



BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pendahuluan

Pengujian pada penelitian ini adalah uji laju korosi dan uji kuat tekan. Sebelum dilakukan kedua pengujian tersebut, terdapat 2 tahap yang harus dilakukan yaitu menguji kualitas material dan menentukan komposisi *mix design*. Tahap-tahap ini dilakukan agar sampel yang dihasilkan memiliki nilai kuat tekan yang sesuai rencana ($f_c' = 30$ MPa). Pada Bab 4 ini dilakukan pembahasan dari hasil uji material yang telah dilakukan, perhitungan komposisi campuran beton, serta hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan.

4.2. Hasil dan Pembahasan Uji Material

Pengujian material dilakukan sebelum membuat *mix design*. Setiap material yang digunakan dalam *mix design* diuji kualitasnya agar mendapatkan beton yang sesuai dengan rencana. Material yang diuji adalah semen, agregat halus, agregat kasar, dan air. Metode yang digunakan dalam pengujian material sebelumnya telah dijelaskan pada Bab 3. Bab ini menjelaskan hasil pengujian dari masing-masing material yang digunakan dalam *mix design* untuk mencapai kuat tekan rencana yang telah ditentukan sebelumnya ($f_c' = 30$ MPa). Berikut hasil pengujian masing-masing material:

4.2.1. Uji material semen

Semen merupakan salah satu material yang diperlukan untuk pembuatan *mix design*. Fungsi utama dari semen pada pembuatan beton adalah untuk merekatkan agregat kasar dan agregat halus dengan mencampurkan semen dan air yang kemudian membentuk pasta. Pada sub bab ini dilakukan pembahasan dari hasil pengujian material semen yang sebelumnya telah dilakukan pada Laboratorium Konstruksi Unika Soegijapranata pada tanggal 18 Agustus 2021 hingga tanggal 20 Agustus 2021. Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian konsistensi normal semen, pengujian waktu ikat dan mengeras semen, pengujian berat jenis semen, dan



pengujian volume semen. Pengujian yang peneliti lakukan menggunakan *American Standard Test Method* sebagai pedoman. Berikut merupakan pembahasan hasil pengujian material yang telah dilakukan:

1. Konsistensi normal semen (ASTM C187-86)

Pengujian konsistensi normal semen dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui kadar air normal semen yang dibutuhkan dalam penelitian ini, khususnya dalam pembuatan sampel beton. Pengujian dilakukan dengan menjatuhkan jarum *vicat* pada pasta semen yang diletakkan pada kronikel dengan kadar air yang berbeda-beda. Hasil pengujian konsistensi normal semen yang dapat dilihat pada Tabel 4.1.

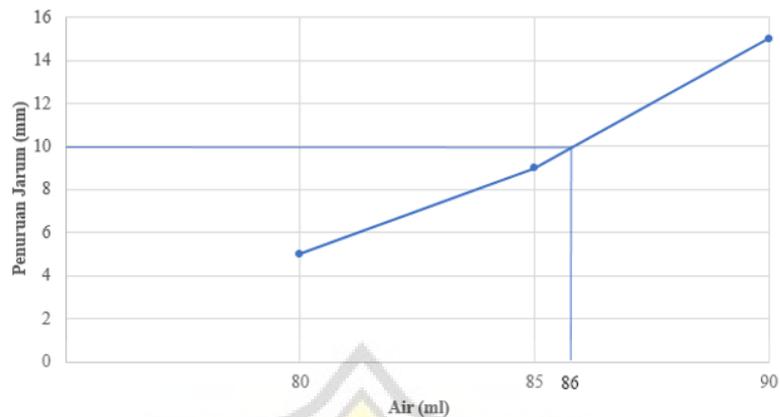
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Konsistensi Normal Semen

Percobaan Nomor	1	2	3
Berat Semen (w1)	300	300	300
Berat Air (w2)	80	85	90
Penurunan (mm)	5	9	15
Konsistensi Normal	26,67%	28,33%	30%

Pengujian konsistensi normal semen dilakukan sebanyak 3 kali. Berikut merupakan perhitungan yang digunakan dalam menghitung persentase konsistensi normal semen:

$$\begin{aligned}\text{Konsistensi semen} &= \frac{w_2}{w_1} \times 100\% \\ &= \frac{80}{300} \times 100\% \\ &= 26,67\%\end{aligned}$$

Perhitungan konsistensi semen percobaan kedua dan ketiga terdapat pada Lampiran L-2. Setelah dilakukan pengujian, hasil uji tersebut diolah dengan menggunakan aplikasi *Microsoft Excel* untuk menjadikannya sebuah grafik. Untuk menentukan konsistensi normal semen dilakukan pendekatan penetrasi 10 mm pada grafik yang dihasilkan. Berdasarkan grafik pada Gambar 4.1 didapatkan nilai konsistensi normal semen sebesar 86 ml yang berikutnya dapat digunakan sebagai tolak ukur untuk kadar air yang digunakan pada percobaan yang telah dilakukan. Gambar 4.1 merupakan grafik hasil pengujian yang telah diolah.



Gambar 4.1 Grafik Hasil Pengujian Konsistensi Normal Semen

2. Waktu ikat dan mengeras semen (ASTM C 191-92)

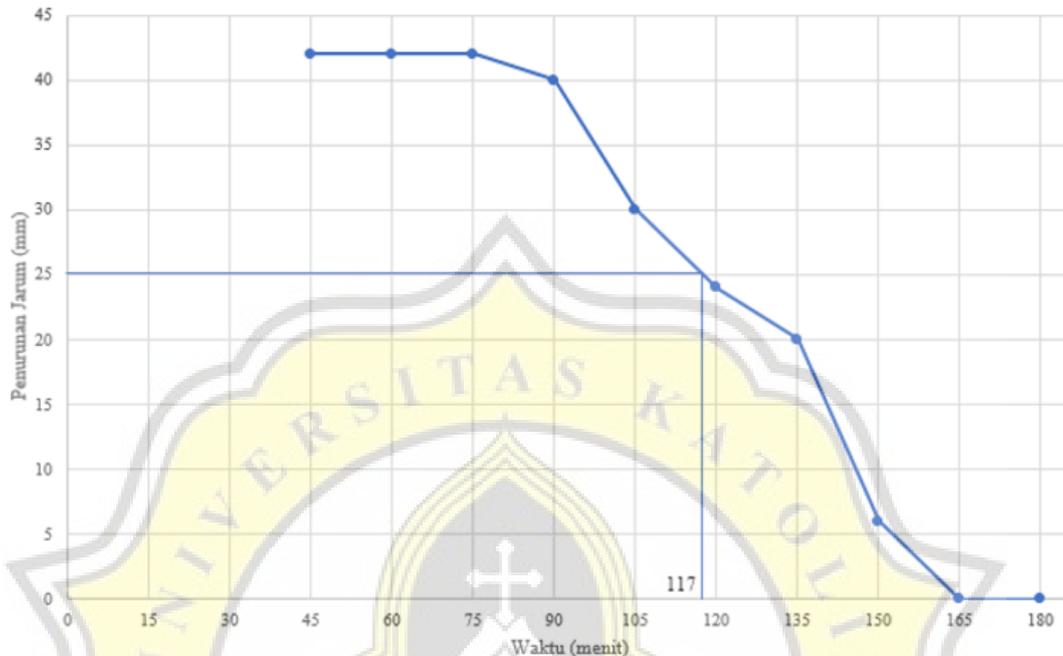
Pengujian waktu ikat dan mengeras semen dilakukan untuk menentukan waktu yang dibutuhkan semen untuk bereaksi dan mengeras. Pengujian dilakukan dengan interval waktu 15 menit hingga penurunan jarum *vicat* tidak lebih besar dari 5 mm. Pada Tabel 4.2 dipaparkan hasil pengujian waktu ikat dan mengeras semen yang telah dilakukan.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Waktu Ikat dan Mengeras Semen

No.	Waktu Penurunan (menit)	Penurunan (mm)
1.	45	42
2.	60	42
3.	75	42
4.	90	40
5.	105	30
6.	120	24
7.	135	20
8.	150	6
9.	165	0
10.	180	0

Setelah didapatkan data hasil pengujian, kemudian data tersebut diolah menggunakan Microsoft Excel menjadi sebuah grafik. Dalam pengujian ini, penetrasi jarum *vicat* untuk waktu ikat semen normal adalah sebesar 25 mm. Selanjutnya dilakukan pendekatan dengan menarik garis pada penetrasi jarum *vicat* 25 mm yang dapat dilihat pada Gambar 4.2. Berdasarkan uji waktu ikat awal dan waktu ikat akhir yang telah dilakukan dapat diketahui bahwa semen yang digunakan pada *mix design* membutuhkan waktu selama 117 menit untuk

waktu ikat awal dan membutuhkan waktu selama 165 menit untuk waktu ikat akhir (pengerasan).



Gambar 4.2 Grafik Hasil Pengujian Waktu Ikat dan Waktu Pengerasan Semen

3. Berat jenis semen (ASTM C188-89)

Pengujian berat jenis semen dilakukan untuk mengetahui berat jenis semen yang digunakan dalam *mix design*. Pengujian ini dilakukan dengan cara memasukkan semen kedalam labu ukur berukuran 500 ml yang diisi dengan minyak tanah hingga penuh. Tabel 4.3 merupakan hasil dari pengujian berat semen.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Berat Jenis Semen

Percobaan	Hasil
Berat Semen (w1)	300 gr
Berat Labu	175 gr
Berat Semen + minyak + labu takar (w2)	790 gr
Berat Labu Takar + Minyak (w3)	569 gr
Berat Jenis	3,04

Perhitungan yang digunakan untuk menentukan berat jenis material semen adalah sebagai berikut:



$$\begin{aligned} \text{Berat jenis semen} &= 0,8 \times \frac{w_1}{(w_1+w_2+w_3)} \\ &= 0,8 \times \frac{300}{(300+790+569)} \\ &= 3,04 \text{ gr/cm}^3 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan di atas, dapat disimpulkan bahwa berat jenis rata-rata semen adalah $3,04 \text{ gr/cm}^3$ lebih kecil dari syarat batas yang diijinkan yaitu $3,7 \text{ gr/cm}^3$ (ASTM C188-89).

4. Berat volume semen (ASTM C188-89)

Pengujian berat volume semen dilakukan untuk menentukan berat volume semen dengan cara meletakkan semen kedalam silinder dengan dirojok hingga padat dan tanpa dirojok. Berat volume semen dalam keadaan dirojok dan tidak dirojok yang sudah didapatkan kemudian dihitung rata-rata keduanya. Berikut merupakan hasil pengujian berat volume semen yang dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Berat Volume Semen

Jenis Percobaan	Dengan Rojokan	Tanpa Rojokan
Berat Silinder (w1)	2650 gr	2650 gr
Berat Silinder+Semen (w2)	9460 gr	8340 gr
Berat Semen (w2-w1)	6810 gr	5690 gr
Volume Silinder (v)	6285 cm ³	6288 cm ³
Berat Volume (w2-w1)/v	1,08 gr/cm ³	0,91 gr/cm ³

Data hasil pengujian tersebut kemudian diolah dengan perhitungan sebagai berikut:

a. Dengan Rojokan

$$\begin{aligned} \text{Berat volume semen (ws1)} &= \frac{(w_2-w_1)}{v} \\ &= \frac{(9460-2650)}{6285} \\ &= 1,08 \text{ gr/cm}^3 \end{aligned}$$

b. Tanpa Rojokan

$$\begin{aligned} \text{Berat volume semen (ws2)} &= \frac{(w_2-w_1)}{v} \\ &= \frac{(8340-2650)}{6288} \\ &= 0,91 \text{ gr/cm}^3 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \text{c. Berat volume rata-rata semen} &= \frac{ws1-ws2}{2} \\ &= \frac{1,08+0,91}{2} \\ &= 0,995 \text{ gr/cm}^3 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, dapat disimpulkan bahwa berat volume semen rata-rata adalah sebesar 0,995 gr/cm³.

4.2.2. Uji agregat halus

Salah satu material yang digunakan untuk menyusun beton adalah agregat halus. Suatu agregat dapat dikategorikan sebagai agregat halus adalah bila memiliki diameter tidak lebih dari sama dengan 5 mm. Selain gradasi butir, ada beberapa pengujian yang perlu dilakukan untuk mengetahui kelayakan suatu agregat halus. Adapun pengujian yang dimaksud adalah:

1. Pengujian kelembaban agregat halus (ASTM C556-89)

Pengujian ini dilakukan guna mengetahui kadar kelembaban dari agregat halus yang digunakan untuk campuran beton dengan cara kering sesuai dengan ASTM C556-89. Data yang diperlukan untuk pengujian akan dijelaskan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian Kelembaban Agregat Halus

Jenis Percobaan	1
Berat Pasir Asli (w1)	500 gr
Berat Pasir Oven (w2)	491 gr
Kelembaban Pasir	1,8%

Perhitungan untuk mengetahui nilai kelembaban agregat halus didapat sesuai dengan perhitungan berikut:

a. Perhitungan Kelembaban agregat halus:

$$\begin{aligned} \text{Kelembaban Pasir} &= \frac{(w1-w2)}{w2} \times 100\% \\ &= \frac{(500-491)}{491} \times 100\% \\ &= 1,8\% \end{aligned}$$



Pada Tabel 4.5 dijelaskan bahwa nilai kelembaban dari agregat halus yang digunakan untuk campuran beton adalah sebesar 1,8%, nilai ini lebih kecil daripada yang diizinkan yaitu maksimal 6% (ASTM C 556-89).

2. Pengujian berat jenis agregat halus (ASTM C128-93)

Pengujian ini dilakukan dengan tujuan untuk menentukan nilai dari berat jenis agregat halus yang digunakan pada kondisi SSD. Oleh karena itu benda uji yang digunakan juga perlu dipastikan bahwa benda uji sudah dalam kondisi SSD. Pada Tabel 4.6 dapat dilihat hasil pengujian berat jenis agregat halus yang telah dilakukan.

Tabel 4.6 Hasil Pengujian Berat Jenis Agregat Halus

Percobaan Nomor	1	2
Berat Labu+Pasir+Air (w1)	987,5 gr	987,5 gr
Berat Pasir SSD (w2)	500 gr	500 gr
Berat Labu+Air (w3)	681 gr	683,5 gr
Berat Jenis Pasir	2,58	2,55

Nilai berat jenis agregat halus didapat dari perhitungan di bawah ini:

a. Berat jenis percobaan 1

$$\begin{aligned}\text{Berat Jenis Agregat Halus} &= \frac{w_2}{(w_2+w_3)-w_1} \\ &= \frac{500}{(500+681)-987,5} \\ &= 2,58 \text{ gr/cm}^3\end{aligned}$$

b. Berat jenis percobaan 2

$$\begin{aligned}\text{Berat Jenis Agregat Halus} &= \frac{w_2}{(w_2+w_3)-w_1} \\ &= \frac{500}{(500+683,5)-987,5} \\ &= 2,55 \text{ gr/cm}^3\end{aligned}$$

c. Berat jenis rata-rata

$$\begin{aligned}&= \frac{(\text{Berat jenis percobaan 1}) + (\text{Berat jenis percobaan 2})}{2} \\ &= \frac{2,58 + 2,55}{2} \\ &= 2,565 \text{ gr/cm}^3\end{aligned}$$

Berdasarkan pengujian berat jenis agregat halus yang telah dilakukan, didapatkan nilai rata-rata sebesar 2,565 gr/cm³. Oleh karena itu agregat halus



ini diizinkan untuk digunakan, karena nilai batas yang diizinkan ASTM memiliki rentang diantara 2,1 – 2,6 gr/cm³.

3. Pengujian air resapan agregat halus (ASTM C128-93)

Pengujian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui seberapa banyak air yang dapat diresap oleh agregat halus yang digunakan untuk pembuatan sampel beton. Pengujian ini dilakukan dengan pedoman ASTM C 128 – 93. Hasil yang diperoleh ditampilkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Hasil Pengujian Air Resapan Agregat Halus

Percobaan Nomor	1	2
Berat Pasir SSD (w1)	500 gr	500 gr
Berat Pasir Oven (w2)	491 gr	493 gr
Kadar Air Resapan	1,83%	1,41%

Sesuai dengan Tabel 4.7 pengujian air resapan agregat halus dilakukan sebanyak 2 kali dan dihitung rata-rata dari hasil pengujian yang telah dilakukan. Adapun perhitungan untuk mengetahui nilai kadar air resapan dapat dihitung dengan perhitungan berikut:

$$\begin{aligned} \text{a. Kadar Air Resapan Percobaan 1} &= \frac{(w1-w2)}{w2} \times 100\% \\ &= \frac{(500 - 491)}{491} \times 100\% \\ &= 1,83\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b. Kadar Air Resapan Percobaan 2} &= \frac{(w1-w2)}{w2} \times 100\% \\ &= \frac{(500 - 493)}{493} \times 100\% \\ &= 1,41\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{c. Kadar Air Resapan Rata-Rata} &= \frac{(\text{Air resapan 1}) + (\text{Air resapan 2})}{2} \\ &= \frac{1,83 + 1,41}{2} \\ &= 1,62\% \end{aligned}$$

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, diketahui nilai resapan air dari agregat halus rata-rata adalah sebesar 1,62%. Nilai tersebut diizinkan karena pada ASTM C 128-93 dinyatakan bahwa batas izin untuk nilai resapan air dari agregat halus adalah sebesar 3,5%.



4. Pengujian berat volume agregat halus (ASTM C29/C29M-91)

Pengujian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui berat volume dari agregat halus yang digunakan. Berat volume yang dimaksud yaitu dalam kondisi lepas dan juga dalam kondisi padat. Oleh karena itu terdapat 2 metode dalam pengujian berat volume ini. Hasil yang telah diperoleh dapat dilihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Hasil Pengujian Berat Volume Agregat Halus

Jenis Percobaan	Tanpa Rojokan	Dengan Rojokan
Berat Silinder (w1)	4290 gr	4290 gr
Berat Silinder+Pasir (w2)	8540 gr	9800 gr
Berat Pasir (w2-w1)	4250 gr	5510 gr
Volume Silinder (v)	5389,21 cm ³	5389,21 cm ³
Berat Volume	0,79 gr/cm ³	1,02 gr/cm ³

Berdasarkan Tabel 4.8, diketahui bahwa dilakukan dua kali pengujian pada uji berat volume agregat halus ini, yang pertama yaitu dengan proses rojokan, dan yang kedua tanpa rojokan. Adapun perhitungan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

a. Perhitungan tanpa rojokan

$$\begin{aligned}\text{Berat Volume} &= \frac{w_2 - w_1}{v} \\ &= \frac{8540 - 4290}{5389,21} \\ &= 0,79 \text{ gr/cm}^3\end{aligned}$$

b. Perhitungan dengan rojokan

$$\begin{aligned}\text{Berat Volume} &= \frac{w_2 - w_1}{v} \\ &= \frac{9800 - 4290}{5389,21} \\ &= 1,02 \text{ gr/cm}^3\end{aligned}$$

c. Berat volume rata-rata

$$\begin{aligned}&= \frac{\text{Berat volume 1} + \text{Berat volume 2}}{2} \\ &= \frac{0,79 + 1,02}{2} \\ &= 0,905 \text{ gr/cm}^3\end{aligned}$$

Nilai berat volume rata-rata dari agregat halus berdasarkan pengujian dengan dan tanpa rojokan adalah sebesar 0,905 gr/cm³.



5. Pengujian kebersihan pasir terhadap lumpur (Pengendapan)

Pengujian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui seberapa banyak kadar lumpur yang ada pada agregat halus. Kelayakan dari agregat halus ditinjau dari kadar lumpurnya adalah apabila memiliki nilai kadar lumpur kurang dari 5%. Hasil dari percobaan ini dapat dilihat pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Hasil Pengujian Kebersihan Agregat Halus Terhadap Lumpur

Percobaan Nomor	1 (Belum Dicuci)	2 (Sudah Dicuci)
Tinggi Lumpur (h)	0,6 cm	0,2 cm
Tinggi Pasir (H)	5,2 cm	6,3 cm
Kadar Lumpur	11,54%	3,18%

Nilai kadar lumpur pada Tabel 4.9 didapat dari perhitungan berikut:

a. Agregat halus sebelum dicuci

$$\begin{aligned}\text{Kadar lumpur} &= \frac{h}{H} \times 100\% \\ &= \frac{0,6}{5,2} \times 100\% = 11,54\%\end{aligned}$$

b. Agregat halus setelah dicuci

$$\begin{aligned}\text{Kadar lumpur} &= \frac{h}{H} \times 100\% \\ &= \frac{0,2}{6,3} \times 100\% = 3,18\%\end{aligned}$$

Telah dijelaskan sebelumnya bahwa kadar lumpur yang diizinkan pada agregat halus tidak boleh melebihi 5%, sedangkan kadar lumpur agregat halus sebelum dicuci mencapai 11,54%. Solusi dari permasalahan ini adalah agregat halus harus terlebih dahulu dicuci sebelum digunakan.

6. Pengujian kadar lumpur (ASTM C117-95)

Percobaan ini memiliki tujuan yang sama dengan percobaan sebelumnya. Perbedaannya ada pada metode yang digunakan dalam pengujiannya. Hasil dari pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Hasil Pengujian Kadar Lumpur

Nomor Percobaan	1	2
Berat Pasir Kering (w1)	500 gr	500 gr
Berat Pasir Bersih Kering (w2)	435,5 gr	436,5 gr
Kadar Lumpur	12,9%	12,7%



Perhitungan untuk pengujian kadar lumpur adalah sebagai berikut:

a. Pengujian kadar lumpur 1

$$\begin{aligned}\text{Kadar lumpur} &= \frac{w_1 - w_2}{1} \times 100\% \\ &= \frac{500 - 435,5}{500} \times 100\% \\ &= 12,9\%\end{aligned}$$

b. Pengujian kadar lumpur 2

$$\begin{aligned}\text{Kadar lumpur} &= \frac{w_1 - w_2}{1} \times 100\% \\ &= \frac{500 - 436,5}{500} \times 100\% \\ &= 12,7\%\end{aligned}$$

c. Kadar lumpur rata-rata

$$\begin{aligned}&= \frac{\text{kadar lumpur 1} + \text{kadar lumpur 2}}{2} \\ &= \frac{12,9 + 12,7}{2} \\ &= 12,8\%\end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan di atas, diketahui bahwa nilai rata-rata dari kadar lumpur pada agregat halus yang digunakan adalah 12,8%. Nilai ini tidak diizinkan untuk digunakan karena melebihi batas maksimal yang ditentukan yaitu sebesar 5%. Solusi dari masalah ini adalah agregat halus sebelum digunakan dapat dicuci terlebih dahulu untuk menghilangkan lumpur yang ada hingga memiliki nilai kurang dari 5%.

7. Pengujian gradasi butiran agregat halus (ASTM C33/C33M-13)

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui distribusi ukuran butir agregat halus yang digunakan untuk campuran beton. Setelah dilakukan pengujian didapat hasil sesuai dengan Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Hasil Pengujian Gradasi Butiran Agregat Halus

No. Saringan	Diameter Saringan (mm)	Berat Saringan (gram)	Berat Tanah dan Saringan (gram)	Berat Tertahan (gram)	% Tertahan	% Lolos
4	4,75	438,4	438,4	0	0	100
8	2	419	442,4	23,4	4,68	95,32
16	1,18	421,2	499	77,8	15,56	79,76
30	0,6	419,6	559,5	139,9	27,98	51,78



No. Saringan	Diameter Saringan (mm)	Berat Saringan (gram)	Berat Tanah dan Saringan (gram)	Berat Tertahan (gram)	% Tertahan	% Lolos
50	0,3	406,4	516,4	110	22	29,78
100	0,15	400,6	513	112,4	22,48	7,3
200	0,075	333,8	364,4	30,6	6,12	1,18
Pan	-	268,4	273,8	5,4	1,08	0,1
Kumulatif				499,5		

Nilai yang didapat pada Tabel 4.11 adalah berdasarkan perhitungan berikut ini:

1. Saringan no. 4

- i. Berat tertahan = (berat tanah + saringan) - berat saringan
$$= 438,4 - 438,4$$
$$= 0 \text{ gr}$$
- ii. Persentase tertahan = $\frac{\text{berat tertahan}}{\text{jumlah sampel tanah}} \times 100\%$
$$= \frac{0}{500} \times 100\%$$
$$= 0 \%$$
- iii. Persentase lolos = $100\% - \text{Persentase tertahan}$
$$= 100\% - 0\%$$
$$= 100\%$$

Perhitungan uji saringan selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran L-27.

4.2.3. Uji agregat kasar

Pengujian untuk material agregat kasar, dilakukan melalui beberapa pengujian seperti uji kelembaban agregat kasar, berat jenis agregat kasar, air resapan agregat kasar, berat volume agregat kasar, kebersihan agregat kasar terhadap lumpur, gradasi agregat kasar, dan keausan agregat. Pengujian material agregat kasar dilakukan untuk mengetahui kualitas dan kelayakan dari agregat kasar untuk selanjutnya digunakan sebagai salah satu bahan campuran sampel benda uji. Pada sub bab ini dilakukan pembahasan dan perhitungan dari hasil pengujian material yang telah didapatkan. Berikut pembahasan masing-masing pengujian material yang dilakukan:



1. Pengujian kelembaban agregat kasar (ASTM C556-89)

Pengujian kelembaban agregat kasar dilakukan untuk mengetahui kadar kelembaban dari agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini. Dalam pengujian material ini dilakukan 2 kali percobaan dengan hasil yang dapat dilihat pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Hasil Pengujian Kelembaban Agregat Kasar

Pengujian Nomor	Berat Agregat Kasar Asli (w1)	Berat Agregat Kasar Oven (w2)	Kelembaban Agregat Kasar
1	500 gr	487,5 gr	2,56%
2	500 gr	485,5 gr	2,9%

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, kelembaban agregat kasar dapat diketahui menggunakan perhitungan sebagai berikut:

a. Kelembaban agregat kasar no. 1 (wk2) = $\frac{(w1-w2)}{w2} \times 100\%$
= $\frac{(500-487,5)}{487,5} \times 100\%$
= 2,56%

b. Kelembaban agregat kasar no. 2 (wk1) = $\frac{(w1-w2)}{w2} \times 100\%$
= $\frac{(500-485,5)}{485,5} \times 100\%$
= 2,9%

c. Kelembaban agregat kasar rata-rata = $\frac{wk1+wk2}{2}$
= $\frac{2,56\% + 2,9\%}{2}$
= 2,73%

Pada ASTM C556-89, nilai kelembaban agregat kasar rata-rata yang diizinkan memiliki rentang antara 0-3% dapat disimpulkan bahwa kelembaban agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini memenuhi persyaratan yaitu 2,73%.

2. Pengujian berat jenis agregat kasar (ASTM C127-88)

Berat jenis agregat kasar merupakan berat rasio berat agregat kasar terhadap volume agregat kasar. Pengujian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui berat jenis dari agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini.



Berikut pada Tabel 4.13 dapat dilihat hasil dari pengujian berat jenis agregat kasar.

Tabel 4.13 Hasil Pengujian Berat Jenis Agregat Kasar

Berat Agregat Kasar di Udara (w1)	Berat Agregat Kasar di Air (w2)	Berat Jenis Agregat Kasar
3000 gr	1884,5 gr	2,69

Berdasarkan hasil pengujian yang telah didapatkan, dapat dihitung berat jenis agregat kasar dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Berat jenis agregat kasar} &= \frac{w_1}{w_1 - w_2} \\ &= \frac{3000}{3000 - 1884,5} \\ &= 2,69 \text{ gr/cm}^3 \end{aligned}$$

Berdasarkan ASTM C127-88, berat jenis agregat kasar yang memenuhi syarat yaitu antara 2,3-2,75 gr/cm³. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini telah memenuhi standar yang digunakan.

3. Pengujian air resapan agregat kasar (ASTM C127-88)

Pengujian air resapan agregat kasar dilakukan untuk menentukan kadar air yang diresap oleh agregat kasar. Pengujian ini dilakukan dengan cara membandingkan agregat kasar dalam keadaan kering dengan agregat kasar setelah dioven selama 24 jam. Hasil pengujian air resapan agregat kasar dapat dilihat pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Hasil Pengujian Air Resapan Agregat Kasar

Pengujian Nomor	Berat Agregat Kasar SSD (w1)	Berat Agregat Kasar (w2)	Kadar Air Resapan
1	3000 gr	2900 gr	3,3%
2	3000 gr	2920 gr	2,7%

Pengujian yang telah dilakukan, dapat dihitung kadar air resapan agregat kasar dengan cara sebagai berikut:

a. Kadar air resapan no. 1 (wk1) = $\frac{(w_1 - w_2) \times 100\%}{w_2}$



$$= \frac{(3000-2900) \times 100\%}{2900}$$

$$= 3,3\%$$

b. Kadar air resapan no. 2 (wk2) = $\frac{(w1-w2) \times 100\%}{w2}$

$$= \frac{(3000-2920) \times 100\%}{2920}$$

$$= 2,7\%$$

c. Kadar air resapan rata-rata = $\frac{wk1+wk2}{2}$

$$= \frac{3,3\% + 2,7\%}{2}$$

$$= 3\%$$

Berdasarkan ASTM C127-88, kadar air resapan agregat kasar maksimal adalah 3%. Hasil pengujian yang didapatkan adalah 3%, sehingga dapat disimpulkan bahwa kadar air resapan agregat yang digunakan dalam penelitian ini memenuhi standar.

4. Pengujian berat volume agregat kasar (ASTM C29/29M)

Pengujian berat volume agregat kasar merupakan pengujian yang dilakukan untuk menentukan berat volume agregat kasar dengan cara memasukkan agregat kasar kedalam sebuah silinder dengan dirojok dan tanpa dirojok. Berikut pada Tabel 4.15 merupakan hasil pengujian berat volume agregat kasar yang telah dilakukan.

Tabel 4.15 Hasil Pengujian Berat Volume Agregat Kasar

Jenis Percobaan	Dengan Rojokan	Tanpa Rojokan
Berat Silinder (w1)	2,65 kg	2,65 kg
Berat Silinder+Agregat Kasar (w2)	10,40 kg	9,87 kg
Berat Agregat Kasar (w2-w1)	7,75 kg	7,22 kg
Volume Silinder (v)	5,38 dm ³	5,38 dm ³
Berat Volume	1,44 kg/dm ³	1,34 kg/dm ³

Setelah didapatkan dari pengujian yang telah dilakukan, kemudian dilakukan perhitungan untuk menentukan berat volume agregat kasar. Perhitungan yang digunakan dalam pengujian ini adalah sebagai berikut:

a. Berat volume dengan rojokan (wk1) = $\frac{w2-w1}{v}$



$$= \frac{7,75}{5,38}$$

$$= 1,44 \text{ kg/dm}^3 \approx 1,44 \text{ gr/cm}^3$$

b. Berat volume dengan rojokan ($wk2$) = $\frac{w2-w1}{v}$

$$= \frac{7,22}{5,38}$$

$$= 1,34 \text{ kg/dm}^3 \approx 1,34 \text{ gr/cm}^3$$

c. Berat volume rata-rata

$$= \frac{wk1+wk2}{2}$$

$$= \frac{1,44 + 1,34}{2}$$

$$= 1,39 \text{ gr/cm}^3$$

Berdasarkan hasil uji yang telah dilakukan, didapatkan berat volume agregat kasar adalah $1,39 \text{ gr/cm}^3$. Berat volume rata-rata agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini telah memenuhi persyaratan yang ditentukan oleh ASTM C29-91 yaitu antara $1,35-1,75 \text{ gr/cm}^3$.

5. Pengujian kebersihan agregat kasar terhadap lumpur (ASTM C117-95)

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kadar lumpur dari agregat kasar yang selanjutnya digunakan untuk campuran beton. Pengujian dilakukan dengan menimbang berat kering agregat kasar, selanjutnya agregat kasar dicuci dan dimasukkan ke dalam *oven* selama 24 jam. Hasil pengujian ini dapat dilihat pada Tabel 4.16.

Tabel 4.16 Hasil Pengujian Kebersihan Agregat Kasar Terhadap Lumpur

Pengujian Nomor	Berat Kering Sebelum Dicuci ($w1$)	Berat Kering Setelah Dicuci ($w2$)	Kadar Lumpur
1	1000 gr	996 gr	0,4%
2	1000 gr	995 gr	0,5%

Kadar lumpur pada agregat kasar dapat ditentukan dengan metode perhitungan sebagai berikut:

a. Kadar lumpur percobaan no. 1 ($wk1$) = $\frac{w1-w2}{w1} \times 100\%$
$$= \frac{1000-996}{1000} \times 100\%$$
$$= 0,4\%$$



$$\begin{aligned} \text{b. Kadar lumpur percobaan no. 2 (wk2)} &= \frac{w1-w2}{w1} \times 100\% \\ &= \frac{1000-995}{995} \times 100\% \\ &= 0,5\% \\ \text{c. Kadar lumpur rata-rata} &= \frac{w1+w2}{2} \\ &= \frac{0,4\%+0,5\%}{2} \\ &= 0,45\% \end{aligned}$$

Pada ASTM C117-95 ditentukan bahwa kadar lumpur yang diperbolehkan yaitu maksimal 1%. Berdasarkan hasil pengujian material, diperoleh bahwa kadar lumpur agregat kasar yang digunakan dalam pengujian ini adalah 0,45%.

6. Pengujian keausan agregat kasar

Pengujian keausan agregat kasar dilakukan untuk mengetahui kadar keausan dari agregat kasar yang digunakan. Pengujian ini dilakukan menggunakan mesin *los angeles*. Berikut merupakan hasil pengujian kadar keausan agregat kasar yang dilihat pada Tabel 4.17.

Tabel 4.17 Hasil Uji Keausan Agregat Kasar

Percobaan	Hasil
Berat Awal Agregat Kasar (w1)	3000 gr
Berat Akhir Agregat Kasar (w2)	2180 gr
Berat Agregat Kasar yang Hancur (w2-w1)	820 gr
Kadar Keausan	27,3%

Perhitungan yang digunakan untuk mendapatkan kadar keausan agregat kasar adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Kadar keausan} &= \frac{w2-w1}{w1} \times 100\% \\ &= \frac{3000-2180}{3000} \times 100\% \\ &= 27,3\% \end{aligned}$$

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, didapatkan nilai kadar keausan agregat kasar setelah dihitung yaitu sebesar 27,3%. Kadar keausan agregat kasar tersebut telah memenuhi persyaratan batas yang ditentukan yaitu sebesar 50%.



7. Pengujian gradasi agregat kasar

Pengujian gradasi agregat kasar dilakukan untuk menentukan gradasi dari agregat kasar. Pengujian ini dilakukan dengan sampel agregat kasar yang dimasukkan ke dalam saringan dan digetarkan menggunakan bantuan alat *sieve shaker* selama 10 menit. Setelah dilakukan pengujian, masing-masing saringan ditimbang bersama agregat kasar yang tertahan pada saringan. Hasil pengujian tersebut kemudian direkap dan dilakukan perhitungan persentase tertahan serta persentase lolos saringan. Hasil pengujian dari gradasi agregat kasar dapat dilihat pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18 Hasil Pengujian Gradasi Agregat Kasar

Nomor Saringan	Diameter Saringan	Berat Saringan	Berat Kerikil dan Saringan	Berat Tertahan	Persentase Tertahan	Persentase Lolos
3/2	37,50 mm	562,80 gr	562,80 gr	0,00 gr	0,00%	100,00%
3/4	19,00 mm	571,50 gr	571,50 gr	0,00 gr	0,00%	100,00%
3/8	9,50 mm	411,50 gr	2.455,00 gr	2.043,50 gr	68,12%	31,88%
4	4,75 mm	440,00 gr	1.304,00 gr	864,00 gr	28,80%	3,08%
8	2,36 mm	418,50 gr	498,00 gr	79,50 gr	2,65%	0,43%
16	1,18 mm	421,00 gr	421,00 gr	0,00 gr	0,00%	0,43%
30	0,60 mm	419,50 gr	421,00 gr	1,50 gr	0,05%	0,38%
50	0,30 mm	407,00 gr	408,50 gr	1,50 gr	0,05%	0,33%
100	0,150 mm	401,00 gr	403,50 gr	2,50 gr	0,08%	0,25%
200	0,075 mm	269,00 gr	273,00 gr	4,00 gr	0,13%	0,12%
Pan	-	268,40 gr	271,50 gr	3,10 gr	0,10%	0,10%
Kumulatif				2999,6 gr		

Hasil sampel agregat kasar yang tertahan pada masing-masing saringan kemudian ditimbang dan dihitung nilai dari berat tertahan, persentase tertahan, serta persentase lolos. Perhitungan dilakukan menggunakan cara sebagai berikut:

1. Saringan no. 3/2

$$\begin{aligned} \text{i. Berat tertahan} &= (\text{berat agregat kasar+saringan})-\text{berat saringan} \\ &= 562,80-562,80 \\ &= 0 \text{ gr} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ii. Persentase tertahan} &= \frac{\text{berat tertahan}}{\text{jumlah agregat kasar}} \times 100\% \\ &= \frac{0}{3000} \times 100\% \end{aligned}$$



$$= 0 \%$$

iii. Persentase lolos = 100%-persentase tertahan

$$= 100\% - 0\%$$

$$= 100\%$$

Perhitungan untuk analisa saringan nomor selanjutnya dapat dilihat pada Lampiran L-45.

4.3. Perhitungan Campuran Adukan Beton

Pada penelitian ini dilakukan juga perhitungan untuk menentukan perbandingan material yang hendak digunakan. Perhitungan dan perencanaan yang telah dilakukan menggunakan metode *Design of Experiment*. Metode *Design of Experiment* yaitu merupakan metode yang digunakan untuk pendekatan sistematis guna menginvestigasi suatu proses ataupun sistem. Perhitungan dan juga metode yang dilakukan dalam penelitian ini menggunakan pedoman berdasarkan SNI 03-2834-2000. Adapun perhitungan yang dilakukan dari metode tersebut adalah:

1. Tahap pertama yang perlu dilakukan adalah menentukan nilai kuat tekan rencana untuk beton berumur 28 hari deviasi standar. Kuat tekan benda uji dalam penelitian ini direncanakan dengan $f_c' = 30$ MPa. Untuk nilai deviasi standar dapat dilihat dari Tabel 2.2. Berdasarkan Tabel 2.2, nilai deviasi standar yang digunakan pada penelitian ini adalah 7,0 yaitu dengan pengendalian mutu pekerjaan yang jelek. Alasan dari penggunaan nilai 7,0 adalah karena peneliti belum memiliki pengalaman sebelumnya dalam membuat dan melakukan penelitian.
2. Berikutnya dapat dilanjutkan dengan menghitung nilai tambah menggunakan Persamaan 2.2 seperti yang telah dibahas pada Bab 2:

$$M = 1,64 \times \text{Nilai Standar Deviasi}$$

$$= 1,64 \times 7$$

$$= 11,48 \approx 12 \text{ MPa}$$

3. Dengan menggunakan Persamaan 2.3 perhitungan untuk kuat tekan beton rata-rata yang ditargetkan dalam penelitian ini dapat dihitung sesuai dengan perhitungan berikut:



$$\begin{aligned}f'_{cr} &= f'_c + M \\ &= 30 + 12 \\ &= 42 \text{ MPa}\end{aligned}$$

4. Semen yang digunakan pada penelitian ini adalah semen portland Tipe 1. Semen tipe ini umum digunakan untuk konstruksi bangunan yang tidak memerlukan persyaratan khusus untuk hidrasi dan juga peningkatan kuat tekan di awal. Semen tipe 1 ini juga umum digunakan untuk konstruksi jembatan, jalan raya, perumahan, dan gedung-gedung bertingkat. Selain itu agregat kasar yang digunakan pada penelitian ini adalah batu pecah. Oleh karena itu, pada Tabel 2.3 dipilih nilai 37 untuk perkiraan kuat tekan yang digunakan untuk menentukan faktor air semen. Penentuan faktor air semen dapat dilihat pada Tabel 2.3. Setelah menentukan nilai kuat tekan perkiraan pada umur beton ke-28 hari yaitu 37 MPa, perhitungan campuran beton dapat dilanjutkan dengan menentukan nilai faktor air semen sesuai dengan Gambar 2.2 dengan cara menarik garis tegak lurus ke bawah dari nilai kuat tekan yang dihasilkan. Pada Gambar 2.2 dapat diketahui nilai faktor air semen yang dibutuhkan dalam percobaan ini dengan mempertimbangkan jenis agregat kasar dan jenis semen yang digunakan adalah sebesar 0,5.
5. Jumlah semen minimum dapat diketahui setelah menentukan faktor air semen yang hendak digunakan. Berdasarkan SNI 03-2834-2000 dapat diketahui jumlah semen minimum yang dapat digunakan dan dapat dilihat pada Tabel 2.4. Nilai faktor air semen maksimum yang digunakan dalam percobaan ini adalah sebesar 0,60 dan jumlah minimum semen yang digunakan adalah 275 kg setiap 1 m³ beton.
6. Setelah mengetahui jumlah semen minimum yang digunakan dapat dilanjutkan dengan menentukan nilai *slump*. Pada SNI 03-2834-2000 dijelaskan bahwa nilai *slump* dapat ditetapkan, oleh karena itu ditentukan nilai *slump* yang digunakan adalah 60 mm – 80 mm.
7. Kadar air bebas dapat diketahui setelah menentukan nilai *slump* dan juga mengetahui ukuran agregat maksimum yang digunakan dalam pengujian. Sesuai dengan *point* nomor 6, diketahui bahwa nilai *slump* yang ditentukan



adalah 60 mm – 180 mm, sedangkan untuk agregat kasar yang digunakan adalah jenis batu pecah dengan ukuran maksimum 20 mm. Berdasarkan data tersebut di atas dapat diketahui kebutuhan air per m³ beton dengan menggunakan Tabel 2.5. Setelah mengetahui nilai perkiraan jumlah air untuk agregat kasar dan agregat halus, dapat diketahui nilai kadar air bebas berdasarkan Persamaan 2.4 Adapun perhitungan tersebut dapat digunakan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{Kadar air bebas} &= \frac{2}{3} W_h + \frac{1}{3} W_k \\ &= \frac{2}{3} 195 + \frac{1}{3} 225 \\ &= 205 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

Sesuai dengan perhitungan di atas, diketahui bahwa kadar air bebas dari penelitian ini adalah sebesar 205 kg/m³

8. Kebutuhan semen dapat dihitung setelah mengetahui kadar air bebas yang digunakan pada penelitian ini. Persamaan yang digunakan adalah Persamaan 2.5. Adapun persamaan tersebut dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}W_{\text{semen}} &= \frac{W_{\text{Air}}}{\text{Faktor air semen}} \\ &= \frac{205}{0,5} \\ &= 410 \text{ kg/m}^3 \text{ (kadar semen yang digunakan)}\end{aligned}$$

9. Setelah menetapkan kadar semen yang digunakan, dapat dilanjutkan dengan menentukan perbandingan antara agregat kasar dan agregat halus. Untuk menentukan perbandingan agregat kasar dan agregat halus tersebut perlu terlebih dahulu mengetahui ukuran maksimum agregat, nilai *slump* rencana, dan gradasi agregat. Untuk gradasi agregat, berdasarkan pengujian yang telah dilakukan diketahui bahwa agregat memiliki gradasi 2. Setelah mengetahui data-data tersebut dapat dilanjutkan dengan menentukan perbandingan agregat berdasarkan Gambar 2.3. Persentase agregat yang digunakan dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.6 dan Persamaan 2.7:

$$\begin{aligned}\text{Persentase agregat halus} &= \frac{46+37}{2} \\ &= 41,5\%\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}\text{Persentase agregat kasar} &= 100\% - \text{persentase agregat halus} \\ &= 100\% - 41,5\% \\ &= 58,5\%\end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan di atas dapat diketahui bahwa persentase agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini adalah 41,5% dan persentase agregat kasar adalah 58,5%.

10. Berat jenis relatif agregat gabungan dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.8. Perhitungan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{Berat jenis agregat gabungan} &= (\% \text{ Agregat halus} \times \text{berat jenis agregat} \\ &\quad \text{halus}) + (\% \text{ Agregat kasar} \times \text{berat jenis} \\ &\quad \text{agregat kasar}) \\ &= \left(\frac{41,5}{100} \times 2,565\right) + \left(\frac{58,5}{100} \times 2,69\right) \\ &= 2,64 \text{ gr/cm}^3\end{aligned}$$

11. Berat volume beton dapat diketahui dengan memasukkan berat jenis agregat dan kadar air bebas ke dalam Gambar 2.4. Pada Gambar 2.4 telah diketahui bahwa berat volume beton, dengan mempertimbangkan berat jenis agregat, dan jumlah air pengaduk adalah sebesar 2.335 kg/m³.
12. Proporsi campuran untuk agregat halus dan agregat kasar dapat diketahui dengan menggunakan Persamaan 2.9 dan Persamaan 2.10. Perhitungan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}W_{\text{Agregat Halus}} &= (W_{\text{isi beton basah}} - W_{\text{semen}} - W_{\text{air}}) \times \% \text{ Agregat halus} \\ &= (2335 - 410 - 205) \times 41,5\% \\ &= 713,8 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}W_{\text{Agregat Kasar}} &= (W_{\text{isi beton basah}} - W_{\text{semen}} - W_{\text{air}}) \times \% \text{ Agregat kasar} \\ &= (2335 - 410 - 205) \times 58,5\% \\ &= 1.006,2 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

4.4. Hasil dan Pembahasan Uji Kuat Tekan *Trial Mix Design*

Pada penentuan penggunaan *mix design* untuk pengujian kuat tekan dan laju korosi, digunakan 2 jenis *mix design* untuk *trial*. Berdasarkan 2 jenis *mix design* tersebut, dipilih *mix design* yang memiliki hasil kuat tekan umur 28 hari mendekati kuat



tekan rencana pada penelitian ini yaitu sebesar 30 MPa. Hasil kuat tekan untuk *mix design* 1 diperlihatkan pada Tabel 4.19.

Tabel 4.19 Hasil Uji Kuat Tekan *Trial Mix Design* 1

Nomor Benda Uji	Umur Beton (hari)	Berat Beton (kg)	Gaya Tekan (kN)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-Rata (MPa)
1.1	7	12,83	340	19,25	15,29
1.2	7	12,84	300	16,99	
1.3	7	12,80	170	9,63	
1.4	14	12,80	410	23,21	18,87
1.5	14	12,65	300	16,99	
1.6	14	12,87	290	16,42	
1.7	28	12,61	400	22,65	24,53
1.8	28	12,94	450	25,47	
1.9	28	12,69	450	25,47	

Selanjutnya untuk *trial mix design* 2, diperlihatkan pada Tabel 4.20.

Tabel 4.20 Hasil Uji Kuat Tekan *Trial Mix Design* 2

Nomor Benda Uji	Umur Beton (hari)	Berat Beton (kg)	Gaya Tekan (kN)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-Rata (MPa)
2.1	7	12,79	190	10,76	17,74
2.2	7	12,95	350	19,82	
2.3	7	12,92	400	22,65	
2.4	14	12,88	400	22,65	20,95
2.5	14	12,87	360	20,39	
2.6	14	12,82	350	19,82	
2.7	28	12,85	470	26,61	26,99
2.8	28	12,94	520	29,44	
2.9	28	12,93	440	24,91	

Berdasarkan *trial mix design* yang telah dilakukan, diketahui bahwa nilai kuat tekan pada umur beton ke 28 hari untuk *mix design* 1 sebesar 24,53 MPa, dan untuk *mix design* 2 sebesar 26,99 MPa. Dengan demikian *mix design* 2 digunakan sebagai perbandingan campuran untuk pembuatan benda uji penelitian. *Trial* yang dilakukan menggunakan mesin pengaduk semen, sehingga perbandingan material tiap benda uji berbeda. Selain itu, terdapat perbedaan waktu pengecoran pada tiap benda uji, sehingga menyebabkan konsistensi yang berbeda pada masing-masing benda uji. Solusi dari permasalahan ini adalah perlunya dilakukan pengecoran benda uji secara manual satu per satu, sehingga perbandingan material dan konsistensi *mix design* sama setiap benda ujinya.



4.5. Hasil dan Pembahasan Uji Kuat Tekan

Setelah melakukan *trial mix design*, dilakukan pembuatan benda uji menggunakan perbandingan material dari *mix design* 2. Pembuatan benda uji telah dilakukan pada tanggal 30 September 2021 hingga tanggal 5 Oktober 2021. Pembuatan benda uji dilakukan di Laboratorium Konstruksi Universitas Katolik Soegijapranata. Hasil dan pembahasan pengujian kuat tekan yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

4.5.1. Hasil pengujian kuat tekan beton

Kuat tekan beton rencana adalah 30 MPa saat umur beton 28 hari. Pengujian kuat tekan dilakukan saat beton berumur 7, 14, dan 28 hari. Pengujian kuat tekan beton yang dilakukan mengacu pada SNI 1974 – 2011. Sebelum dilakukan uji kuat tekan, dilakukan proses *curing* dan perendaman pada masing-masing benda uji. *Curing* dan perendaman yang dilakukan dibagi menjadi 2, yaitu 9 benda uji di-*curing* dan direndam menggunakan air dengan pH ± 7 dan 9 benda uji lainnya di-*curing* dan direndam menggunakan air dengan pH $5\pm 0,5$. Pengujian juga dilakukan di Laboratorium Konstruksi Universitas Katolik Soegijapranata Semarang. Hasil uji kuat tekan yang telah dilakukan diperlihatkan pada Tabel 4.21.

Tabel 4.21 Hasil Uji Kuat Tekan

Nomor Benda Uji	Umur Beton (hari)	Luas Permukaan (mm ²)	Berat Beton (kg)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-Rata (MPa)
1	7	17678	12,28	20,36	20,27
2		17678	12,37	19,52	
3		17678	12,53	20,93	
1A		17678	12,29	16,41	17,63
2A		17678	12,33	18,67	
3A		17678	12,50	17,82	
4	14	17678	12,31	26,02	25,83
5		17678	12,52	25,17	
6		17678	12,41	26,31	
4A		17678	12,49	21,50	22,52
5A		17678	12,50	22,30	
6A		17678	12,26	23,76	
7	28	17678	12,57	31,40	30,93
8		17678	12,41	33,10	
9		17678	12,56	28,30	
7A		17678	12,32	22,63	23,66
8A		17678	12,60	23,19	
9A		17678	12,39	25,17	

Pada Tabel 4.21 dapat dilihat untuk sampel benda uji yang diberi huruf A setelah angka, menandakan bahwa sampel tersebut di-*curing* dan direndam menggunakan air pH 5±0,5. Sedangkan untuk sampel yang hanya diberi nama dengan angka, maka sampel tersebut di-*curing* dan direndam dengan menggunakan air normal dari PDAM. Kuat tekan pada masing-masing sampel dihitung dengan cara berikut:

1. Kuat Tekan Beton Nomor 7 Umur 28 Hari

$$\begin{aligned}\text{Kuat Tekan} &= \frac{P}{A} = \frac{P}{\pi r^2} \\ &= \frac{550.000}{3,14 \times 150 \times 150} \\ &= \frac{550.000}{17678} \\ &= 31,4 \text{ MPa}\end{aligned}$$

2. Kuat Tekan Beton Nomor 7A Umur 28 Hari

$$\begin{aligned}\text{Kuat Tekan} &= \frac{P}{A} = \frac{P}{\pi r^2} \\ &= \frac{400.000}{3,14 \times 150 \times 150} \\ &= \frac{400.000}{17678} \\ &= 22,63 \text{ MPa}\end{aligned}$$

3. Kuat Tekan Rata-Rata Beton Normal 28 Hari

$$\begin{aligned}\text{Kuat Tekan} &= \frac{f'_c7 + f'_c8 + f'_c9}{3} \\ &= \frac{31,40 + 33,10 + 28,30}{3} = 30,93 \text{ MPa}\end{aligned}$$

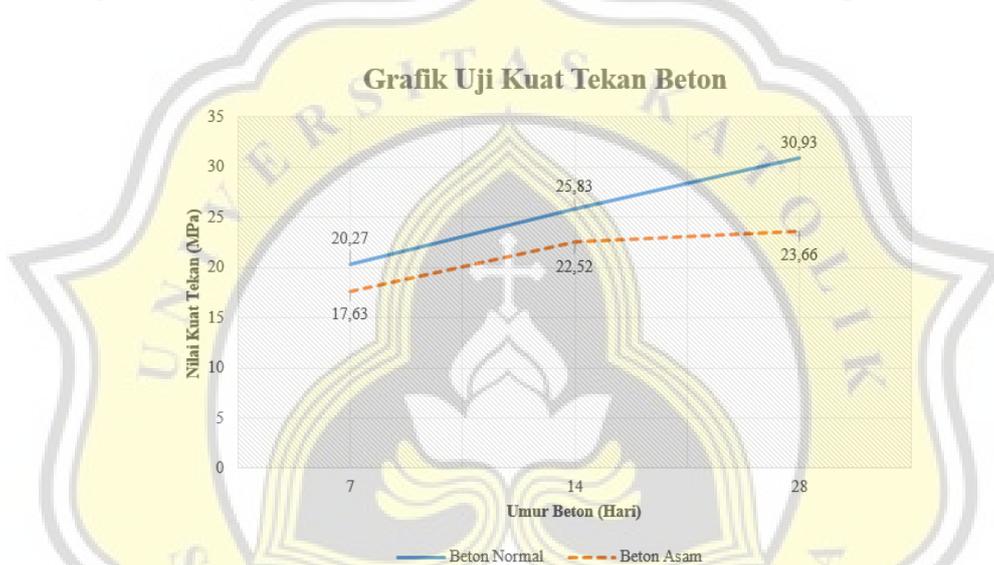
Pada Gambar 4.3 merupakan salah satu pola keretakan untuk uji kuat tekan pada beton benda uji asam nomor 8A pada umur beton 28 hari.



Gambar 4.3 Pola Keretakan Benda Uji Nomor 8A

4.5.2. Pembahasan pengujian kuat tekan beton

Pada Tabel 4.21 telah diperlihatkan data terkait hasil uji kuat tekan yang telah dilakukan pada benda uji silinder. Pengujian dilakukan saat beton berumur 7, 14, dan 28 hari. Sebelum di uji benda uji juga dibedakan menjadi 2 berdasarkan *curing* dan perendaman yang dilakukan. Sebanyak 9 benda uji di-*curing* dan direndam menggunakan air normal yang bersumber dari PDAM dan 9 benda uji lainnya di-*curing* dan direndam menggunakan air asam dengan pH $5\pm 0,5$. Untuk grafik hubungan antara uji kuat tekan dengan umur beton dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Grafik Hubungan Nilai Kuat Tekan Dengan Umur Beton

Pada penelitian yang telah dilakukan, dapat diketahui hasil kuat tekan untuk sampel yang telah diuji. Berdasarkan hasil pengujian tersebut didapatkan hasil rata-rata pada tiap umur beton dan jenis sampel seperti yang terdapat pada Gambar 4.4. Hasil kuat tekan yang terdapat pada Gambar 4.4 menunjukkan bahwa beton yang di-*curing* dan direndam menggunakan air yang bersumber dari PDAM memiliki nilai kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton yang di-*curing* dan direndam menggunakan air dengan pH $5\pm 0,5$.

Beton umur 14 hari yang di-*curing* dan direndam menggunakan air PDAM, terdapat kenaikan nilai kuat tekan sebesar 27,43% dibandingkan dengan beton umur 7 hari. Untuk beton umur 14 hari yang di-*curing* dan direndam menggunakan air dengan pH $5\pm 0,5$, terdapat kenaikan nilai kuat tekan sebesar 27,74% dibandingkan dengan



beton umur 7 hari. Untuk beton pada umur 28 hari yang di-*curing* dan direndam menggunakan air PDAM, terjadi kenaikan sebesar 19,74% dibandingkan dengan beton yang berumur 14 hari. Beton yang di-*curing* dan direndam menggunakan air dengan pH $5\pm 0,5$ pada hari ke-28 hanya mengalami kenaikan sebanyak 5,06% dibandingkan dengan beton umur 14 hari. Penelitian yang sebelumnya telah dilakukan oleh Pandiangan, dkk., (2017), didapatkan hasil kuat tekan beton normal yang lebih besar daripada kuat tekan beton asam, sehingga kesimpulan tersebut mendukung hasil penelitian yang telah peneliti lakukan. Dengan demikian beton yang di-*curing* dan direndam menggunakan air dengan pH $5\pm 0,5$ tidak memenuhi rencana awal yang seharusnya memiliki nilai kuat tekan rencana sebesar 30 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa asam sangat mempengaruhi kualitas beton ditinjau dari kuat tekannya. Tidak tercapainya nilai kuat tekan rencana tersebut diakibatkan karena reaksi kimiawi yang terjadi pada beton dengan asam yang digunakan untuk *curing* dan perendaman. Asam yang digunakan dalam penelitian ini (HNO_3) melemahkan ikatan struktur partikel pada beton mulai dari permukaan beton hingga masuk menuju bagian dalam beton yang kemudian menyebabkan penurunan nilai kuat tekan pada beton sampel.

Menurut Pandiangan, dkk., (2014), kerusakan yang terjadi dapat berupa asam yang melemahkan ikatan antar partikel yang ada di dalam beton. Hal inilah yang menyebabkan nilai kuat tekan beton yang di-*curing* dan direndam menggunakan air dengan pH $5\pm 0,5$ lebih kecil apabila dibandingkan dengan beton yang di-*curing* menggunakan air dengan pH netral. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pH air lingkungan berpengaruh terhadap sifat mekanis beton.

4.6. Hasil dan Pembahasan Pengujian Laju Korosi

Uji laju korosi merupakan uji yang dilakukan untuk menentukan kehilangan massa tulangan sebelum dilakukan pengujian dan setelah dilakukan pengujian. Pengujian laju korosi dihentikan setelah terdapat retak pertama (*initial crack*) pada masing-masing benda uji. Keretakan pada benda uji menandakan bahwa tulangan yang terdapat didalam beton bereaksi dan menghasilkan produk korosi. Produk korosi yang dihasilkan menyebabkan keretakan pada permukaan beton. Produk korosi



tersebut mengakibatkan massa dari tulangan awal berkurang. Kehilangan massa tersebut dapat digunakan untuk perhitungan laju korosi beton bertulang. Pada sub bab ini ditampilkan hasil serta pembahasan dari uji laju korosi yang telah dilakukan.

4.6.1. Hasil pengujian laju korosi

Pengujian laju korosi dilakukan mulai tanggal 28 Oktober 2021 di Laboratorium Fisika Teknik Unika Soegijapranata. Pengujian dilakukan hingga seluruh benda uji pada bagian permukaannya telah retak. Ketika terdapat keretakan pertama pada benda uji, sampel tersebut dikeluarkan dari tempat uji laju korosi dan selanjutnya didokumentasi menggunakan kamera mikroskop untuk mengetahui lebar retak dari pengujian tersebut. Waktu muncul retak pertama pada masing-masing beton yang di-*curing* dan direndam dengan air PDAM serta beton yang di-*curing* dan direndam dengan air pH $5 \pm 0,5$ dapat dilihat pada Tabel 4.22.

Tabel 4.22 Waktu Pengujian Laju Korosi

No.	Benda Uji	pH <i>Curing</i>	Tanggal Pengujian Pertama	Tanggal Pengujian Terakhir	<i>Initial Crack</i>
1.	1	$5 \pm 0,5$	28 Oktober 2021	23 November 2021	26 hari
2.	2	$5 \pm 0,5$	28 Oktober 2021	2 Desember 2021	35 hari
3.	3	$5 \pm 0,5$	28 Oktober 2021	2 Desember 2021	35 hari
4.	4	$7 \pm 0,5$	28 Oktober 2021	13 Desember 2021	46 hari
5.	5	$7 \pm 0,5$	28 Oktober 2021	2 Desember 2021	35 hari
6.	6	$7 \pm 0,5$	28 Oktober 2021	24 November 2021	27 hari
7.	7	$7 \pm 0,5$	28 Oktober 2021	6 Desember 2021	39 hari
8.	8	$5 \pm 0,5$	28 Oktober 2021	6 Desember 2021	39 hari
9.	9	$5 \pm 0,5$	28 Oktober 2021	2 Desember 2021	35 hari
10.	10	$5 \pm 0,5$	28 Oktober 2021	6 Desember 2021	39 hari
11.	11	$7 \pm 0,5$	28 Oktober 2021	9 Desember 2021	42 hari
12.	12	$7 \pm 0,5$	28 Oktober 2021	2 Desember 2021	35 hari

Waktu keretakan pertama (*initial crack*) yang terjadi pada beton bervariasi. Hal ini diakibatkan oleh kemampuan beton dalam menyerap air melalui pori kapiler berbeda-beda pada tiap benda uji. Air memiliki sifat konduktor atau bisa menghantarkan listrik. Sehingga ketika proses pengujian dilakukan, air yang masuk melalui pori-pori beton menghantarkan listrik dan menyebabkan terjadinya percepatan proses korosi. Dengan demikian semakin tinggi nilai absorpsi pada beton, maka semakin cepat proses korosi terjadi. Proses pengujian laju korosi dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Proses Uji Laju Korosi

Pada proses uji laju korosi, sampel beton bertulang diletakkan pada kolam yang berisi air dan disambungkan dengan *power supply* yang dialiri listrik sebesar 0,03 A melalui tulangan yang berfungsi sebagai anoda (+). Pelat baja yang terdapat pada Gambar 4.5 berfungsi sebagai katoda (-). Pengujian laju korosi dilakukan pada tanggal 28 Oktober 2021. Pada Tabel 4.22, diketahui bahwa keretakan pertama terjadi tanggal 23 November 2021 pada beton nomor 1. Beton tersebut telah di-*curing* dan direndam menggunakan air dengan pH $5\pm 0,5$. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, terdapat satu beton yang memiliki lebar keretakan terbesar yaitu beton nomor 3 yang telah di-*curing* dan direndam menggunakan air dengan pH $5\pm 0,5$. Keretakan tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Pola Keretakan Benda Uji Beton Nomor 3

Uji laju korosi yang telah dilakukan menghasilkan berat tulangan akhir yang lebih kecil bila dibandingkan dengan berat tulangan awal. Hal ini disebabkan terjadinya kehilangan massa selama proses pengujian laju korosi. Kehilangan massa tulangan kemudian dapat digunakan untuk perhitungan laju korosi pada masing-masing sampel benda uji. Nilai kehilangan massa tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.23.



Tabel 4.23 Hasil Pengujian Laju Korosi

No. Tulangan	Berat Tulangan Awal (gr)	Berat Tulangan Akhir (gr)	Kehilangan Massa (gr)	Kehilangan Massa (%)
1.	143,5	142,8	0,7	0,49
2.	139,0	137,4	1,6	1,15
3.	138,5	136,3	2,2	1,59
4.	137,5	134,8	2,7	1,96
5.	143,5	142,8	0,7	0,49
6.	142,5	141,8	0,7	0,49
7.	136,5	135,1	1,4	1,03
8.	144,0	142,3	1,7	1,18
9.	138,5	137,7	0,8	0,58
10.	143,0	141,2	1,8	1,26
11.	144,0	142,3	1,7	1,53
12.	134,0	133	1	0,75

Kehilangan massa dapat dihitung dengan mengurangi berat tulangan awal dengan berat tulangan akhir. Selanjutnya, kehilangan massa tulangan yang telah didapatkan dapat dihitung untuk mengetahui nilai dari laju korosi atau *corrosion rate* sampel beton bertulang dengan menggunakan Persamaan 2.11. Berikut ini merupakan contoh perhitungan laju korosi suatu sampel beton bertulang dengan menggunakan beton 3 sebagai sampel.

$$\begin{aligned} \text{Corrosion rate (CR)} &= \frac{K \times W}{(A \times D \times T)} \\ &= \frac{8,76 \times 10^4 \times 2,2}{(63,92 \times 7,874 \times 840)} \\ &= 0,456 \text{ mm/tahun} \end{aligned}$$

Pada perhitungan tersebut diatas, nilai laju korosi dapat dihitung berdasarkan konstanta laju korosi, berat kehilangan massa tulangan, luas permukaan tulangan, berat jenis tulangan, dan waktu terekspos. Nilai konstanta laju korosi yang diperlukan dapat dilihat pada Tabel 2.6 yang menunjukkan konstanta laju korosi berdasarkan satuannya. Pemilihan konstanta dapat disesuaikan dengan kebutuhan penelitian. Pada penelitian ini, digunakan konstanta dengan satuan laju korosi yaitu mm/tahun yaitu sebesar $8,76 \times 10^4$. Konstanta tersebut dapat kemudian dimasukkan kedalam persamaan guna mengetahui hasil uji laju korosi. Nilai laju korosi untuk masing-masing sampel beton berbeda tergantung pada lama pengujian saat beton dialiri listrik. Untuk hasil perhitungan uji laju korosi dapat dilihat pada Tabel 4.24:



Tabel 4.24 Hasil Perhitungan Uji Laju Korosi

No. Tulangan	pH <i>Curing</i>	Kehilangan Massa (gr)	Lama Perendaman (Hari)	Lama Perendaman (Jam)	Nilai Laju Korosi (mm/tahun)
1.	5 ± 0,5	0,7	26	624	0,195
2.	5 ± 0,5	1,6	35	840	0,332
3.	5 ± 0,5	2,2	35	840	0,456
4.	5 ± 0,5	2,7	46	1104	0,426
5.	7 ± 0,5	0,7	35	840	0,145
6.	7 ± 0,5	0,7	27	648	0,188
7.	7 ± 0,5	1,4	39	936	0,260
8.	5 ± 0,5	1,7	39	936	0,316
9.	7 ± 0,5	0,8	35	1104	0,126
10.	5 ± 0,5	1,8	39	936	0,335
11.	7 ± 0,5	2,2	42	1008	0,380
12.	7 ± 0,5	1	35	840	0,207

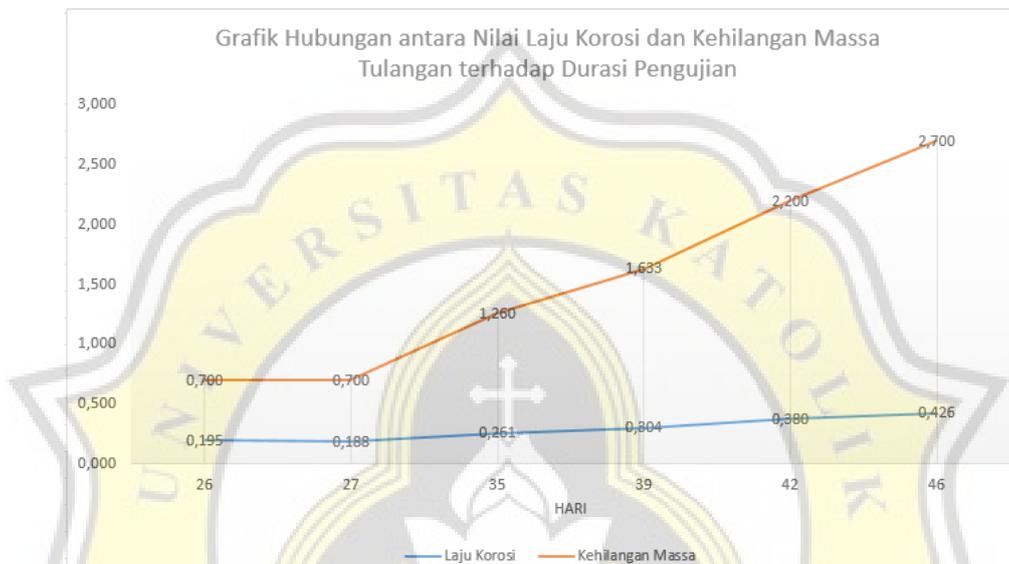
4.6.2. Pembahasan pengujian laju korosi

Pengujian laju korosi telah dimulai pada tanggal 28 Oktober 2021, dan selesai pada tanggal 13 Desember 2021. Keretakan pertama terjadi pada beton nomor 1 yang mengalami keretakan pada hari ke-26 pengujian laju korosi. Keretakan terakhir terjadi pada beton 4 yang mengalami keretakan pada hari ke-45 pengujian laju korosi di tanggal 13 Desember 2021.

Pada penelitian ini sampel dibagi menjadi 2, dengan rincian 6 beton sampel di-*curing* dan direndam air dengan pH 5 ± 0,5 dan 6 lainnya di-*curing* dan direndam air bersumber dari PDAM. Laju korosi menurut Afandi, dkk., (2015) dapat diartikan sebagai kecepatan rambatan atau kecepatan penurunan kualitas dari suatu bahan terhadap waktu. Satuan internasional yang digunakan untuk laju korosi adalah mm/tahun, atau mill/tahun dalam standar Inggris. Laju korosi yang dihitung pada penelitian ini adalah tulangan yang terdapat pada beton sampel yang digunakan untuk pengujian.

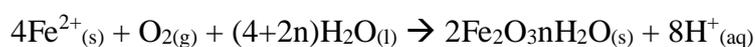
Setelah melakukan pengujian laju korosi selama total 46 hari, diketahui bahwa nilai laju korosi yang terjadi pada beton bertulang dipengaruhi oleh durasi dari pengujian yang dilakukan terhadap sampel beton bertulang. Pada penelitian yang telah peneliti lakukan, dapat ditarik hasil bahwa semakin bertambahnya waktu atau durasi dari pengujian laju korosi, nilai kehilangan massa dan juga laju korosi dari benda uji juga akan bertambah. Secara singkat, karat yang terakumulasi pada suatu sampel

akan bertambah seiring berjalannya waktu pengujian, dan dari karat tersebut akan meningkatkan nilai kehilangan massa akibat pengujian, dan juga akan berpengaruh terhadap nilai laju korosi dari suatu sampel beton bertulang. Adapun grafik hubungan antara durasi pengujian laju korosi terhadap nilai laju korosi dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Grafik Hubungan antara Nilai Rata-Rata Laju Korosi dan Rata-Rata Kehilangan Massa Tulangan terhadap Durasi Pengujian

Pada Gambar 4.7 menunjukkan bahwa semakin lama durasi dari pengujian laju korosi maka semakin tinggi pula nilai kehilangan massa dan nilai laju korosi yang terjadi pada tulangan. Hal ini mendukung penelitian sebelumnya oleh Wahyuniarsih Sutrisno pada tahun 2017 yang juga melakukan penelitian dengan hasil semakin lama waktu dari pengujian yang dilakukan, semakin tinggi juga nilai kehilangan massa dari tulangan. Alasan dari hal ini adalah semakin lama durasi dari pengujian yang dilakukan, karat yang terbentuk pada tulangan juga semakin bertambah. Karat tersebut muncul karena adanya reaksi dari logam, oksigen (O_2) dan juga air (H_2O) yang merembes ke dalam beton sampel. Adapun produk dari reaksi tersebut adalah karat yang memiliki rumus kimia $nFe_2O_3 \cdot nH_2O$. Produk karat tersebut bereaksi sesuai dengan persamaan kimia berikut:





Kian waktu karat tersebut akan terakumulasi dan semakin bertambah, sehingga menyebabkan nilai kehilangan massa yang bertambah, dan juga akan berdampak pada nilai laju korosi dari sampel tersebut.

Derajat keasaman dari air yang digunakan untuk media *curing* dan media perendaman memiliki pengaruh terhadap nilai laju korosi pada sampel beton bertulang. Derajat keasaman dari air yang digunakan untuk media *curing* dan media perendaman berpengaruh pada tingkat penetrasi air ke dalam beton. Seperti yang telah diungkapkan oleh Pandiangan, dkk., (2014), bahwa kerusakan yang terjadi pada beton yang berinteraksi pada lingkungan asam adalah ikatan antar partikel yang ada di dalam beton yang kian melemah. Berdasarkan pernyataan tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin melemahnya ikatan partikel yang ada pada beton, juga akan berpotensi menimbulkan rongga-rongga yang dapat menurunkan nilai kuat tekan serta berpotensi untuk air masuk melalui rongga-rongga tersebut, sehingga juga dapat menurunkan durabilitas dari suatu beton bertulang.

Seperti yang telah diketahui bersama bahwa air memiliki sifat kapilaritas yang menyebabkan air dapat naik melalui rongga-rongga bagian bawah sampel hingga menyentuh tulangan yang ada pada beton bertulang. Semakin banyak rongga yang ada pada beton, semakin banyak juga air yang masuk ke dalam beton, sehingga volume produk karat yang dihasilkan juga semakin besar, dengan demikian hal tersebut dapat mempengaruhi nilai laju korosi pada suatu sampel beton bertulang. Volume karat yang semakin bertambah akan mengurangi diameter dan juga luas permukaan dari suatu tulangan. Berdasarkan volume karat yang semakin bertambah ini akan mendesak beton dari dalam sehingga beton dapat terkelupas atau bahkan pecah. Hal ini nantinya akan berpengaruh pada kinerja dan juga durabilitas dari beton bertulang dalam masa layannya. Volume karat yang bertambah, akan mempengaruhi daya lekat antara beton dengan tulangan. Beton yang tidak mengikat tulangan akan cenderung memiliki durabilitas yang rendah.

Rongga-rongga yang ada pada beton yang di-*curing* dan direndam menggunakan air dengan pH $5 \pm 0,5$ juga dapat menyebabkan beton memiliki retak yang lebih besar bila dibandingkan dengan yang di-*curing* dan direndam menggunakan air PDAM. Gambar 4.8 menunjukkan perbedaan lebar retak beton yang di-*curing* dan direndam

menggunakan air dengan pH $5\pm 0,5$ (Beton 3) dan beton yang di-*curing* dan direndam menggunakan air PDAM (Beton 7).



a. Pola Retak Sampel Beton 3



b. Pola Retak Sampel Beton 7

Gambar 4.8 Perbandingan Pola Keretakan Benda Uji Beton 3 dan Beton 7

Penelitian yang telah dilakukan menghasilkan nilai rata-rata laju korosi beton bertulang yang di-*curing* dan direndam menggunakan air dengan pH $5\pm 0,5$ sebesar $0,343 \text{ mm}/\text{tahun}$. Sedangkan untuk nilai rata-rata laju korosi beton bertulang yang di-*curing* dan direndam menggunakan air PDAM sebesar $0,218 \text{ mm}/\text{tahun}$. Nilai laju korosi pada sampel beton bertulang yang di-*curing* dan direndam menggunakan air dengan pH $5\pm 0,5$ lebih besar dibandingkan beton bertulang yang di-*curing* dan direndam menggunakan air PDAM. Beton bertulang yang terpapar lingkungan asam akan memiliki nilai laju korosi yang lebih besar dibandingkan beton yang berada pada lingkungan pH normal ($7\pm 0,5$). Dengan demikian derajat keasaman lingkungan sekitar beton bertulang berpengaruh secara langsung terhadap durabilitas beton.