 25 |
| 3.6 Pembuatan Model..... | 25 |
| | |
| IV HASIL DAN PEMBAHASAN | |
| 4.1 Pengujian Aggregate Kasar dan Halus..... | 27 |
| 4.2 Perhitungan Bahan Susun Beton Geopolimer | 32 |
| | |
| V Kesimpulan Dan Saran | |
| 5.1 Kesimpulan dan Saran | 44 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 2.1 Kadar FlyAsh..... | 10 |
| Tabel 2.2 Kadar FlyAsh Tipe C dan F..... | 11 |
| Tabel 2.3 Penelitian Terdahulu yang terkait | 15 |
| Tabel 3.1 Komposisi Bahan Susun Beton tiap m3 | 20 |
| Tabel 3.2 Komposisi Bahan Susun Beton tiap Cetakan | 21 |
| Tabel 3.3 Jumlah Benda Uji Tes Kuat Tekan Tiap Suhu Perawatan..... | 21 |
| Tabel 3.4 Jumlah Benda Uji Tes Tarik Belah Tiap Suhu Perawatan..... | 22 |
| Tabel 3.5 Jumlah Benda Uji Tes Kuat Tekan Suhu 60 derajat celcius..... | 22 |
| Tabel 3.6 Jumlah Benda Uji Tes Tarik Belah Suhu 60 derajat celcius..... | 23 |
| Tabel 3.7 Jumlah Benda Uji Tes Kuat Tekan Suhu 90 derajat celcius | 23 |
| Tabel 3.8 Jumlah Benda Uji Tes Tarik Belah Suhu 90 derajat celcius..... | 24 |
| Tabel 4.1 Berat Jenis Batu Pecah (ASTM C 127-88)..... | 27 |
| Tabel 4.1 Kelembapan Batu Pecah (ASTM C566-97)..... | 27 |
| Tabel 4.3 Kadar air resapan Batu Pecah (ASTM C 127-01)..... | 28 |
| Tabel 4.4 Kadar lumpur Batu Pecah (ASTM C 117, -03)..... | 28 |
| Tabel 4. 5 Keausan Batu Pecah (ASTM C 131, -03)..... | 28 |
| Tabel 4. 6 Berat Jenis Pasir (ASTM C 128)..... | 29 |
| Tabel 4. 7 Kadar Air Resapan Pasir (ASTM C 128, -01) | 29 |
| Tabel 4.8 Kadar lumpur Pasir sebelum dicuci (ASTM C 117, -03) | 29 |
| Tabel 4.9 Kadar lumpur Pasir setelah dicuci | 30 |
| Tabel 4.10 Pengujian Saringan Pasir (ASTM C 136, -01) | 30 |
| Tabel 4.11 Pengujian Saringan Batu pecah | 31 |
| Tabel 4.12 Perancangan Perbandingan Pasir batu pecah standart British | 31 |
| Tabel 4.13 Perhitungan bahan susun beton geopolimer tiap m3 | 32 |
| Tabel 4. 14 Kebutuhan bahan susun beton geopolimer tiap silinder 10x20 | 33 |
| Tabel 4. 15 Kuat tekan beton geopolimer umur 28 hari perawatan suhu ruangan | 33 |
| Tabel 4. 16 Kuat tekan beton geopolimer umur 28 suhu perawatan 60° | 34 |
| Tabel 4. 17 Kuat tekan beton geopolimer umur 28 suhu perawatan 90° | 34 |
| Tabel 4.18 kenaikan kuat tekan berdasarkan suhu perawatan..... | 35 |

| | |
|--|----|
| Tabel 4. 19 Kuat Tarik belah beton geopolimer umur 28 Suhu Perawatan Ruangan | 36 |
| Tabel 4. 20 Kuat Tarik belah beton geopolimer umur 28 suhu perawatan 60° | 37 |
| Tabel 4.21 Kuat Tarik Belah Beton Geopolimer Umur 28 Suhu Perawatan 90° | 37 |
| Tabel 4.22 kenaikan kuat tarik belah berdasarkan variasi suhu perawatan | 38 |
| Tabel 4.23 Kuat Tarik Belah dan Kuat Tekan Beton Geopolimer Umur 28 Suhu Perawatan Ruangan ° | 39 |
| Tabel 4.24 Kuat Tarik Belah dan Kuat Tekan Beton Geopolimer Umur 28 Suhu Perawatan 60° | 40 |
| Tabel 4.25 Kuat Tarik Belah dan Kuat Tekan Beton Geopolimer Umur 28 Suhu Perawatan 90° | 41 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|---|----|
| Gambar 3.1 Alat Tes Kuat Tekan..... | 24 |
| Gambar 3.2 Alat Tes Tarik Belah | 25 |
| Gambar 4.1 Gradasi Aggregate campuran (Pasir dan batu Pecah)..... | 32 |
| Gambar 4.2 Kenaikan Kuat Tekan Tekan Beton Berdasarkan Variasi Suhu Perawatan | 36 |
| Gambar 4.3 Kenaikan Kuat Tarik Belah Berdasarkan Variasi Suhu Perawatan..... | 41 |
| Gambar 4.4 Model Hubungan Kuat Tarik Belah dan Kuat Tekan Beton Geopolimer Umur 28 Suhu Perawatan Ruangan 90 | 42 |

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangunan jalan tol yang akhir akhir ini menunjukkan peningkatan yang sangat pesat, sebagian besar menggunakan perkerasan kaku yang material utamanya berupa beton dari semen Portland, disamping itu pembangunan pusat pemukiman, hotel dan apartemen membutuhkan semen portland yang sangat tinggi, untuk itu kebutuhan akan semen portland akan meningkat tajam. Dipredikisi pada hingga tahun 2030, kebutuhan dan persediaan semen portland seluruh dunia hanya mampu memenuhi 67,42% kebutuhan. Bahan bersifat semen atau bahan pozzolan menjadi opsi untuk mereduksi kebutuhan semen portland 20-30% dari kebutuhan normal, namun tetap saja hal itu hanya mampu mengubah ke angka pemenuhan 83,29% kebutuhan (PortlandCement Association, 2013).

Namun pemakai semen mendapat kritik yang tajam karena menghasilkan 0.8 ton gas karbondioksida setiap produksi 1 ton semen (J. Peng et al 2013) atau 4 miliar ton karbon dioksida pertahun di seluruh dunia, untuk mengurangi dampak negatif pemakai semen, perlu dilakukan penelitian pengganti seluruh semen dengan bahan lain yang lebih ramah lingkungan yaitu **beton geopolimer**.

Dibidang teknik sipil, beton geopolimer diartikan sebagai suatu campuran beton yang terdiri dari pasta geopolimer (sebagai bahan pengikat) dan agregat kasar dan halus sebagai bahan pengisi. Umumnya, pembuatan geopolimer menggunakan metode pencampuran basah, yaitu menggabungkan bahan pozzolan dan larutan alkali aktivator dengan komposisi perbandingan molaritas kimia tertentu.

Pada umumnya, sebagai pengganti semen digunakan bahan pozzolan yang mengandung unsur aluminium (Al) dan Silikat (Si) yang berperan penting dalam membuat ikatan polimer. Pozzolan mampu menjadi material substitusi parsial 20-30% semen portland dikarenakan bahan pozzolan memiliki kandungan Si dan Al yang tinggi sehingga dapat bereaksi dengan sisa hidrasi semen portland yaitu CaO untuk menghasilkan gel C-S-H sekunder sebagai bahan pengikat tambahan (ACI 232R-96). Salah satu jenis bahan pozzolan yang paling banyak tersedia dan dimanfaatkan ialah abu terbang (Fly Ash) dengan jumlah 2260 juta ton per tahun atau 12 kali lipat dari jumlah ketersediaan semen portland (Global Mining Investment Conference, 2010).

Beton geopolimer merupakan salah satu inovasi dalam menggantikan beton

semen portland dikarenakan memiliki beberapa keunggulan, yakni: lebih ramah lingkungan (dalam proses pembuatannya tanpa melepas emisi CO₂ ke atmosfer), tingkat workabilitas yang tinggi (mudah mengalir atau self leveling), lebih tahan terhadap serangan kimia (sulfat, asam, dan klorida), dan lebih tahan terhadap temperatur tinggi (Provis dan Deventer, 2009)

Geopolimer ialah material yang merupakan hasil dari sintesa dari Silika (Si) dan Alumina (Al) yang akan membentuk senyawa aluminosilicate (Davidovits, 2005). Kekuatan tekan yang dihasilkan oleh beton geopolimer lebih tinggi dibandingkan beton semen, namun berbeda dengan kuat tekan beton semen, beton geopolimer lebih dipengaruhi oleh proses curing (Hardjito, 2004). Selain itu perbandingan konsentrasi suatu aktivator juga akan menghasilkan kuat tekan yang berbeda (Hardjito, 2004) Walaupun curing dianjurkan untuk menaikkan kuat tekan beton, namun menurut (Hasbullah, 2015), beton geopolimer yang dirawat pada suhu biasa akan mempunyai perilaku daktilitas yang lebih baik. Penelitian yang dilakukan oleh Ekaputri dan Triwulan (2013), menunjukkan bahwa semakin tinggi molaritas dari activator (NaOH), maka semakin kuat pula kuat tekan dari geopolimer tersebut. Kuat tekan dari beton geopolimer dengan molaritas 14M dapat mencapai 51.3 MPa. Disamping itu peningkatan kuat tekan beton bisa dipengaruhi dengan semakin tingginya suhu perawatan, kuat tekan 21.79 MPa perawatan suhu ruangan meningkat menjadi 32.65 MPa dengan suhu perawatan 60° C meningkat lagi menjadi 42.32 MPa saat suhu perawatan 90 °C. Fiki & Sumajouw (2018).

Sifat mekanik bahan seperti, kuat tarik belah, merupakan faktor terpenting untuk perancangan, sifat mekanik beton geopolymer menurut Diaz et al (2011) berat jenis 1890 - 2371 kg/m³, kuat tekan 10,34 – 80,37MPa, modulus elasitas 6812 – 42878 MPa.

Menurut ACI 363.R-92, kekuatan tarik belah untuk beton normal sebesar $= 0.5 \sqrt{f'c}$ sampai $0.6 \sqrt{f'c}$ MPa. Hasil penelitian Dewira Rante Pangloly dkk(2018) kuat tarik belah beton geopolimer $= 0.5 \sqrt{f'c}$ sampai $0.6 \sqrt{f'c}$ MPa. Menurut Geertruida Eveline Untu dkk(2015) kuat tarik belah beton semen sebesar $0,52 \sqrt{f'c}$ sampai $0.55 \sqrt{f'c}$ MPa dan 0,09 sampai 0,12 fc. Muhammad Fakhru Rozi (2020) kuat tarik beton geopolimer sebesar 0,23 fc. Daniel Mandala Putra (2015) kuat tarik belah beton semen ringan sebesar 0,496 MPa sampai 0,664 MPa untuk beton normal sebesar 0,332 MPa sampai 0,496 MPa untuk beton ringan

Kualitas beton ditunjukkan dengan seberapa besar nilai kuat tekan padahal beton

merupakan material yang tidak kuat menahan kekuatan tarik, untuk itu perlu dilakukan penelitian model persamaan kuat tekan beton dan kuat tarik belah dengan variasi suhu perawatan, yang oleh peneliti terdahulu belum dilakukan.

1.2 Identifikasi Masalah

- 1) Kekuatan beton geopolimer dengan variasi suhu perawatan
- 2) Kuat tarik belah dengan variasi suhu perawatan
- 3) Pengaruh kuat tekan terhadap, kuat tarik belah, dengan suhu perawatan suhu ruangan, suhu 60°C, 90°C selama 24 jam

1.3 Perumusan Masalah

- 1) Bagaimana kuat tekan beton geopolimer dengan variasi suhu perawatan
- 2) Bagaimana kuat tarik belah dengan variasi suhu perawatan
- 3) Bagaimana perilaku kuat tarik belah terhadap kuat tekan beton dengan suhu perawatan suhu ruangan, suhu 60°C, 90°C selama 24 jam

1.4 Tujuan

Tujuan penelitian yang ingin dicapai untuk :

- 1) Memperoleh prosentase kenaikan kuat tekan beton geopolimer rata rata dengan variasi suhu perawatan
- 2) Memperoleh prosentase kenaikan kuat tarik belah dengan berbagai suhu perawatan
- 3) Memperoleh model matematis (regresi korelasi) perilaku kuat tarik belah terhadap kuat tekan beton geopolimer dengan suhu perawatan suhu ruangan, suhu 60°C, 90°C selama 24 jam

1.5 Batasan Masalah

- 1) Bahan susun beton geopolimer yang dipakai berasal dari material lokal
- 2) Parameter bahan susun beton geopolimer yang diteliti sesuai kebutuhan perancangan

- 3) Reaksi kimia tidak menjadi prioritas yang lebih diutamakan perilaku bahan susun beton geopolimer
- 4) Suhu Perawatan suhu ruangan, suhu 60°C, 90°C selama 24 jam
- 5) Kuat tarik yang dimaksud kuat tarik belah

1.6 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian tentang model persamaan kuat tarik belah dengan kuat tekan beton dengan berbagai suhu perawatan adalah : Pedoman standar penentuan kuat tarik belah, Pedoman dalam menentukan kekuatan tekan beton dengan variasi suhu perawatan

1.7 Signifikansi penelitian dan Originalitas

Penelitian, model persamaan kuat tarik belah dan kuat tekan beton geopolimer terbatas pada suhu perawatan tertentu, penelitian terkait model persamaan kuat tarik belah dengan kuat tekan beton dengan variasi suhu perawatan sangat perlu dilakukan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton Geopolymer

Geopolimer ialah material yang merupakan hasil dari sintesa dari Silika (Si) dan Alumina (Al) yang akan membentuk senyawa aluminosilicate (Davidovits, 2005). Kekuatan tekan yang dihasilkan oleh beton geopolimer tidak kalah tinggi dibandingkan beton normal, namun berbeda dengan kuat tekan beton normal yang dipengaruhi water to cement ratio (w/c) dan umur beton tersebut, beton geopolimer lebih dipengaruhi oleh proses curing (Hardjito, 2004). Selain itu perbandingan konsentrasi suatu aktivator juga akan menghasilkan kuat tekan yang berbeda (Hardjito, 2004) Walaupun curing dianjurkan untuk menaikkan kuat tekan beton, namun menurut (Hasbullah, 2015), beton geopolimer yang dirawat pada suhu biasa akan mempunyai perilaku daktilitas yang lebih baik. Penelitian yang dilakukan oleh Ekaputri dan Triwulan (2013), menunjukkan bahwa semakin tinggi molaritas dari activator (NaOH), maka semakin kuat pula kuat tekan dari geopolimer tersebut. Kuat tekan dari beton geopolimer dengan molaritas 14M dapat mencapai 51.3 Mpa.

2.2 Bahan Pembentukan Geopolymer

Beton geopolimer, semen portland tidak digunakan dan seluruhnya diganti dengan bahan-bahan pengganti yang bersifat pozolan dan yang tinggi kandungan silica dan alumina. Material dasar geopolimer yang berasal dari mineral alam seperti kaolin, tanah liat, limbah industri seperti fly ash, silica fume, granulated blast furnace slag, abu sekam pagi dan lain lain. Silika dan alumina yang terdapat pada material dasar tersebut bereaksi dengan aktivator alkali sebagai aktivator untuk membentuk geopolimer pasta dan mengikat aggregate kasar dan halus, untuk membentuk beton geopolimer. Semua material yang tinggi kandungan silica dan alumina bisa digunakan untuk material dasar geopolimer.

2.2.1 Material Dasar Fly Ash

Fly ash merupakan limbah dari pembakaran batu bara. Sifat fisik, kimia dan mekanik geopolimer sangat dipengaruhi oleh sifat dan karakteristik material fly ash (Fernandez-Jimenez dan Palomo 200). Sedangkan sifat dan karakteristik fly ash itu sendiri dipengaruhi oleh batu bara yang digunakan, temperatur dan lama pembakaran batubara, tipe dan sistem pengumpulan fly ash (Ekaputri dkk. 2013). Metode pembakaran batubara yang umumnya

dipakai pada PLTU adalah PCC (pulverized coal combustions). Temperatur pembakaran pada metode PCC adalah sekitar 1300-1700 derajat celcius dan fly ash yang dihasilkan berbentuk spherical, amorphous phase tinggi dan sangat reaktif, ukuran partikel sangat halus sekitar 1-2001. Sedangkan pada metode FBC (fluidized bed combustions) temperatur pembakaran hanya sekitar 800-900 derajat celcius sehingga fly ash berbentuk tidak beraturan, ukuran partikel 1-300 dan tinggi kandungan crystalline phase (Chindaprasirt dan Rattanaak 2010; Chinaprasirt dkk. 2014; Boonserm dkk.2012; Chindaprasirt dkk. 2011)

ASTM C618-02 mengklarifikasikan fly ash dan material alam berbahan dasar pozzolan dalam 3 kelas yaitu kelas N, F dan C. Kelas N adalah pozzolan alam atau pozzolan yang telah dikalsinasi untuk mendapatkan sifat-sifat yang diinginkan seperti abu gunung berapi dan kaolin. Fly ash kelas F merupakan fly ash yang dihasilkan dari pembakaran batu bara jenis anthracite atau bitumen. Fly ash ini bersifat pozzolan. Sedangkan fly ash kelas C hasil pembakaran batu bara dari jenis lignite atau sub bitumen. Fly ash yang termasuk dalam kelas ini mempunyai sifat pozzolan dan sifat cementitious. LOI merupakan kehilangan berat fly ash akibat proses pembakaran. Hilangnya berat tersebut akibat oleh kehilangan kelembaban, karbon, sulfur dan lain lain. Karakteristik fisik fly ash yang mempengaruhi reaktifitas fly ash adalah kehalusan atau fineness partikel.

ASTM C681-02 mensyaratkan berat fly ash yang tertahan pada saringan no 325 terhadap berat total maksimal 34%. Semakin tinggi persentase partikel yang tertahan pada saringan no 325 makin kasar butiran partikel fly ash dan sebaliknya makin rendah persentase yang tertahan pada saringan makin halus partikel fly ash.

Hal ini menunjukkan bahwa makin halus ukuran butiran makin tinggi kuat tekan. Karena luaspermukaan butiran yang kecil lebih tinggi dari butiran yang besar dan butiran yang besar akan mengurangi kelecakan adukan dan mengakibatkan menurunnya kuat tekan. Sehingga dapat dikatakan bahwa ukuran butiran fly ash merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kuat tekan beton geopolimer. Menurut Fernandez-Jimenez dan Palomo (2003) mensyaratkan agar mendapatkan properties geopolimer yang optimum, fly ash kelas F harus mempunyai LOI lebih kecil dari 5%, Iron Oxide kurang dari 10%, kandungan silika antara 40-50% dan 80-90 dari partikel harus lebihkecil dari 451 serta rendah kandungan CaO.

Tabel 2.1 Kadar Fly ash

| Oksida | Prosentase Kadar Senyawa |
|--------------------------------|--------------------------|
| SiO ₂ | 53,36 |
| Al ₂ O ₃ | 26,49 |
| Fe ₂ O ₃ | 10,86 |
| CaO | 1,34 |
| Na ₂ O | 0,37 |
| K ₂ O | 0,8 |
| TiO ₂ | 1,47 |
| MgO | 0,77 |
| P ₂ O ₅ | 1,43 |
| SO ₃ | 1,7 |
| ZrO ₂ | - |
| LOI | 1,39 |

Sumber : Romasta Hutajalu 2010

Tabel 2.2 Kadar Fly ash Suryalaya tipe C dan F

| Oksida | <i>Fly Ash</i> Tipe C (%) | <i>Fly Ash</i> Tipe F (%) |
|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| SiO ₂ | 46.39 | 54 |
| Al ₂ O ₃ | 20.08 | 29.12 |
| Fe ₂ O ₃ | 13.32 | 9.81 |
| CaO | 13.07 | 1.33 |
| SO ₃ | 2.16 | 0.65 |
| MgO | 1.09 | 0.81 |
| Mn ₂ O ₃ | 0.15 | 0.04 |
| Cr ₂ O ₃ | 0.01 | --- |
| Na ₂ O | 0.17 | < 0.01 |
| K ₂ O | 0.77 | 0.96 |
| TiO ₂ | 1.64 | 1.35 |
| P ₂ O ₅ | 1.03 | 0.16 |

Sumber : Pugar Septia 2011

2.2.2 Aktivator alkali

Aktivator alkali diperlukan pada proses terjadinya reaksi geopolimerisasi dengan fly ash. Tipe dan konsentrasi aktivator alkali yang digunakan untuk mengaktifasi material dasar sangat penting dalam perkembangan reaksi. Beberapa peneliti menggunakan aktivator alkali yang berbahan dasar sodium yaitu sodium hidraoksida (NaOH) dan sodium silikat atau yang berbahan dasar potasium yaitu potasium hidraoksida (KOH) dan potasium silikat. Menurut Palomo (1999) menggunakan empat macam aktivator alkali yang hasilnya menunjukkan bahwa penambahan sodium silikat dan potasium silikat pada aktivator alkali menghasilkan kuat tekan pada umur 24jam lebih tinggi yaitu masing masing sekitar 57,5% dan 170,4% jika dibandingkan dengan hanya menggunakan sodium hidraoksida atau hanya potasium hidraoksida.

Hal yang sama juga ditunjukkan pada penelitian yang dilakukan oleh Fernandez-Jimenez dkk (2006) yang membandingkan kuat tekan beton geopolimer dengan hanya menggunakan larutan NaOH (8M) dan mencampurkan 85% NaOH (12,5M) dengan 15% sodium silikat. Hasilnya menunjukkan bahwa penambahan sodium silikat yang dicampur dengan sodium hidraoksida sebagai aktivator alkali menghasilkan kuat tekan beton geopolimer yang lebih tinggi jika dibanding dengan hanya menggunakan larutan NaOH. Hal ini menunjukkan bahwa reaksi yang terjadi lebih cepat jika menggunakan aktivator yang mengandung sodium atau potasium silikat jika dibandingkan dengan hanya menggunakan sodium atau potasium hidraoksida sehingga akibatnya perkembangan kekuatan mekaniknya lebih cepat (Palomo dkk. 1999). Penambahan silikat pada larutan KOH menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan penambahan silikat pada larutan NaOH. Namun perlu diperhatikan bahwa konsentrasi larutan NaOH adalah 12M sedangkan larutan KOH adalah 18M. Sehingga total rasio pada aktivator alkali NaOH dan Na_2SiO_3 adalah 1,23 sedangkan total rasio $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ pada aktivator alkali campuran antara KOH dan Na_2SiO_3 hanya 0,63. Biasanya sodium hidraoksida berbentuk flakes dengan purity berkisar antara 90-98%. Sehingga untuk mendapatkan larutan sodium hidraoksida, sodium hidraoksida flakes tersebut dilarutkan dengan aquades. Aquades digunakan untuk menghindari material yang tidak diinginkan ada di dalam air PDAM.

Pembuatan larutan NaOH mengeluarkan panas, berdasarkan hasil penelitian awal, temperatur larutan NaOH saat dibuat berkisar antara 90-100 derajat celsius dengan temperatur ruang saat pembuatan 27-29 dan kelembaban ruangan 65-75%. Larutan NaOH

ini harus didinginkan kemudian tutup rapat agar tidak terjadi kristalisasi sodium carbonate. Terjadinya kristalisasi sodium carbonate dapat menyebabkan berkurangnya kuat tekan beton sekitar 20-40% dan mengurangi workability campuran (Simatupang 2013). Setelah larutan NaOH dingin (temperatur sekitar 10 derajat celcius) baru dicampurkan dengan sodium silikat. Kembali terjadi kenaikan temperatur tapi tidak signifikan pada pembuatan larutan NaOH. Setelah itu aktivator alkali siap untuk dipergunakan.

Dalam pembuatan geopolimer yang merupakan beton yang tidak membutuhkan semensama sekali, perlu adanya alkali activator yang berfungsi untuk mereaksikan silica dan aluminium dalam fly ash. Alkali sebagai activator yang biasanya dipakai dalam geopolimer ialah Sodium Hidroksida (NaOH) direaksikan dengan Sodium Silikat (Na_2SiO_3), atau Potassium Hidroksida (KOH) direaksikan dengan Potassium Silikat (K_2SiO_3), (Davidovits, 1999) (Hardjito, 2005)

Pada penelitian ini, alkali activator yang digunakan adalah sodium hidroksida (NaOH) dan sodium silikat (Na_2SiO_3). Hasil penelitian Hardjito (2005), dengan konsentrasi sodium hidroksida (NaOH) yang digunakan berkisar antara 8M-16M, perbandingan massa antara sodium hidroksida dan sodium silikat berkisar antara 0,4 sampai 2.5 menyimpulkan bahwa semakin tinggi konsentrasi molaritas sodium hidroksida menyebabkan semakin tinggi pula kuat tekan beton geopolimer. Dan semakin tinggi perbandingan massa antara sodium hidroksida dan sodium silikat menyebabkan semakin tinggi pula kuat tekan yang dihasilkan.

2.2.3 Konsentrasi Larutan NaOH

Konsentrasi larutan alkali merupakan faktor yang berpengaruh untuk mengontrol pelepasan alumina dan silika dan partikel fly ash, proses geopolimerisasi dan sifat mekanik dari geopolimer (Rattanasak dan Chindaprasirt 2009). Konsentrasi larutan NaOH yang sering digunakan para peneliti berkisar antara 8M sampai 16M (Hardjito dan Rangan 2005; Simatupang 2013; Rattanasak dan Chindaprasirt 2009; Mustafa dkk. 2011; Somna dkk.2011). Hasil penelitian menunjukan bahwa makin tinggi konsentrasi larutan NaOH makin tinggi kuat tekan beton geopolimer, namun ada batasan konsentrasi larutan NaOH sebab terlalu rendah konsentrasi larutan NaOH tidak memberikan pengaruh pada kuat tekan geopolimer terhadap umur. Sedangkan apabila konsentrasi larutan NaOH diatas 14M kekutan pasta geopolimer akan berkurang jika dibandingkan dengan konsentrasi larutan NaOH 14M. Hal ini terjadi karena makin tinggi konsentrasi aktivator NaOH maka akan

mengurangi kelecakan adukan beton geopolimer dan beton geopolimer akan cepat setting. Penurunan kuat tekan setelah 14M NaOH itu disebabkan oleh dari aluminosilicate products (Somna dkk.2011).

2.2.4 Rasio Berat Sodium Silikat terhadap Sodium Hidraoksida

Rasio berat $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ yang juga disebut rasio alkali mempengaruhi sifat mekanik geopolimer. Menurut Hardjito (2005) mengevaluasi pengaruh rasio alkali terhadap kuat tekan beton dengan menggunakan fly ash kelas F dan curing 24jam pada suhu 60°C . Pada konsentrasi larutan NaOH 8M, kuat tekan beton geopolimer pada umur 7 hari dengan rasio alkali 0,4 adalah 17MPa sedangkan rasio pada alkali 2,5 kuat tekan sekitar 57 Mpa. Berarti terjadi kenaikan kuat tekan yang sangat tinggi sekitar 235%. Sedangkan pada konsentrasi larutan NaOH 14M, pada rasio alkali 0,4 kuat tekan 48Mpa dan pada rasio alkali 2,5 kuat tekan 68Mpa terjadi kenaikan sekitar 41,7%. Pola hasil yang sama juga diperlihatkan dari penelitian yang telah dilakukan oleh Simpatupang (2013) pada kuat tekan pasta geopolimer dengan rasio alkali yang digunakan 0,5 , 1 dan 2.

Hal ini menunjukkan bahwa makin tinggi rasio sodium silikat terhadap sodium hidraoksida makin tinggi kuat tekan. Pada konsentrasi NaOH yang relatif rendah, kuat tekan beton geopolimer meningkat sangat signifikan dengan menaikkan rasio alkali dari 0,4 menjadi 2,5.

2.2.5 Rasio Berat Aktivator alkali terhadap Fly Ash

Sifat mekanik geopolimer dipengaruhi komposisi campuran terutama rasio aktivator alkali terhadap fly ash (Wongpa dkk. 2010; kamhangrittirong dkk.2011;Hardjito dkk 2009) meneliti pengaruh rasio berat aktivator alkali terhadap fly ash yaitu 0.43, 0.54, 0.67 terhadap kuat tekan pasta geopolimer pada umur 28 hari. Fly ash yang digunakan adalah fly ash kelas C. Terjadi kenaikan sebesar 39% kuat tekan pasta jika merubah komposisi aktivator alkali terhadap fly ash 0.67 menjadi 0.54 dan meningkat sekitar 25% pada rasio aktivator alkali terhadap fly ash dari 0.54 menjadi 0.43 seperti yang dilakukan oleh wongpa dkk(2010). Hal ini menunjukkan bahwa makin rendah rasio aktivator alkali terhadap fly ash makin tinggi kuat tekan pasta dan beton geopolimer.

Pada rasio berat aktivator alkali fly ash yang relative sama kuat tekan yang di dapat dari penelitan wongpa dkk. Lebih tinggi dari hasil penelitian yang dilakukan

Kaninghangrittirong dkk.(2011). Material dasar yang digunakan wongpa dkk. Merupakan campuran antara fly ash dan rice husk-bark ash(RHBA) pada fasa beton. Sedangkan kamhangrittirong dkk. Pada fasa pasta (fly ash kelas C). Hardjito dkk. (2008) menyatakan rasio, aktavitor alkali terhadap FA yang optimum adalah 0.4

2.3 Suhu Perawatan

Peningkatan kuat tekan beton dengan semakin tingginya suhu perawatan, kuat tekan 21.79 Mpa perawatan suhu ruangan meningkat menjadi 32.65 Mpa dengan suhu perawatan 60° C meningkat lagi menjadi 42.32 Mpa saat suhu perawatan 90 °C. Fiki & Sumajouw (2018).

2.4 Agregat

Pada umumnya, beton mengandung rongga udara sekitar 1 % - 2%, pasta semen (semen dan air) sekitar 25% - 40%, agregat halus dan agregat kasar sekitar 60% - 75%, karena komposisinya yang cukup besar serta sangat mempengaruhi sifat beton segar dan beton keras, maka agregat inipun menjadi penting. Aggregate material granural yang umumnya terdiri dari batuan sedimen atau batuan primer yang sudah mengalami pelapukan/dipecah.

2.4.1 Kegunaan Aggregate dalam beton :

- 1) Meningkatkan kekuatan beton (kekuatan aggregate > pasta semen kering = semen portlad + air)
- 2) Mengurangi penyusutan (adukan beton basah saat kering akan mengalami penyusutan, sehingga semakin besar kandungan aggregate dalam adukan beton susut akan semakin kecil)
- 3) Mengurangi sifat tembus air maupun udara (aggregate lebih padat dan rapat dibandingkan dengan pasta semen kering)
- 4) Mengurangi pemakaian semen portlad, sehingga lebih ekonomis.

2.4.2 Berdasarkan butirannya agregat terdiri dari

- 1) Agregat halus/pasir, adalah agregat yang diameter butirannya berukuran antara 0,15 mm - 4,90 mm atau aggregate yang lolos saringan 4,75 mm) No 4 (

- 2) Agregat Kasar, adalah agregat yang diameter butirannya berukuran antara 5,00 – 40 mm (kerikil atau batu pecah/split)

2.4.3 Syarat Aggregate yang baik untuk bahan susun beton

- 1) Kuat, lebih kuat dari pasta semen kering (semen portland + air)
- 2) Tahan terhadap cuaca (tidak mudah rusak karena pengaruh cuaca)
- 3) Mempunyai permukaan kasar dan berbentuk (tidak bulat kelereng/pipih)
- 4) Tidak mengandung lumpur (lumpur akan mengganggu reaksi kimia antara semen portland dan air)
- 5) Tidak mengandung zat organik atau senyawa garam yang mengandung sulfat dan chlor)
- 6) Bergradasi baik (gradasi = susunan butiran, bergradasi baik artinya susunan butiran sedemikian rupa sehingga rongga yang terbentuk antara butiran minimal)

2.4.4 Syarat Agregat Halus SK.SNI 04-1989-F

- 1) Agregat halus harus terdiri dari butiran-butiran yang tajam dan keras. Butiran-butiran halus harus bersifat kekal, artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh cuaca seperti terik matahari dan hujan.
- 2) Agregat halus tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5% (ditentukan terhadap berat kering). Yang diartikan dengan Lumpur adalah suatu bahan yang berasal dari tanah liat yang menempel pada agregat dan lolos ayakan 0.063 mm. Apabila kadar Lumpur melampaui batas yang disyaratkan, maka agregat harus dicuci terlebih dahulu sebelum digunakan.
- 3) Agregat halus tidak boleh mengandung bahan-bahan organik terlalu banyak yang harus dibuktikan dengan percobaan warna dari Abrams-Harder (dengan larutan NaOH kepekatan 3%). Agregat halus yang tidak memenuhi percobaan warna ini dapat juga dipakai, asal kekuatan tekan adukan agregat tersebut pada umur 7 dan 28 hari larutan NaOH kepekatan 3% yang kemudian dicuci dengan air, pada umur yang sama.
- 4) Pasir laut tidak boleh digunakan sebagai agregat halus untuk semua mutu beton, kecuali dengan petunjuk dari lembaga pemeriksaan bahan-bahan yang diakui.
- 5) Agregat halus terdiri dari butiran-butiran beraneka ragam besarnya dan apabila diayak dengan susunan ayakan memenuhi syarat sebagai berikut :

- a) sisa diatas ayakan 4 mm, minimum 2% berat
- b) sisa diatas ayakan 1 mmm minimum 10% berat.
- c) Sisa diatas ayakan 0.25 mm, harus berkisar antara 80% dan 95%.

Syarat Agregat Kasar

- 1) Agregat kasar harus terdiri dari butiran-butiran yang keras dan tidak berpori.
- 2) Agregat kasar yang mempunyai butiran-butiran pipih hanya dapat dipakai apabila jumlah butir-butir pipih tersebut tidak melebihi 20% dari berat agregat seluruhnya.
- 3) Butir-butir kasar harus bersifat kekal, artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh-pengaruh cuaca seperti terik matahari dan hujan.
- 4) Agregat kasar tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 1 % dari berat kering, apabila agregat mengandung lumpur lebih dari 1% maka agregat tersebut harus dicuci.
- 5) Agregat kasar tidak boleh mengandung zat-zat yang reaktif terhadap alkali.
- 6) Besar butir agregat tidak boleh lebih dari seperlima jarak terkecil antara bidang samping dari cetakan atau tiga perempat dari jarak bersih minimum diantara batang-batang dan berkas tulangan.
- 7) Agregat kasar harus terdiri dari butiran-butiran yang beraneka ragam besarnya dan apabila diayak dengan sejumlah ayakan harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut:
 - a) sisa diatas ayakan 31,5 harus 0% berat.
 - b) sisa diatas ayakan 4 mm, harus berkisar antara 90% dan 98% berat
 - c) selisih antara sisa-sisa komulatif diatas dua ayakan yang berurutan, yaitu maksimum 60% dan minimum 10% berat.
- 8) Kekerasan dari butiran-butiran agregat diperiksa dengan beban penguji 2- ton, dengan memenuhi persyaratan sebagai berikut :
 - a) Tidak terjadi pembubukan sampai fraksi 9,5 - 19 mm lebih dari 24% berat.
 - b) Tidak terjadi pembubukan sampai fraksi 10 - 30 mm lebilh dari 22% berat
 - c) Atau dengan mesin pengaus Los Angeles, tidak boleh terjadi kehilangan berat lebih dari 50%.

2.5 Sifat Mekanik

Sifat mekanik bahan seperti, kuat tekan, kuat tarik belah, kuat lentur merupakan faktor terpenting untuk perancangan, sifat mekanik beton geopolimer menurut Diaz et al (2011) berat jenis 1890 - 2371 kg/m³, kuat tekan 10,34 – 80,37Mpa, modulus elatisitas 6812 –

42878 Mpa.

Kekuatan tarik beton relatif rendah, kira-kira hanya 10%-15% dari kekuatan tekan beton, kadang-kadang 20%. Kekuatan ini lebih sukar untuk diukur dan hasilnya berbeda-beda dari satu bahan percobaan ke bahan percobaan yang lain dibandingkan untuk silinder-silinder tekan (Ferguson, 1986). Kuat Tarik beton dihitung dengan rumus : $f_{sp} = \frac{2P}{\pi \cdot d \cdot L}$ dimana: f_{sp} = kuat Tarik belah (Mpa) P = beban pada waktu belah (N) L = panjang benda uji (mm) D = diameter benda uji (mm) π = phi Retak rambut yang mungkin terjadi akibat kering permukaan (surface drying), terjadi pada daerah permukaan silinder yang berada dalam daerah tekan, dan tidak akan mempengaruhi sifat beton pada daerah tarik yang berada pada daerah sumbu beban didalam silinder. Dengan demikian kekuatan tarik belah dipengaruhi oleh kondisi kering permukaan dan dapat dianggap sebagai nilai kekuatan tarik beton yang representatif.

Menurut ACI 363.R-92, kekuatan tarik belah untuk beton normal sebesar = $0.5 \sqrt{f_{c'}}$ sampai $0.6 \sqrt{f_{c'}}$ MPa. Hasil penelitian Dewira Rante Pangloly dkk(2018) kuat tarik belah beton geopolimer = $0.5 \sqrt{f_{c'}}$ sampai $0.6 \sqrt{f_{c'}}$ MPa. Menurut Geertruida Eveline Untu dkk(2015) kuat tarik belah beton semen sebesar $0,52 \sqrt{f_{c'}}$ sampai $0.55 \sqrt{f_{c'}}$ MPa dan 0,09 sampai 0,12 fc. Muhammad Fakhru Rozi (2020) kuat tarik beton geopolimer sebesar 0,23 fc. Daniel Mandala Putra (2015) kuat tarik belah beton semen ringan sebesar 0,496 MPa sampai 0,664 MPa untuk beton normal sebesar 0,332 MPa sampai 0,496 MPa untuk beton ringan

2.6 Penelitian Terdahulu

Tabel 2.3 Penelitian terdahulu yang terkait

| No | Peneliti dan Tahun | Judul | Journal dan SJR | Metode Perancangan | Bahan Susun Utama | Model Hubungan tarik belah dengan kuat tekan |
|----|--------------------|-------|-----------------|--------------------|-------------------|--|
| | | | | | | |

| | | | | | | |
|---|--------------------------------|---|---|----------------|---|-------------------------------|
| 1 | Ivan Diaz et al (2011) | Mechanical Properties of Fly-Ash-Based Geopolymer Concrete | A Journal ACI V. 108, No. 3, May-June 2011. (SJR Q1) | coba coba | Fly ash, Rasio Natrium silikat/NaOH : 0,67-1,0. NaOH 10 M | berupa nilai |
| 2 | Monita Olivia (2011) | Durability Related Properties of Low Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete | Doctor of Philosophy of Curtin University of Technology | Metode Taguchi | Fly ash, aktivator alkali 6,1%, NaOH 14 M, rasio Natrium Silikat/Natrium Hidroksida 2 | Ada pengujian tidak ada model |
| 3 | Puput Risdanareni et al (2015) | Effect of Alkaline Activator Ratio to Mechanical Properties of Geopolymer Concrete with Trass as Filler | Applied Mechanics and Materials Vols. 754-755 (2015) pp 406-412 Submitted: 06.01.2015 | coba coba | Fly ash, Trust, aktivator alkali 26% | ada (grafik) |
| 4 | K. Shehab et al (2016) | Mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete with full | Construction and Building Materials 126 (2016) 560–565 (SJR Q1) | | Fly Ash, Aktivator alkali 7%, NaOH 14 M, Rasio Natrium Silikat/Natrium Hidroksida 2.5 | ada |

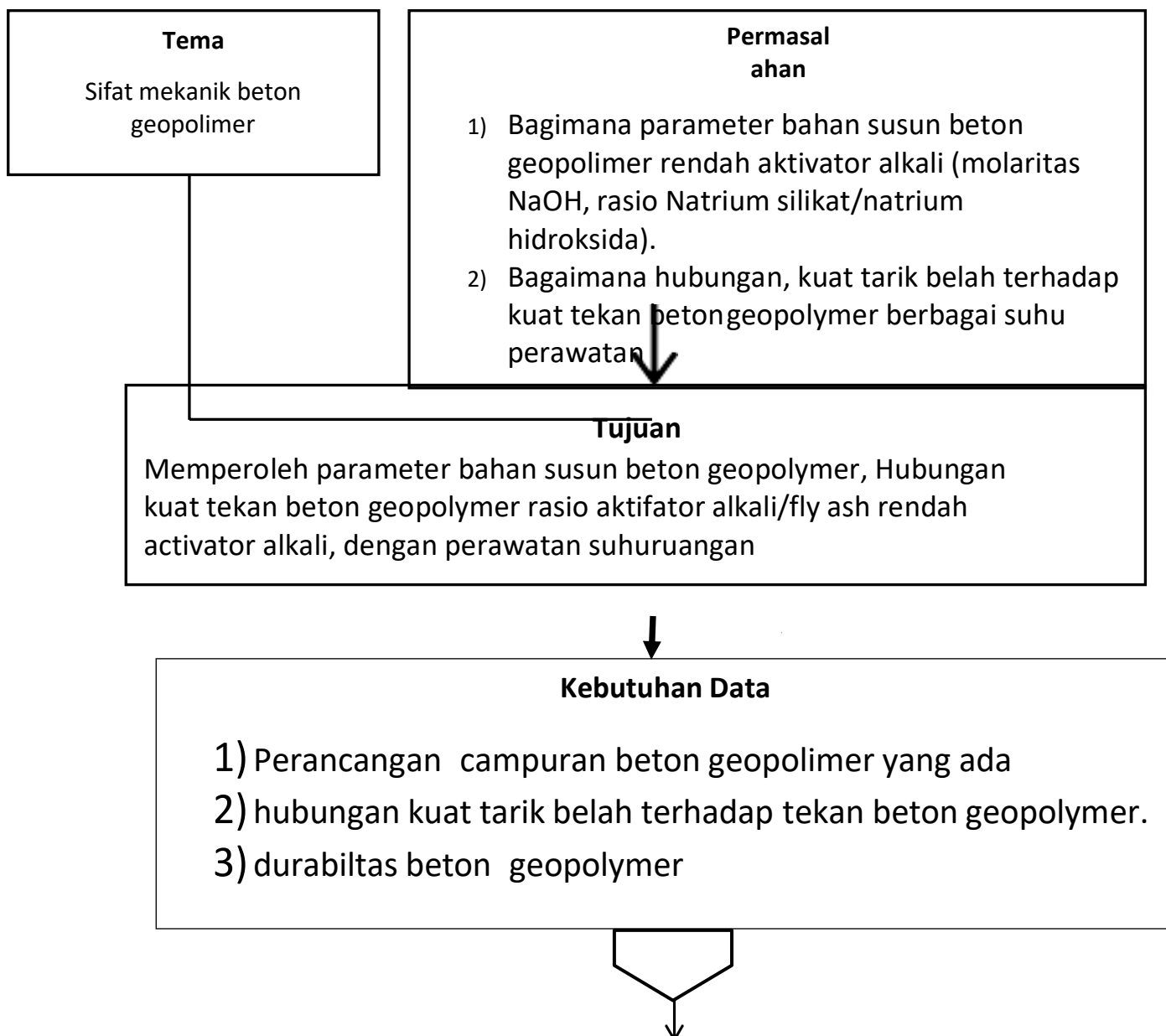
| | | | | | | |
|---|--|--|---|---|---|-----------|
| 5 | H Hardjasaputra, Han A Lie, Cornelia, , Y Gunawan, Surjaputra 1, | Study of mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete | International Conference on Euro Asia Civil Engineering Forum IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 615 (2019) | menggunakan referensi Perancangan beton Normal SNI 2000 | Fly Ash, Aktivator alkali 8%, molaritas NaOH 2M - 16M, rasio Natrium silikat/Natrium Hidroksida 2.5 | tidak ada |
| 6 | Remigildus Cornelis et al (2019) | Workability and Strength Properties of Class C Fly Ash-Based Geopolymer Mortar | MATEC Web of Conferences 258 (2019) | kekuatan target | Fly Ash, Aktivator alkali 9.3%, NaOH 10M, rasio Natrium silikat/Natrium Hidroksida 2 | ada |
| 7 | Andi Arham Adam et al (2019) | The Effects of Water to Solid Ratio, Activator to Binder Ratio, and Lime Proportion on the Compressive Strength of Ambient-Cured Geopolymer Concrete | Journal of the Civil Engineering Forum Vol. 5 No. 2 (May 2019) | kekuatan target | Fly Ash, Aktivator alkali 10.8%, NaOH 04M, | tidak ada |

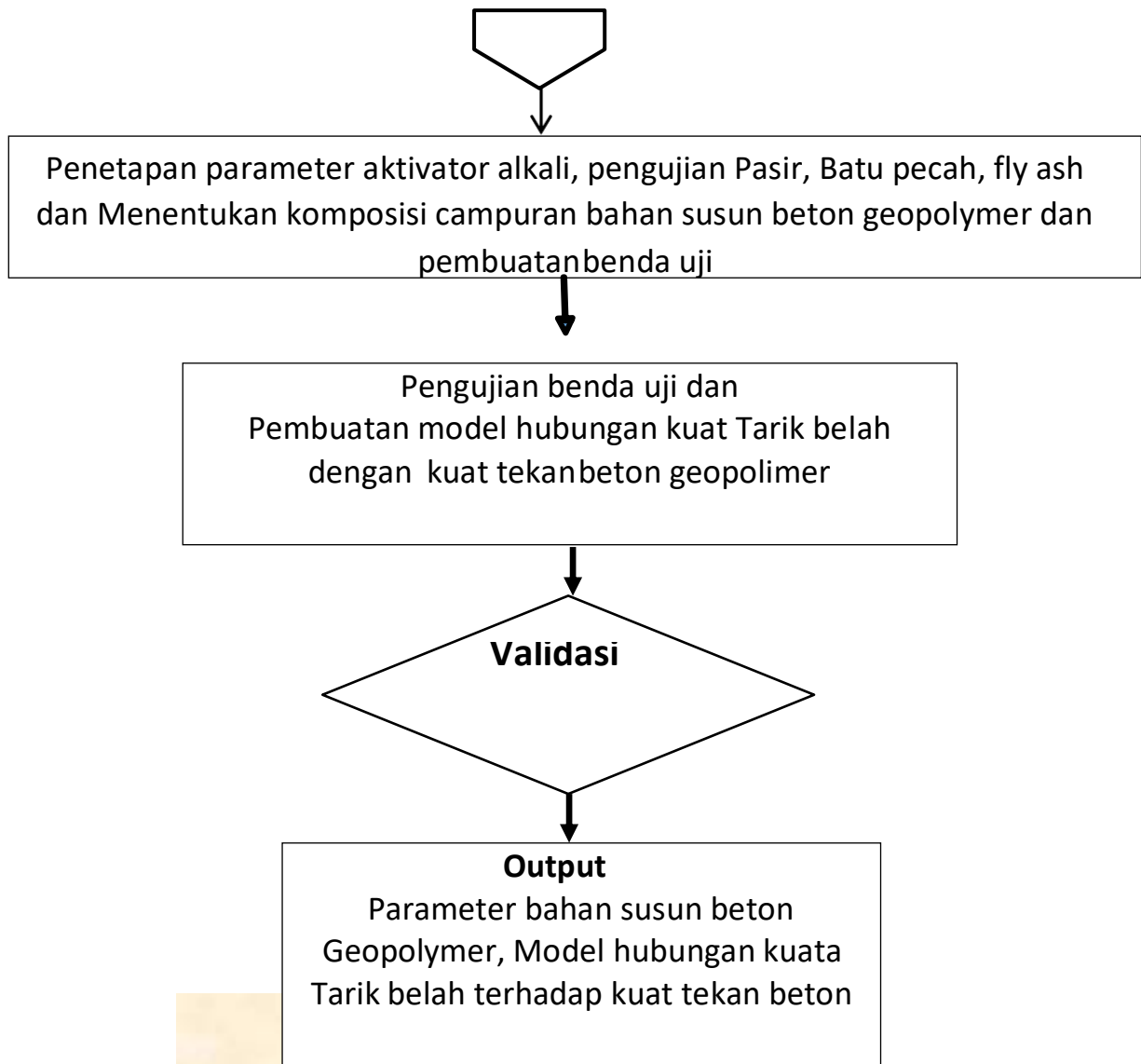
| | | | | | | |
|----|--------------------------------|---|---|-----------|--|--|
| 8 | Radhwan Alzebaree et al (2019) | Mechanical properties and durability of unconfined and confined geopolymer concrete with fiber reinforced polymers exposed to sulfuric acid | Construction and Building Materials 215 (2019) 1015–1032 (SJR Q1) | coba coba | Fly Ash, Aktivator alkali 9.5%, NaOH 14M, rasio Natrium silikat/Natrium Hidroksida 2.5 | tidak ada |
| 9 | Yifei Cui et al (2020) | Experimental and Statistical Study on Mechanical Characteristics of Geopolymer Concrete | Materials 2020, 13, 1651; | coba coba | Fly Ash, Aktivator alkali 8.8%, NaOH 14M, rasio Natrium silikat/Natrium Hidroksida 2.5 | tidak ada model , hasil berupa nilai kuat tekan beton dan komposisi bahan susun |
| 10 | Fateme Hamidia et al (2020) | Compressive and tensile strength fracture models for heavy weight geopolymer concrete | Engineering Fracture Mechanics 231 (2020) 107023 | coba coba | Fly Ash, Aktivator alkali 6.5%, NaOH 14M, rasio Natrium silikat/Natrium Hidroksida 2.5 | tidak ada model , hasil berupa nilai kuat tekan beton dan komposisi bahan susun |

2.7 Gap Penelitian

Dari kajian pustaka dan distribusi penelitian ada gap yang belum dilakukan dan didapat oleh penelitian sebelumnya sebagai berikut : Memperoleh hubungan model matematis kuat tarik belah terhadap kuat tekan beton geopolymer dengan berbagai suhu perawatan. Dan model hubungan kuat tekan dan kuat Tarik belah beton semen menurut ACI : kuat tarik belah $f_r = 0.1 f_c'$,

2.8 Kerangka Pemikiran





BAB III METODOLOGI

Penelitian ini berupa penelitian ekperimental yang dilakukan dilaboratorium untuk memperoleh data yang diperlukan sesuai dengan standart pengujian SNI maupun ASTM. Untuk mencapai tujuan itu semua metodologi penelitian Thesis ini disusun terdiri dari 4 (delapan) tahapan kegiatan.

- 1) Tahap pertama kajian pustaka untuk mengetahui komposisi perancangan campuran, kuat Tarik belah dan kuat tekan beton geopolimer
- 2) Tahap kedua Penentuan jumlah bahan susun beton geopolymer ,
- 3) Tahap ketiga, Pembuatan benda uji silinder ukuran 10x20 cm sebanyak :
 - a) Suhu Perawatan ruangan : 18
 - b) Suhu perawatan 60 : 18
 - c) Suhu Perawatan 90 : 18
- 4) Tahap keempat, dilakukan uji kuat tekan dan kuat Tarik belah beton umur 28 hari,

3.1 Perancangan Campuran

Data lain yang diperlukan untuk perancangan :

berat jenis Natrium hidroksida, berat jenis Natrium silikat, berat jenis fly ash, berat jenis pasir, berat jenis batu pecah, kadar lumpur dalam pasir, kekerasan batu pecah, pembuatan molaritas Natrium hidroksida, kandungan kimia dan kehalusan fly ash.

3.2 Komposisi campuran bahan susun Beton geopolymer

Tabel 3.1 komposisi bahan susun beton tiap 1m³ dengan AAL : 168(7%), NH 12 M, NS/NH : 2,5

| | | | |
|---|-------|-------|-------|
| AAS/FA | 0,4 | 0,5 | 0,6 |
| FA (kg/m ³) | 425 | 340 | 283 |
| W NaOH (kg/m ³) | 49 | 49 | 49 |
| W Na ₂ SiO ₃ (kg/m ³) | 121 | 121 | 121 |
| W agg halus | 614 | 652 | 678 |
| W Agg kasar | 1.087 | 1.155 | 1.200 |
| Bj Beton | 2.315 | 2.335 | 2.346 |

Tabel 3.2 komposisi bahan susun beton tiap 1 cetakan dengan AAL : 168(7%), NH 12 M, NS/NH : 2,5

| | | | |
|---|-------|-------|-------|
| FA (kg/m ³) | 0,667 | 0,534 | 0,445 |
| W NaOH (kg/m ³) | 0,076 | 0,076 | 0,076 |
| W Na ₂ SiO ₃ (kg/m ³) | 0,191 | 0,191 | 0,191 |
| W agg halus | 1,051 | 1,118 | 1,162 |
| W Agg kasar | 1,615 | 1,718 | 1,786 |

Tabel 3.3 Jumlah Benda Uji tes kuat tekan perawatan suhu ruangan

| No | Kode Benda uji | Rasio AAS/FA | Kuat tekan beton fci (Mpa) | |
|----|----------------|--------------|----------------------------|---|
| 1 | K11 | 0,4 | fc1 | 3 |
| 2 | K12 | 0,4 | fc2 | |
| 3 | K21 | 0,5 | fc3 | 3 |
| 4 | K22 | 0,5 | fc4 | |
| 5 | K31 | 0,6 | fc5 | 3 |
| 6 | K32 | 0,6 | fc6 | |
| | | | Jumlah | 9 |

Tabel 3.4 Jumlah Benda Uji tes kuat Tarik belah perawatan suhu ruangan

| No | Kode Benda uji | Rasio AAS/FA | Kuat tekan beton fci (Mpa) | |
|----|----------------|--------------|----------------------------|---|
| 1 | K11 | 0,4 | fr1 | 3 |
| 2 | K12 | 0,4 | fr2 | |
| 3 | K21 | 0,5 | fr3 | 3 |
| 4 | K22 | 0,5 | fr4 | |
| 5 | K31 | 0,6 | fr5 | 3 |
| 6 | K32 | 0,6 | fr6 | |
| | | | Jumlah | 9 |

Tabel 3.5 Jumlah Benda Uji tes kuat tekan perawatan suhu 60°

| No | Kode Benda uji | Rasio AAS/FA | Kuat tekan beton fci (Mpa) | |
|----|----------------|--------------|----------------------------|---|
| 1 | K11 | 0,4 | fc1 | 3 |
| 2 | K12 | 0,4 | fc2 | |
| 3 | K21 | 0,5 | fc3 | 3 |
| 4 | K22 | 0,5 | fc4 | |
| 5 | K31 | 0,6 | fc5 | 3 |
| 6 | K32 | 0,6 | fc6 | |
| | | | Jumlah | 9 |

Tabel 3.6 Jumlah Benda Uji tes kuat Tarik belah perawatan suhu 60°

| No | Kode Benda uji | Rasio AAS/FA | Kuat tekan beton fci (Mpa) | |
|----|----------------|--------------|----------------------------|---|
| 1 | K11 | 0,4 | fr1 | 3 |
| 2 | K12 | 0,4 | fr2 | |
| 3 | K21 | 0,5 | fr3 | 3 |
| 4 | K22 | 0,5 | fr4 | |
| 5 | K31 | 0,6 | fr5 | 3 |
| 6 | K32 | 0,6 | fr6 | |
| | | | Jumlah | 9 |

Tabel 3.7 Jumlah Benda Uji tes kuat tekan perawatan suhu 90°

| No | Kode Benda uji | Rasio AAS/FA | Kuat tekan beton fci (Mpa) | |
|----|----------------|--------------|----------------------------|---|
| 1 | K11 | 0,4 | fc1 | 3 |
| 2 | K12 | 0,4 | fc2 | |
| 3 | K21 | 0,5 | fc3 | 3 |
| 4 | K22 | 0,5 | fc4 | |
| 5 | K31 | 0,6 | fc5 | 3 |
| 6 | K32 | 0,6 | fc6 | |
| | | | Jumlah | 9 |

Tabel 3.8 Jumlah Benda Uji tes kuat Tarik belah perawatan suhu 90°

| No | Kode Benda uji | Rasio AAS/FA | Kuat tekan beton fci (Mpa) | |
|----|----------------|--------------|----------------------------|---|
| 1 | K11 | 0,4 | fr1 | 3 |
| 2 | K12 | 0,4 | fr2 | |
| 3 | K21 | 0,5 | fr3 | 3 |
| 4 | K22 | 0,5 | fr4 | |
| 5 | K31 | 0,6 | fr5 | 3 |
| 6 | K32 | 0,6 | fr6 | |
| | | | Jumlah | 9 |

3.3 Pengujian Kuat tekan

Beton Geopolymer dengan standart pengujian ASTM ASTM C39-99. atau SNI benda ujisilinder 10 x 200 cm.

$$f_i = \frac{P}{A} = \frac{P}{\frac{1}{4}\pi \cdot D^2}$$



Gambar 3.1 Alat Tes Kuat Tekan

3.4 Pengujian Kuat Tarik belah sesuai dengan standar ASTM C 469-94 dengan persamaan tegangan tarik belah,

$$\text{Tegangan tarik belah } (f_r) = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot L \cdot D}$$



Gambar 3.2 Alat Tes Tarik Belah

3.5 Pembuatan Model

Data hasil pengujian ujian kuat tekan sebanyak 15 kali dibuat tabel hubungan kuat tekan beton sebagaimana dalam tabel 3.4 sampai tabel 3.6 selanjutnya dilakukan pembuatan model hubungan kuat tekan beton geopolimer (f_c) dan tegangan tarik belah (X_4) menggunakan regresi power dengan rumus

$f_c = a X^b$, Koefisien a dan b bisa dihitung dengan rumus

$$b = \frac{\sum \log x_i \sum \log y_i - n \sum \log x_i \log y_i}{(\sum \log x_i)^2 - n(\sum \log x_i^2)}$$

$$a = \frac{1}{n} \sum y_i - \frac{1}{n} \sum x_i^b$$

Validasi model hubungan kuat tekan beton geopolimer dengan kuat tarik belah dilakukan dengan korelasi pearson dengan rumus

rumus

$$R = \frac{\sum(Xi - \bar{Xr})(Yi - \bar{Yr})}{\sqrt{\sum(Xi - \bar{Xr})^2 \times \sum(Yi - \bar{Yr})^2}}$$

Jika nilai R mendekati 1 berarti ada hubungan yang sangat kuat antara kuat tekan beton geopolimer dengan kuat Tarik belah, perhitungan bisa juga dilakukan dengan bantuan excel atau dengan software SPSS.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini akan dibahas mengenai hasil yang diperoleh dari setiap pengujian yang dilakukan pada material penyusun dan beton geopolimer. Pengujian yang dilakukan antara lain uji karakteristik material, kuat tekan beton, balok, pola retak yang terjadi, hubungan beban dan lendutan

4.1 Pengujian Aggregate kasar dan Halus

Tabel 4. 1 Berat Jenis Batu Pecah (ASTM C 127-88)

| Percobaan | 1 | 2 |
|-----------------------------|-------|-------|
| | gram | gram |
| Berat Kerikil di udara (w1) | 2500 | 2500 |
| Berat Kerikil di Air (w2) | 1535 | 1540 |
| Berat Jenis = $w1/(w1-w2)$ | 2,591 | 2,604 |
| | rata2 | 2,597 |

Dari percobaan yang telah dilakukan didapatkan berat jenis batu pecah rata-rata sebesar 2,597 gram/cm³. Berdasarkan ASTM C 128-88 Reapp. 01 berat jenis batu pecah yang disyaratkan sebesar 2.4 – 2.7 gram/cm³. Jadi, batu pecah yang digunakan memenuhi persyaratan.

Tabel 4. 2 Kelembaban Batu Pecah (ASTM C 566-97)

| Percobaan | 1 | 2 |
|--------------------------------------|-------|------|
| | gram | gram |
| Berat Batu pecah asli (w1) | 3000 | 3000 |
| Berat Batu Pecah Oven (w2) | 2920 | 2915 |
| Kelembaban (%) = $((w1-w2)/w2)*100%$ | 2,7 | 2,9 |
| | rata2 | 2,8 |

Dari percobaan didapatkan bahwa rata rata kelembaban batu pecah sebesar 2,8%

Tabel 4. 3 Kadar air resapan Batu Pecah (ASTM C 127-01)

| Percobaan | 1 | 2 |
|---|-------|------|
| | gram | gram |
| Berat kerikil SSD | 3000 | 3000 |
| Berat kerikil oven (w) | 2920 | 2940 |
| Kadar air resapan (%) = $((3000 - w) / w) \times 100\%$ | 2,7 | 2,0 |
| | rata2 | 2,4 |

Dari percobaan yang telah dilakukan didapatkan kadar air resapan rata-rata sebesar 2,4%. Berdasarkan ASTM C 127-88-93 batas kadar air resapan yang diperbolehkan adalah 1% sampai dengan 2%. Jadi batu pecah yang digunakan memenuhi persyaratan.

Tabel 4. 4 Kadar lumpur Batu Pecah (ASTM C 117, -03)

| Percobaan | 1 | 2 |
|--|-------|------|
| | gram | gram |
| Berat kering sebelum dicuci (w1) | 1000 | 1000 |
| Berat kering setelah dicuci (w2) | 980 | 970 |
| Kadar lumpur (%) = $((w1 - w2) / w1) \times 100\%$ | 2,0 | 3,1 |
| | rata2 | 2,6 |

Dari percobaan yang telah dilakukan didapatkan kadar lumpur batu pecah rata-rata sebesar $((2\% + 3,1\%) / 2) = 2,55\%$ sedangkan batas kadar lumpur yang disyaratkan adalah tidak boleh lebih dari 1%. Sehingga agar batu pecah dapat dipakai sebagai agregat pada beton, maka batu pecah harus dicuci beberapa kali sampai kadar lumpurnya kurang dari 1%.

Tabel 4. 5 Keausan Batu Pecah (ASTM C 131, -03)

| Percobaan | 1 |
|---|------|
| | gram |
| Berat sebelum diabrasi (w1) | 5000 |
| Berat setelah diabrasi (w2) | 4070 |
| Keausan (%) = $((w1 - w2) / w1) \times 100\%$ | 22,9 |

Dari percobaan yang telah dilakukan didapatkan tingkat keausan agregat kasar sebesar 22,9%. Berdasarkan ASTM C 131-89 agregat yang baik harus mempunyai tingkat keausan kurang dari 35%. Jadi, batu pecah yang digunakan memenuhi persyaratan

Tabel 4. 6 Berat Jenis Pasir (ASTM C 128)

| Percobaan | 1 | 2 |
|---|-------|-------|
| | gram | gram |
| Berat labu + pasir + air (w1) | 1560 | 1560 |
| Berat pasir SSD | 500 | 500 |
| Berat labu + air (w2) | 1265 | 1250 |
| Berat jenis pasir (gr/cm ³) = $500 / (500 + w2 - w1)$ | 2,439 | 2,632 |
| | rata2 | 2,54 |

Berdasarkan ASTM C 128-78 berat jenis pasir yang disyaratkan adalah antara 2.4 sampai dengan 2.7. Dari hasil percobaan didapatkan hasil berat jenis sebesar 2.54. Jadi pasir yang digunakan memenuhi persyaratan.

Tabel 4. 7 Kadar Air Resapan Pasir (ASTM C 128, -01)

| Percobaan | 1 | 2 |
|--|-------|------|
| | gram | gram |
| Berat pasir SSD | 500 | 500 |
| Berat pasir oven (w1) | 350 | 320 |
| Kadar air resapan (%) = $((500 - w1) / w1) \times 100\%$ | 1,43 | 1,56 |
| | rata2 | 1,50 |

Dari percobaan yang telah dilakukan didapatkan kadar air resapan rata-rata sebesar 1,5%. Berdasarkan ASTM C 128-93 batas kadar air resapan yang diperbolehkan antara 1% sampai 4%. Jadi pasir yang digunakan memenuhi persyaratan.

Tabel 4.8 Kadar lumpur Pasir sebelum dicuci (ASTM C 117, -03)

| Percobaan | 1 | 2 |
|---|-------|------|
| | gram | gram |
| Berat kering sebelum dicuci (w ₁) | 500 | 500 |
| Berat kering setelah dicuci (w ₂) | 420 | 435 |
| Kadar lumpur (%) = $((w_1 - w_2) / w_1) \times 100\%$ | 19,0 | 14,9 |
| | rata2 | 17,0 |

Dari percobaan yang telah dilakukan didapatkan kadar lumpur pasir rata-rata sebesar = 17,0 Berdasarkan ASTM C 33 batas maksimum kebersihan pasir terhadap material yang lebih halus dari ayakan no. 200 (75 mm) untuk klasifikasi beton umum adalah 5% dari total sampel percobaan. Jadi pasir yang digunakan tidak memenuhi persyaratan

Tabel 4.9 Kadar lumpur Pasir setelah dicuci

| Percobaan | 1 | 2 |
|---|-------|------|
| | gram | gram |
| Berat kering sebelum dicuci (w_1) | 500 | 500 |
| Berat kering setelah dicuci (w_2) | 475 | 485 |
| Kadar lumpur (%) = $((w_1 - w_2) / w_1) \times 100\%$ | 5,3 | 3,1 |
| | rata2 | 4,2 |

Tabel 4.10 Pengujian Saringan Pasir (ASTM C 136, -01)

| Diameter saringan | A (berat Pasir diatas masing masing saringan) | B (berat kumulatif Pasir diatas masing masing saringan) | C(Prosentase kumulatif Pasir diatas masing masing saringan) | D(Prosentase kumulatif Pasir Lolos dari masing masing saringan) |
|-------------------|--|--|--|--|
| mm | gr | gr | % | % |
| 38,1 | 0 | 0 | 0,0 | 100,0 |
| 19 | 0 | 0 | 0,0 | 100,0 |
| 9,5 | 0 | 0 | 0,0 | 100,0 |
| 4,75 | 0 | 0 | 0,0 | 100,0 |
| 2,36 | 230 | 230 | 23,0 | 77,0 |
| 1,18 | 325 | 555 | 55,5 | 44,5 |
| 0,6 | 190 | 745 | 74,5 | 25,5 |
| 0,3 | 110 | 855 | 85,5 | 14,5 |
| 0,15 | 120 | 975 | 97,5 | 2,5 |
| pan | 25 | 1000 | 100,0 | 0,0 |
| berat total | 1000 | | | |

Tabel 4.11 Pengujian Saringan Batu pecah

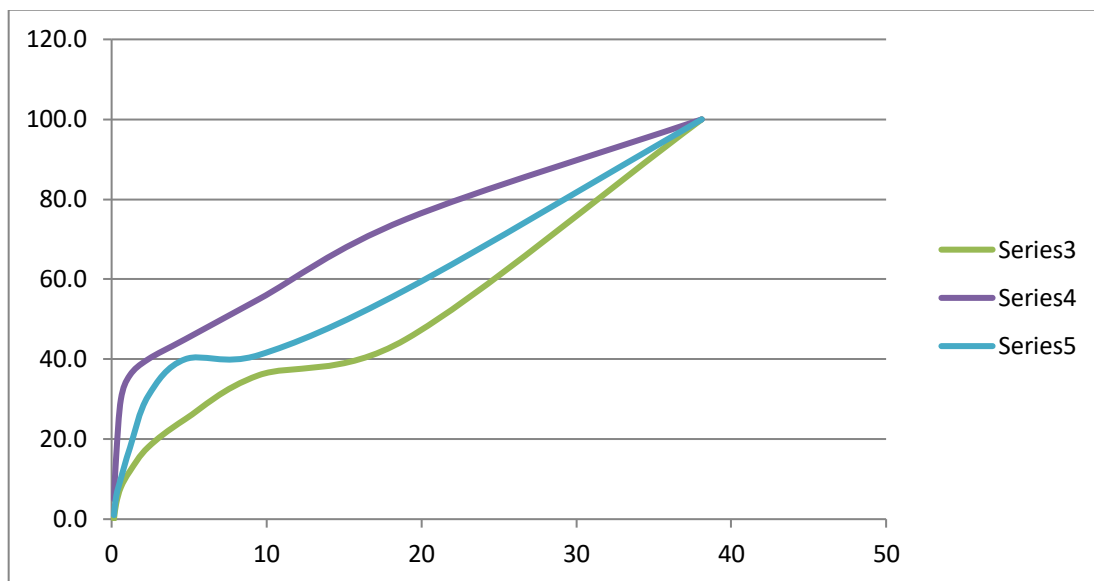
| Diameter saringan | A (berat kumulatif Split diatas masing masing saringan) | B (berat kumulatif Split diatas masing masing saringan) | C(Prosentase kumulatif Split diatas masing masing saringan) | D(Prosentase kumulatif Split Lolos dari masing masing saringan) |
|-------------------|--|--|--|--|
| mm | gr | gr | % | % |
| 38,1 | 0 | 0 | 0,0 | 100,0 |
| 19 | 1420 | 1420 | 71,0 | 29,0 |
| 9,5 | 545 | 1965 | 98,3 | 1,8 |
| 4,75 | 35 | 2000 | 100,0 | 0,0 |
| 2,36 | 0 | 2000 | 100,0 | 0,0 |
| 1,18 | 0 | 2000 | 100,0 | 0,0 |
| 0,6 | 0 | 2000 | 100,0 | 0,0 |
| 0,3 | 0 | 2000 | 100,0 | 0,0 |
| 0,15 | 0 | 2000 | 100,0 | 0,0 |
| pan | 0 | 2000 | 100,0 | 0,0 |
| berat total | 2000 | | | |

Berdasarkan ASTM C 136-01 agregat yang baik harus memenuhi zona lengkung ayakan. Dari Tabel 4.11 didapatkan grafik lengkung ayakan batu pecah pada Gambar 4.2 yang menunjukkan material yang digunakan memenuhi persyaratan.

Tabel 4.12 Perancangan Perbandingan Pasir batu pecah standart British

| Diameter saringan | D(Prosentase kumulatif Pasir Lolos dari masing masing saringan) | D(Prosentase kumulatif Split Lolos dari masing masing saringan) | Standart British | | 40,0% |
|-------------------|--|--|------------------|------------|------------|
| | | | batas bawah | batas atas | |
| mm | % | % | % | % | Pasir ...% |
| 38,1 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 19 | 100,0 | 29,0 | 45,0 | 75,0 | 57,4 |
| 9,5 | 100,0 | 1,8 | 36,0 | 55,0 | 41,1 |
| 4,75 | 100,0 | 0,0 | 25,0 | 45,0 | 40,0 |
| 2,36 | 77,0 | 0,0 | 18,0 | 40,0 | 30,8 |
| 1,18 | 44,5 | 0,0 | 12,0 | 36,0 | 17,8 |
| 0,6 | 25,5 | 0,0 | 8,0 | 30,0 | 10,2 |
| 0,3 | 14,5 | 0,0 | 4,0 | 16,0 | 5,8 |
| 0,15 | 2,5 | 0,0 | 0,0 | 5,0 | 1,0 |

Pasir 40,0%
 Agg Kasar/Split 60,0%



Gambar 4.1 Gradasi Aggregate campuran (Pasir dan batu Pecah)

4.2 Perhitungan bahan susun beton geopolimer

Tabel 4. 13 Perhitungan bahan susun beton geopolimer tiap m³

digunakan Aktifator Alkali (AAL) : 170, NH 12 M, NS/NH : 2,5

| | | | |
|--|-------|-------|-------|
| W aktifator alkali (kg/m ³ beton) | 170 | | |
| Rasio AAL/FA | 0,4 | 0,5 | 0,6 |
| FA (kg/m ³) = W AAL/Rasio AAL/FA | 425 | 340 | 283 |
| W NaOH (kg/m ³)= W AAL/(1+2,5) | 49 | 49 | 49 |
| W Na ₂ SiO ₃ (kg/m ³) = W AAL - W NaOH | 121 | 121 | 121 |
| BJ FA (kg/m ³) | 2030 | | |
| BJ NaOH (kg/m ³) | 1277 | | |
| BJ Na ₂ SiO ₃ (kg/m ³) | 1675 | | |
| BJ Pasir | 2535 | | |
| Bj batu pecah | 2597 | | |
| Vol : W/Bj FA (tiap 1m ³) | 0,209 | 0,167 | 0,140 |
| Vol : W/BjNaOH (tiap 1m ³) | 0,038 | 0,038 | 0,038 |
| Vol : W/BjNa ₂ SiO ₃ (tiap 1m ³) | 0,072 | 0,072 | 0,072 |
| VolW/Bj Pasir (tiap 1m ³) | 0,264 | 0,281 | 0,292 |
| Vol : W/Bjbatu pecah (tiap 1m ³) | 0,396 | 0,421 | 0,438 |
| W Pasir | 669 | 712 | 740 |
| W batu pecah | 1.029 | 1.094 | 1.138 |
| Bj Beton | 2.293 | 2.316 | 2.331 |

Tabel 4. 14 Kebutuhan bahan susun beton geopolimer tiap silinder 10x20

Silinder 10x20 cm ($\frac{1}{4}\pi \varnothing^2$) = $\frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 10^2 \text{ cm}^3 = 0,00157 \text{ m}^3$

| | | | |
|---|-------|-------|-------|
| FA (kg/m ³) | 0,667 | 0,534 | 0,445 |
| W NaOH (kg/m ³) | 0,076 | 0,076 | 0,076 |
| W Na ₂ SiO ₃ (kg/m ³) | 0,191 | 0,191 | 0,191 |
| W agg halus | 1,051 | 1,118 | 1,162 |
| W Agg kasar | 1,615 | 1,718 | 1,786 |

Tabel 4. 15 Kuat Tekan Beton Geopolimer Umur 28 Suhu Perawatan Ruangan

| No | Kode | AAL/FA | Pi (Alat tes desak) kg | A: 0,25 η. Φ ² = 0,25.3,14.10 ² cm ² | fci : P/A (kg/cm ²) | fc rata2 (kg/cm ²) |
|----|------|--------|------------------------------------|--|------------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | Gtr1 | 0,4 | 21000 | 78,5 | 268 | 229 |
| 2 | Gtr2 | 0,4 | 18000 | 78,5 | 229 | |
| 3 | Gtr3 | 0,4 | 15000 | 78,5 | 191 | |
| 4 | Gtr4 | 0,5 | 16000 | 78,5 | 204 | 195 |
| 5 | Gtr5 | 0,5 | 13000 | 78,5 | 166 | |
| 6 | Gtr6 | 0,5 | 17000 | 78,5 | 217 | |
| 7 | Gtr7 | 0,6 | 14000 | 78,5 | 178 | 157 |
| 8 | Gtr8 | 0,6 | 11000 | 78,5 | 140 | |
| 9 | Gtr9 | 0,6 | 12000 | 78,5 | 153 | |

Kuat tekan rata-rata beton geopolimer dengan rasio aktivator alkali Fly Ash 0,4 perawatan suhu ruangan sebesar 229 kg/cm². Kuat tekan rata-rata beton geopolimer dengan rasio aktivator alkali Fly Ash 0,5 perawatan suhu ruangan sebesar 195kg/cm². Dan kuat tekan rata-rata beton geopolimer dengan rasio aktivator alkali Fly Ash 0,6 perawatan suhu ruangan sebesar 157kg/cm².

Tabel 4. 16 Kuat Tekan Beton Geopolimer Umur 28 Suhu Perawatan 60°

| No | Kode | AAL/FA | Pi (Alat tes desak) kg | A: $0,25 \eta \cdot \Phi^2$ = $0,25 \cdot 3,14 \cdot 10^2$ cm ² | fci : P/A (kg/cm ²) | fc rata2 (kg/cm ²) |
|----|------|--------|------------------------------------|---|------------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | Gt61 | 0,4 | 24000 | 78,5 | 306 | 301 |
| 2 | Gt62 | 0,4 | 25000 | 78,5 | 318 | |
| 3 | Gt63 | 0,4 | 22000 | 78,5 | 280 | |
| 4 | Gt64 | 0,5 | 21000 | 78,5 | 268 | 263 |
| 5 | Gt65 | 0,5 | 19000 | 78,5 | 242 | |
| 6 | Gt66 | 0,5 | 22000 | 78,5 | 280 | |
| 7 | Gt67 | 0,6 | 17000 | 78,5 | 217 | 208 |
| 8 | Gt68 | 0,6 | 14000 | 78,5 | 178 | |
| 9 | Gt69 | 0,6 | 18000 | 78,5 | 229 | |

Kuat tekan rata-rata beton geopolimer dengan rasio aktivator alkali Fly Ash 0,4 perawatan suhu 60° sebesar 301kg/cm². Kuat tekan rata-rata beton geopolimer dengan rasio aktivator alkali Fly Ash 0,5 perawatan suhu 60° sebesar 263kg/cm². Dan kuat tekan rata-rata beton geopolimer dengan rasio aktivator alkali Fly Ash 0,6 perawatan suhu 60° sebesar 208kg/cm².

Tabel 4. 17 Kuat Tekan Beton Geopolimer Umur 28 Suhu Perawatan 90°

| No | Kode | AAL/FA | Pi (Alat tes desak) kg | A: $0,25 \eta \cdot \Phi^2$ = $0,25 \cdot 3,14 \cdot 10^2$ cm ² | fci : P/A (kg/cm ²) | fc rata2 (kg/cm ²) |
|----|------|--------|------------------------------------|---|------------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | Gt91 | 0,4 | 27000 | 78,5 | 344 | 365 |
| 2 | Gt92 | 0,4 | 30000 | 78,5 | 382 | |
| 3 | Gt93 | 0,4 | 29000 | 78,5 | 369 | |
| 4 | Gt94 | 0,5 | 25000 | 78,5 | 318 | 327 |
| 5 | Gt95 | 0,5 | 24000 | 78,5 | 306 | |
| 6 | Gt96 | 0,5 | 28000 | 78,5 | 357 | |
| 7 | Gt97 | 0,6 | 18000 | 78,5 | 229 | 251 |
| 8 | Gt98 | 0,6 | 22000 | 78,5 | 280 | |
| 9 | Gt99 | 0,6 | 19000 | 78,5 | 242 | |

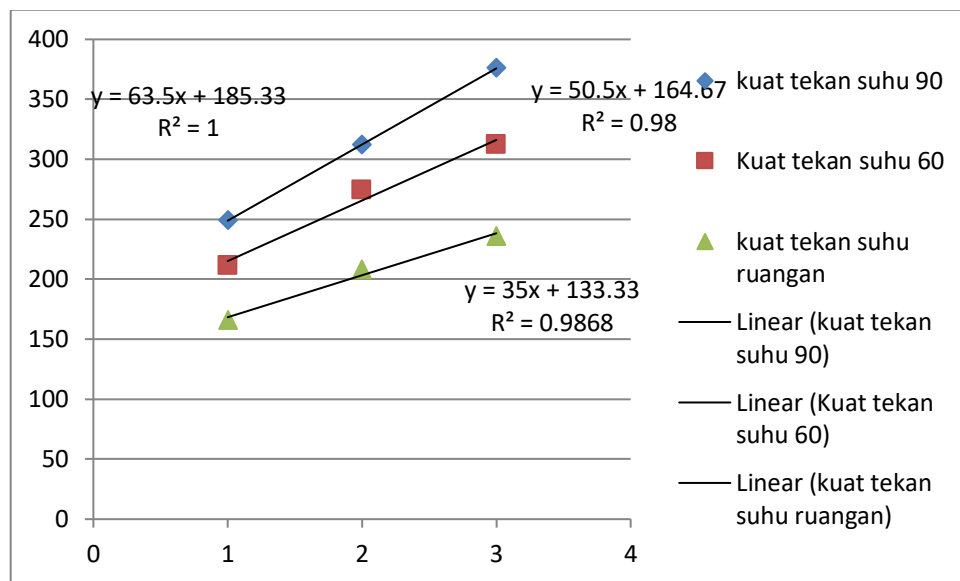
Kuat tekan rata-rata beton geopolimer dengan rasio aktivator alkali Fly Ash 0,4 perawatan suhu 90° sebesar 365kg/cm². Kuat tekan rata-rata beton geopolimer dengan rasio aktivator alkali Fly Ash 0,5 perawatan suhu 90° sebesar 327kg/cm². Dan kuat tekan rata-rata beton geopolimer dengan rasio aktivator alkali Fly Ash 0,6 perawatan suhu 90° sebesar 251kg/cm².

Kenaikan kuat tekan beton berdasarkan suhu perawatan :

- 1) untuk AAL/FA 0,4 Suhu perawatan ruangan : fc 229 kg/cm², suhu perawatan 60 : fc 301 kg/cm² dan suhu perawatan 90 fc 365 kg
- 2) untuk AAL/FA 0,5 Suhu perawatan ruangan : fc 195 kg/cm², suhu perawatan 60 : fc 263 kg/cm² dan suhu perawatan 90 fc 327 kg/
- 3) untuk AAL/FA 0,6 Suhu perawatan ruangan : fc 157 kg/cm², suhu perawatan 60 : fc 208 kg/cm² dan suhu perawatan 90 fc 251 kg/
- 4) Rata rata kenaikan kuat tekan beton dari suhu ruangan ke perawatan suhu 60 sebesar : 32,7% dari suhu 60 ke perawatan suhu 90 sebesar: 22,5%

Tabel 4.18 kenaikan kuat tekan berdasarkan suhu perawatan

| No | AAL/FA | fcrg | fc60 | fc90 |
|----|--------|------|------|------|
| 1 | 0,4 | 249 | 312 | 376 |
| 2 | 0,5 | 211 | 274 | 312 |
| 3 | 0,6 | 166 | 208 | 236 |



Gambar 4.2 Kenaikan kuat tekan beton berdasarkan variasi suhu perawatan Tabel 4. 19 Kuat Tarik Belah Beton Geopolimer Umur 28 Suhu Perawatan Ruangan

| No | Kode | AAL/FA | Pi (Alat tes desak) kg | 2 Pi (kg) | A: $\eta \cdot L \cdot \Phi = 3,14 \cdot 20 \cdot 10$ (cm ²) | fr : P/A (kg/cm ²) | fr rata2 (Kg/cm ²) |
|----|-------|--------|------------------------|-----------|--|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 | Gtrr1 | 0,4 | 3600 | 7.200 | 628 | 11,5 | 10,2 |
| 2 | Gtrr2 | 0,4 | 3200 | 6.400 | 628 | 10,2 | |
| 3 | Gtrr3 | 0,4 | 2800 | 5.600 | 628 | 8,9 | |
| 4 | Gtrr4 | 0,5 | 3200 | 6.400 | 628 | 10,2 | 9,8 |
| 5 | Gtrr5 | 0,5 | 2800 | 5.600 | 628 | 8,9 | |
| 6 | Gtrr6 | 0,5 | 3200 | 6.400 | 628 | 10,2 | |
| 7 | Gtrr7 | 0,6 | 2800 | 5.600 | 628 | 8,9 | 8,7 |
| 8 | Gtrr8 | 0,6 | 2800 | 5.600 | 628 | 8,9 | |
| 9 | Gtrr9 | 0,6 | 2600 | 5.200 | 628 | 8,3 | |

Kuat tarik belah rata-rata beton geopolimer dengan rasio aktivator alkali Fly Ash 0,4 perawatan suhu ruangan sebesar 10,2kg/cm². Kuat tarik belah rata-rata beton geopolimer dengan rasio aktivator alkali Fly Ash 0,5 perawatan suhu ruangan sebesar 9,8kg/cm². Dan Kuat tarik belah rata-rata beton geopolimer dengan rasio aktivator alkali Fly Ash 0,6 perawatan suhu ruangan sebesar 8,7kg/cm².

Tabel 4. 20 Kuat Tarik Belah Beton Geopolimer Umur 28 Suhu Perawatan 60°

| No | Kode | AAL/FA | Pi (Alat tes desak) kg | 2 Pi (kg) | A: η . L . $\Phi =$ 3,14.20.10 (cm ²) | fr : P/A (kg/cm ²) | fr rata2 (Kg/cm ²) |
|----|-------|--------|------------------------------------|--------------|---|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | Gtr61 | 0,4 | 4400 | 8.800 | 628 | 14,0 | 14,0 |
| 2 | Gtr62 | 0,4 | 4500 | 9.000 | 628 | 14,3 | |
| 3 | Gtr63 | 0,4 | 4300 | 8.600 | 628 | 13,7 | |
| 4 | Gtr64 | 0,4 | 4100 | 8.200 | 628 | 13,1 | 13,0 |
| 5 | Gtr65 | 0,4 | 3900 | 7.800 | 628 | 12,4 | |
| 6 | Gtr66 | 0,4 | 4200 | 8.400 | 628 | 13,4 | |
| 7 | Gtr67 | 0,4 | 3700 | 7.400 | 628 | 11,8 | 11,6 |
| 8 | Gtr68 | 0,4 | 3400 | 6.800 | 628 | 10,8 | |
| 9 | Gtr69 | 0,4 | 3800 | 7.600 | 628 | 12,1 | |

Kuat tarik belah rata-rata beton geopolimer dengan rasio aktivator alkali Fly Ash 0,4 perawatan suhu 60° sebesar 14kg/cm². Kuat tarik belah rata-rata beton geopolimer dengan rasio aktivator alkali Fly Ash 0,5 perawatan suhu 60° sebesar 13kg/cm². Dan kuat tekan rata-rata beton geopolimer dengan rasio aktivator alkali Fly Ash 0,6 perawatan suhu 60° sebesar 11,6kg/cm².

Tabel 4. 21 Kuat Tarik Belah Beton Geopolimer Umur 28 Suhu Perawatan 90°

| No | Kode | AAL/FA | Pi (Alat tes desak) kg | 2 Pi (kg) | A: η . L . $\Phi =$ 3,14.20.10 (cm ²) | fr : P/A (kg/cm ²) | fr rata2 (Kg/cm ²) |
|----|-------|--------|------------------------------------|--------------|---|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | Gtr91 | 0,4 | 4400 | 8.800 | 628 | 14,0 | 14,6 |
| 2 | Gtr92 | 0,4 | 4800 | 9.600 | 628 | 15,3 | |
| 3 | Gtr93 | 0,4 | 4600 | 9.200 | 628 | 14,6 | |
| 4 | Gtr94 | 0,5 | 4400 | 8.800 | 628 | 14,0 | 14,0 |
| 5 | Gtr95 | 0,5 | 4000 | 8.000 | 628 | 12,7 | |
| 6 | Gtr96 | 0,5 | 4800 | 9.600 | 628 | 15,3 | |
| 7 | Gtr97 | 0,6 | 3600 | 7.200 | 628 | 11,5 | 11,9 |
| 8 | Gtr98 | 0,6 | 4000 | 8.000 | 628 | 12,7 | |
| 9 | Gtr99 | 0,6 | 3600 | 7.200 | 628 | 11,5 | |

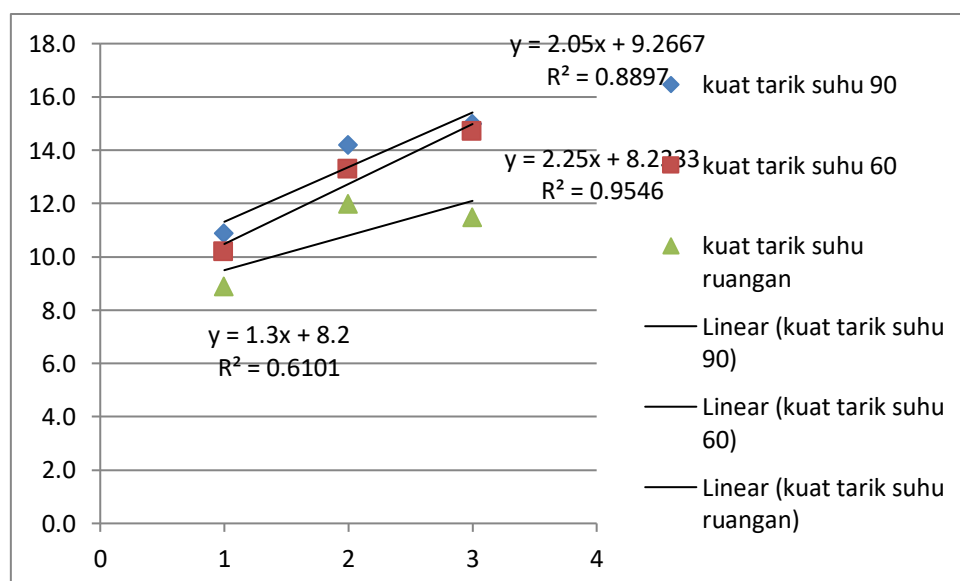
Kuat tarik belah rata-rata beton geopolimer dengan rasio aktivator alkali Fly Ash 0,4 perawatan suhu 90° sebesar 14,6kg/cm². Kuat tarik belah rata-rata beton geopolimer dengan rasio aktivator alkali Fly Ash 0,5 perawatan suhu 90° sebesar 14kg/cm². Dan kuat tekan rata-rata beton geopolimer dengan rasio aktivator alkali Fly Ash 0,6 perawatan suhu 90° sebesar 11,9kg/cm²

Kenaikan kuat tarik belah beton berdasarkan suhu perawatan :

- 1) untuk AAL/FA 0,4 Suhu perawatan ruangan : fr 10,2 kg/cm², suhu perawatan 60 : fr 14 kg/cm² dan suhu perawatan 90 fr 14,6 kg/cm²
- 2) untuk AAL/FA 0,5 Suhu perawatan ruangan : fr 9,8 kg/cm², suhu perawatan 60 : fr 13 kg/cm² dan suhu perawatan 90 fr 14 kg/cm²
- 3) untuk AAL/FA 0,6 Suhu perawatan ruangan : fr 8,7 kg/cm², suhu perawatan 60 : fr 11,6 kg/cm² dan suhu perawatan 90 fr 11,9 kg/cm²
- 4) Rata rata kenaikan kuat tarik belah beton dari suhu ruangan ke perawatan suhu 60 sebesar : 34,4% dari suhu 60 ke perawatan suhu 90 sebesar : 4,7%

Tabel 4. 22 kenaikan kuat tarik belah berdasarkan variasi suhu perawatan

| No | AAL/FA | frr | fr60 | fr90 |
|----|--------|------|------|------|
| 1 | 0,4 | 10,9 | 14,2 | 15,0 |
| 2 | 0,5 | 10,2 | 13,3 | 14,7 |
| 3 | 0,6 | 8,9 | 12,0 | 11,5 |



Gambar 4.3 kenaikan kuat tarik belah berdasarkan variasi suhu perawatan

Tabel 4. 23 Kuat Tarik Belah dan Kuat Tekan Beton Geopolimer Umur 28 Suhu Perawatan Ruangan

| No | AAL/FA | fc' (kg/cm ²) | fr (kg/cm ²) |
|----|--------|---------------------------|--------------------------|
| 1 | 0,4 | 268 | 11,5 |
| 2 | 0,4 | 229 | 10,2 |
| 3 | 0,4 | 191 | 8,9 |
| 4 | 0,5 | 204 | 10,2 |
| 5 | 0,5 | 166 | 8,9 |
| 6 | 0,5 | 217 | 10,2 |
| 7 | 0,6 | 178 | 8,9 |
| 8 | 0,6 | 140 | 8,9 |
| 9 | 0,6 | 153 | 8,3 |

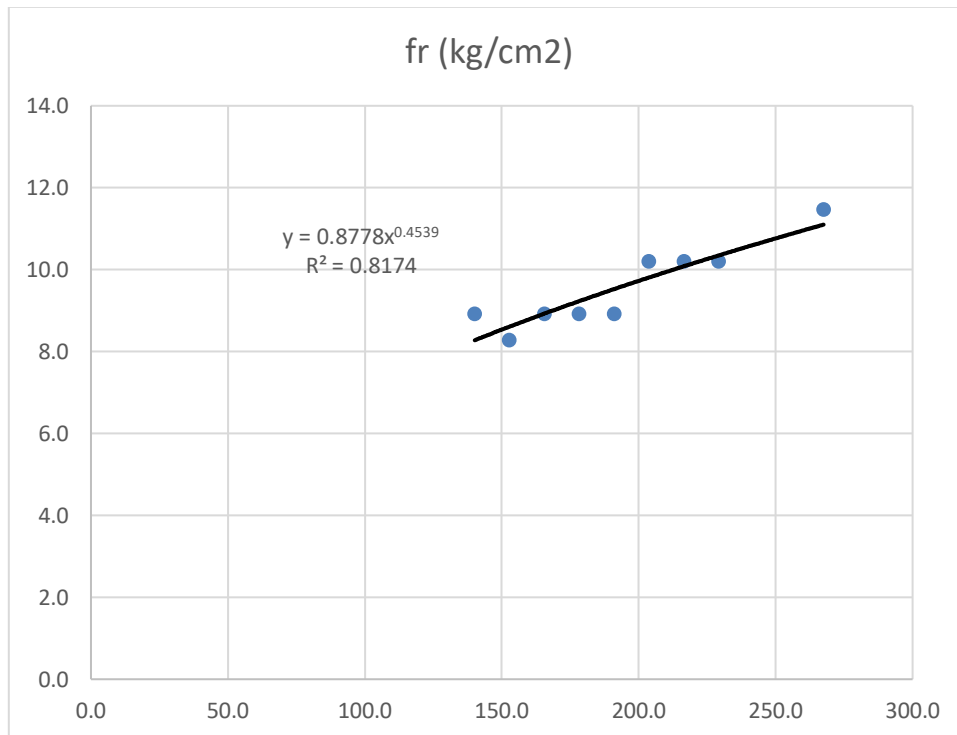
Analisis Model hubungan kuat tarik belah dan kuat tekan beton geopolimer dilakukan 2 cara

- 1) Dengan menghitung rata-rata kuat tekan dan tarik belah sebagaimana yang dilakukan ACI (American Concrete Institute).
- 2) Dengan menggunakan regresi power sebagaimana dilakukan oleh peneliti lain yang memiliki nilai angka korelasi tinggi, yang menunjukkan hubungan antara kuat tekan dan kuat tarik belah kuat. Cara pembuatan regresi dilakukan dengan alat bantu excel dengan langkah : diblock bagian tabel hubungan kuat tekan dan kuat tarik belah, selanjutnya klik insert dan pilih menu Scatter, klik bagian grafik, selanjutnya klik kanan dan cari menu add trendline dan klik menu tersebut, cari menu power dan centang menu display R dan display Equation.

Hasil perhitungan kuat tekan dan kuat tarik belah rata-rata sebagaimana dilakukan ACI sebagai berikut :

- 1) Suhu perawatan ruangan untuk AAL/FA 0,4 diperoleh $f_r = 0,044 f_c$
- 2) Suhu perawatan ruangan untuk AAL/FA 0,5 diperoleh $f_r = 0,050 f_c$
- 3) Suhu perawatan ruangan untuk AAL/FA 0,6 diperoleh $f_r = 0,055 f_c$
- 4) Suhu perawatan 60 untuk AAL/FA 0,4 diperoleh $f_r = 0,046 f_c$
- 5) Suhu perawatan 60 untuk AAL/FA 0,5 diperoleh $f_r = 0,049 f_c$

- 6) Suhu perawatan 60 untuk AAL/FA 0,6 diperoleh $f_r = 0,055 f_c$
- 7) Suhu perawatan 90 untuk AAL/FA 0,4 diperoleh $f_r = 0,040 f_c$
- 8) Suhu perawatan 90 untuk AAL/FA 0,5 diperoleh $f_r = 0,042 f_c$
- 9) Suhu perawatan 90 untuk AAL/FA 0,6 diperoleh $f_r = 0,047 f_c$

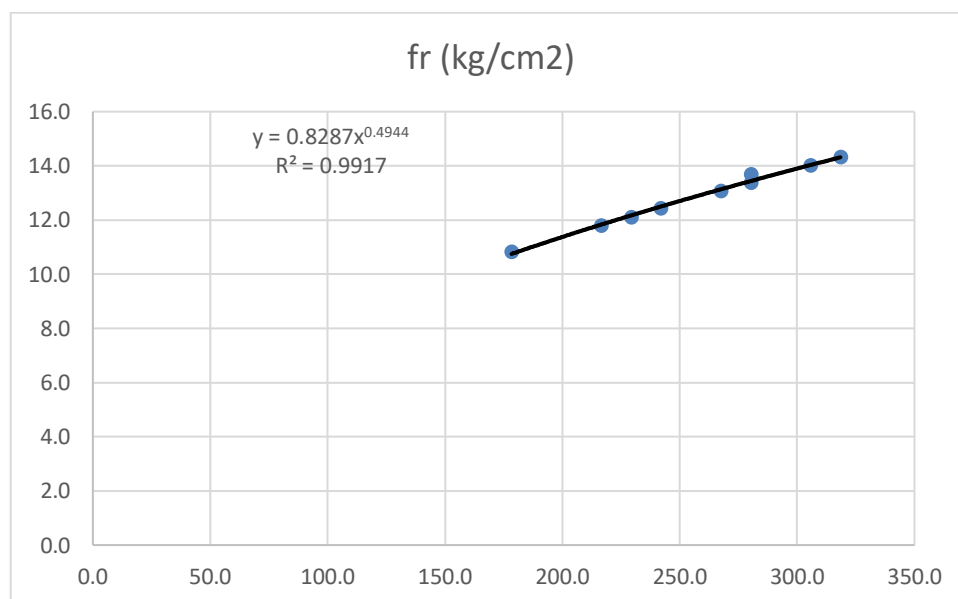


Gambar 4.4 Model Persamaan Kuat Tarik belah dan kuat tekan beton geopolimer umur 28 suhu perawatan ruangan

Model persamaan kuat tarik belah dengan kuat tekan beton geopolimer umur 28 hari perawatan suhu ruangan hasil regresi power dengan alat bantu excel ditunjukkan dengan persamaan $f_r = 0,8778 f_c^{0,4539}$, angka korelasi 0,8399 yang menunjukkan hubungan yang sangat kuat antara kuat Tarik belah dengan kuat tekan beton. Persamaan $f_r = 0,8778 f_c^{0,4539}$ identik dengan persamaan dalam bentuk kuadrat : $f_r = 0,708 f_c^{0,5}$

Tabel 4.24 Kuat Tarik Belah dan Kuat Tekan Beton Geopolimer Umur 28 Suhu Perawatan 60°

| No | AAL/FA | fc' (kg/cm ²) | fr (kg/cm ²) |
|----|--------|---------------------------|--------------------------|
| 1 | 0,4 | 305,7 | 14,0 |
| 2 | 0,4 | 318,5 | 14,3 |
| 3 | 0,4 | 280,3 | 13,7 |
| 4 | 0,5 | 267,5 | 13,1 |
| 5 | 0,5 | 242,0 | 12,4 |
| 6 | 0,5 | 280,3 | 13,4 |
| 7 | 0,6 | 216,6 | 11,8 |
| 8 | 0,6 | 178,3 | 10,8 |
| 9 | 0,6 | 229,3 | 12,1 |



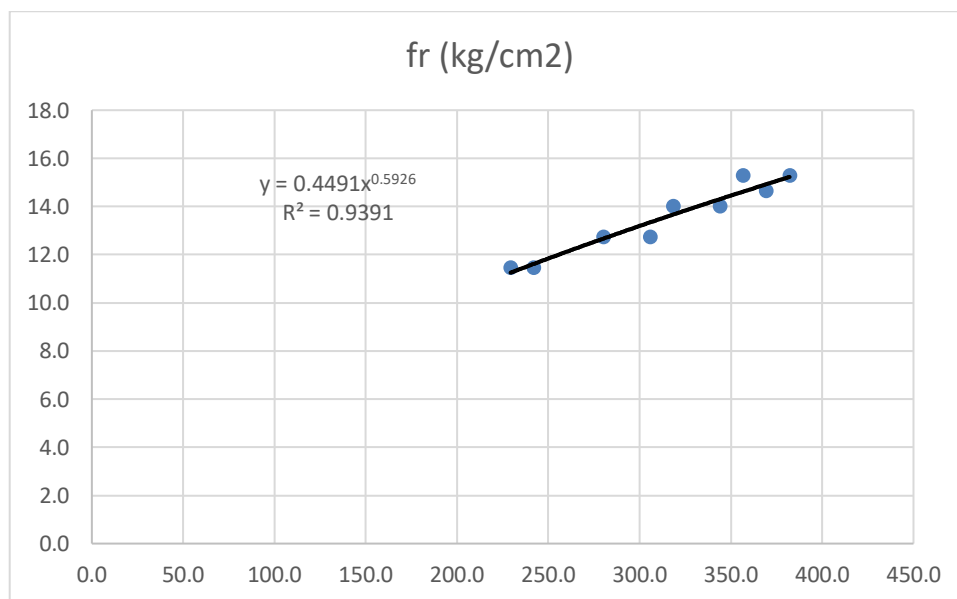
Gambar 4.3 model hubungan Kuat Tarik belah dan kuat tekan beton geopolimer umur 28 suhu perawatan 60

Model persamaan kuat tarik belah dengan kuat tekan beton geopolimer umur 28 hari perawatan suhu 60° hasil regresi power dengan alat bantu excel ditunjukkan dengan persamaan $fr = 0,8287 fc'^{0,4955}$, angka korelasi 0,991 yang menunjukkan hubungan yang sangat kuat antara kuat Tarik belah dengan kuat tekan beton Persamaan $fr = 0,8778$

$f_c^{0,4539}$ identik dengan persamaan dalam bentuk kuadrat : $f_r = 0,808 f_c^{0,5}$

Tabel 4.25 Kuat Tarik Belah dan Kuat Tekan Beton Geopolimer Umur 28 Suhu Perawatan 90°

| No | AAL/FA | f_c' (kg/cm ²) | f_r (kg/cm ²) |
|----|--------|------------------------------|-----------------------------|
| 1 | 0,4 | 343,9 | 14,0 |
| 2 | 0,4 | 382,2 | 15,3 |
| 3 | 0,4 | 369,4 | 14,6 |
| 4 | 0,5 | 318,5 | 14,0 |
| 5 | 0,5 | 305,7 | 12,7 |
| 6 | 0,5 | 356,7 | 15,3 |
| 7 | 0,6 | 229,3 | 11,5 |
| 8 | 0,6 | 280,3 | 12,7 |
| 9 | 0,6 | 242,0 | 11,5 |



Gambar 4.4 Model Persamaan Kuat Tarik Belah dan Kuat Tekan Beton Geopolimer Umur 28 Suhu Perawatan 90

Model persamaan kuat tarik belah dengan kuat tekan beton geopolimer umur 28 hari perawatan suhu 90° hasil regresi power dengan alat bantu excel ditunjukkan dengan persamaan $f_r = 0,4491 f_c^{0,5926}$, angka korelasi 0,9339 yang menunjukkan persamaan yang sangat kuat antara kuat Tarik belah dengan kuat tekan beton. Persamaan $f_r =$

$0,8778 f_c^{0,4539}$ identik dengan persamaan dalam bentuk kuadrat . Hal ini sejalan dengan hasil penelitian terdahulu yang dilakukan oleh ACI 363.R-92, kekuatan tarik belah untuk beton normal sebesar $= 0.5 \sqrt{f_c'}$ sampai $0.6 \sqrt{f_c'}$ MPa. Hasil penelitian Dewira Rante Pangloly dkk(2018) kuat tarik belah beton geopolimer $= 0.5 \sqrt{f_c'}$ sampai $0.6 \sqrt{f_c'}$ MPa. Menurut Geertruida Eveline Untu dkk(2015) kuat tarik belah beton semen sebesar $0,52 \sqrt{f_c'}$ sampai $0.55 \sqrt{f_c'}$ MPa dan 0,09 sampai 0,12 fc. Muhammad Fakhru Rozi (2020) kuat tarik beton geopolimer sebesar 0,23 fc. Daniel Mandala Putra (2015) kuat tarik belah beton semen ringan sebesar 0,496 MPa sampai 0,664 MPa untuk beton normal sebesar 0,332 MPa sampai 0,496 MPa untuk beton ringan

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian model persamaan kuat tarik belah dengan kuat tekan beton geopolimer dengan variasi suhu perawatan dapat disimpulkan sebagai berikut :

- 1) Rata rata kenaikan kuat tekan beton dari suhu ruangan ke perawatan suhu 60 sebesar : 32,7% dari suhu 60 ke perawatan suhu 90 sebesar: 22,5%
- 2) Rata rata kenaikan kuat tarik belah beton dari suhu ruangan ke perawatan suhu 60 sebesar : 34,4% dari suhu 60 ke perawatan suhu 90 sebesar: 4,7%
- 3) Model persamaan kuat tarik belah dengan kuat tekan beton geopolimer umur 28 hari perawatan suhu ruangan ditunjukkan dengan persamaan $f_r = 0,708 f_c^{0,5}$
Perawatan suhu 60° ditunjukkan dengan persamaan $f_r = 0,808 f_c^{0,5}$. Perawatan suhu 90° ditunjukkan dengan persamaan

5.2 Saran

Dari hasil penelitian model persamaan kuat tarik belah dengan kuat tekan beton geopolimer dengan variasi suhu perawatan dapat disarankan sebagai berikut :

- 1) Perlunya pemilihan bahan yang sesuai standart
- 2) Perlunya dilakukan lebih lanjut tentang beberapa komposisi bahan susun beton geopolimer dan pengaruhnya terhadap kekuatan betonnya, misalnya kadar aktifator alkali,

Daftar Pustaka

- 1) Achmad, Djedjen(2015). *Efek Kadar Lumpur Terhadap Kekuatan Beton Geopolimer*. Jakarta: Politeknologi Vol.14 No.1
- 2) Hadi MNS, Farhan NA, Sheikh MN. Design of geopolymer concrete with GGBFS at ambient curing condition using Taguchi method. *Constr Build Mater* 2017;140 (Supplement C):424–31.
- 3) Hadi MNS, Zhang H, Parkinson S. Optimum mix design of geopolymer pastes and concretes cured in ambient condition based on compressive strength, setting time and workability. *J Build Eng* 2019;23:301–13. [56] Neville AM. *Properties of concrete*. Longman London; 1995
- 4) Hardjito D, Rangan BV. *Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete*. Curtin University of Technology; 2005.
- 5) Herwani, Ivindra Pane , Iswandi Imran, Bambang Budiono : *Compressive Strength of Concrete Geopolymer Based on Flying Ash with Variable Sodium Hydroxide (NaOH) Solution Molarity*, MATEC Web of Coferences 147 01004 (2018)
- 6) Ekaputri, Januarti Jaya.dkk(2007). *Sifat Mekanika Beton Geopolimer Berbahan Dasar FlyAsh Jawa Power Paiton Sebagai Material Alternatif*. *Jurnal Pondasi*, Vol13 No2 Desember 2007 ISSN 0853-814X.
- 7) Ekaputri, Januarti Jaya.dkk(2007). *Sodium sebagai Aktivator Fly Ash, Trass dan Lumpur Sidoarjo dalam Beton Geopolimer*. ISSN 0853-2982
- 8) Joseph B, Mathew G. Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete. *Sci Iran* 2012;19(5):1188–94.
- 9) Junaid MT, Kayali O, Khennane A, Black J. A mix design procedure for low calcium alkali activated fly ash-based concretes. *Constr Build Mater* 2015;79:301–10
- 10) Ling Y, Wang K, Li W, Shi G, Lu P. Effect of slag on the mechanical properties and bond strength of fly ash-based engineered geopolymer composites. *Compos B Eng* 2019;164:747–57.
- 11) Luhar, Salmabanu(2015). *Durability Studies of Fly Ash Based Geopolymer Concrete*. Rajasthan: ISSN: 2248-9622, Vol. 5, Issue 8, (Part - 4) August 2015

- 12) Khalaj G, Hassani SES, Khezrloo A, Haratifar E-a-d. Split tensile strength of OPC-based geopolymers: application of DOE method in evaluating the effect of production parameters and their optimum condition. *Ceram Int* 2014;40(7): 10945–52.
- 13) Phoo-ngernkham T, Phiangphimai C, Damrongwiriyanupap N, Hanjit Phoo-ngernkham T, Phiangphimai C, Damrongwiriyanupap N, Hanjitsuwan S, Thumrongvut J, Chindaprasirt P. A mix design procedure for alkali-activated high-calcium fly ash concrete cured at ambient temperature. *Ann Mater Sci Eng* 2018; 2018:1–13.
- 14) Pratikto & Susilowati, Anni(2013). *Beton Instan Tanpa Semen dan Tanpa Pemadatan manual*. Depok: Politeknologi Vol.12 No.3 JANUARI 2013
- 15) Provis JL, Deventer JSJV. Alkali activated materials. Netherlands: Springer; 2014.
- 16) Puput Risdanareni, Triwulan, Januarti, : Pengaruh Molaritas Aktivator Alkalin Terhadap Kuat Mekanik Beton Geopolymer dengan Tras Sebahai Bahan Pengisi, Seminar Nasional X, 2014, Teknik Sipil ITS Surabaya