

## OPTIMIZATION OF HIGH STRENGTH CONCRETE

### OPTIMASI BETON MUTU TINGGI

Yulin Patrisia

Program Studi Pendidikan Teknik Bangunan, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan  
Universitas Palangka Raya, Kampus Unpar Tunjung Nyaho, Jl. H. Timang, 73111A

e-mail: [yulinpatrisia@yahoo.com](mailto:yulinpatrisia@yahoo.com)

#### ABSTRACT

The production of high strength concrete using local materials, which are available in Surabaya and its surrounding area, that consider adequate slump so that the design is applicable in the project site, begin to be needed in the construction world. Through laboratory experiments, mix design using materials such as portland cement, silica fume, fly ash, coarse aggregate, fine aggregate, and also superplasticizer produces high strength concrete with cylinder compressive strength between 48 MPa – 93 MPa at 28 days age. By utilizing multiple regression analysis for data processing, a mathematical model for the designing composition of high strength concrete is proposed. The most factor that influences the compressive strength of concrete is the composition of silica fume, followed by composition of portland cement, finally the composition of water and fly ash.

**Keywords:** Optimization, high strength concrete

#### ABSTRAK

Pembuatan beton mutu tinggi yang menggunakan bahan-bahan yang tersedia di daerah Surabaya dan sekitarnya, dengan mempertimbangkan slump yang memadai untuk dapat diaplikasikan di lapangan, mulai diperlukan dalam dunia konstruksi. Melalui percobaan di laboratorium, campuran dengan menggunakan bahan-bahan berupa semen portland, silica fume, *fly ash*, agregat kasar dan agregat halus, serta superplasticizer, dihasilkan beton mutu tinggi dengan kuat tekan silinder antara 48 MPa – 93 MPa pada umur 28 hari. Melalui pengolahan data dengan analisa regresi berganda, diperoleh suatu model matematis untuk mendesain komposisi beton mutu tinggi, di mana faktor utama yang mempengaruhi kuat tekan beton adalah komposisi silica fume, selanjutnya komposisi semen portland, dan terakhir komposisi air dan *fly ash*.

**Kata kunci:** Optimasi, beton mutu tinggi

#### PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir, beton mutu tinggi sudah mulai dikenal dan digunakan dalam dunia konstruksi di Indonesia. Hal ini berkembang seiring dengan didirikannya bangunan bertingkat tinggi dan jembatan dengan bentang cukup panjang, di mana konstruksi tersebut membutuhkan material yang kuat dan mampu untuk mendukung struktur yang dibangun.

Saat ini, beberapa universitas di Indonesia sudah mengadakan penelitian laboratorium dalam pembuatan beton mutu tinggi, dan dari hasil penelitian tersebut dapat diketahui bahwa penggunaan bahan-bahan lokal (yaitu agregat kasar maupun halus yang tersedia di daerah sekitarnya, serta bahan-bahan tambahan yang mudah diperoleh dipasaran) dapat menghasilkan beton bermutu tinggi. Penulis juga pernah memproduksi beton secara massal dengan kekuatan umur 28 hari mencapai 700 – 800 kg/cm<sup>2</sup> (aplikasi di lapangan harus memenuhi beberapa

persyaratan khusus). Selain itu, penulis juga pernah beberapa kali melakukan percobaan di laboratorium untuk pembuatan beton mutu tinggi, di mana beton dengan kekuatan silinder mencapai 114 MPa dapat dihasilkan, walaupun demikian, beton mutu tinggi tersebut belum dapat diaplikasikan di lapangan karena *slump* yang terlalu rendah.

Meskipun kebutuhan akan beton mutu tinggi semakin meningkat dan di Indonesia sudah mulai bisa diproduksi secara massal, tetapi harga beton tersebut masih mahal dibandingkan dengan beton normal. Secara umum, beton mutu tinggi dibentuk dari binder material (berupa material yang mempunyai sifat mengikat yaitu semen, *silica fume* dan *fly ash*) dalam jumlah yang cukup banyak dan pemakaian bahan kimia tambahan (misalnya *superplasticizer*). Bahan-bahan inilah yang menyebabkan biaya pembuatan beton mutu tinggi lebih mahal dibandingkan beton biasa, karena harga bahan-bahan tersebut dipasaran masih

cukup mahal. Tetapi sering kali biaya ekstra yang dikeluarkan untuk produksi beton mutu tinggi masih diperoleh pada keseluruhan biaya konstruksi (bila dipakai beton mutu tinggi). Karena itu, penelitian ke arah optimasi komposisi perlu dilakukan, agar diperoleh suatu desain komposisi yang optimum dengan harga yang minimum.

Berdasarkan pada beberapa pemikiran yang telah disebutkan, yaitu kebutuhan yang semakin tinggi terhadap beton mutu tinggi dalam dunia konstruksi, percobaan laboratorium yang telah penulis lakukan dalam pembuatan beton mutu tinggi dan harga bahan-bahan pembentuk beton yang cukup mahal, maka penulis merasa perlu melakukan penelitian lebih lanjut dalam pembuatan beton mutu tinggi agar diperoleh suatu desain untuk komposisi beton mutu tinggi yang optimal dengan menggunakan bahan-bahan lokal (agregat kasar dan halus yang tersedia di Jawa Timur serta bahan-bahan tambahan yang mudah diperoleh dipasaran), dengan *workability* yang memadai agar nantinya dapat diaplikasikan di lapangan. Desain komposisi yang dimaksud adalah dengan membuat suatu model matematis yang tentunya akan sangat mempermudah merancang komposisi bahan-bahan pembentuk beton sesuai target kekuatan yang diharapkan, sehingga dapat diperoleh desain beton yang optimum dengan harga seminimum mungkin.

Permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah bagaimana bentuk model matematis untuk komposisi beton mutu tinggi, agar dapat memberikan kemudahan dalam menentukan desain campuran untuk suatu target nilai kuat tekan beton tertentu dengan menggunakan bahan-bahan lokal?

Tujuan penelitian adalah untuk menghasilkan suatu model matematis untuk mendesain komposisi beton mutu tinggi dengan menggunakan bahan-bahan lokal berdasarkan hubungan antara nilai kuat tekan beton dengan beberapa parameter hasil percobaan laboratorium.

## METODOLOGI PENELITIAN

### Jenis Penelitian

Jenis penelitian yang dipergunakan adalah penelitian eksperimental, berupa percobaan di laboratorium. Selain penelitian eksperimental, penelitian ini didukung oleh studi kepustakaan yang bersumber pada berbagai buku- buku literatur, jurnal-jurnal penelitian, artikel-artikel yang dipublikasi di internet, laporan tugas akhir, dan lain-lain yang berkaitan dengan topik penelitian.

lebih kecil dibandingkan dengan penghematan yang

### Bahan- bahan Pembentuk Beton

#### Semen

Semen yang digunakan dalam penelitian ini adalah semen tipe I Tiga Roda produksi PT. Indocement Tunggul Prakarsa (*Normal Portland Cement* - ASTM C 150).

#### Fly ash

*Fly ash* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *fly ash* tipe F, yang diambil dari limbah pabrik batu bara Paiton.

#### Agregat

Agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari daerah Lumajang (gunung Semeru). Pasir ini pada umumnya berwarna hitam dengan nilai modulus kehalusan cukup besar, dan tingkat kebersihan terhadap lumpur cukup tinggi. Alasan mengapa digunakan pasir Lumajang dalam penelitian ini adalah karena pasir tersebut mudah diperoleh dipasaran dan kualitas cukup bagus dibandingkan dengan pasir- pasir lain yang terdapat di daerah Jawa Timur.

Agregat kasar yang digunakan adalah batu pecah yang diambil dari pemecah batu di daerah Pasuruan, dengan ukuran 10- 10 dan 5- 10. Berdasarkan analisa ayakan, batu pecah 10-10 berukuran antara 9.5 cm – 16 cm, sedangkan batu pecah 5-10 berukuran antara 2.36 cm - 9.5 mm. Dalam pembuatan beton mutu tinggi nantinya, kedua macam batu tersebut akan dikombinasikan sampai mencapai gradasi yang ideal.

Untuk mengetahui spesifikasi agregat, maka dilakukan beberapa pengujian dengan menggunakan standar ASTM dan BS. Pengujian tersebut meliputi analisa ayakan, berat volume, *specific gravity*, absorpsi, kelembaban agregat, pengujian keausan dan *crushing value*.

#### SilicaFume (Bahan Mineral Tambahan)

Bahan mineral tambahan yang digunakan adalah *silica fume* dengan penjelasan sebagai berikut:

Nama produk : Sikafume

Produksi : PT. Sika Nusa Pratama

Sikafume adalah generasi terbaru untuk bahan mineral tambahan, berupa bubuk halus yang mengandung lebih dari 96% SiO<sub>2</sub> berukuran kurang

dari 1 mikron (100 kali lebih kecil dari ukuran butiran semen).

#### Superplasticizer (Bahan Kimia Pembantu)

Bahan kimia pembantu yang digunakan adalah Sikament NN diproduksi oleh PT. Sika Nusa Pratama. Sikament NN merupakan bahan kimia tambahan jenis *superplasticizer* tipe F - ASTM C 494 – 92 (*high range water reducer*) berupa cairan dan dapat menimbulkan efek *flowing* pada beton, *water reducer*, dan meningkatkan kekuatan awal dan kekuatan akhir beton.

#### Identifikasi Variabel-variabel Percobaan

Variabel-variabel dalam penelitian ini dibagi menjadi dua bagian, yaitu variabel tidak bebas dan variabel bebas. Variabel tidak bebas adalah variabel yang dicari atau diukur dalam suatu percobaan, sedangkan variabel bebas adalah variabel yang nilainya berubah dan sebagai pengontrol dalam suatu percobaan (variabel yang mempengaruhi variabel tidak bebas) (Moen, Ronald D., 1991). Variabel-variabel dalam percobaan ditentukan sebagai berikut:

1. Variabel tidak bebas:
  - kuat tekan beton umur 28 hari (MPa)
2. Variabel bebas:
  - Air (kg)
  - Semen (kg)
  - *Fly ash* (kg)
  - *Silica fume* (kg)
  - Agregat halus (pasir) (kg)
  - Agregat kasar (batu pecah ukuran 2.36-9.5 cm) (kg)
  - Agregat kasar (batu pecah ukuran 9.5- 16 cm) (kg)

#### Batasan-batasan Percobaan

Adapun batasan-batasan dalam percobaan ditetapkan sebagai berikut:

- Nilai *slump* akhir yang direncanakan sebesar  $200 \pm 20$  mm, dengan pertimbangan bahwa beton dengan nilai *slump* tersebut akan dapat dengan mudah dikerjakan. Untuk mencapai nilai *slump* yang ditargetkan itu, maka akan ditambahkan sejumlah *superplasticizer* ke dalam campuran beton sampai didapatkan nilai *slump* sesuai rencana.
- Nilai W/B dibatasi antara 0.25 – 0.35, nilai ini ditentukan dengan memperhatikan penelitian sebelumnya oleh peneliti lain, di mana dengan rentang W/B tersebut dapat dihasilkan beton mutu tinggi.
- Jumlah total *binder material* (semen, *fly ash* dan *silica fume*) yang digunakan ditetapkan sebesar 525, 575 dan 625 kg/m<sup>3</sup>.
- Prosentase *fly ash* yang digunakan adalah 0%, 10% dan 20% dari total berat *binder material*.
- Prosentase *silica fume* yang digunakan adalah 0%, 5% dan 10% dari total berat *binder material*.
- Bahan tambahan berupa *retarder* tidak dipergunakan.
- *Slump loss* dan temperatur beton diabaikan.

Adapun tahapan-tahapan percobaan di laboratorium adalah sebagai berikut:

#### 1. Pengujian Agregat

Agregat halus dan kasar harus melalui beberapa pengujian dan memenuhi persyaratan dalam pengujian tersebut agar dapat digunakan sebagai bahan pembuatan beton. Adapun untuk standar pengujian agregat dipergunakan ASTM dan *British Standard* (BS) yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Jenis pengujian/pemeriksaan dalam standar ASTM

Standar ASTM / BS	Jenis Pengujian / Pemeriksaan
C 29/C 29M – 91a	Metode pengesanan berat volume agregat kasar dan halus
C 33 – 93	Spesifikasi agregat untuk pembuatan beton
C 566 – 96	Metode pengesanan kelembaban agregat kasar dan halus
BS 812	Metode pengesanan <i>crushing value</i> agregat kasar
C 117- 95	Metode pengesanan kebersihan agregat kasar dan halus terhadap lumpur
C 127 – 88 (1993)	Metode pengesanan berat jenis dan air resapan agregat kasar
C 128 – 93	Metode pengesanan berat jenis dan air resapan agregat halus
C 131 – 89 & C 535 – 89	Metode pengesanan keausan agregat kasar
C 136 – 95a	Metode pengesanan analisa saringan agregat kasar dan halus

Untuk keperluan desain campuran, maka dilakukan pengujian tambahan terhadap agregat halus maupun agregat kasar, yaitu:

- a. Pengujian analisa saringan agregat halus (ASTM C 136 – 95a)
- b. Pengujian analisa saringan agregat kasar (ASTM C 136 – 95a)

Dengan pengujian analisa saringan dapat ditentukan prosentase dari setiap jenis agregat agar tercapai gradasi yang baik dalam campuran beton. Gradasi campuran dikatakan baik jika beton yang

dihasilkan tidak mengalami *segregasi*, *bleeding* dan porositas sekecil mungkin dan kekuatan yang optimum.

## 2. Desain Campuran

Berdasarkan batasan-batasan percobaan yang telah ditetapkan dan hasil pengujian agregat, maka dibuat suatu desain campuran (*mix design*) beton mutu tinggi dengan menggunakan standar ACI (Tabel 2).

Tabel 2. Jenis pengujian / pemeriksaan dalam standar ACI

Standar ACI	Jenis Pengujian / Pemeriksaan
ACI 211.1 – 91	Standar pelaksanaan campuran beton normal, <i>heavyweight</i> dan <i>mass concrete</i>
ACI 211.4R-93	Petunjuk pemilihan proporsi beton mutu tinggi dengan menggunakan semen portland dan <i>fly ash</i>
ACI 212.3R – 91	Petunjuk penggunaan bahan kimia tambahan ( <i>admixture</i> ) pada beton
ACI 226.3R – 87	Penggunaan <i>fly ash</i> pada beton
ACI 363R – 92	<i>State of the art report on high strength concrete</i>

## 3.

### Percobaan di Laboratorium

Percobaan dilakukan sebanyak 72 kali sesuai dengan desain campuran yang telah.

### 4. Pembuatan Benda Uji

Dalam setiap kali percobaan, dilakukan pembuatan benda uji silinder sesuai ketentuan dalam ASTM C 192 – 95.

### 5. Perawatan Benda Uji

Perawatan benda uji dilakukan sesuai dengan ASTM C 192 – 95 dan ACI 308- 81.

### 6. Pengetesan Beton Keras

Ketentuan untuk umur pengetesan beton ditetapkan pada umur 28 (berdasarkan standar ACI, umur pengetesan beton mutu tinggi 3 atau 7, 28 dan 56 atau 90 hari) (ACI Committee, 1993). Jumlah benda uji yang ditest adalah 3 buah benda uji silinder berukuran 100 mm x 200 mm.

### Analisa Data Hasil Percobaan

Berdasarkan tujuan penelitian, maka tahapan terpenting dan terakhir yang akan ditempuh adalah melakukan pemodelan. Adapun pemodelan yang

dilakukan menggunakan model matematis yang merupakan hubungan korelasi variabel bebas dengan beberapa variabel tidak bebas. Bentuk persamaan yang dipilih adalah persamaan regresi berganda, karena dengan persamaan regresi dapat diketahui seberapa jauh model yang dihasilkan dapat digunakan serta tingkat keandalannya.

Untuk memperoleh model terbaik dengan analisa regresi berganda, ada beberapa tahapan pengujian yang harus dilakukan untuk analisa data. Untuk itu, data- data hasil percobaan akan diolah dan diuji dengan bantuan program komputer yaitu program paket statistik MINITAB.

Data-data tersebut dibagi menjadi variabel tak bebas (*variable dependent*) dan variabel bebas (*variable independent*), di mana variabel tidak bebas dilambangkan dengan huruf "Y", sedangkan variabel bebas dilambangkan dengan huruf "X".

Berikut ini adalah penjelasan tahapan-tahapan pengujian yang dilakukan:

#### 1. Analisa Regresi Bertatar (*Stepwise Regression*)

Semua variabel tak bebas dan bebas (termasuk variabel turunan) yang telah diperoleh dari hasil percobaan (baik yang tidak dan sudah ditransformasi) dianalisa untuk memperoleh suatu model dengan tahapan pertama, yaitu analisa

regresi bertatar. Melalui analisa ini akan dilakukan penyeleksian variabel bebas, di mana pada akhirnya, tidak semua variabel bebas dan turunannya akan diambil untuk membentuk persamaan, tetapi hanya variabel tertentu yang paling berkorelasi dengan variabel tak bebas saja. Tujuannya adalah untuk memperoleh persamaan yang sederhana, tetapi dapat memprediksi dengan baik. Hasil analisa regresi bertatar harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

- a. Nilai koefisien determinasi terkorreksi  $\approx 1$
- b.  $P$ -value variabel bebas  $X \leq 0.05$
- c. Tanda + / - pada masing-masing koefisien variabel bebas  $X$  dapat diterima secara logika.
- d. Sebaiknya memiliki nilai konstanta regresi kecil (0)

## 2. Analisa Regresi (*Regression Analysis*)

Pengujian normalitas bertujuan untuk menguji apakah dalam sisaan sebuah model regresi berdistribusi normal atau tidak. Deteksi dengan melihat penyebaran titik-titik sisaan terhadap sumbu diagonal dari grafik *Normal Probability Plot for Residuals*. Dasar pengambilan keputusan:

- Jika titik-titik sisaan menyebar di sekitar garis diagonal dan mengikuti arah garis diagonal, maka model regresi memenuhi asumsi normalitas.
- Jika titik-titik sisaan menyebar jauh dari garis diagonal dan/atau tidak mengikuti arah garis diagonal, maka model regresi tidak memenuhi asumsi normalitas.

### b. Pengujian Multikolinearitas

Menguji apakah ada hubungan linear yang sempurna atau pasti di antara beberapa atau semua variabel yang menjelaskan model regresi. Deteksi adanya multikolinearitas adalah dengan besaran VIF (*variance inflation factor*). Resiko multikolinearitas tinggi untuk nilai VIF  $> 4$  (Garson G, David).

### c. Pengujian Autokorelasi

Menguji apakah kesalahan dan gangguan dalam fungsi regresi populasi adalah random atau berkorelasi. Jika terjadi korelasi, maka timbul masalah autokorelasi. Deteksi adanya autokorelasi dengan menggunakan besaran Durbin-Watson ( $d$ ) yang besarnya berkisar dari 0-4. dasar pengambilan keputusan pada pengujian ini adalah (Garson G, David):

Variabel-variabel bebas yang berhasil diperoleh melalui analisa regresi bertatar akan diuji lagi melalui pengujian analisa regresi. Analisa regresi akan menghasilkan model matematis serta hasil pengujian  $p$ -value konstanta,  $p$ -value persamaan, di mana konstanta setiap persamaan harus memiliki  $p$ -value  $\leq 0.05$  dan  $p$ -value persamaan  $\leq 0.05$ . Selain  $p$ -value, analisa regresi menyajikan hasil dari pengujian anova (*analysis of variance*).

## 3. Pengujian Asumsi-asumsi Analisa Regresi Berganda

Setelah melewati tahap pengujian analisa regresi, maka model-model yang telah diperoleh harus diuji apakah sesuai atau bertentangan dengan asumsi-asumsi dalam analisa regresi berganda sebagai berikut:

### a. Pengujian Normalitas

- Jika nilai  $d$  mendekati 0, terjadi autokorelasi positif (*standard error* untuk koefisien regresi terlalu kecil).
- Jika nilai  $d$  mendekati 4, terjadi autokorelasi negatif (*standard error* untuk koefisien regresi terlalu besar).
- Jika nilai  $d$  berada di antara 1.5-2.5, tidak terjadi autokorelasi.

### d. Pengujian Heteroskedastisitas

Menguji apakah dalam sebuah model regresi terjadi ketidaksamaan varians dari residual dari satu pengamatan ke pengamatan yang lain (variasi satu kesalahan dengan kesalahan yang lain besarnya relatif sama). Jika terjadi perbedaan varians dikatakan terjadi heteroskedastisitas. Deteksi dilakukan dengan melihat ada tidaknya pola tertentu pada grafik sisaan-nilai prediksi (*Residual Versus Fitted Value*). Absis pada grafik menunjukkan nilai prediksi, sedangkan ordonat menunjukkan penyimpangan. Dasar pengambilan keputusan dalam pengujian ini adalah:

- Jika ada pola tertentu, seperti titik-titik yang ada membentuk suatu pola tertentu yang teratur (bergelombang, melebar kemudian menyempit), maka telah terjadi heteroskedastisitas.
- Jika tidak ada pola yang jelas, serta titik-titik menyebar di atas dan di bawah angka 0 pada sumbu  $Y$ , maka tidak terjadi heteroskedastisitas.

Program paket Minitab juga menyajikan hasil pengujian asumsi-asumsi analisa regresi berganda.

#### 4. Pendugaan Nilai Variabel Tak Bebas Berdasarkan Model

Tahapan yang terakhir dari pengujian analisa regresi berganda adalah menduga nilai variabel tak bebas dengan memasukkan variabel- variabel bebas ke dalam model persamaa dan menghitung penyimpangan dan simpangan baku sisaan, yang meliputi perhitungan:

- Rata-rata kuadrat penyimpangan/*Mean of Square Error* (MSE)
- Jumlah kuadrat penyimpangan/*Sum of Squares Error* (SSE)
- Akar kuadrat penyimpangan/*Root Mean of Squares* (RMSE)

- Simpangan baku sisaan/*Devisi Standard of Error* (DSE)

Model yang dipilih adalah model yang memiliki nilai MSE, SSE, RMSE dan DSE terkecil. SSE menyatakan jumlah kuadrat penyimpangan dari suatu model terhadap hasil penelitian. Pengkuadratan skor simpangan ini untuk mempermudah menghitung jumlah skor simpangan dengan didasarkan pada kenyataan sebagian skor simpangan berharga negatif dan sebagian lagi berharga positif. Jika SSE tersebut dibagi dengan jumlah sampel (n), maka akan diperoleh rata-rata kuadrat simpangan (MSE) (Montgomery, DC., 1992 dan Nazir, M., 1998). Perhitungan- perhitungan matematis dalam pengujian ini dilakukan dengan program paket *spreadsheet* Excel.

## HASIL DAN DISKUSI

### Hasil Pengujian Agregat

Sebelum percobaan laboratorium dilakukan, maka bahan-bahan pembentuk beton yang akan *Standard* (BS). Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 3.

digunakan harus melewati beberapa pengujian/pemeriksaan. Pengujian tersebut dilakukan berdasarkan *American Society for Testing and Materials* (ASTM) dan *British*

Tabel 3. Jenis pengujian/pemeriksaan agregat

Jenis Pengujian / Pemeriksaan	Satuan	Hasil Pengujian/Pemeriksaan		
		Pasir Lumajang	Batu Pecah 2.36-9.5 mm	Batu Pecah 9.5-16 mm
Berat volume (ASTM C 29/C 29M – 91a)	%	1.628	1.481	1.436
Kelembaban / kandungan air (ASTM C 566 – 96)	%	Setiap kali sebelum percobaan	Setiap kali sebelum percobaan	Setiap kali sebelum percobaan
<i>Crushing value</i> (BS 812)	%	-	-	22.29
Kebersihan terhadap lumpur (pencucian) (ASTM C 117- 95)	%	0.35	0.52	0.20
Berat jenis:				
- <i>Bulk specific gravity</i>		2.677	2.730	2.745
- <i>Bulk specific gravity SSD basis</i>		2.733	2.784	2.791
- <i>Apparent specific gravity</i> (ASTM C 127-88 (1993) dan C 128- 93)		2.838	2.886	2.878
Air resapan (ASTM C 127-88 (1993) dan C 128- 93)	%	2.120	1.971	1.686

Keausan batu pecah (ASTM C 131 – 89 & C535 – 89)	%	-	-	23.66
Modulus kehalusan (ASTM C 136 – 95a)	-	2.66	-	-

#### Data-data Hasil Percobaan Pembuatan Beton Mutu Tinggi

Percobaan laboratorium dilakukan sebanyak 72 kali dengan desain campuran yang berbeda. Secara umum, desain campuran dibagi menjadi 3 kelompok besar berdasarkan berat total *binder material* yang digunakan yaitu 625, 575 dan 525 kg/m<sup>3</sup>. Percobaan laboratorium untuk pembuatan beton

mutu tinggi dilakukan dengan nilai W/B bervariasi dari 0.25 – 0.35, total *binder material* 525, 575 dan 625 kg/m<sup>3</sup> (*binder material* berupa semen, silica fume (SF) dan *fly ash* (FA)). Agregat kasar yang digunakan adalah batu pecah dari Pasuruan, agregat halus diambil dari pasir Lumajang, juga digunakan superplasticizer (Sikament NN) untuk memperoleh campuran beton dengan slump 200±20 mm.

Tabel 4. Desain komposisi beton mutu tinggi

No. Mix	<i>Binder Material</i> kg	W/B	Semen		Silica Fume		<i>Fly Ash</i>		Air		Agregat Halus Pasir Lumajang		Agregat Kasar				Sikament NN liter	Slump cm
			kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%		
1	625	0,25	625,0	100	0	0	0	0	156	688	39	506	28	592	33	10,00	21,5	
2	625	0,25	562,5	90	0	0	62,5	10	156	684	39	503	28	589	33	11,00	21,5	
3	625	0,25	500,0	80	0	0	125	20	156	680	39	500	28	585	33	10,75	21	
4	625	0,25	593,8	95	31,3	5	0	0	156	685	39	503	28	590	33	15,50	22	
5	625	0,25	531,3	85	31,3	5	62,5	10	156	681	39	501	28	586	33	12,00	22	
6	625	0,25	468,8	75	31,3	5	125	20	156	677	39	498	28	583	33	12,00	22	
7	625	0,25	562,5	90	62,5	10	0	0	156	682	39	501	28	587	33	19,25	22	
8	625	0,25	500,0	80	62,5	10	62,5	10	156	678	39	498	28	584	33	14,00	19	
9	625	0,25	437,5	70	62,5	10	125	20	156	674	39	495	28	580	33	12,00	20	
10	625	0,27	625,0	100	0	0	0	0	169	674	39	495	28	580	33	10,75	22	
11	625	0,27	562,5	90	0	0	62,5	10	169	670	39	493	28	577	33	10,00	20	
12	625	0,27	500,0	80	0	0	125	20	169	667	39	490	28	574	33	9,50	21	
13	625	0,27	593,8	95	31,3	5	0	0	169	671	39	493	28	578	33	10,00	22	
14	625	0,27	531,3	85	31,3	5	62,5	10	169	668	39	490	28	574	33	10,75	22	
15	625	0,27	468,8	75	31,3	5	125	20	169	663	39	488	28	571	33	13,00	20	
16	625	0,27	562,5	90	62,5	10	0	0	169	688	39	491	28	575	33	12,00	19,5	
17	625	0,27	500,0	80	62,5	10	62,5	10	169	664	39	488	28	572	33	12,00	20	
18	625	0,27	437,5	70	62,5	10	125	20	169	660	39	485	28	568	33	12,50	21	
19	625	0,29	625,0	100	0	0	0	0	181	661	39	486	28	569	33	7,00	21	
20	625	0,29	562,5	90	0	0	62,5	10	181	658	39	483	28	566	33	7,00	22	
21	625	0,29	500,0	80	0	0	125	20	181	654	39	480	28	563	33	6,00	22	
22	625	0,29	593,8	95	31,3	5	0	0	181	659	39	484	28	567	33	7,00	20	
23	625	0,29	531,3	85	31,3	5	62,5	10	181	655	39	481	28	563	33	7,00	21	
24	625	0,29	468,8	75	31,3	5	125	20	181	651	39	478	28	560	33	5,75	22	
25	625	0,29	562,5	90	62,5	10	0	0	181	656	39	482	28	564	33	6,50	21	
26	625	0,29	500,0	80	62,5	10	62,5	10	181	652	39	479	28	561	33	8,00	21	
27	625	0,29	437,5	70	62,5	10	125	20	181	648	39	476	28	557	33	6,50	21	
28	575	0,30	575,0	100	0	0	0	0	174	844	48	448	25	484	27	6,25	20	
29	575	0,30	517,5	90	0	0	57,5	10	174	840	48	446	25	482	27	5,50	22	
30	575	0,30	460,0	80	0	0	115	20	174	836	48	444	25	479	27	6,50	19,5	
31	575	0,30	546,3	95	28,8	5	0	0	174	842	48	447	25	483	27	13,00	20	
32	575	0,30	488,8	85	28,8	5	57,5	10	174	836	48	444	25	479	27	11,25	22	

33	575	0,30	431,3	75	28,8	5	115	20	174	832	48	442	25	477	27	10,25	22
34	575	0,30	517,5	90	57,5	10	0	0	174	838	48	445	25	481	27	14,00	21
35	575	0,30	460,0	80	57,5	10	57,5	10	174	833	48	442	25	478	27	13,25	20
36	575	0,30	402,5	70	57,5	10	115	20	174	828	48	440	25	475	27	11,00	21
37	575	0,33	575,0	100	0	0	0	0	190	823	48	437	25	472	27	6,00	20
38	575	0,33	517,5	90	0	0	57,5	10	190	819	48	435	25	470	27	5,50	21
39	575	0,33	460,0	80	0	0	115	20	190	815	48	433	25	467	27	5,20	20
40	575	0,33	546,3	95	28,8	5	0	0	190	820	48	435	25	470	27	12,00	19,5
41	575	0,33	488,8	85	28,8	5	57,5	10	190	816	48	433	25	468	27	9,00	20
42	575	0,33	431,3	75	28,8	5	115	20	190	811	48	431	25	465	27	9,00	19
43	575	0,33	517,5	90	57,5	10	0	0	190	817	48	434	25	469	27	12,50	20
44	575	0,33	460,0	80	57,5	10	57,5	10	190	812	48	431	25	466	27	11,00	20
45	575	0,33	402,5	70	57,5	10	115	20	190	817	48	434	25	469	27	9,75	22
46	525	0,31	525,0	100	0	0	0	0	163	916	50	458	25	476	26	11,50	21
47	525	0,31	472,5	90	0	0	52,5	10	163	912	50	456	25	474	26	12,00	20,5
48	525	0,31	420,0	80	0	0	105	20	163	908	50	454	25	472	26	10,60	21,5
49	525	0,31	498,8	95	26,3	5	0	0	163	913	50	457	25	474	26	15,00	22
50	525	0,31	446,3	85	26,3	5	52,5	10	163	909	50	455	25	472	26	11,25	21,5
51	525	0,31	393,8	75	26,3	5	105	20	163	905	50	453	25	470	26	14,25	22
52	525	0,31	472,5	90	52,5	10	0	0	163	910	50	455	25	473	26	15,00	21
53	525	0,31	420,0	80	52,5	10	52,5	10	163	905	50	453	25	470	26	16,00	20
54	525	0,31	367,5	70	52,5	10	105	20	163	901	50	451	25	468	26	14,75	20
55	525	0,33	525,0	100	0	0	0	0	173	903	50	452	25	469	26	8,25	20
56	525	0,33	472,5	90	0	0	52,5	10	173	899	50	450	25	467	26	9,00	21
57	525	0,33	420,0	80	0	0	105	20	173	894	50	447	25	465	26	8,75	22
58	525	0,33	498,8	95	26,3	5	0	0	173	899	50	450	25	467	26	11,25	20
59	525	0,33	446,3	85	26,3	5	52,5	10	173	895	50	448	25	465	26	9,75	19,5
60	525	0,33	393,8	75	26,3	5	105	20	173	891	49	448	25	464	26	11,25	20,5
61	525	0,33	472,5	90	52,5	10	0	0	173	896	50	448	25	466	26	11,30	22
62	525	0,33	420,0	80	52,5	10	52,5	10	173	892	50	446	25	463	26	12,25	18,5
63	525	0,33	367,5	70	52,5	10	105	20	173	888	50	444	25	461	26	11,50	21,5
64	525	0,35	525,0	100	0	0	0	0	184	888	50	444	25	461	26	5,00	20
65	525	0,35	472,5	90	0	0	52,5	10	184	884	50	442	25	459	26	6,00	22
66	525	0,35	420,0	80	0	0	105	20	184	880	50	440	25	457	26	6,75	22
67	525	0,35	498,8	95	26,3	5	0	0	184	884	50	442	25	459	26	7,00	20
68	525	0,35	446,3	85	26,3	5	52,5	10	184	880	50	440	25	457	26	7,50	22
69	525	0,35	393,8	75	26,3	5	105	20	184	876	50	438	25	455	26	7,25	21,5
70	525	0,35	472,5	90	52,5	10	0	0	184	882	50	441	25	458	26	7,75	20
71	525	0,35	420,0	80	52,5	10	52,5	10	184	877	50	439	25	455	26	8,50	22
72	525	0,35	367,5	70	52,5	10	105	20	184	872	50	436	25	453	26	8,25	22

Setiap kali percobaan dengan desain campuran berbeda, dibuat benda uji silinder berukuran 100 mm x 200 mm sebanyak 3 buah, dengan pengujian kuat tekan beton umur 28 (3 benda uji). Test kuat tekan beton pada masing-masing umur yang disajikan adalah merupakan rata-rata dari 3 benda uji dengan prosentase selisih maksimum nilai tertinggi dan terendah (*acceptable range*) dari 3 benda uji sebesar 7.8%. Apabila hasil yang diperoleh melebihi prosentase yang ditetapkan, maka salah satu hasil test dikeluarkan, dan nilai kuat tekan yang diambil adalah rata-rata 2

benda uji dengan prosentase selisih maksimum nilai tertinggi dan terendah sebesar 6.6%. Batasan sebesar 7.8% untuk rata-rata 3 benda uji dan 6.6% untuk rata-rata 2 benda uji hasil percobaan di laboratorium ditetapkan di dalam ASTM C39 – 94 (ASTM, 1996).

Dengan desain campuran tersebut, nilai kuat tekan silinder beton umur 28 hari yang dihasilkan minimum 48.2 MPa (W/B 0.35, total *binder material* 525 kg/m<sup>3</sup>, 80% semen dan 20% *fly ash*) dan maksimum 93.0 MPa (W/B 0.25, total *binder material* 625 kg/m<sup>3</sup>, 90% semen dan 10% *silica fume*).



### Pemodelan Komposisi Beton Mutu Tinggi

Dalam pemodelan komposisi beton mutu tinggi, data- data yang dihasilkan dari 72 kali percobaan di laboratorium dibagi menjadi beberapa variabel, yaitu variabel tak bebas (*dependent variable*) dan variabel bebas (*independent variable*), yang kemudian diolah dengan menggunakan program Microsoft Excel dan Minitab. Variabel tak bebas dan variabel bebas yang dipakai dalam pemodelan dilambangkan sebagai berikut:

Y28 = Kuat tekan silinder beton umur 28 hari (MPa), nilai kuat tekan maksimum 93 MPa dan minimum 48 MPa

- X1 = Semen (kg)
- X2 = *Silica fume* (kg)
- X3 = *Fly ash* (kg)
- X4 = Air (kg)

- X5 = Agregat halus (pasir) dalam keadaan SSD (kg)
- X6 = Agregat kasar (batu pecah ukuran 2.36-9.5 cm) dalam keadaan SSD (kg)
- X7 = Agregat kasar (batu pecah ukuran 9.5-16 cm) dalam keadaan SSD (kg)
- X8 = Total agregat kasar (batu pecah ukuran 2.36- 9.5 cm dan 9.5-16 cm) dalam keadaan SSD (kg)

Proses pemodelan dan tahapan-tahapan pengujian serta hasil yang diperoleh melalui analisa regresi berganda, untuk menghasilkan model matematis terbaik yang dapat memprediksi kuat tekan beton umur 28 hari dijelaskan sebagai berikut:



No.	No.	Umur 28 hari		No.	No.	Umur 28 hari		No.	No.	Umur 28 hari		No.	No.	Umur 28 hari	
Mix	Benda	Kuat Tekan Individual	Mix	Mix	Benda	Kuat Tekan Individual	Mix	Mix	Benda	Kuat Tekan Individual	Mix	Mix	Benda	Kuat Tekan Individual	Mix
	Uji	MPa			Uji	MPa			Uji	MPa			Uji	MPa	
1	1	73,6		11	1	66,0		21	1	59,8		31	1	83,0	
	2	70,2	71,0		2	64,7	65,8		2	60,4	60,1		2	81,3	81,2
	3	69,2			3	66,8			3	51,8*			3	79,3	
2	1	68,4		12	1	66,2		22	1	75,8		32	1	74,2	
	2	70,2	68,4		2	60,8*	66,4		2	78,5	75,7		2	73,2	73,9
	3	66,7			3	66,6			3	72,8			3	74,2	
3	1	66,8		13	1	86,8*		23	1	75,2		33	1	70,3	
	2	65,1	66,2		2	80,9	79,5		2	74,6	76,8		2	72,5	70,6
	3	66,6			3	78,2			3	80,6			3	68,9	
4	1	89,2		14	1	81,0		24	1	73,6		34	1	80,6	
	2	85,4	86,0		2	79,5	80,5		2	70,2	71,2		2	76,0	79,2
	3	83,4			3	81,0			3	69,7			3	81,0	
5	1	87,5		15	1	76,2		25	1	84,2		35	1	72,6	
	2	83,0	85,2		2	74,5	75,2		2	83,6	84,0		2	69,2	70,0
	3	85,0			3	75,0			3	84,2			3	68,2	
6	1	81,0		16	1	78,8*		26	1	87,8		36	1	79,2	
	2	75,8	78,2		2	91,2	89,6		2	77,2*	86,1		2	74,6	76,8
	3	77,9			3	87,9			3	84,5			3	76,5	
7	1	97,1		17	1	86,0		27	1	80,0		37	1	57,0	
	2	89,8	93,0		2	81,8*	87,4		2	78,6	79,2		2	55,7	56,2
	3	92,0			3	88,8			3	79,0			3	56,0	
8	1	92,0		18	1	77,2		28	1	60,8		38	1	51,0	
	2	88,2	90,0		2	74,8	76,0		2	59,2	61,2		2	44,3*	53,2
	3	89,8			3	76,0			3	63,6			3	55,4	
9	1	89,8		19	1	70,3*		29	1	65,1*		39	1	54,3	
	2	84,0	86,9		2	63,8	63,8		2	58,7	57,9		2	50,8	53,1
	3	77,8*			3	63,8			3	57,2			3	54,3	
10	1	69,4		20	1	69,0		30	1	54,0		40	1	70,1	
	2	68,5	69,4		2	67,8	67,8		2	54,0	55,0		2	71,0	70,4
	3	70,2			3	66,5			3	57,1			3	70,1	

Tabel 5. Hasil pengujian kuat tekan beton mutu tinggi

Tabel 5. Hasil pengujian kuat tekan beton mutu tinggi (lanjutan)

No.	No.	Umur 28 hari		No.	No.	Umur 28 hari		No.	No.	Umur 28 hari		No.	No.	Umur 28 hari	
Mix	Benda	Kuat Tekan Individual	Mix	Mix	Benda	Kuat Tekan Individual	Mix	Mix	Benda	Kuat Tekan Individual	Mix	Mix	Benda	Kuat Tekan Individual	Mix
	Uji	MPa			Uji	MPa			Uji	MPa			Uji	MPa	
41	1	70,0		51	1	70,8		61	1	73,2		71	1	68,5	
	2	65,2	67,2		2	65,8	69,2		2	72,4	73,1		2	64,5	66,5
	3	66,4			3	71,0			3	73,8			3	62,0*	
42	1	65,8		52	1	78,2		62	1	81,2		72	1	68,0	
	2	67,3	65,8		2	72,8	75,8		2	78,8	78,9		2	66,8	67,2
	3	64,2			3	76,4			3	76,8			3	66,8	
43	1	74,3		53	1	79,0		63	1	72,0		73	1	70,0	
	2	73,8	74,0		2	84,0	81,5		2	69,0	70,0		2	70,0	
	3	73,8			3	77,0*			3	69,0			3	70,0	
44	1	78,8		54	1	71,8		64	1	55,2		74	1	54,3	
	2	74,0	76,0		2	75,2	73,5		2	53,8	54,3		2	54,3	
	3	75,2			3	73,5			3	54,0			3	54,0	
45	1	73,8		55	1	60,0		65	1	50,6		75	1	50,2	
	2	70,2	72,3		2	56,6	58,2		2	49,0	50,2		2	50,2	
	3	72,8			3	58,0			3	51,0			3	51,0	
46	1	61,0		56	1	55,0		66	1	50,2		76	1	48,2	
	2	60,0	60,2		2	55,0	55,0		2	47,6	48,2		2	48,2	

	3	59,5			3	49,7*			3	46,8	
	1	55,0			1	52,8			1	67,0	
47	2	58,5	55,8	57	2	50,8	51,0	67	2	65,8	65,2
	3	54,0			3	49,5			3	62,8	
	1	55,6			1	70,2			1	63,8	
48	2	54,0	54,1	58	2	65,8	68,1	68	2	60,5	61,0
	3	52,8			3	68,3			3	58,8	
	1	78,5			1	66,9			1	61,0	
49	2	72,3*	76,3	59	2	65,0	65,2	69	2	57,5	59,2
	3	74,2			3	63,7			3	55,5*	
	1	77,0			1	62,2			1	70,0	
50	2	76,0	75,2	60	2	57,8	60,2	70	2	67,3	68,2
	3	72,6			3	60,5			3	67,3	

Tabel 6. Kandidat model matematis dengan variabel  $Y_{28}$ ,  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ , dan  $X_4$ 

No.	Kandidat Model Matematis	$R^2$ (adj) (%)	P all	P
1	$Y_{28} = 60,8 + 0,427 X_2 + 0,100 X_1 - 0,318 X_4 + 0,0525 X_3$	90.8	0.000	$C = 0.000, X_1 = 0.000, X_2 = 0.000, X_3 = 0.000, X_4 = 0.000$
2	$\ln Y_{28} = 4,09 + 0,00622 X_2 + 0,00145 X_1 - 0,00449 X_4 + 0,000759 X_3$	89.4	0.000	$C = 0.000, X_1 = 0.000, X_2 = 0.000, X_3 = 0.000, X_4 = 0.000$
3	$\ln Y_{28} = 3,91 + 0,0833 \ln (X_2+1) + 0,701 \ln (X_1+1) - 0,828 \ln (X_4+1) + 0,0163 \ln (X_3+1)$	90.1	0.000	$C = 0.000 \ln (X_1+1) = 0.000, \ln (X_2+1) = 0.000, \ln (X_3+1) = 0.000, \ln (X_4+1) = 0.000$
4	$\log Y_{28} = 1,77 + 0,00270 X_2 + 0,000628 X_1 - 0,00194 X_4 + 0,000328 X_3$	89.4	0.000	$C = 0.000, X_1 = 0.000, X_2 = 0.000, X_3 = 0.000, X_4 = 0.000$
5	$\log Y_{28} = 1,72 + 0,0831 \log (X_2+1) + 0,695 \log (X_1+1) - 0,828 \log (X_4+1) + 0,0160 \log (X_3+1)$	90.1	0.000	$C = 0.000, \log (X_1+1) = 0.000, \log (X_2+1) = 0.000, \log (X_3+1) = 0.000, \log (X_4+1) = 0.000$
6	$Y_{28} = 59,6 + 3,26 X_2^{0,5} + 4,76 X_1^{0,5} - 8,55 X_4^{0,5} + 0,631 X_3^{0,5}$	93.6	0.000	$C = 0.000, X_1^{0,5} = 0.000, X_2^{0,5} = 0.000, X_3^{0,5} = 0.000, X_4^{0,5} = 0.000$
7	$Y_{28}^{0,5} = 7,75 + 0,0257 X_2 + 0,00600 X_1 - 0,0188 X_4 + 0,00313 X_3$	90.3	0.000	$C = 0.000, X_1 = 0.000, X_2 = 0.000, X_3 = 0.000, X_4 = 0.000$
8	$Y_{28}^{0,5} = 7,63 + 0,197 X_2^{0,5} + 0,285 X_1^{0,5} - 0,505 X_4^{0,5} + 0,0376 X_3^{0,5}$	93.8	0.000	$C = 0.000, X_1^{0,5} = 0.000, X_2^{0,5} = 0.000, X_3^{0,5} = 0.000, X_4^{0,5} = 0.000$

Tahap I: Analisa regresi bertatar (*stepwise regression*) Tahapan awal yang dilakukan adalah menganalisa variabel tak bebas ( $Y_{28}$ ), variabel bebas ( $X$ ), variabel bebas turunan (yang tidak dan sudah ditransformasi) dengan analisa regresi bertatar. Dari hasil regresi bertatar, diperoleh persamaan-persamaan yang mengandung beberapa variabel bebas yang mempunyai korelasi paling tinggi terhadap variabel tak bebas.

#### Tahap II: Analisa Regresi

Selanjutnya, variabel-variabel bebas yang berhasil memenuhi persyaratan analisa regresi bertatar masuk pada tahap pengujian berikutnya, yaitu analisa regresi. Analisa regresi akan menghasilkan model matematis yang dilengkapi dengan hasil perhitungan dan pengujian asumsi-asumsi. Hasil dari pengujian ini adalah 8 kandidat model yang dapat diterima karena nilai *p-value* 0.05 (Tabel 6).

#### Tahap III: Pengujian asumsi-asumsi klasik regresi

##### 1. Pengujian Normalitas

Hasil pengujian normalitas dengan bantuan software minitab dapat dilihat pada Lampiran 3 (*Normal Probability Plot for Residuals*). Grafik normalisasi untuk kandidat model 2, 3, 4, 5, 6 dan 8 memperlihatkan bahwa titik-titik sisaan menyebar di sekitar garis diagonal dan mengikuti arah garis (walaupun ada beberapa titik

merupakan pencilan/*outliers*), sehingga dikatakan sisaan model-model tersebut berdistribusi normal. Sedangkan grafik normalitas kandidat model 1 dan 7 memperlihatkan adanya kumpulan titik-titik sisaan yang tidak mengikuti garis lurus, sehingga tidak memenuhi asumsi normalitas dan tidak dapat diambil sebagai kandidat model terbaik.

##### 2. Pengujian Multikolinearitas

Hasil pengujian multikolinearitas dengan menggunakan program Minitab dapat dilihat pada Tabel 7, di mana multikolinearitas tidak terjadi jika  $VIF < 4$ . Hasil pengujian yang dilakukan pada 6 kandidat model memperlihatkan bahwa nilai  $VIF$  untuk semua variabel bebas  $< 4$ , sehingga dapat disimpulkan bahwa tidak terjadi multikolinearitas pada kandidat-kandidat model tersebut.

##### 3. Pengujian Autokorelasi

Hasil pengujian autokorelasi dengan menggunakan program Minitab menghasilkan besaran Durbin-Watson ( $d$ ) (Tabel 8), di mana hasil pengujian terhadap 4 kandidat model (kandidat model 2, 3, 4 dan 5) memperlihatkan nilai  $d$  tidak berada di antara 1.5 sampai 2.5, hal ini menyebabkan 4 model tersebut harus dikeluarkan. Sedangkan, kandidat model 6 dan 8 dapat memenuhi asumsi autokorelasi, sehingga dapat memasuki pengujian selanjutnya, yaitu pengujian asumsi heteroskedastisitas.

Tabel 7. Hasil pengujian asumsi multikolinearitas dengan menggunakan nilai VIF

Kandidat Model	Nilai VIF	Status Pengujian
2	$X1 = 2.3, X2 = 1.2, X3 = 2.1, X4 = 1.0$	Tidak terjadi multikolinearitas VIF < 4
3	$\ln (X1+1) = 2.2, \ln (X2+1) = 1.2, \ln (X3+1) = 1.9, \ln (X4+1) = 1.0$	Tidak terjadi multikolinearitas VIF < 4
4	$X1 = 2.3, X2 = 1.2, X3 = 2.1, X4 = 1.0$	Tidak terjadi multikolinearitas VIF < 4
5	$\log (X1+1) = 2.2, \log (X2+1) = 1.2, \log (X3+1) = 1.9, \log (X4+1) = 1.0$	Tidak terjadi multikolinearitas VIF < 4
6	$X1^{0.5} = 2.4, X2^{0.5} = 1.3, X3^{0.5} = 2.1, X4^{0.5} = 1.0$	Tidak terjadi multikolinearitas VIF < 4
8	$X1^{0.5} = 2.4, X2^{0.5} = 1.3, X3^{0.5} = 2.1, X4^{0.5} = 1.0$	Tidak terjadi multikolinearitas VIF < 4

Tabel 8. Hasil Pengujian Asumsi Autokorelasi dengan Menggunakan Statistik Durbin-Watson (d)

Kandidat Model	Nilai d	Status Pengujian
2	1.50	Terjadi autokorelasi positif d 0
3	1.31	Terjadi autokorelasi positif d 0
4	1.50	Terjadi autokorelasi positif d 0
5	1.31	Terjadi autokorelasi positif d 0
6	1.76	Tidak terjadi autokorelasi $1.5 < d < 2.5$
8	1.69	Tidak terjadi autokorelasi $1.5 < d < 2.5$

#### 4. Pengujian Heteroskedastisitas

Deteksi yang dilakukan untuk melihat apakah terjadi pelanggaran terhadap asumsi heteroskedastisitas pada kandidat model regresi yang telah diperoleh adalah dengan melihat pola yang ada pada grafik antara  $Y_{28}$  prediksi (*fitted value*) dan residual ( $Y_{28}$  prediksi -  $Y_{28}$  hasil test) yang telah distandarisasi (*standardized residual*). Hasil pengujian kandidat model 6 dan kandidat model 8 tidak memperlihatkan adanya suatu pola tertentu pada penyebaran titik-titiknya, titik-titik tersebut menyebar di atas dan di bawah angka 0 pada sumbu Y, keadaan ini menunjukkan tidak terjadinya heteroskedastisitas pada model-model itu, sehingga dapat disimpulkan bahwa kandidat model 6 dan 8 berhasil untuk masuk ke dalam

tahapan pengujian IV yaitu pengujian penyimpangan dan simpangan baku sisaan.

#### Tahap IV: Pendugaan Nilai Variabel Bebas Berdasarkan Model

Selanjutnya, dalam memilih model terbaik, selain tahapan pengujian di atas, maka persamaan tersebut harus memenuhi syarat pengujian *mean of square error* (MSE), *sum of square error* (SSE), *root mean of square error* (RMSE) dan *deviasi standard of errors* (DSE), di mana model yang dipilih adalah model yang memiliki nilai MSE, SSE, RMSE dan DSE terkecil. Hasil perhitungan penyimpangan dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Nilai MSE, SSE, RMSE dan DSE untuk Kandidat Model Matematis dengan Variabel  $Y_{28}$ ,  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ , dan  $X_4$ 

Kandidat Model	MS	SSE	RMSE	DSE
6	7.14	271.20	16.47	13.37
8	7.19	273.20	16.53	13.81

Dari hasil perhitungan pada Tabel 9, terlihat bahwa 2 kandidat model tersebut mempunyai nilai MSE, SSE, RMSE dan DSE relatif tidak jauh berbeda, tetapi nilai terkecil telah dihasilkan oleh model 6.

Tahap V: Penetapan Model Matematis Terbaik untuk Prediksi Kuat Tekan Beton Umur 28 Hari ( $Y_{28}$ )

$$Y_{28} = 59,6 + 3,26 SF^{0,5} + 4,76 PS^{0,5} - 8,55 WT^{0,5} + 0,631 FA^{0,5} \quad (1)$$

Di mana:

$Y_{28}$  = Kuat tekan silinder beton umur 28 hari (kekuatan di antara 48 MPa sampai 93 MPa) (MPa)

SF = Silica fume (0% - 10% dari total *binder material*) (kg)

PS = Semen Portland (70% - 100% dari total *binder material*) (kg)

FA = *Fly ash* (0% - 20% dari total *binder material*) (kg)

WT = Air (W/B antara 0.25 – 0.35) (kg)

#### KESIMPULAN

1. Percobaan laboratorium sebanyak 72 kali dalam pembuatan beton mutu tinggi dengan nilai W/B 0.25 – 0.35, total *binder material* 525, 575 dan 625 kg/m (*binder material* berupa semen, silica fume dan *fly ash*), pemakaian superplasticizer dan agregat lokal ternyata dapat menghasilkan beton mutu tinggi yang dapat diaplikasikan di lapangan dengan slump  $200 \pm 20$  mm. Nilai kuat tekan silinder beton umur 28 hari yang dihasilkan minimum 48 MPa (W/B 0.35, total *binder material* 525 kg/m<sup>3</sup>, 80% semen dan 20% *fly ash*) dan maksimum 93 MPa (W/B 0.25, total *binder material* 625 kg/m<sup>3</sup>, 90% semen dan 10% silica fume).
2. Model terbaik yang dihasilkan untuk memprediksi kekuatan beton silinder umur 28 hari adalah:

$$Y_{28} = 59,6 + 3,26 SF^{0,5} + 4,76 PS^{0,5} - 8,55 WT^{0,5} + 0,631 FA^{0,5}$$

Di mana:

$Y_{28}$  = Kuat tekan silinder beton umur 28 hari (kekuatan di antara 48 MPa sampai 93 MPa) (MPa) dengan penyimpangan sebesar  $\pm 5$  MPa

SF = Silica fume (0% - 10% dari total *binder material*) (kg)

PS = Semen Portland (70% - 100% dari total *binder material*) (kg)

WT = Air (W/B antara 0.25 – 0.35) (kg)

FA = *Fly ash* (0% - 20% dari total *binder material*) (kg)

#### DAFTAR PUSTAKA

ACI Committee 211 (1991). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91). *ACI Manual of*

Kesimpulan yang diambil setelah kandidat-kandidat model melalui tahapan-tahapan pengujian adalah bahwa model terbaik dihasilkan oleh model 6. Persamaan model matematis 6:

*Concrete Practice 1993*, Part 1. Detroit: American Concrete Institute.

ACI Committee 211 (1993). Guide for Selecting Proportions for High Strength Concrete with Portland Cement and *Fly ash* (ACI 211.4R-93). *ACI Manual of Concrete Practice 1993*, Part 1. Detroit: American Concrete Institute.

ACI Committee 212 (1991). Chemical Admixtures for Concrete (ACI 212.3R -91).

*ACI Manual of Concrete Practice 1993*, Part 1. Detroit: American Concrete Institute.

ACI Committee 226 (1987). Use of *Fly ash* in Concrete (ACI 226.3R-87). *ACI Manual of Concrete Practice 1993*, Part 1. Detroit: American Concrete Institute.

ACI Committee 363 (1992). State of the Art Report on High Strength Concrete (ACI 363R-92). *ACI Manual of Concrete Practice 1993*, Part 1. Detroit: American Concrete Institute.

ASTM. (1996). *Annual Book of ASTM Standards*, Section 4, Vol. 04.02. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.

Moen, Ronald D. (1991). *Improving Quality through Planned Experimentation*. New York: McGraw-Hill. Inc.

Montgomery, D.C. & Peck, Elizabeth A. (1992). *Introduction to Linear Regression Analysis* (2<sup>nd</sup>). Canada: John Wiley & Sons, Inc.