

BAB III

METODE PENELITIAN

A. Jenis Penelitian

Penelitian ini termasuk ke dalam jenis eksperimen dengan pendekatan kuantitatif yang terdiri dari beberapa tahap kegiatan yang mengacu kepada SNI dan jurnal-jurnal penelitian terdahulu.

B. Subjek dan Objek Penelitian

1. Subjek

Subjek dalam penelitian ini adalah abu terbang yang berasal dari Pabrik Spiritus Madukismo sebagai pengganti sebagian pasir dalam campuran beton.

2. Objek

Objek dalam penelitian ini adalah *strength-weight ratio* dan *material cost-strength ratio* beton yang dihasilkan dari penggantian sebagian pasir dengan abu terbang.

C. Variabel Penelitian

1. Variabel Bebas

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah variasi penggunaan abu terbang sebagai pengganti sebagian pasir dalam beton sebanyak 0%, 20%, 35%, dan 50% berdasarkan proporsi berat setiap bahan terhadap masing-masing kebutuhan semen Portland.

2. Variable Terikat

Variabel terikat dalam penelitian ini adalah nilai *slump*, kuat tekan, berat satuan, dan biaya material beton.

3. Variabel Kontrol

Variabel kontrol dalam penelitian ini adalah tipe semen, jenis agregat, jenis air, jenis abu terbang, dan *aggregate-cement ratio* di setiap tipe beton.

D. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Bahan Bangunan JPTSP FT UNY dalam sekitar kurun waktu tiga bulan yang dimulai dari Februari sampai dengan April 2019.

E. Alat dan Bahan Penelitian

1. Alat

a. Ember

Ember digunakan sebagai wadah bahan campuran beton yang telah dipersiapkan untuk pengujian karakteristik atau pembuatan benda uji.



Gambar 13. Ember

b. Kain Lap

Kain lap digunakan untuk menghilangkan air pada permukaan agregat kasar agar menjadi kondisi jenuh kering permukaan atau *Saturated Surface Dry* (SSD), dan untuk mengelap peralatan yang disyaratkan dalam kondisi SSD selama penggunaannya seperti perkakas uji *slump* dan mesin pengaduk.



Gambar 14. Kain Lap

c. Perkakas Uji kondisi Agregat Halus

Perkakas uji kondisi agregat halus adalah seperangkat alat yang digunakan untuk memeriksa kondisi agregat halus yang terdiri dari dua alat yakni:

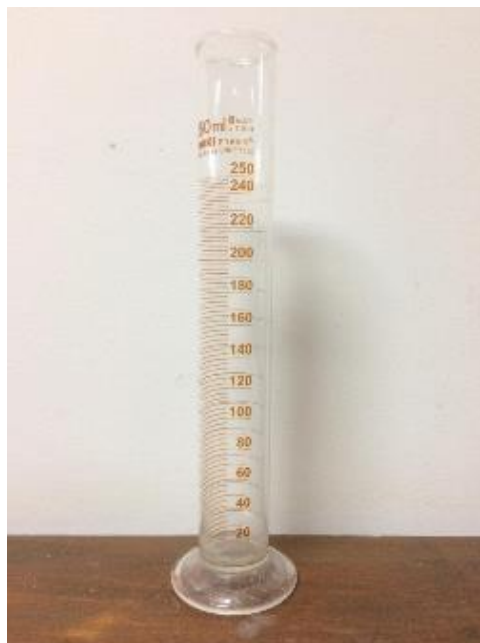
- a) Kerucut terpancung sebagai cetakan agregat halus yang memiliki diameter dalam atas 40 mm, diameter dalam bawah 90 mm, dan tinggi 75 mm.
- b) Batang penumbuk dengan berat 340 gram dan diameter kepala 25 mm.



Gambar 15. Perkakas Uji Kondisi Agregat Halus

d. Gelas Ukur

Gelas ukur digunakan sebagai wadah agregat saat pengujian berat jenis agregat dan kadar lumpur pasir serta untuk menakar volume air saat pembuatan benda uji.



Gambar 16. Gelas Ukur

e. Ayakan

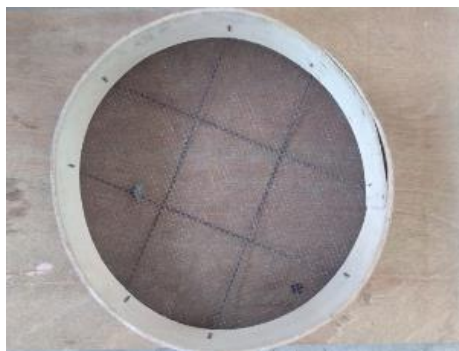
Ayakan digunakan sebagai alat pemisah antar-ukuran partikel agregat. Dua jenis ayakan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- c) Ayakan gradasi yang tersusun berdasarkan ukuran sub-ayakan dari terbesar ke terkecil sesuai dengan Tabel 3 untuk agregat halus dan Tabel 4 untuk agregat kasar.



Gambar 17. Ayakan Gradasi

- d) Ayakan pencuci yang digunakan sebagai pemisah agregat kasar dari agregat halus dan lumpur saat pencucian agregat kasar.



Gambar 18. Ayakan Pencuci

f. Palu Kayu

Palu kayu digunakan sebagai alat untuk memadatkan campuran beton segar di dalam cetakan silinder.



Gambar 19. Palu Kayu

g. Perkakas Uji *Slump*

Perkakas uji *slump* adalah seperangkat alat yang digunakan dalam pengujian *slump*. Perkakas uji *slump* terdiri dari tiga alat yakni:

- e) Kerucut Abrams sebagai cetakan campuran beton segar yang memiliki diameter dalam atas 10 cm, diameter dalam bawah 20 cm, dan tinggi 30 cm.
- f) Batang penusuk dengan diameter 16 mm, panjang 60 cm, ujung berbentuk setengah bulat berdiameter 16 mm.
- g) Alas pelat dengan permukaan datar.



Gambar 20. Perkakas Uji *Slump*

h. Cetakan Silinder

Cetakan silinder digunakan sebagai wadah campuran beton segar untuk mengeras yang memiliki diameter dalam 15 cm dan tinggi 30 cm.



Gambar 21. Cetakan Silinder

i. Bak Perendaman

Bak perendaman digunakan sebagai tempat perendaman saat perawatan benda uji.



Gambar 22. Bak Perendaman

j. Cetakan Penutup Silinder Vertikal

Perkakas penutup vertikal (*vertical cylinder capper*) digunakan sebagai wadah belerang cair saat penutupan permukaan atas benda uji silinder.



Gambar 23. Cetakan Penutup Silinder Vertikal

k. Neraca

Neraca digunakan untuk mengukur berat seluruh bahan campuran beton dan benda uji yang telah dibuat. Tiga jenis neraca yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- h) Neraca Ohaus akurasi 0.01 gram yang digunakan untuk mengukur berat agregat siap uji dalam volume sangat sedikit seperti dari hasil pengayakan gradasi.



Gambar 24. Neraca Ohaus Akurasi 0.01 Gram

- i) Neraca keseimbangan berat (*heavy duty solution balance*) akurasi 1 gram yang digunakan untuk mengukur berat benda uji dan agregat siap uji dalam volume sedikit.



Gambar 25. Neraca Keseimbangan Berat Akurasi 1 Gram

- j) Neraca skala bangku (*bench scale*) yang digunakan untuk mengukur bahan siap campur untuk pembuatan benda uji dengan kapasitas 50 kg.



Gambar 26. Neraca Skala Bangku

l. Meteran Gulung

Meteran gulung digunakan untuk mengukur nilai *slump*.



Gambar 27. Meteran Gulung

m. Jangka Sorong

Jangka sorong digunakan untuk mengukur diameter dan tinggi benda uji.



Gambar 28. Jangka Sorong

n. Mesin Gradasi

Mesin gradasi digunakan sebagai pengguncang ayakan gradasi saat pengujian gradasi agregat.



Gambar 29. Mesin Gradasi

o. Mesin Los Angeles

Mesin Los Angeles digunakan sebagai pengabrasi yang beroperasi dengan cara berputar secara vertikal saat pengujian kekerasan agregat kasar. Di dalam

mesin Los Angeles terdapat bilah baja melintang penuh dengan tinggi 9 cm serta 11 bola baja dengan diameter 4.7 cm dan berat 440 gram per bola.



Gambar 30. Mesin Los Angeles

p. Oven

Oven digunakan untuk menghilangkan kadar air yang terkandung dalam agregat siap uji.



Gambar 31. Oven

q. Mesin Pengaduk

Mesin pengaduk digunakan saat proses penampuran bahan campuran beton yang kapasitas untuk membuat sekitar enam benda uji silinder.



Gambar 32. Mesin Pengaduk

r. Pemanas Senyawa Penutup

Pemanas senyawa penutup (*capping compound warmer*) digunakan untuk melelehkan senyawa sebagai tutup permukaan atas benda uji.



Gambar 33. Pemanas Senyawa Penutup

s. Mesin Uji Tekan

Mesin uji tekan digunakan untuk memberikan gaya tekan axial terhadap permukaan atas benda uji sampai terjadi perubahan bentuk.



Gambar 34. Mesin Uji Tekan

2. Bahan

a. Semen Portland

Tipe semen Portland yang digunakan dalam penelitian ini adalah Tipe I berasal dari PT. Bantul Holcim *Readymix*.



Gambar 35. Semen Portland Tipe I

b. Pasir Alami

Agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini adalah pasir alami berasal dari Kali Progo.



Gambar 36. Pasir Alami

c. Batu Pecah

Agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini adalah batu pecah berasal dari Gunung Merapi.



Gambar 37. Batu Pecah

d. Abu Terbang

Abu terbang yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari Pabrik Spiritus Madukismo.



Gambar 38. Abu Terbang

e. Air

Air yang digunakan dalam penelitian ini adalah air sumur bor di Laboratorium Bahan Bangunan JPTSP FT UNY.



Gambar 39. Air

f. Belerang

Belerang digunakan sebagai senyawa penutup permukaan atas benda uji pada saat dilakukan uji tekan beton.



Gambar 40. Belerang

g. Oli

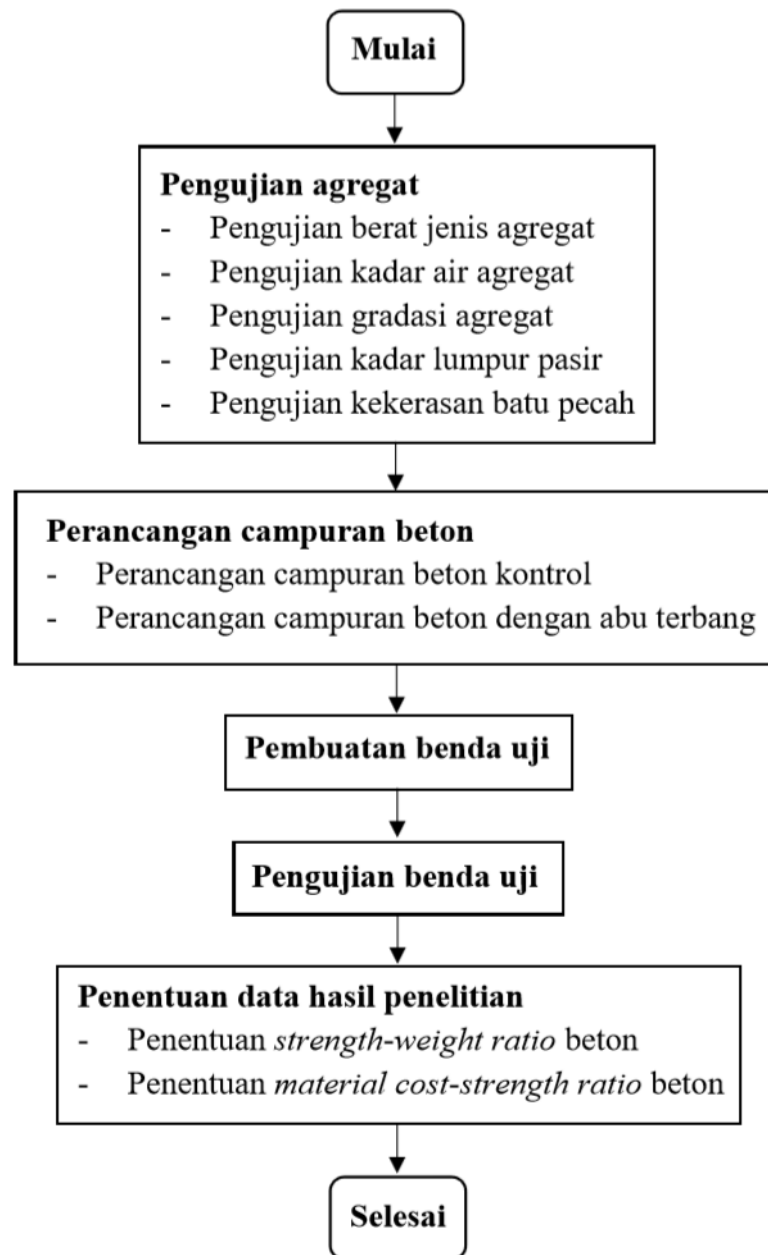
Oli digunakan sebagai pelumas cetakan silinder dan cetakan penutup silinder vertikal.



Gambar 41. Oli

F. Prosedur Penelitian

Penelitian ini terdiri dari lima tahap kegiatan yakni pengujian agregat, perancangan campuran beton, pembuatan benda uji, pengujian benda uji, dan penentuan data hasil penelitian yang diperlihatkan pada Gambar 42.



Gambar 42. Alir Prosedur Penelitian

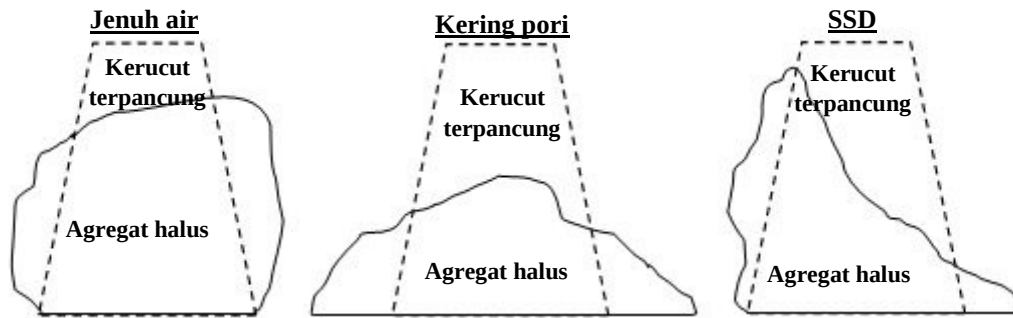
1. Pengujian Agregat

a. Pengujian Berat Jenis Agregat

Berat jenis agregat adalah perbandingan berat agregat terhadap berat air yang volumenya sama dengan volume agregat tersebut. Pengujian berat jenis pasir dan batu pecah harus dilakukan karena campuran beton kontrol akan dirancang dengan

metode SNI 03-2834-2000. Dalam SNI 03-2834-2000, berat jenis pasir dan batu pecah dibutuhkan untuk menentukan berat satuan campuran beton segar. Pengujian berat jenis dalam penelitian ini dilakukan pada agregat dalam kondisi SSD dengan cara pengujian sebagai berikut:

- 1) Agregat seberat yang dibutuhkan direndam dalam ember yang berisi air selama ± 24 jam.
- 2) Agregat dalam kondisi jenuh air kemudian dibuat dalam kondisi SSD dengan cara:
 - a) Untuk agregat halus ditiriskan di tempat dengan permukaan yang menyerap air dan tidak langsung terkena sinar matahari selama waktu tertentu. Kondisi SSD diperiksa menggunakan perkakas uji SSD dengan cara:
 - Agregat halus dimasukkan ke dalam kerucut terpancung sebanyak tiga kali lapis yang di setiap lapisan memiliki tebal $\frac{1}{3}$ tinggi kerucut terpancung dan ditumbuk menggunakan batang penumbuk sebanyak 8 kali. Kemudian, sedikit ruang kosong di bagian atas kerucut terpancung diisi dengan pasir secukupnya dan ditumbuk sebanyak satu kali.
 - Kerucut terpancung diangkat secara perlahan, kemudian kondisi agregat halus diperiksa. Ilustrasi agregat halus dalam kondisi jenuh air, kering pori, dan SSD diperlihatkan pada Gambar 43.
 - b) Untuk batu pecah ditiriskan, kemudian air pada permukaannya dihilangkan menggunakan kain lap.



Gambar 43. Ilustrasi Kondisi Agregat Halus

- 3) Agregat yang telah dalam kondisi SSD dipersiapkan sebanyak lima sampel seberat yang dibutuhkan, kemudian secara perlahan dimasukkan ke dalam gelas ukur yang telah berisi air dengan volume perkiraan tertentu yang dapat merendam seluruh butiran agregat.
- 4) Berat jenis per-sampel agregat dihitung menggunakan Persamaan 12 dan berat jenis agregat adalah rerata berat jenis dari lima sampel.

$$SG = \frac{w_{A1}}{(v_{W2} - v_{W1})} \quad \text{Persamaan (12)}$$

dimana

SG : berat jenis agregat

w_{A1} : berat agregat dalam kondisi SSD (g)

v_{W2} : volume air di dalam gelas ukur setelah dimasuki oleh agregat (ml)

v_{W1} : volume air di dalam gelas ukur sebelum dimasuki oleh agregat (ml)

b. Pengujian Kadar Air Agregat

Kadar air agregat adalah persentase air yang dapat mengisi seluruh pori butiran agregat. Pengujian kadar air agregat dilakukan untuk mengetahui persentase

pori terhadap volume butiran agregat. Adapun cara pengujian kadar air agregat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Agregat seberat yang dibutuhkan direndam dalam ember yang berisi air selama ± 24 jam, kemudian dibuat dalam kondisi SSD.
- 2) Agregat yang sudah dalam kondisi SSD diambil sebanyak lima sampel seberat yang dibutuhkan, kemudian dimasukkan ke dalam oven dengan suhu $110 \pm 5^\circ \text{C}$ selama ± 24 jam.
- 3) Berat setiap sampel agregat dalam kondisi kering pori diukur menggunakan neraca keseimbangan berat.
- 4) Kadar air per-sampel agregat dihitung menggunakan Persamaan 13 dan kadar air agregat adalah rerata kadar lumpur dari lima sampel.

$$a = \frac{(w_{A1} - w_{A2})}{w_{A1}} \times 100 \quad \text{Persamaan (13)}$$

dimana

a : kadar air agregat (%)

w_{A2} : berat agregat dalam kondisi kering pori (g)

c. Pengujian Gradasi Agregat

Gradasi agregat adalah pembagian butiran agregat berdasarkan ukuran tertentu yang mempengaruhi kelayakan pengerjaan dan kepadatan beton. Pengujian gradasi agregat dilakukan untuk mengetahui modulus halus butir (*fineness modulus*) agregat yakni indeks yang digunakan untuk mengukur kekasaran butiran agregat, dimana semakin besar modulus halus butir maka agregat semakin memiliki

ukuran butiran yang besar. Kemudian, pengujian gradasi pasir bertujuan untuk mengetahui zona pasir dan pengujian gradasi batu pecah bertujuan untuk mengetahui ukuran maksimum agregat, yang keduanya dibutuhkan dalam perancangan campuran beton dengan metode SNI 03-2834-2000. Adapun cara pengujian gradasi agregat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Agregat seberat yang dibutuhkan dimasukkan ke dalam oven dengan suhu $110 \pm 5^\circ \text{C}$ selama ± 24 jam.
- 2) Agregat dalam keadaan kering pori dipersiapkan sebanyak dua sampel dengan berat tertentu, kemudian dimasukkan ke dalam ayakan gradasi dengan susunan untuk agregat halus dan kasar sesuai dengan SNI 03-2834-2000 (secara berurutan sesuai dengan Tabel 3 dan 4).
- 3) Ayakan gradasi yang berisi agregat diletakkan pada mesin gradasi yang kemudian dioperasikan selama tiga menit.
- 4) Ayakan gradasi diputar secara horizontal dengan sudut 90° dan mesin gradasi dioperasikan kembali selama dua menit, kemudian agregat yang terdapat di setiap ayakan gradasi dikeluarkan dan diukur beratnya menggunakan neraca.
- 5) Persentase butiran agregat kumulatif yang lolos ayakan tertentu dihitung menggunakan Persamaan 14. Kemudian zona pasir dan ukuran maksimum agregat secara berurutan ditentukan berdasarkan Tabel 3 dan 4

$$lk_x = 100 - tk_x \quad \text{Persamaan (14)}$$

dengan

$$tk_x = tk_{x+1} + t_x \quad \text{Persamaan (15)}$$

dimana

lk_x : persentase butiran agregat komulatif yang lolos dari ayakan ke-x

tk_x : persentase butiran agregat komulatif yang tertahan di ayakan ke-x

tk_{x+1} : persentase butiran agregat komulatif yang tertahan di satu ayakan atas ayakan ke-x

t_x : persentase jumlah agregat dari dua sampel yang tertahan di ayakan ke-x

6) Modulus halus butir agregat dihitung menggunakan Persamaan 16.

$$FM = \frac{\sum tk_x}{100} \quad \text{Persamaan (16)}$$

dimana

FM : modulus halus butir agregat

d. Pengujian Kadar Lumpur Pasir

Pengujian kadar lumpur pasir dilakukan untuk memastikan pasir yang digunakan dalam penelitian ini memenuhi persyaratan kadar lumpur sesuai dengan SK SNI S-04-1989-F. Adapun pengujian kadar lumpur pasir dalam penelitian ini dilakukan dengan cara sebagai berikut:

- 1) Pasir dari tempat penampungan dipersiapkan sebanyak lima sampel dengan volume 105 ± 3 ml, kemudian dimasukkan ke dalam gelas ukur yang berisi air dengan volume yang dapat merendam seluruh butiran pasir.
- 2) Gelas ukur yang berisi pasir dan air dikocok selama 30 detik.

- 3) Butiran pasir yang menempel di dinding dalam gelas ukur dibersihkan dengan air tambahan secukupnya.
- 4) Sampel pasir yang berada di gelas ukur dibiarkan mengendap selama ± 24 jam.
- 5) Kadar lumpur per-sampel dihitung menggunakan Persamaan 17 dan kadar lumpur pasir adalah rerata kadar lumpur dari lima sampel.

$$D = \frac{v_D}{(v_S + v_D)} \times 100 \quad \text{Persamaan (17)}$$

dimana

D : kadar lumpur pasir (%)

v_D : volume lumpur yang berada di atas pasir di dalam gelas ukur (ml)

v_S : volume pasir di dalam gelas ukur (ml)

e. Pengujian Kekerasan Batu Pecah

Pengujian kekerasan batu pecah dilakukan untuk memastikan batu pecah yang digunakan dalam penelitian ini memenuhi persyaratan kekerasan sesuai dengan SII 0052-80 (Tabel 5). Adapun pengujian kekerasan batu pecah dalam penelitian ini dilakukan dengan cara sebagai berikut:

- 1) Batu pecah berukuran butiran yang lolos dari ayakan 20 mm dan tertinggal di ayakan 15 mm dipersiapkan seberat yang dibutuhkan, kemudian dibersihkan dari kotoran menggunakan ayakan pencuci dan air, kemudian dimasukkan ke dalam oven dengan suhu $110 \pm 5^\circ \text{C}$ selama ± 24 jam.

- 2) Batu pecah dalam kondisi kering pori dipersiapkan sebanyak dua sampel dengan berat 5000 g per-sampel, kemudian dimasukkan ke dalam mesin Los Angeles yang dioperasikan sebanyak 500 putaran.
- 3) Sampel batu pecah terabrasi diayak menggunakan ayakan 1.7 mm, kemudian butiran yang tertahan dicuci menggunakan air dan dimasukkan ke dalam oven dengan suhu $110 \pm 5^\circ \text{C}$ selama ± 24 jam.
- 4) Berat batu pecah per-sampel dalam kondisi kering udara diukur menggunakan neraca keseimbangan berat.
- 5) Bagian per-sampel batu pecah yang hancur dihitung menggunakan Persamaan 18 dan bagian dari batu pecah yang hancur adalah rerata dari dua sampel.

$$L_{CS} = \frac{(w_{CS1} - w_{CS2})}{w_{CS1}} \times 100 \quad \text{Persamaan (18)}$$

dimana

L_{CS} : persentase butiran batu pecah yang hancur

w_{CS1} : berat batu pecah sebelum terabrasi (g)

w_{CS2} : berat batu pecah setelah terabrasi (g)

2. Perancangan Campuran Beton

a. Perancangan Campuran Beton Kontrol

Perancangan campuran beton kontrol yang dinotasikan sebagai FS1 dilakukan dengan mengacu pada SNI 03-2834-2000. Beton dirancang dengan kuat tekan 31 MPa pada umur 28 hari, *water-cement ratio* 0.50, dan *slump* 120 ± 2 mm.

Adapun beton FS1 dirancang dengan cara sebagai berikut:

- 1) Kebutuhan air dihitung menggunakan Persamaan 19 berdasarkan Tabel 14, kemudian kebutuhan semen Portland dihitung menggunakan Persamaan 20.

Tabel 14. Perkiraan Kebutuhan Air Campuran Beton Nilai *Slump* 60-180 mm

Ukuran Agregat Maksimum (mm)	Jenis Batuan Agregat	Kebutuhan Air (l/m ³)
10	Alami	225
	Batu pecah	250
20	Alami	195
	Batu pecah	225
40	Alami	175
	Batu pecah	205

(SNI 03-2834-2000)

$$W = 0.67 \times W_S + 0.33 \times W_{CS} \quad \text{Persamaan (19)}$$

$$PC = \frac{W}{wc} \quad \text{Persamaan (20)}$$

dimana

W : kebutuhan air pada beton kontrol (l/m³)

W_S : perkiraan kebutuhan air berdasarkan jenis agregat halus (l/m³)

W_{CS} : perkiraan kebutuhan air berdasarkan jenis agregat kasar (l/m³)

- 2) Berat jenis agregat campuran dihitung menggunakan Persamaan 21, dengan perbandingan agregat campuran ditentukan berdasarkan zona pasir dan ukuran agregat maksimum menggunakan grafik yang diperlihatkan pada Gambar 44.

$$SG_A = sa \times SG_S + csa \times SG_{CS} \quad \text{Persamaan (21)}$$

dimana

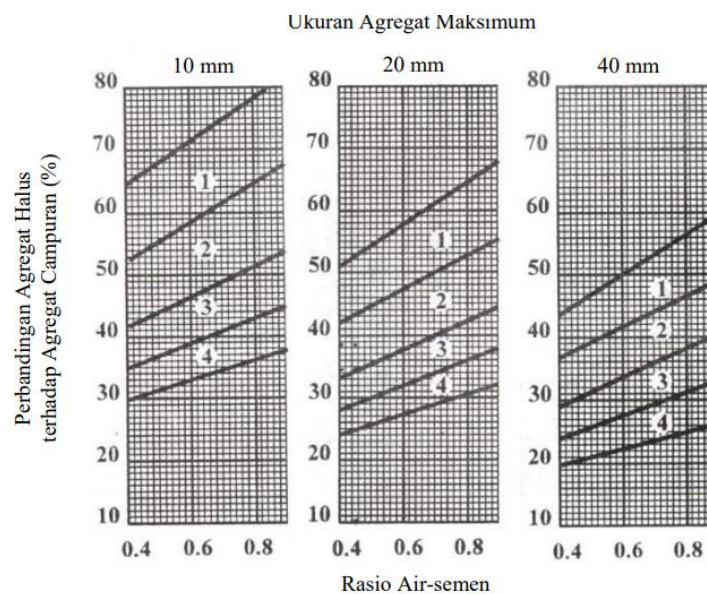
SG_A : berat jenis agregat campuran beton kontrol

sa : sand-aggregate ratio beton kontrol

SG_s : berat jenis pasir

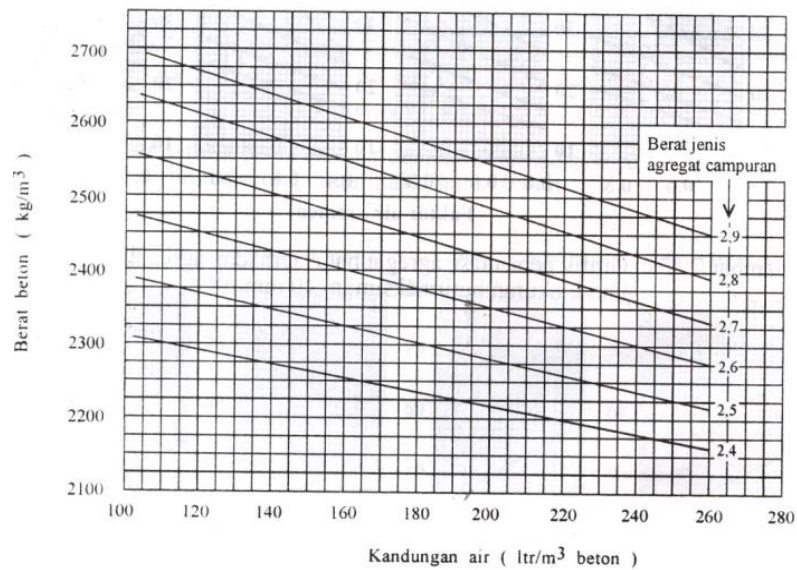
csa : crushed stone-aggregate ratio campuran beton kontrol

SG_{CS} : berat jenis batu pecah



Gambar 44. Grafik Perbandingan Agregat Campuran berdasarkan Zona Pasir (SNI 03-2834-2000)

- 3) Berat satuan campuran beton segar ditentukan berdasarkan berat jenis agregat campuran dan kebutuhan air menggunakan grafik yang diperlihatkan pada Gambar 45, kemudian kebutuhan pasir dan batu pecah secara berurutan dihitung menggunakan Persamaan 22 dan 23.



Gambar 45. Grafik Berat Satuan Campuran Beton Segar (SNI 03-2834-2000)

$$S = sa \times A \quad \text{Persamaan (22)}$$

$$CA = A - S \quad \text{Persamaan (23)}$$

dengan

$$A = w_{CF} - W - PC \quad \text{Persamaan (24)}$$

dimana

CA : kebutuhan agregat kasar pada beton kontrol (kg/m³)

A : kebutuhan agregat campuran pada beton kontrol (kg/m³)

w_{CF} : berat satuan campuran beton segar kontrol (kg/m³)

b. Perancangan Campuran Beton dengan Abu Terbang

Perancangan campuran beton dengan abu terbang sebagai pengganti sebagian pasir sebanyak 20%, 35%, dan 50% berdasarkan berat masing-masing kebutuhan semen Portland yang secara berurutan dinotasikan sebagai FS2, FS3, dan FS4

dilakukan menggunakan metode berbasis *cementing efficiency* pozolan seperti yang dilakukan oleh Rajamane dan Ambily (2013). Adapun campuran beton FS2, FS3, dan FS4 dirancang dengan cara sebagai berikut:

- 1) Faktor efisiensi pozolan abu terbang ditentukan menggunakan Persamaan 4 atau grafik pada Gambar 12, kemudian *water-binder ratio* dihitung menggunakan Persamaan 2.
- 2) Pengurangan kebutuhan semen Portland ditetapkan menggunakan Persamaan 6, kemudian proporsi berat antarbahannya campuran ditetapkan menggunakan Persamaan 5.
- 3) Kebutuhan semen Portland, abu terbang, pasir, batu pecah, dan air secara berurutan dihitung menggunakan Persamaan 7, 8, 9, 10, dan 11.

3. Pembuatan Benda Uji

Benda uji untuk setiap tipe rancang campur beton dibuat sebanyak 14 silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Adapun pembuatan benda uji dilakukan dengan cara sebagai berikut:

a. Agregat dipersiapkan dengan cara:

- 1) Untuk pasir dikondisikan SSD dengan cara penjemuran di bawah matahari yang sebelumnya telah didiamkan di dalam karung dengan kondisi jenuh air selama 24 atau 48 jam.
- 2) Untuk batu pecah dikondisikan SSD dengan cara pendiaman di dalam karung selama 48 atau 72 jam yang sebelumnya telah dibersihkan dari seluruh kotoran menggunakan ayakan pencuci dan air.

- 3) Untuk abu terbang dikondisikan kering alami dengan cara penjemuran di bawah sinar matahari.
- b. Volume kebutuhan seluruh bahan campuran yang telah dipersiapkan diukur menggunakan gelas ukur untuk air dan timbangan skala duduk untuk semen Portland, abu terbang, pasir, dan batu pecah, kemudian seluruh bahan dimasukkan ke dalam ember yang ditelakkan di tempat teduh.
 - c. Seluruh kotoran yang berada di dalam mesin pengaduk dibersihkan menggunakan air, kemudian mesin pengaduk dibiarkan sampai dalam kondisi SSD.
 - d. Seluruh bahan dimasukkan ke dalam mesin pengaduk dengan urutan:
 - 1) Agregat, kemudian mesin dioperasikan sampai pasir, batu pecah, dan abu terbang tercampur dengan merata.
 - 2) Semen Portland, kemudian mesin dioperasikan sampai agregat dan semen Portland tercampur dengan merata.
 - 3) Air, kemudian mesin dioperasikan sampai seluruh bahan tercampur dengan merata atau selama $1\frac{1}{2}$ menit.
 - e. Operasi mesin dihentikan kemudian pengujian *slump* dilakukan dengan cara sebagai berikut:
 - 1) Seperangkat alat uji *slump* direndam di dalam air sampai menjadi kondisi jenuh air, kemudian diletakkan di tempat yang datar dengan posisi diameter terbesar kerucut Abrams berada di atas alas pelat.
 - 2) Campuran beton segar dimasukkan ke dalam kerucut Abrams secara berlapis dengan ketebalan $\frac{1}{3}$ tinggi kerucut Abrams per lapis, dan

campuran beton segar di setiap lapisan ditusuk menggunakan batang penusuk sebanyak 25 kali, kemudian ruang kosong di dalam atas kerucut Abrams diisi padatan campuran beton segar secukupnya.

- 3) Setelah campuran beton segar di dalam kerucut Abrams didiamkan dan ditahan selama 30 detik, kerucut Abrams diangkat secara perlahan dengan kecepatan 3-7 detik, kemudian jarak antara bagian atas kerucut Abrams dengan puncak campuran beton segar yang merupakan nilai *slump* diukur menggunakan meteran gulung.
- f. Campuran beton segar dimasukkan ke dalam cetakan silinder yang sebelumnya telah dilumasi menggunakan oli. Cara pengisian yang dilakukan adalah sama dengan pengisian campuran beton segar ke dalam kerucut Abrams, tetapi setelah penusukan per-lapisan campuran beton dilakukan, cetakan silinder dipukul menggunakan palu hingga campuran beton memadat.
- g. Setelah cetakan silinder yang berisi campuran beton segar disimpan di dalam ruangan dengan atap selama 24 jam.
- h. Beton keras sebagai benda uji dikeluarkan dari cetakan silinder dan diberikan kode identitas kemudian dimasukkan ke dalam bak perendaman untuk proses perawatan beton selama 28 hari.

4. Pengujian Benda Uji

Pengukuran volume dan pengujian tekan benda uji dilakukan pada saat beton berumur 28 hari. Nilai berat satuan dan kuat tekan beton dibutuhkan dalam penentuan *strength-weight ratio* dan *material cost-strength ratio*. Adapun pengujian benda uji dilakukan dengan cara sebagai berikut:

- a. Benda uji yang telah dikeluarkan dari bak perendaman dan diletakkan di tempat teduh selama ± 48 jam agar sebagian besar kandungan air di dalam beton menghilang, kemudian diameter, tinggi, dan berat benda uji diukur menggunakan jangka sorong dan neraca keseimbangan berat.
- b. Berat satuan benda uji dihitung menggunakan Persamaan 25 dan berat satuan beton keras adalah berat satuan rerata 14 benda uji.

$$w_C = \frac{w_S}{(0.25 \times \pi \times d^2 \times h)} \quad \text{Persamaan (25)}$$

dimana

w_C : berat satuan beton keras (kg/m^3)

w_S : berat benda uji (kg)

d : diameter benda uji (m)

h : tinggi benda uji (m)

- c. Permukaan atas benda uji ditutup menggunakan cetakan penutup silinder vertikal dengan belerang yang sebelumnya telah dipanaskan menggunakan pemanas senyawa, dan penutup permukaan atas benda uji dipastikan rata dan tegak lurus terhadap sumbu penampang silinder.
- d. Benda uji dengan penutup permukaan atas diletakkan di mesin uji kuat tekan, kemudian mesin uji tekan dioperasikan sampai terjadi tegangan tekan maksimum pada benda uji.
- e. Kuat tekan benda uji dihitung menggunakan Persamaan 26 dan kuat tekan beton adalah kuat tekan rerata 14 benda uji.

$$f_c = \frac{P}{(0.25 \times \pi \times d^2)} \quad \text{Persamaan (26)}$$

dimana

f_c : kuat tekan beton (MPa)

P : beban tekan maksimum (N)

5. Penentuan Data Hasil Penelitian

a. Penentuan *Strength-weight Ratio* Beton

Strength-weight ratio adalah perbandingan kuat tekan terhadap berat satuan beton keras yang ditentukan menggunakan Persamaan 27.

$$f_{c\gamma} = \frac{f_c}{w_c} \quad \text{Persamaan (27)}$$

dimana

$f_{c\gamma}$: *strength-weight ratio* beton (MPa/m³/kg)

b. Penentuan *Material Cost-strength Ratio* Beton

Material cost-strength ratio adalah perbandingan biaya pekerjaan terhadap kuat tekan beton yang ditentukan menggunakan Persamaan 28, dengan daftar harga satuan bahan campuran beton yang diperlihatkan pada Tabel 15.

$$c f_c = \frac{\Sigma c}{f_c} \quad \text{Persamaan (28)}$$

dimana

$c f_c$: *material cost-strength ratio* beton (Rp./m³/MPa)

c : biaya pekerjaan beton (Rp/m³)

Tabel 15. Harga Satuan Bahan Campuran Beton

Kebutuhan	Harga (Rp)
Semen Portland (kg)	1500.00
Abu terbang (kg)	0.00
Pasir (kg)	150.00
Batu pecah (kg)	130.00
Air (l)	1.50

