

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

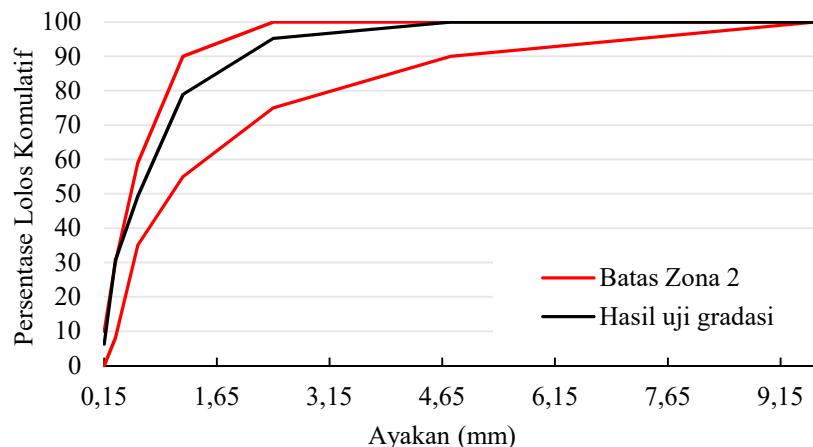
A. Hasil

1. Karakteristik Agregat

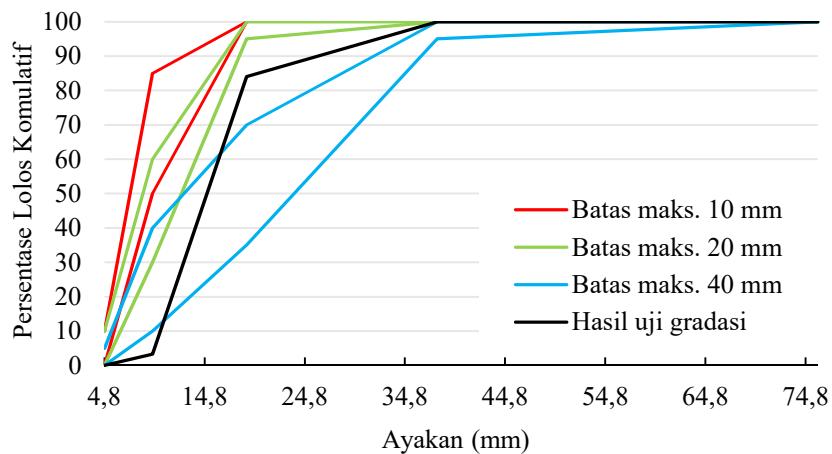
Setelah dilakukan pengujian terhadap pasir, batu pecah, dan abu terbang maka didapatkan karakteristik agregat yang diperlihatkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Pengujian Agregat

Karakteristik	Agregat		
	Pasir	Batu Pecah	Abu Terbang
Berat jenis	2.71	2.48	1.93
Kadar air	1.99%	2.44%	26.67%
Zona	2	-	-
Ukuran maksimum	-	20 mm	-
Modulus halus butir	2.40	7.50	0.96
Kadar lumpur	1.88%	-	-
Bagian hancur oleh mesin Los Angeles	-	48%	-
Kandungan CaO	-	-	0.054%
Kandungan SiO ₂	-	-	42.46%
Kadar lengas	-	-	2.76%
Kelas	-	-	F



Gambar 49. Grafik Hasil Pengujian Gradasi Pasir



Gambar 50.. Grafik Hasil Pengujian Gradasi Batu Pecah

Tabel 9. Hasil Pengujian Gradasi Abu Terbang

Ayakan (mm)	Percentase Lulus Kumulatif
9.6	100
4.8	99
2.4	97
1.2	97
0.6	94
0.3	83
0.15	34

2. Data Campuran Beton Segar

Setelah dilakukan perancangan campuran beton maka didapatkan proporsi berat antar bahan dan data campuran beton segar untuk seluruh tipe beton yang secara berurutan diperlihatkan pada Tabel 10 dan Tabel 11.

Tabel 10. Proporsi Berat antar-Bahan Hasil Perancangan Campuran Beton Segar

Tipe Beton	Proporsi berat antar-Bahan
SPP1	1.00: 1.67: 2.50: 0.50
SPP2	[1.00: 0.20]: 1.47: 2.50: 0.504
SPP3	[1.00: 0.35]: 1.32: 2.50: 0.459
SPP4	[1.00: 0.50]: 1.17: 2.50: 0.409

Tabel 11. Data Hasil Perancangan Campuran Beton Segar

Data	Tipe Beton			
	SPP1	SPP2	SPP3	SPP4
Tingkat penggantian pasir (%)	0	20	35	50
<i>Aggregate-cement ratio</i>	4.17	4.17	4.17	4.17
Faktor efisiensi pozolan	0.00	1.05	0.69	0.45
<i>Fly ash-binder ratio</i>	0.00	0.17	0.26	0.33
<i>Water-binder ratio</i>	0.500	0.504	0.459	0.409
<i>Water-cement ratio</i>	0.500	0.605	0.620	0.613
Kebutuhan semen (kg/m ³)	409.80	385.21	372.92	360.62
Kebutuhan abu terbang (kg/m ³)	0.00	77.04	130.52	180.31
Kebutuhan pasir (kg/m ³)	684.12	566.26	492.25	421.92
Kebutuhan batu pecah (kg/m ³)	1026.18	963.02	932.30	901.55
Kebutuhan air (l/m ³)	204.90	232.97	231.08	221.24
Berat satuan (kg/m ³)	2325.00	2224.50	2159.07	2085.64
Perubahan kebutuhan semen (%)	0	-6	-9	-12
Perubahan kebutuhan pasir (%)	0	-17	-28	-38
Perubahan kebutuhan batu pecah (%)	0	-6	-9	-12
Perubahan kebutuhan air (%)	0	13	11	7
Perubahan berat satuan (%)	0	-4	-7	-10
Nilai <i>slump</i> (mm)	140	100	60	30

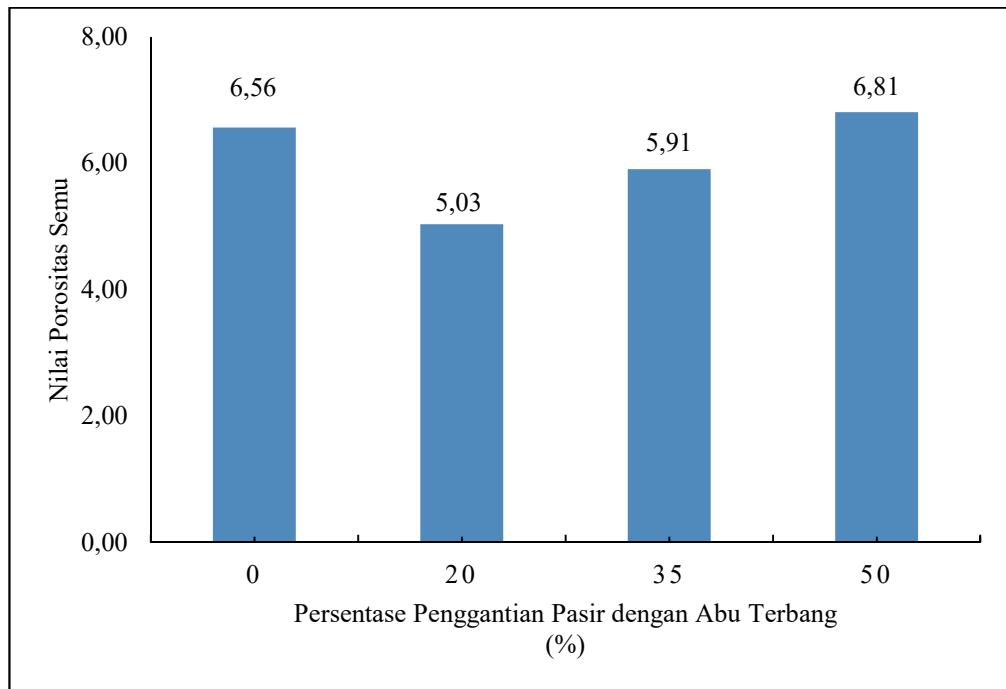
3. Porositas Semu Beton

Setelah dilakukan perhitungan menggunakan persamaan 31 maka didapatkan nilai porositas semu beton yang diperlihatkan pada Tabel 12.

Tabel 12. Nilai Porositas Semu Beton

Tipe Beton	Nilai Porositas Semu Beton (%)
SPP1	6,56
SPP2	5,03
SPP3	5,91
SPP4	6,81

Dari data yang ditampilkan pada Tabel 14 diperoleh grafik hubungan porositas semu dengan penggantian sebagian pasir dengan abu terbang yang digambarkan pada Gambar 51.



Gambar 51. Nilai Porositas Semu Beton dengan Variasi Persentase Penggantian Pasir dengan Abu Terbang

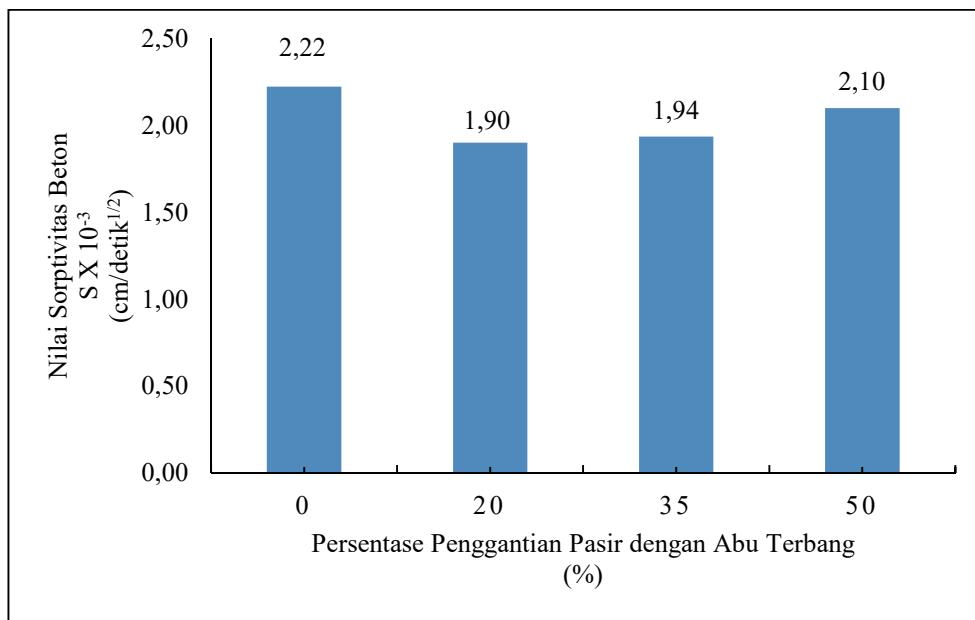
4. Sorptivitas Beton

Setelah dilakukan perhitungan menggunakan persamaan 32 maka didapatkan nilai porositas semu beton yang diperlihatkan pada Tabel 15.

Tabel 13. Nilai Sorptivitas Beton

Tipe Beton	Nilai Sorptivitas Beton $S \times 10^{-3}$ (cm/detik $^{1/2}$)
SPP1	2,224
SPP2	1,902
SPP3	1,936
SPP4	2,101

Dari data yang ditampilkan pada Tabel 15 diperoleh grafik hubungan sorptivitas dengan penggantian sebagian pasir dengan abu terbang yang digambarkan pada Gambar 52.



Gambar 52. Nilai Sorptivitas Beton dengan Variasi Persentase Penggantian Pasir dengan Abu Terbang

B. Pembahasan

1. Berat Jenis dan Kadar Air Agregat

Pada Tabel 8, dapat dilihat bahwa abu terbang adalah agregat yang jauh lebih ringan ketimbang pasir dan batu pecah, karena abu terbang memiliki berat jenis 1.93 sedangkan pasir dan batu pecah secara berurutan memiliki berat jenis 2.71 dan 2.48. Kemudian dalam hal kadar air, dapat dilihat bahwa abu terbang memiliki kadar air yang paling tinggi yakni 26.67%, ketimbang pasir dan batu pecah yang secara berurutan memiliki kadar air 1.99% dan 2.44%. Dengan berat jenis 1.93 dan kadar air 26.67% maka dapat disimpulkan bahwa abu terbang memiliki sifat hidroskopis yang sangat tinggi.

2. Gradasi Pasir dan Batu Pecah

Pada Tabel 8, dapat dilihat bahwa pasir masuk ke dalam Zona 2 berdasarkan grafik gradasi pasir menurut SNI 03-2834-2000 (Tabel 1) yang diperlihatkan pada Gambar 46, dengan modulus halus butir 2.40 yang memenuhi syarat menurut SK SNI S-04-1989-F. Kemudian ukuran maksimum batu pecah ditetapkan 20 mm karena grafik gradasi batu pecah yang diperlihatkan pada Gambar 47 tidak sesuai dengan SNI 03-2834-2000 (Tabel 2), dengan modulus halus butir 7.50 yang juga tidak memenuhi syarat menurut SK SNI S-04-1989-F.

3. Kadar Lumpur Pasir dan Kekerasan Batu Pecah

Pada Tabel 8, dapat dilihat bahwa pasir memiliki kadar lumpur sebanyak 1.88% yang memenuhi syarat menurut SK SNI S-04-1989-F sehingga pasir tidak perlu dicuci. Kemudian bagian batu pecah yang hancur oleh mesin Los Angeles adalah sebanyak 48% yang memenuhi syarat kekerasan agregat kasar menurut SII 0052-80 (Tabel 5).

4. Gradasi dan Kelas Abu Terbang

Sebagai agregat halus abu terbang memang tidak memenuhi syarat gradasi, karena pada Tabel 16 dapat dilihat bahwa abu terbang memiliki modulus halus butir 0.96 yang tidak memenuhi syarat menurut SK SNI S-04-1989 (1.5 - 3.8). Ukuran butiran abu terbang sangat tidak bervariasi dan sangat kecil jika dibandingkan dengan pasir seperti yang diperlihatkan pada Tabel 17, dimana jumlah butiran abu terbang yang paling sedikit lolos secara kumulatif adalah dari ayakan 0.15 mm yakni 34% dan ayakan 0.075 mm yakni 20%.

Sebagai bahan yang bersifat pozolanik, menurut ACAA (2003) abu terbang termasuk ke dalam Kelas F karena mengandung CaO sebanyak 5.54% (kurang dari 10%) dengan kandungan SiO₂ sebanyak 42.46% sebagai reaktan pembentuk CSH dan kadar lengas 2.76%, berdasarkan hasil pengujian parameter yang dilakukan di Laboratorium Padatan dan B3 Balai Besar Teknik Kesehatan Lingkungan dan Pengendalian Penyakit (BBTKLPP) Yogyakarta.

5. Perancangan Campuran Beton Kontrol

Dengan pertimbangan bahwa abu terbang merupakan bahan higroskopis dan *superplasticizer* tidak digunakan maka rasio-air semen *Portland* ditetapkan 0.50 sehingga menurut SNI 03-2834-2000 kuat tekan beton benda uji silinder pada umur 28 hari adalah 31 MPa. Kemudian dengan nilai *slump* yang ditetapkan adalah 120±2 mm, ukuran agregat maksimum 20 mm, dan jenis agregat yang digunakan adalah pasir alami dan batu pecah maka perkiraan kebutuhan air untuk pasir dan batu pecah campuran beton segar SPP1 menurut SNI 03-2834-2000 (Tabel 14) secara berurutan adalah 195 dan 225 l/m³. Sehingga kebutuhan air dan semen *Portland* campuran beton segar SPP1 yang secara berurutan didapatkan menggunakan persamaan 15 dan 16 adalah:

$$W = 0.67 \times 195 + 0.33 \times 225 = 204.90 \text{ l/m}^3$$

$$PC = \frac{204.90}{0.50} = 409.80 \text{ kg/m}^3$$

Dengan pasir yang termasuk ke dalam Zona 2 dan berdasarkan grafik menurut SNI 03-2834-2000 (Gambar 45) maka didapatkan *sand-aggregate ratio* adalah 0.40,

sehingga berat jenis agregat campuran beton SPP1 yang didapatkan menggunakan persamaan 17 adalah:

$$BJ_C = 0.40 \times 2.71 + 0.60 \times 2.48 = 2.57$$

Dengan berat jenis agregat campuran 2.57 dan berdasarkan grafik menurut SNI 03-2834-2000 (Gambar 46) maka berat satuan campuran beton segar SPP1 adalah 2325 kg/m^3 , sehingga kebutuhan agregat campuran, kebutuhan agregat halus, dan kebutuhan agregat kasar campuran beton segar SPP1 yang secara berurutan dihitung menggunakan persamaan 20, 18, dan 19 adalah:

$$C = 2325.00 - 204.90 - 409.80 = 1710.30 \text{ kg/m}^3$$

$$H = 0.40 \times 1710.30 = 684.12 \text{ kg/m}^3$$

$$K = 1710.30 - 684.12 = 1026.18 \text{ kg/m}^3$$

Berdasarkan perancangan yang telah dilakukan maka kebutuhan semen *Portland*, agregat halus, agregat kasar, dan air campuran beton segar SPP1 secara berurutan adalah 409.80, 684.12, 1026.18 kg/m^3 dan 204.91 l/m^3 .

6. Perancangan Campuran Beton dengan Abu Terbang

Pada bagian ini hanya dijelaskan rancangan campuran beton SPP2 sebagai contoh yang mewakili seluruh tipe beton dengan abu terbang. Persentase abu terbang pengganti pada campuran beton segar SPP2 adalah sebanyak 20% (0.20), sehingga faktor *cementing efficiency* pozolan abu terbang beton SPP2 yang ditetapkan menggunakan persamaan 21 atau grafik pada Gambar 47 (Yeh, 2013) adalah:

$$k_{AT} = 1.25 + 0.14 \times \ln 28 - 3.9 \times 0.20 + 2.75 \times 0.20^2 = 1.05$$

Kemudian, *fly ash-binder ratio*, *water-binder ratio*, dan pengurangan kebutuhan semen *Portland* campuran beton segar SPP2 yang secara berurutan ditetapkan menggunakan persamaan 23, 22, dan 24 adalah:

$$fab = \frac{0.20}{(1 + 0.20)} = 0.17$$

$$wb = 0.50 \times [(1 - 0.17) + 1.05 \times 0.17] = 0.504$$

$$PC_{FSred} = 0.2 \times 20 + 2 = 6\%$$

Proporsi berat antar-bahan campuran beton segar SPP1 adalah 1.00: 1.67: 2.50: 0.50, sehingga proporsi berat antar-bahan campuran beton segar SPP2 yang ditetapkan menggunakan persamaan 25 adalah:

$$1.00: (1.67 - 0.20): 2.50: 0.50 = [1.00: 0.20]: 1.47: 2.50: 0.504$$

Sehingga kebutuhan semen *Portland*, abu terbang, pasir, batu pecah, dan air campuran beton segar SPP2 yang secara berurutan dihitung menggunakan persamaan 26, 27, 28, 29, dan 30 adalah:

$$PC_{FS} = 409.80 - (0.06 \times 409.80) = 385.21 \text{ kg/m}^3$$

$$AT_{FS} = 0.20 \times 385.21 = 77.04 \text{ kg/m}^3$$

$$H_{FS} = 1.47 \times 385.21 = 566.26 \text{ kg/m}^3$$

$$K_{FS} = 2.50 \times 385.21 = 963.02 \text{ kg/m}^3$$

$$W_{FS} = 0.504 \times (77.04 + 385.21) = 232.97 \text{ l/m}^3$$

Berdasarkan perancangan yang telah dilakukan maka kebutuhan semen *Portland*, abu terbang, pasir, batu pecah, dan air campuran beton segar SPP2 secara berurutan adalah 385.21, 77.04, 566.26, 963.02 kg/m³ dan 232.97 l/m³.

7. *Aggregate-Cement Ratio*

Aggregat-cement ratio adalah perbandingan seluruh kebutuhan agregat terhadap kebutuhan semen *Portland* yang dimaksudkan sebagai variabel kontrol dalam penelitian ini. Dalam hal ini, *aggregate-cement ratio* ditetapkan menggunakan persamaan 29.

$$ac_x = \frac{(H_x + K_x + AT_x)}{PC_x} = 4.17 \quad (33)$$

di mana

ac_x : *aggregat-cement ratio* campuran beton segar x

H_x : kebutuhan agregat halus campuran beton segar x (kg/m³)

K_x : kebutuhan agregat kasar campuran beton segar x (kg/m³)

AT_{Px} : kebutuhan abu terbang campuran beton segar x (kg/m³)

PC_x : kebutuhan semen *portland* campuran beton segar x (kg/m³)

Pada Tabel 11 dapat dilihat bahwa setiap faktor efisiensi pozolan yang didapatkan dari Persamaan 21 atau grafik pada Gambar 47 oleh Yeh (2013) masih

termasuk ke dalam kisaran untuk beton penggantian sebagian pasir dengan abu terbang menurut Rajamane dan Ambily (2013) yakni 0.2 - 1.1.

8. Pengurangan Kebutuhan Pasir

Pada Tabel 11 dapat dilihat bahwa jumlah pengurangan kebutuhan pasir beton SPP2, SPP3, dan SPP4 adalah tidak sama dengan tingkat penggantian pasirnya, yakni secara berurutan sebanyak 17%, 28%, dan 38%. Hal ini dapat terjadi karena pengurangan kebutuhan pasir tidak ditetapkan berdasarkan penggantian pasir dengan abu terbang yang sebenarnya, tetapi ditetapkan menggunakan Persamaan 28 yakni berdasarkan proporsi berat pasir dan kebutuhan semen *Portland* pada masing-masing tipe beton, dengan proporsi pasir yang ditetapkan menggunakan Persamaan 25 dengan hasil terlihat pada Tabel 10. Perbedaan jumlah pengurangan kebutuhan pasir terhadap tingkat penggantian pasir ini juga bergantung pada pengurangan kebutuhan semen *Portland* dari Persamaan 26 dan proporsi berat pasir beton SPP1 sebagai beton kontrol.

9. Penurunan Nilai *Slump*

Pada Tabel 11, dapat dilihat bahwa nilai *slump* campuran beton segar SPP2, SPP3, dan SPP4 adalah lebih rendah ketimbang campuran beton segar SPP1 walaupun kebutuhan air campuran beton segar SPP2, SPP3, dan SPP4 adalah lebih banyak ketimbang campuran beton segar SPP1. Dalam hal ini, selain karena penambahan abu terbang dapat meningkatkan total luas permukaan bahan granular campuran beton segar, (Rajamane dan Ambily, 2013), sehingga meningkatkan kohesivitas campuran beton segar. Hal ini juga dapat terjadi karena ditambah dengan sifat hidroskopis abu terbang dalam keadaan kering alami yang dapat

menyerap sebagian besar jumlah air. Penurunan nilai *slump* ini mungkin dapat diatasi dengan penggunaan *superlacticizer* pada campuran beton segar.



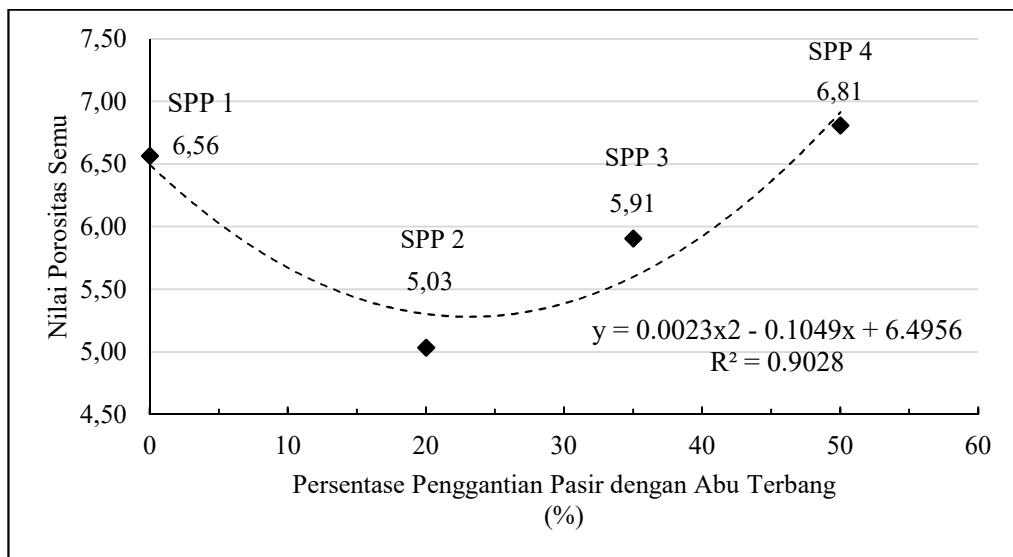
Gambar 53. Campuran Beton Segar saat Pengujian *Slump*

10. Analisis Hasil Penelitian dengan Metode Regresi

Analisis regresi yang digunakan adalah analisis regresi polinomial orde 2 menggunakan fasilitas *trendline* dari aplikasi *Microsoft Excel*. Pembuatan regresi non linier ini bermaksud untuk mengetahui nilai koefisien determinasi (R^2) yang menunjukkan seberapa besar kecocokan ketetapan garis regresi yang terbentuk dan mengetahui sejauh mana hubungan antara variabel-variabel penyusunnya.

a. Analisis Regresi Pengujian Porositas Semu Beton

Hubungan antara nilai porositas semu beton dengan variasi persentase penggantian pasir dengan abu terbang disajikan dalam Gambar 54.



Gambar 54. Grafik Regresi Nilai Porositas Semu Beton dengan Variasi Persentase Penggantian Pasir dengan Abu Terbang

Dari Gambar 54 dapat diperoleh nilai $R^2 = 0,9028$, yang mana nilainya mendekati 1 sehingga ada hubungan antara kedua variabel yang dianalisis. Sedangkan persamaan yang dihasilkan digunakan untuk mencari besarnya kadar penggantian pasir dengan abu terbang dan besarnya nilai porositas semu beton. Perhitungan kadar penggantian pasir dengan abu terbang yang optimum untuk menghasilkan porositas beton yang minimum adalah sebagai berikut:

$$P = 0,0023(AT)^2 - 0,1049(AT) + 6,4956 \quad (34)$$

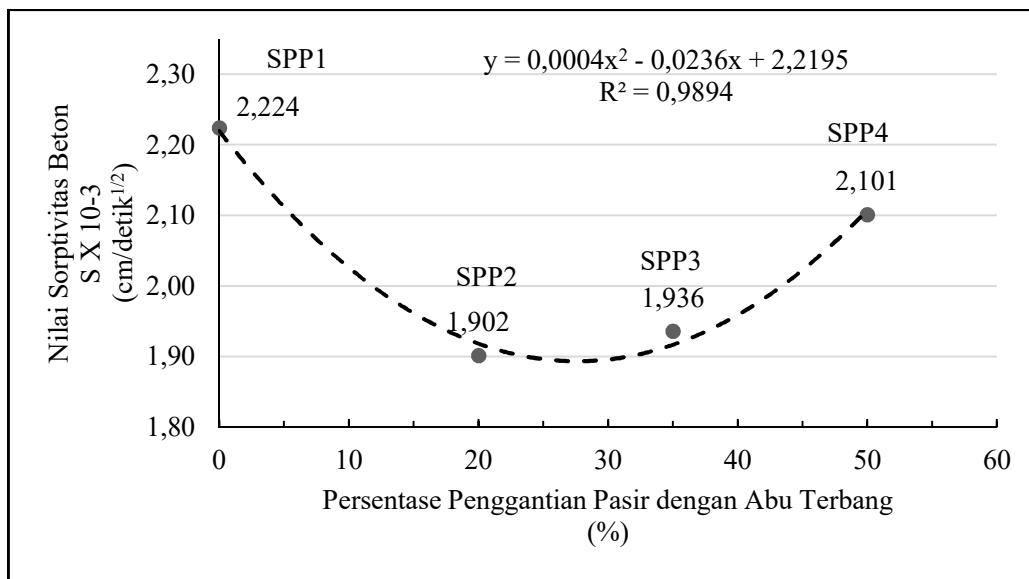
dimana:

P = Porositas semu beton (%)

AT = Kadar penggantian pasir dengan abu terbang (%)

b. Analisis Regresi Pengujian Sorptivitas Beton

Hubungan antara nilai sorptivitas beton dengan variasi persentase penggantian pasir dengan abu terbang disajikan dalam Gambar 55.



Gambar 55. Grafik Regresi Nilai Porositas Semu Beton dengan Variasi Persentase Penggantian Pasir dengan Abu Terbang

Dari Gambar 53 dapat diperoleh nilai $R^2 = 0,9894$, yang mana nilainya mendekati 1 sehingga ada hubungan antara kedua variabel yang dianalisis. Sedangkan persamaan yang dihasilkan digunakan untuk mencari besarnya kadar penggantian pasir dengan abu terbang dan besarnya nilai sorptivitas beton. Perhitungan kadar penggantian pasir dengan abu terbang yang optimum untuk menghasilkan sorptivitas beton yang minimum adalah sebagai berikut:

$$S = 0,0004(AT)^2 - 0,0236(AT) + 2,2195 \quad (35)$$

dimana:

S = Koefisien sorptivitas (cm/detik^{1/2})

AT = Kadar penggantian pasir dengan abu terbang (%)

11. Pembahasan Nilai Porositas Semu dan Sorptivitas

Dalam penelitian ini diketahui bahwa penggantian sebagian pasir dengan abu terbang berpengaruh terhadap penurunan nilai porositas semu dan koefisien

sorptivitas pada variasi SPP2 dan SPP3. Kandungan kimia dalam abu terbang dapat mempengaruhi pada saat beton mengalami reaksi hidrasi antara air, semen, *portland* dan abu terbang. Dalam proses hidrasi, air dalam campuran beton segar akan mengikat dikalsium silikat (C_2S) dan trikalsium silikat (C_3S) yang kemudian menjadi kalsium silikat hidrat ($3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ atau CSH) dan membebaskan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$). Tambahan abu terbang yang mengandung silika (SiO_2) akan bereaksi dengan $Ca(OH)_2$ yang dibebaskan dari proses hidrasi yang akan membentuk kembali CSH.

Dengan bertambahnya waktu dan dalam kondisi perawatan yang memadai, kuantitas dari CSH semakin meningkat. Meningkatnya kuantitas CSH mengakibatkan ikatan yang dihasilkan oleh semen dan agregat semakin kuat dan ruang-ruang kosong yang awalnya terisi oleh air tergantikan oleh CSH sehingga porositas beton berkurang (Salain, 2007).

Dalam penelitian ini diketahui pula bahwa penggantian sebagian pasir dengan abu terbang berpengaruh terhadap kenaikan nilai porositas semu dan koefisien sorptivitas pada variasi SPP4. Hal tersebut mungkin terjadi karena kadar abu terbang yang digunakan nilainya cukup besar. Kalsium oksida (CaO) yang terkandung dalam abu terbang yang tidak aktif menjadi kapur bebas sehingga menyebabkan volume rongga udara pada beton meningkat. Beton menjadi berpori sehingga nilai porositas semu dan koefisien sorptivitas semakin meningkat.

12. Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan terkait yakni sebagai berikut:

- a. Pada abu terbang hanya dilakukan pengujian parameter kandungan CaO, SiO₂, dan kadar lengas.
- b. Uji coba untuk penetapan k tidak dilakukan, sehingga penetapan k dilakukan menggunakan Persamaan 2 oleh Yeh (2013) untuk beton penggantian semen dengan tipe semen *Portand* biasa, jenis agregat normal, dan kondisi perawatan beton normal.
- c. Hal yang dipertimbangkan dalam pengurangan kebutuhan semen *Portland* pada beton dengan abu terbang masih belum diketahui, sehingga PC_{FSred} ditetapkan menggunakan Persamaan 5 yakni berdasarkan rancang campur beton dalam penelitian Rajamane dan Ambily (2013).
- d. Pada benda uji SPP4 (50%) berbeda dimensi dari variasi lainnya karena keterbataan jumlah silinder yang ada.