

BAB IV

ANALISIS DATA DAN HASIL PENELITIAN

IV.1 ANALISIS PEMBUATAN SAMPEL

Penelitian dimulai dengan melakukan pengujian material untuk mengecek kualitas dan perhitungan rancang campuran. Material yang diuji adalah agregat halus (pasir) dan agregat kasar (kerikil). Hasil dari pengujian material diperoleh:

Pengujian agregat kasar:

- *Bulk Specific Gravity (SSD)* = 2,54
- *Apparent Specific Gravity* = 2,68
- *Absorption* = 3,35 %

Pengujian agregat halus:

- *Bulk Specific Gravity (SSD)* = 2,64
- *Apparent Specific Gravity* = 2,69
- *Absorption* = 0,7 %
- *Fine Modulus (FM) Sand* = 2,02

Setelah itu dilakukan pembuatan sampel pendahuluan untuk mendapatkan rancang campuran yang cocok sehingga sesuai dengan *target strength* yang direncanakan. Hasil *mix design* proporsi bahan untuk membuat campuran beton yang digunakan adalah sebagai berikut:

- $W = 193 \text{ kg/m}^3$ (8,8 L per $0,045 \text{ m}^3$)
- $C = 361,11 \text{ kg/m}^3$ (17 kg per $0,045 \text{ m}^3$)
- $S = 677,24 \text{ kg/m}^3$ (30,5 kg per $0,045 \text{ m}^3$)
- $CA = 1146,65 \text{ kg/m}^3$ (52 kg per $0,045 \text{ m}^3$)
- Slump = $10 \pm 2 \text{ cm}$

Volume air masing-masing pengecoran berubah-ubah untuk hari yang berbeda, hal ini dikarenakan kondisi dari material, basah ataupun kering material akibat cuaca. Oleh karena itu, untuk material yang kering diperlukan penambahan air dan sebaliknya. Oleh karena itu w/c dikontrol dari uji slump yang diupayakan dipertahankan $10 \pm 2 \text{ cm}$.

Proses pembuatan benda uji adalah sebagai berikut:

a. Pengadukan:

- Memasukkan agregat kasar kedalam bak pengaduk
- Kemudian memasukkan semen dan agregat halus dan mengaduknya sampai merata, teruskan pengadukan sambil menambahkan air pencampur sedikit demi sedikit. Setelah semua air pencampur dimasukkan ke dalam bak pengaduk, teruskan pengadukan sampai beton merata.

b. Menentukan slump.

Apabila slump yang didapat tidak sesuai dengan yang dikehendaki, ulangi pekerjaan (I) dengan menambah atau mengurangi agregat/air sampai mendapat slump yang dikehendaki.

c. Mengisi cetakan dengan adukan beton dalam 3 lapis, tiap-tiap lapis dipadatkan dengan 25 kali tusukan secara merata pada saat melakukan pemadatan lapisan pertama, tongkat pemadat tidak boleh mengenai dasar cetakan. Pada saat pemadatan lapisan kedua serta ketiga tongkat pemadat boleh masuk kira-kira 25,4 mm kedalam lapisan dibawahnya. Setelah selesai melakukan pemadatan, praktikan mengetuk sisi cetakan perlahan-lahan sampai rongga bekas tusukan tertutup, lalu meratakan permukaan beton. Kemudian membiarkan beton dalam cetakan selama 24 jam dan meletakkannya pada tempat yang bebas dari getaran.

d. Setelah 24 jam, cetakan dibuka dan benda uji dikeluarkan.

e. Merendam benda uji dalam bak perendam berisi air yang telah memenuhi persyaratan untuk perawatan (curing), sampai waktu pengujian.

IV.2 ANALISIS PENGUJIAN KUAT LENTUR

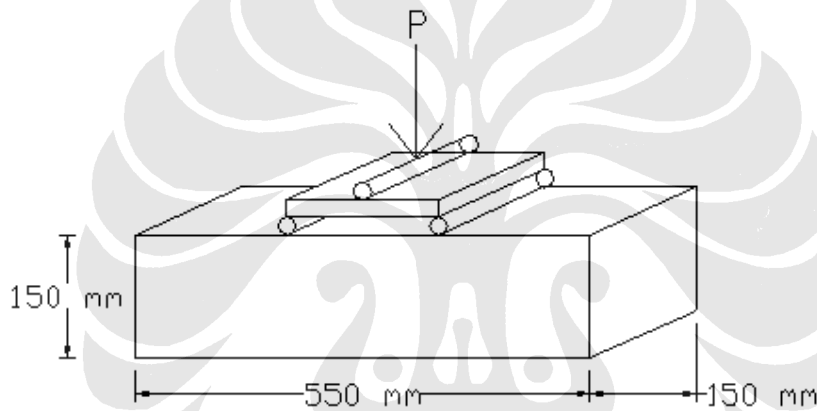
Pengujian kuat lentur pada penelitian ini menggunakan metode *Third-Point Loading*, yaitu pengujian beton secara langsung dimana pengujian bersifat destruktif, yang berarti benda uji dilakukan pengujian hanya 1 kali pengujian. Hal ini dikarenakan benda uji yang telah dilakukan pengujian menjadi rusak dan tidak dapat digunakan lagi untuk pengujian lainnya. Benda uji yang digunakan berupa balok beton berpenampang bujur sangkar dengan panjang total balok empat kali lebar penampangnya. Waktu pengujian, kedua blok tumpuan tidak boleh bergeser, bentang antara dua blok tumpuan adalah 450 mm dengan toleransi 9 mm.

Kecepatan beban harus dilakukan kontinyu tanpa menimbulkan efek kejut. Patahnya benda uji di daerah pusat pada 1/3 jarak titik perletakan dari bagian tarik beton. Rumus yang digunakan untuk menghitung:

$$f_r = \frac{PL}{bd^2}$$

dimana :

- f_r = Kuat lentur benda uji (MPa),
- P = Beban maksimum dari mesin uji
- L = jarak antara dua garis perletakan (mm),
- b = lebar tampang lintang patah arah horizontal (mm)
- d = lebar tampang lintang patah arah vertikal (mm)



Gambar 4.1 Model Pengujian Balok Beton dengan Metode *Third-Point Loading*

Benda uji berbentuk balok mempunyai kuat tekan rencana f_c' 30 MPa. Untuk hari-hari tertentu yaitu 3,7,14,21,28,56 dan 84 memiliki jumlah sampel 5 buah. Oleh karena, jumlah benda uji termasuk sampel kecil, maka digunakan ukuran pemusatan dan metode chi-kuadrat untuk penarikan keputusan dalam menentukan kisaran data yang tepat dalam sebaran tersebut.

Hasil pengujian akan mendapatkan nilai beban P (KN), yang kemudian dimasukkan ke persamaan di atas agar didapat kuat lenturnya. Besar nilai kuat lentur yang dihasilkan diharapkan mendekati persamaan $f_r = 0,70\sqrt{f_c'}$.

Tabel 4.1 Beban P Hasil Pengujian Sampel

HARI KE-	BEBAN P (KN)					STATISTIK	
	SAMPSEL					MEAN	CHI-KUADRAT
	1	2	3	4	5		
1	7.5	6.5	6	5.5	7	6.50	6.75
2	8.5	6.5	7			7.33	6.75
3	11.5	12	10.5	11	12.5	11.50	11.75
4	11	11.5	12			11.50	11.50
5	14	13.5	15.5			14.33	13.75
6	15.5	17.5	12			15.00	16.50
7	16.5	16	15	17.5	13	15.60	15.83
8	18.5	16	14			16.17	17.25
9	19.5	18.5	19.5			19.17	19.50
10	18	22	16.5			18.83	20.00
11	22	25	22.5			23.17	22.25
12	20	19.5	21			20.17	20.50
13	21	22	19			20.67	21.50
14	20.5	21.5	18.5	17	23	20.10	21.67
15	19.5	17.5	20			19.00	19.75
16	21	22	19			20.67	21.50
17	20	20.5	23			21.17	21.17
18	21	22	27			23.33	21.50
19	23	24	25.5			24.17	23.50
20	22	23	20			21.67	22.50
21	25	31	28	29	27	28.00	28.00
22	21	23	24.5			22.83	23.75
23	28.5	35.5	28.5			30.83	28.50
24	25.5	29.5	28.5			27.83	29.00
25	28	30.5	40.5			33.00	30.50
26	37	25	25.5			29.17	25.25
27	40	34	27.5			33.83	34.00
28	33	34.5	34	32.5	39	34.60	34.25
56	36	35.5	40	37.5	36	37.00	35.83
84	38	36.5	36	44	37.5	38.40	36.67

Dari data di atas, maka nilai kuat lentur untuk tiap hari uji dapat dihitung. Berikut ini adalah hasil perhitungan nilai kuat lentur untuk beban P rata-rata dan metode chi-kuadrat:

Tabel 4.2 Nilai Kuat Lentur Hasil Rata-rata

Hari ke-	Beban P	Beban P	W	M Lentur	T Lentur	fr
	KN	kg	$1/6 bh^2$ cm ³	$1/6 PL$ kgcm	M/W kg/cm ²	PL/bd ² MPa
1	6.5	663.2653061	562.5	4974.489796	8.843537415	0.867
2	7.333333333	748.2993197	562.5	5612.244898	9.977324263	0.978
3	11.5	1173.469388	562.5	8801.020408	15.6462585	1.533
4	11.5	1173.469388	562.5	8801.020408	15.6462585	1.533
5	14.33333333	1462.585034	562.5	10969.38776	19.50113379	1.911
6	15	1530.612245	562.5	11479.59184	20.40816327	2.000
7	15.6	1591.836735	562.5	11938.77551	21.2244898	2.080
8	16.16666667	1649.659864	562.5	12372.44898	21.99546485	2.156
9	19.16666667	1955.782313	562.5	14668.36735	26.07709751	2.556
10	18.83333333	1921.768707	562.5	14413.26531	25.62358277	2.511
11	23.16666667	2363.945578	562.5	17729.59184	31.51927438	3.089
12	20.16666667	2057.823129	562.5	15433.67347	27.43764172	2.689
13	20.66666667	2108.843537	562.5	15816.32653	28.11791383	2.756
14	20.1	2051.020408	562.5	15382.65306	27.34693878	2.680
15	19	1938.77551	562.5	14540.81633	25.85034014	2.533
16	20.66666667	2108.843537	562.5	15816.32653	28.11791383	2.756
17	21.16666667	2159.863946	562.5	16198.97959	28.79818594	2.822
18	23.33333333	2380.952381	562.5	17857.14286	31.74603175	3.111
19	24.16666667	2465.986395	562.5	18494.89796	32.87981859	3.222
20	21.66666667	2210.884354	562.5	16581.63265	29.47845805	2.889
21	28	2857.142857	562.5	21428.57143	38.0952381	3.733
22	22.83333333	2329.931973	562.5	17474.4898	31.06575964	3.044
23	30.83333333	3146.258503	562.5	23596.93878	41.95011338	4.111
24	27.83333333	2840.136054	562.5	21301.02041	37.86848073	3.711
25	33	3367.346939	562.5	25255.10204	44.89795918	4.400
26	29.16666667	2976.190476	562.5	22321.42857	39.68253968	3.889
27	33.83333333	3452.380952	562.5	25892.85714	46.03174603	4.511
28	34.6	3530.612245	562.5	26479.59184	47.07482993	4.613
56	37	3775.510204	562.5	28316.32653	50.34013605	4.933
84	38.4	3918.367347	562.5	29387.7551	52.24489796	5.120

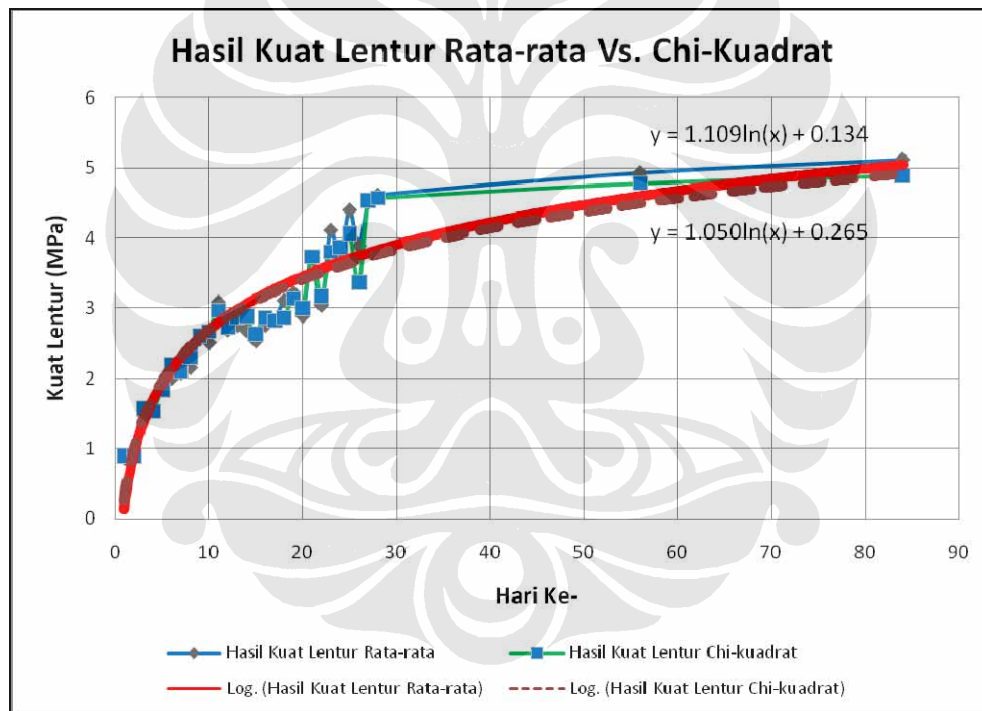
Tabel 4.3 Nilai Kuat Lentur Hasil Metode Chi-Kuadrat

Hari ke-	Beban P	Beban P	W	M Lentur	T Lentur	fr
	KN	kg	1/6 bh ² cm ³	1/6 PL kgcm	M/W kg/cm ²	PL/bd ² MPa
1	6.75	688.7755102	562.5	5165.816327	9.183673469	0.900
2	7.75	790.8163265	562.5	5931.122449	10.54421769	0.900
3	11.75	1198.979592	562.5	8992.346939	15.98639456	1.567
4	11.5	1173.469388	562.5	8801.020408	15.6462585	1.533
5	14.75	1505.102041	562.5	11288.26531	20.06802721	1.833
6	16.5	1683.673469	562.5	12627.55102	22.44897959	2.200
7	15.83333333	1615.646259	562.5	12117.34694	21.54195011	2.111
8	17.25	1760.204082	562.5	13201.53061	23.46938776	2.300
9	19.5	1989.795918	562.5	14923.46939	26.53061224	2.600
10	20	2040.816327	562.5	15306.12245	27.21088435	2.667
11	23.16666667	2363.945578	562.5	17729.59184	31.51927438	2.967
12	20.5	2091.836735	562.5	15688.77551	27.89115646	2.733
13	21.5	2193.877551	562.5	16454.08163	29.25170068	2.867
14	21.66666667	2210.884354	562.5	16581.63265	29.47845805	2.889
15	19.75	2015.306122	562.5	15114.79592	26.8707483	2.633
16	21.5	2193.877551	562.5	16454.08163	29.25170068	2.867
17	21.16666667	2159.863946	562.5	16198.97959	28.79818594	2.822
18	24.5	2500	562.5	18750	33.33333333	2.867
19	24.75	2525.510204	562.5	18941.32653	33.67346939	3.133
20	22.5	2295.918367	562.5	17219.38776	30.6122449	3.000
21	28.75	2933.673469	562.5	22002.55102	39.11564626	3.733
22	23.75	2423.469388	562.5	18176.02041	32.31292517	3.167
23	30.83333333	3146.258503	562.5	23596.93878	41.95011338	3.800
24	29	2959.183673	562.5	22193.87755	39.45578231	3.867
25	35.5	3622.44898	562.5	27168.36735	48.29931973	4.067
26	37	3775.510204	562.5	28316.32653	50.34013605	3.367
27	37	3775.510204	562.5	28316.32653	50.34013605	4.533
28	35.125	3584.183673	562.5	26881.37755	47.78911565	4.567
56	37.375	3813.77551	562.5	28603.31633	50.85034014	4.778
84	39	3979.591837	562.5	29846.93878	53.06122449	4.889

Perubahan nilai kuat lentur seharusnya selalu meningkat secara logaritmik seiring bertambahnya umur beton. Akan tetapi terjadinya penurunan pada hari-hari tertentu, kemungkinan dipengaruhi kondisi beton saat proses pencampuran, pengecoran, pembebanan (kecepatan pembebanan yang berbeda) dan kondisi lingkungan. Selain itu, nilai kuat lentur juga dipengaruhi proses *curing* yang dilakukan. Perawatan yang kurang baik, dapat menyebabkan susut tidak merata (*non-uniform shrinkage*) yang memiliki pengaruh sensitif terhadap nilai kuat lentur. Kemudian kesalahan lainnya yang mungkin terjadi saat pengecoran adalah distribusi agregat yang tidak merata untuk setiap benda uji dan pemadatan yang kurang memenuhi prosedur.

Berdasarkan pengolahan data yang dilakukan dengan dua metode statistik. Hasil rata-rata yang didapat untuk kuat lentur beton dengan PCC pada hari-hari awal memiliki kecepatan peningkatan kekuatan yang cepat, lalu semakin berkurang pada umur beton mendekati hari ke-28 dan setelahnya. Pada hari ke-28 didapat kuat lentur beton sebesar 4.613 MPa, setelah itu tetap meningkat dengan lebih lambat hingga 4.933 MPa pada hari ke-56 dan 5.12 MPa pada hari ke-84.

Metode kedua dengan distribusi chi-kuadrat, dilakukan pemilihan data setelah menentukan batasan atas dan bawahnya. Hasil kuat lentur beton PCC yang didapat secara umum lebih kecil dibanding hitungan rata-rata, karena ada data-data yang jauh berbeda dari lainnya yang tidak digunakan. Kuat lenturnya pada hari ke-28 sebesar 4.57 MPa dan meningkat hingga 4.78 MPa pada hari ke-56 dan 4.89 MPa pada hari ke-84.



Gambar 4.2 Grafik Kuat Lentur Hasil Penelitian

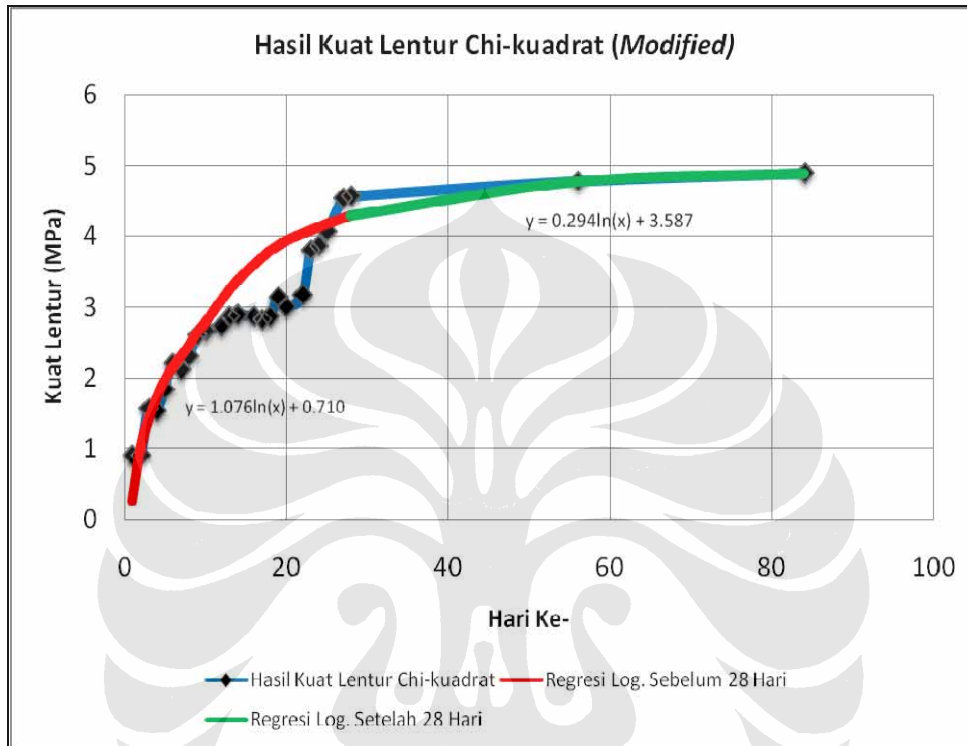
Pada grafik di atas terlihat perbedaan nilai kedua metode statistik tidak terlalu besar. Berdasarkan tabel di bawah ini, rata-rata perbedaan kuat lentur kedua metode sebesar 4.33%. Kemudian grafik regresi logaritma yang dihasilkan kurang menggambarkan perilaku kenaikan nilai kuat lentur beton dari hasil penelitian. Jika melihat data hasil penelitian, seharusnya grafik yang didapat setelah hari ke-28 lebih landai dari sebelumnya.

Tabel 4.4 Perbedaan Nilai Kuat Lentur Beton Dua Metode Statistik

Hari ke-	fr	fr	Perbedaan
	Mean	Chi-Kuadrat	
	MPa	MPa	
1	0.867	0.900	3.846
2	0.978	0.900	7.955
3	1.533	1.567	2.174
4	1.533	1.533	0.000
5	1.911	1.833	4.070
6	2.000	2.200	10.000
7	2.080	2.111	1.496
8	2.156	2.300	6.701
9	2.556	2.600	1.739
10	2.511	2.667	6.195
11	3.089	2.967	3.957
12	2.689	2.733	1.653
13	2.756	2.867	4.032
14	2.680	2.889	7.794
15	2.533	2.633	3.947
16	2.756	2.867	4.032
17	2.822	2.822	0.000
18	3.111	2.867	7.857
19	3.222	3.133	2.759
20	2.889	3.000	3.846
21	3.733	3.733	0.000
22	3.044	3.167	4.015
23	4.111	3.800	7.568
24	3.711	3.867	4.192
25	4.400	4.067	7.576
26	3.889	3.367	13.429
27	4.511	4.533	0.493
28	4.613	4.567	1.012
56	4.933	4.778	3.153
84	5.120	4.889	4.514
Rata-rata Perbedaan =			4.333

Selain hasil regresi logaritma yang kurang sesuai dengan hasil penelitian, terdapat juga perubahan data cukup ekstrim terjadi pada umur beton ke 6,11, 15, 21 dan 26. Pada umur beton tersebut dan umur-umur yang mendekati 28 hari terlihat ketidakkonsistensian kenaikan nilai kuat lentur. Hal ini dikarenakan pengecoran terjadi saat musim hujan, dimana kadar air agregat selalu berubah akibat penempatan pada lokasi terbuka. Perubahan kadar air agregat ini berpengaruh pada jumlah air untuk campuran seperti dijelaskan pada analisis pembuatan benda uji. Selain itu, semakin lama umur beton semakin besar nilai susut *non-uniform* yang terjadi. Hal ini juga akan berpengaruh terhadap kuat lentur benda uji.

Akibat kedua kondisi di atas perlu dilakukan penyesuaian agar analisis yang dilakukan lebih mendekati kenyataan. Data-data pada hari-hari yang tidak konsisten tersebut tidak digunakan. Kemudian regresi logaritma untuk umur beton sebelum 28 hari dipisah dengan setelahnya, maka grafik kuat lentur (metode chi-kuadrat) yang dihasilkan seperti di bawah ini:



Gambar 4.3 Grafik kuat Lentur Hasil Metode Chi-Kuadrat (Modifikasi)

Peningkatan kuat lentur beton sebelum 28 hari yang cepat digambarkan dengan persamaan $Y=1.076 \ln(x) + 0.710$. Kemudian peningkatan melambat setelah 28 hari dan semakin mendatar saat umur beton antara hari ke-56 dan 84, yang digambarkan dengan persamaan $Y= 0.294 \ln(x) + 3.587$.

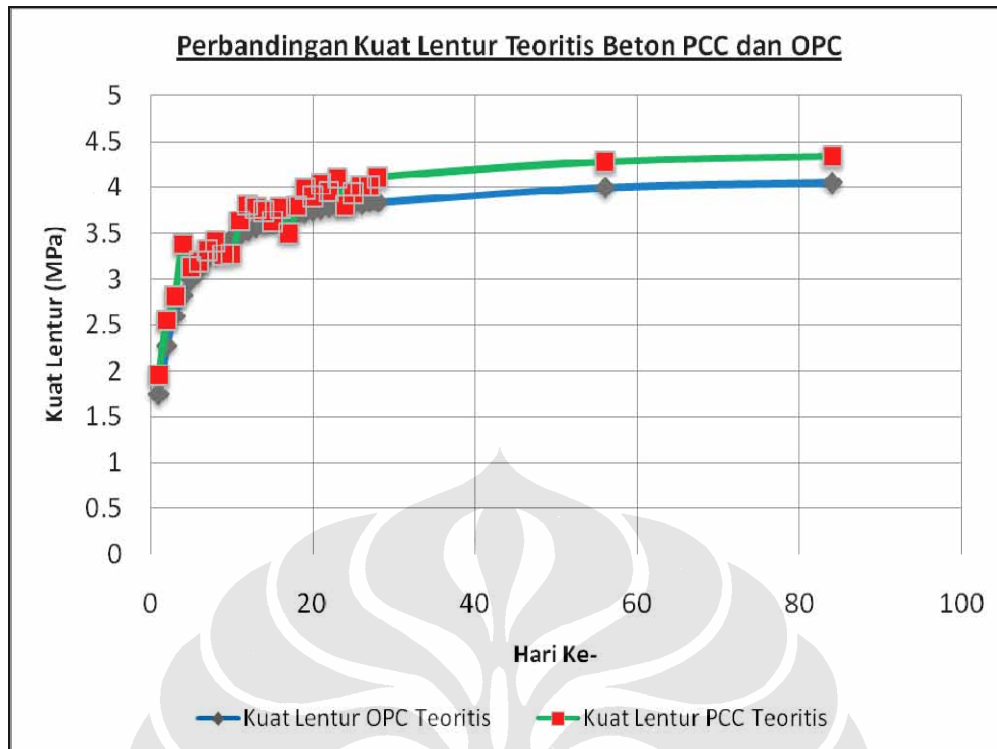
IV.3 ANALISIS KUAT LENTUR BETON TEORITIS

Berdasarkan persamaan pada SNI 03-1726-2002 pasal 11.5.3 ($f_r = 0,70\sqrt{f_c}$) nilai kuat lentur dapat dihitung. Nilai kuat lentur akan dihitung berdasarkan nilai kuat tekan yang telah didapatkan. Nilai kuat tekan untuk beton normal dan beton dengan PCC diperoleh dari penelitian “Perilaku Kuat Tekan Dan Kuat Tarik Beton dengan Menggunakan Semen Tipe PCC (*Portland Composite Cement*) untuk Cetakan Silinder Dengan Metode Statistik” oleh Liany Kartika (0403010437), dengan kuat tekan rencana $f_c' = 30\text{MPa}$.

Hasil perhitungan kuat lentur beton dengan PCC akan dibandingkan dengan kuat lentur beton normal dengan OPC. Pada grafik atau tabel di bawah terlihat perbedaan nilai kuat lentur beton PCC dan OPC yang dihitung secara teoritis dengan menggunakan nilai kuat tekannya.

Tabel 4.5 Hubungan Kuat Tekan dengan Kuat Lentur Beton

Hari Ke-	Kuat Tekan PCC		Kuat Tekan OPC		% Perbedaan PCC dengan OPC	
	f_c' 30 Mpa	$0.7\sqrt{f_c}$	K-368	f_c' 30 Mpa		
	MPa	MPa	kg/cm ²	MPa		
1	7.723	1.945	75.994	6.186	1.741	10.505
2	13.226	2.546	129.324	10.526	2.271	10.788
3	16.079	2.807	168.812	13.740	2.595	7.557
4	23.215	3.373	199.228	16.216	2.819	16.422
5	19.885	3.122	223.377	18.182	2.985	4.380
6	20.625	3.179	243.015	19.780	3.113	2.070
7	22.351	3.309	259.297	21.106	3.216	2.826
8	23.631	3.403	273.016	22.222	3.300	3.027
9	21.550	3.250	284.734	23.176	3.370	3.703
10	21.828	3.270	294.858	24.000	3.429	4.858
11	26.822	3.625	303.692	24.719	3.480	4.001
12	29.412	3.796	311.469	25.352	3.525	7.158
13	28.950	3.766	318.368	25.914	3.563	5.389
14	28.434	3.733	324.529	26.415	3.598	3.615
15	26.730	3.619	330.065	26.866	3.628	0.254
16	28.950	3.766	335.066	27.273	3.656	2.939
17	24.903	3.493	339.606	27.642	3.680	5.356
18	29.227	3.784	343.746	27.979	3.703	2.158
19	32.279	3.977	347.537	28.288	3.723	6.386
20	30.938	3.894	351.021	28.571	3.742	3.901
21	33.125	4.029	354.234	28.833	3.759	6.703
22	31.770	3.946	357.206	29.075	3.774	4.336
23	34.221	4.095	359.964	29.299	3.789	7.471
24	29.319	3.790	362.530	29.508	3.803	0.321
25	31.447	3.925	364.923	29.703	3.815	2.812
26	32.742	4.005	364.923	29.703	3.815	4.753
27	32.742	4.005	368.572	30.000	3.834	4.278
28	34.370	4.104	368.572	30.000	3.834	6.573
56	37.301	4.275	400.001	32.558	3.994	6.573
84	38.290	4.332	410.611	33.422	4.047	6.573
Rata-rata Perbedaan =						5.256



Gambar 4.4 Grafik Perbandingan Kuat Lentur Beton PCC dan OPC Teoritis

Pada tabel di atas menunjukkan bahwa kenaikan kuat beton diikuti dengan peningkatan kuat lentur. nilai kuat tekan pada beton PCC yang lebih besar daripada beton OPC berarti secara teori nilai kuat lenturnya pun lebih besar. Pada beton normal dengan OPC kuat lentur di hari ke-28 adalah 3.396 MPa, yaitu 11.32% dari kuat tekannya. Sedangkan, pada beton PCC kuat lentur di hari ke-28 adalah 3.635 MPa, yaitu 12.11% dari kuat tekannya. Ini mendekati teori bahwa kuat lentur beton berkisar pada 10-15% dari kuat tekannya.

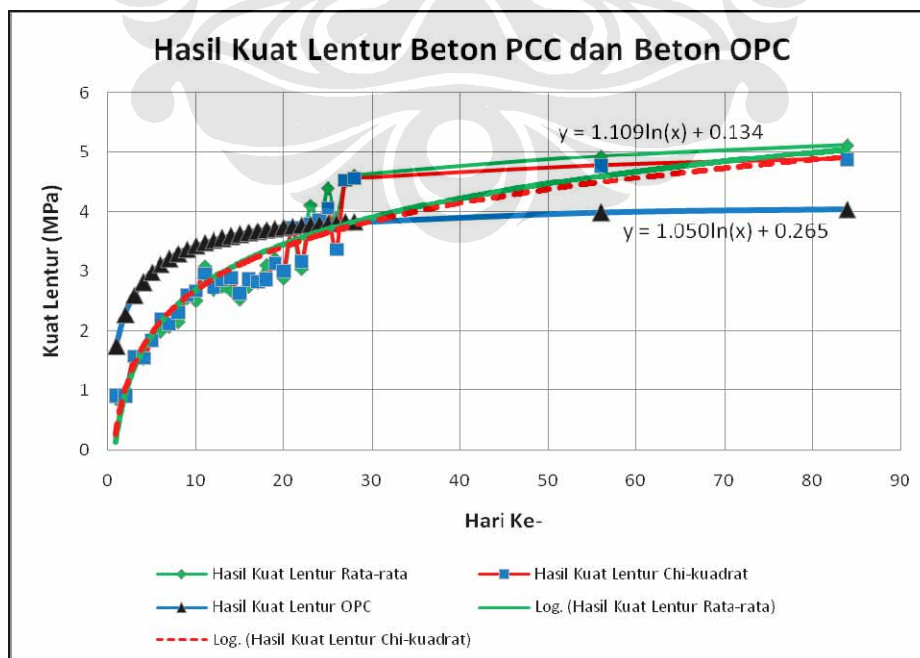
Perbedaan kedua kuat lentur pada dua hari pertama lebih dari 10%. Lalu, pada hari yang lain perbedaannya berkisar antara 2-7 %, dengan rata-rata perbedaan keseluruhannya sebesar 5.256%.

IV.4 ANALISIS PERBANDINGAN KUAT LENTUR BETON PCC DAN BETON NORMAL (OPC)

Analisis dimaksudkan untuk melihat perbandingan kuat lentur beton PCC hasil observasi laboratorium dengan beton OPC hasil perhitungan persamaan SNI 03-1726-2002 pasal 11.5.3 ($f_r = 0,70\sqrt{f_c'}$). Perbandingan keduanya akan memperlihatkan dampak terhadap kuat lentur akibat penggunaan PCC pada beton.

Tabel 4.6 Perbandingan Kuat Lentur Beton PCC dengan Beton OPC

Hari Ke-	Kuat Lentur Beton		
	Mean PCC	Chi-Kuadrat PCC	OPC
	MPa	MPa	MPa
1	0.867	0.900	1.741
2	0.978	0.900	2.271
3	1.533	1.567	2.595
4	1.533	1.533	2.819
5	1.911	1.833	2.985
6	2.000	2.200	3.113
7	2.080	2.111	3.216
8	2.156	2.300	3.300
9	2.556	2.600	3.370
10	2.511	2.667	3.429
11	3.089	2.967	3.480
12	2.689	2.733	3.525
13	2.756	2.867	3.563
14	2.680	2.889	3.598
15	2.533	2.633	3.628
16	2.756	2.867	3.656
17	2.822	2.822	3.680
18	3.111	2.867	3.703
19	3.222	3.133	3.723
20	2.889	3.000	3.742
21	3.733	3.733	3.759
22	3.044	3.167	3.774
23	4.111	3.800	3.789
24	3.711	3.867	3.803
25	4.400	4.067	3.815
26	3.889	3.367	3.815
27	4.511	4.533	3.834
28	4.613	4.567	3.834
56	4.933	4.778	3.994



Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Kuat Lentur Beton PCC dan Beton OPC

Dari grafik di atas dapat dilihat bahwa pada hasil kuat lentur beton OPC pada hari pertama mendapatkan nilai yang cukup tinggi, yaitu 1.741MPa. Setelah itu mengalami kenaikan yang cukup cepat pada 14 hari awal, sebelum kenaikannya melambat hingga dicapai kekuatan lentur pada umur beton 28 hari sebesar 3.834 MPa (11.32% dari kuat tekan) , lalu cenderung tetap. Sedangkan, hasil kuat lentur beton PCC mendapatkan nilai awal yang kecil 0.867 MPa untuk hasil rata-rata dan 0.90 untuk metode chi-kuadrat. Kenaikan berlangsung cepat hingga mencapai umur beton 28 hari dengan besar kuat lentur 4.613 MPa (15.377% dari kuat tekan) untuk hasil rata-rata, lalu 4.567 MPa (15.22% dari kuat tekan) untuk chi-kuadrat dan tetap mengalami peningkatan. Hasil ini mendekati perkiraan pada hipotesis bahwa kuat lentur beton dengan PCC akan lebih besar dibanding OPC, dengan nilai yang berkisar pada 10-15% dari kuat tekannya.

Pada umur sebelum mendekati 28 hari nilai kuat lentur beton PCC rata-rata di bawah kuat lentur beton OPC, tetapi setelah itu nilai yang lebih besar. Kemudian, kuat lentur beton OPC cenderung tetap seperti kuat tekannya. Sedangkan, kuat lentur beton PCC tetap mengalami peningkatan hingga hari ke-84.

Besarnya persentase perbedaan nilai antara kuat lentur beton PCC dan beton OPC dapat dilihat pada tabel di bawah. Perbedaan nilai kuat lentur beton PCC rata-rata dengan beton OPC pada hari-hari awal cukup besar, contohnya terdapat perbedaan hingga 132.27% pada hari ke-2. Akan tetapi, setelah 20 hari hingga 28 hari perbedaannya semakin mengecil antara 0.7-19%. Saat kuat lentur beton PCC lebih besar setelah 28 hari, perbedaan pada hari ke-56 sebesar 19.04% dan 20.96% pada hari ke-84. Secara rata-rata perbedaan kuat lentur beton PCC rata-rata hitung dan OPC adalah sebesar 35.8%.

Hal yang sama terjadi pada perbandingan antara kuat lentur beton PCC perhitungan metode chi-kuadrat dengan beton OPC. Perbedaan kuat lentur rata-ratanya sebesar 34.12%.

Tabel 4.7 Persentase Perbedaan Kuat Lentur Beton PCC dengan Beton OPC

Hari ke-	fr	fr	Perbedaan	Hari ke-	fr	fr	Perbedaan
	Mean PCC	OPC			Chi-Kuadrat PCC	OPC	
	MPa	MPa			MPa	MPa	
1	0.867	1.741	100.880	1	0.900	1.741	93.440
2	0.978	2.271	132.272	2	0.900	2.271	152.344
3	1.533	2.595	69.224	3	1.567	2.595	65.624
4	1.533	2.819	83.838	4	1.533	2.819	83.838
5	1.911	2.985	56.182	5	1.833	2.985	62.808
6	2.000	3.113	55.662	6	2.200	3.113	41.511
7	2.080	3.216	54.608	7	2.111	3.216	52.330
8	2.156	3.300	53.085	8	2.300	3.300	43.471
9	2.556	3.370	31.866	9	2.600	3.370	29.612
10	2.511	3.429	36.564	10	2.667	3.429	28.598
11	3.089	3.480	12.671	11	2.967	3.480	17.313
12	2.689	3.525	31.079	12	2.733	3.525	28.947
13	2.756	3.563	29.316	13	2.867	3.563	24.304
14	2.680	3.598	34.242	14	2.889	3.598	24.536
15	2.533	3.628	43.220	15	2.633	3.628	37.782
16	2.756	3.656	32.664	16	2.867	3.656	27.522
17	2.822	3.680	30.405	17	2.822	3.680	30.405
18	3.111	3.703	19.015	18	2.867	3.703	29.163
19	3.222	3.723	15.543	19	3.133	3.723	18.820
20	2.889	3.742	29.519	20	3.000	3.742	24.722
21	3.733	3.759	0.681	21	3.733	3.759	0.681
22	3.044	3.774	23.979	22	3.167	3.774	19.194
23	4.111	3.789	7.835	23	3.800	3.789	0.289
24	3.711	3.803	2.463	24	3.867	3.803	1.659
25	4.400	3.815	13.295	25	4.067	3.815	6.188
26	3.889	3.815	1.899	26	3.367	3.815	13.318
27	4.511	3.834	15.009	27	4.533	3.834	15.425
28	4.613	3.834	16.892	28	4.567	3.834	16.043
56	4.933	3.994	19.037	56	4.778	3.994	16.401
84	5.120	4.047	20.961	84	4.889	4.047	17.224
Rata-rata Perbedaan =			35.797	Rata-rata Perbedaan =			34.117

Jadi, dapat disimpulkan bahwa penggunaan beton dengan PCC dapat meningkatkan kekuatan lentur beton, sesuai dengan meningkat kuat tekannya. Hal ini dapat dilihat lagi pada grafik perbandingan persamaan logaritma dari kuat lentur beton PCC dan OPC.

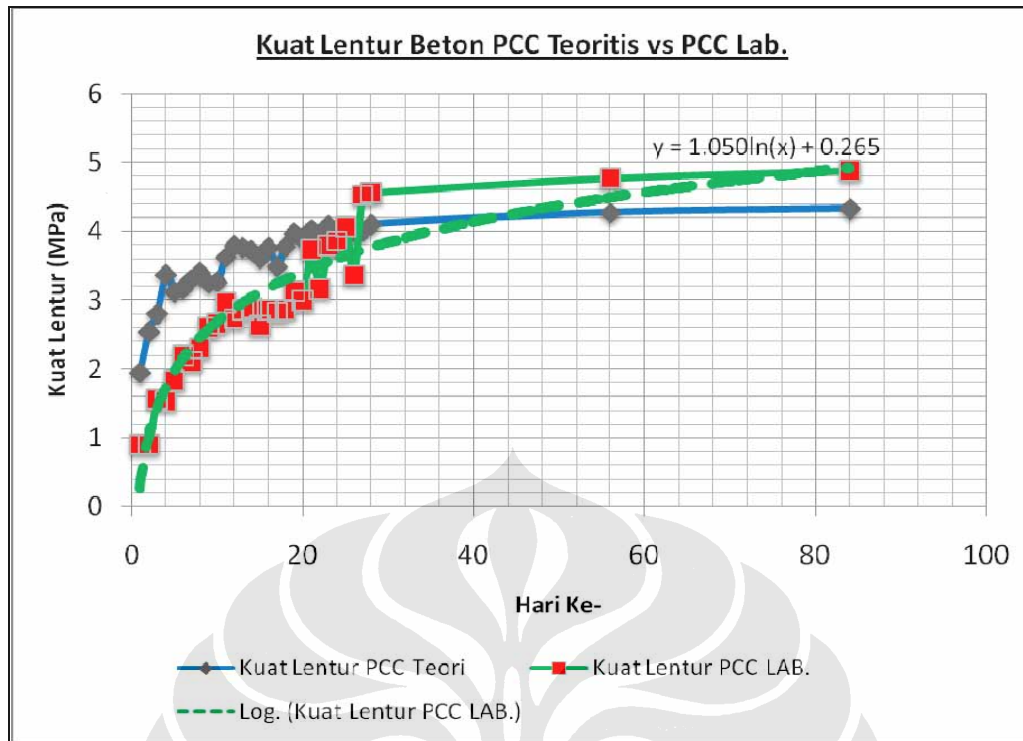
Kenaikan kekuatan tekan dan lentur beton sangat dipengaruhi dari komposisi PCC dimana sekitar 6% - 35 % dari massa semen portland kompositnya mengandung bahan anorganik yang memiliki karakteristik yang dapat meningkatkan kuat tekan beton, sehingga juga berpengaruh terhadap kuat lenturnya.

IV.5 ANALISIS HUBUNGAN NILAI KUAT TEKAN DENGAN KUAT LENTUR BETON DENGAN PCC

Nilai kuat lentur beton dengan yang dihitung dengan persamaan $f_r = 0,70\sqrt{f_c'}$, mempunyai perbedaan nilai dengan kuat lentur yang didapat dari hasil penelitian. Besarnya perbedaan nilai kuat lentur teoritis dan hasil metode chi-kuadrat dapat dilihat pada grafik dan tabel di bawah ini. Perbedaan rata-rata kedua nilai kuat lentur sebesar 39.22%.

Tabel 4.8 Perbedaan Kuat Lentur Beton PCC Teoritis dan Hasil Penelitian

Hari ke-	fr	fr teoritis	Perbedaan
	Chi-Kuadrat PCC	PCC	
	MPa	MPa	
1	0.900	1.945	116.146
2	0.900	2.546	182.860
3	1.567	2.807	79.163
4	1.533	3.373	119.962
5	1.833	3.122	70.265
6	2.200	3.179	44.503
7	2.111	3.309	56.760
8	2.300	3.403	47.950
9	2.600	3.250	24.983
10	2.667	3.270	22.640
11	2.967	3.625	22.202
12	2.733	3.796	38.889
13	2.867	3.766	31.384
14	2.889	3.733	29.207
15	2.633	3.619	37.433
16	2.867	3.766	31.384
17	2.822	3.493	23.775
18	2.867	3.784	32.012
19	3.133	3.977	26.927
20	3.000	3.894	29.785
21	3.733	4.029	7.914
22	3.167	3.946	24.597
23	3.800	4.095	7.762
24	3.867	3.790	1.974
25	4.067	3.925	3.473
26	3.367	4.005	18.973
27	4.533	4.005	11.645
28	4.567	4.104	10.135
56	4.778	4.275	10.519
84	4.889	4.332	11.400
Rata-rata Perbedaan =			39.221



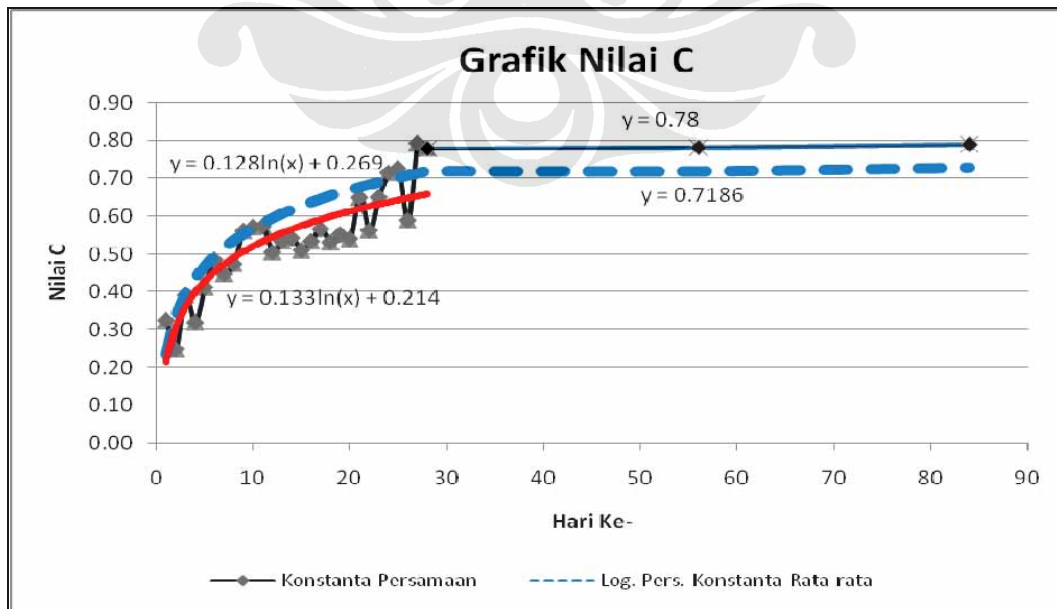
Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Kuat Lentur Beton PCC Teoritis dengan Hasil Penelitian

Perbedaan yang didapat menunjukkan hubungan kuat tekan (f_c) dengan kuat lentur (f_r) berdasarkan persamaan $f_r = 0,70\sqrt{f_c}$, tidak lagi berlaku untuk beton dengan PCC. Untuk mendapatkan hubungan baru antara kuat tekan dan kuat lentur digunakan persamaan $f_r = C\sqrt{f_c}$, dimana C adalah konstanta hasil bagi antara nilai kuat lentur dengan akar kuadrat kuat tekan, yang didapat dari hasil penelitian.

Nilai C bervariasi bergantung pada umur beton. Perubahan nilai terjadi sebelum umur beton ke-28 hari, tetapi mulai mempunyai nilai yang tetap untuk umur beton sekitar 28 hari dan setelahnya. Kenaikan nilai C terjadi secara logaritmik dapat dilihat pada tabel dan grafik di bawah ini.

Tabel 4.9 Nilai Konstanta

Hari ke-	fr	Kuat Tekan PCC	Konstanta C
	PL/bd ²	fc' 30 Mpa	
	MPa	MPa	
1	0.900	7.723	0.32
2	0.900	13.226	0.25
3	1.567	16.079	0.39
4	1.533	23.215	0.32
5	1.833	19.885	0.41
6	2.200	20.625	0.48
7	2.111	22.351	0.45
8	2.300	23.631	0.47
9	2.600	21.550	0.56
10	2.667	21.828	0.57
11	2.967	26.822	0.57
12	2.733	29.412	0.50
13	2.867	28.950	0.53
14	2.889	28.434	0.54
15	2.633	26.730	0.51
16	2.867	28.950	0.53
17	2.822	24.903	0.57
18	2.867	29.227	0.53
19	3.133	32.279	0.55
20	3.000	30.938	0.54
21	3.733	33.125	0.65
22	3.167	31.770	0.56
23	3.800	34.221	0.65
24	3.867	29.319	0.71
25	4.067	31.447	0.73
26	3.367	32.742	0.59
27	4.533	32.742	0.79
28	4.567	34.370	0.78
56	4.778	37.301	0.78
84	4.889	38.290	0.79



Gambar 4.7 Grafik Nilai C

Jadi, dapat ditentukan persamaan hubungan antara kuat tekan (f_c) dan kuat lentur (f_r) sebagai berikut:

$$\text{Untuk umur beton sebelum 28 hari : } f_r = [0.128 \ln(x) + 0.269] \sqrt{f_c} ,$$

dimana x adalah umur beton, dan

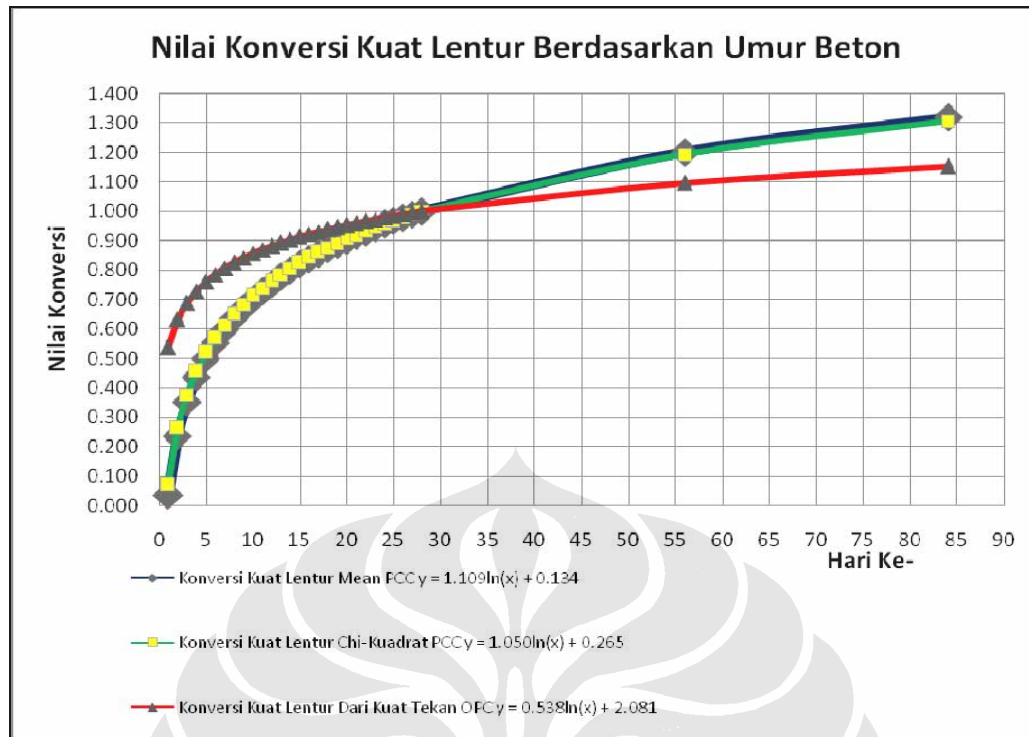
$$\text{untuk umur beton 28 hari dan setelahnya : } f_r = 0,7186 \sqrt{f_c} ,$$

IV.6 ANALISIS KONVERSI UMUR KUAT LENTUR BETON

Pada tabel di bawah ini menunjukkan nilai konversi kuat lentur beton pada umur tertentu terhadap kuat lentur pada hari ke-28. Seperti terlihat bahwa nilai konversi beton PCC hampir seluruhnya berada di bawah nilai konversi beton normal dengan OPC. Akan tetapi, nilai konversi kuat lentur beton PCC lebih besar dari beton normal pada umur beton di atas 28 hari.

Tabel 4.10 Nilai Konversi Umur untuk Kuat Lentur Beton

Hari Ke-	Konversi Kuat Lentur		
	Mean PCC	Chi-Kuadrat PCC	OPC
1	0.035	0.070	0.537
2	0.236	0.264	0.633
3	0.353	0.377	0.690
4	0.436	0.457	0.730
5	0.501	0.519	0.761
6	0.554	0.570	0.786
7	0.599	0.613	0.807
8	0.637	0.651	0.826
9	0.671	0.683	0.842
10	0.702	0.713	0.857
11	0.729	0.739	0.870
12	0.755	0.764	0.882
13	0.778	0.786	0.893
14	0.799	0.807	0.904
15	0.819	0.826	0.913
16	0.838	0.844	0.922
17	0.855	0.861	0.931
18	0.872	0.877	0.939
19	0.888	0.892	0.946
20	0.903	0.906	0.953
21	0.917	0.920	0.960
22	0.930	0.933	0.967
23	0.943	0.945	0.973
24	0.955	0.957	0.979
25	0.967	0.968	0.984
26	0.979	0.979	0.990
27	0.989	0.990	0.995
28	1.000	1.000	1.000
56	1.201	1.193	1.096
84	1.318	1.306	1.153



Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Nilai Konversi Umur untuk Kuat Lentur Beton

Berdasarkan grafik di atas peningkatan kuat lentur beton dengan PCC berlangsung lebih lambat dibandingkan beton normal dengan OPC hingga hari ke 28. Akan tetapi, setelah umur beton di atas 28 hari, beton PCC masih mengalami kenaikan, sedangkan beton OPC relatif tetap. Hal ini seiring dengan nilai kuat tekan beton dengan PCC yang juga nilai kuat tekannya terus bertambah setelah 28 hari.

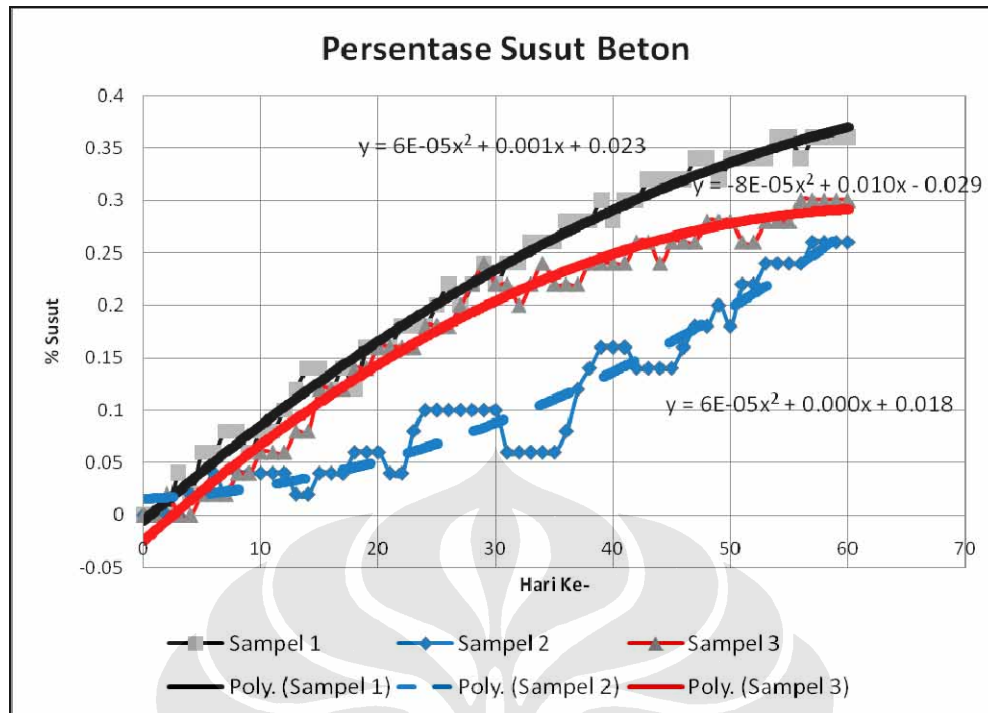
IV.7 ANALISIS SUSUT BETON DENGAN PCC

Perubahan volume juga dapat terjadi pada saat setelah *setting* selesai, dan dapat berupa penyusutan (*shrinkage*) ataupun pengembangan (*swelling*). Hidrasi yang terus menerus, terjadi karena masih ada air yang tersisa menyebabkan pengembangan. Akan tetapi, jika beton melepaskan panas dan air, dapat menyebabkan terjadinya susut (*shrinkage*).

Berikut ini hasil pengamatan terhadap tiga sampel balok susut beton dengan menggunakan PCC:

Tabel 4.11 Susut Beton dengan PCC

Date of Test	Remarks	Hari ke-	Sampel 1		Sampel 2		Sampel 3	
			ΔL	% Shrinkage	ΔL	% Shrinkage	ΔL	% Shrinkage
30-May	61%, 29.9	1	0.02	0.040	0	0.000	0	0.000
31-May	62%, 29.9	2	0.02	0.040	0	0.000	0.01	0.020
1-Jun	78%, 28.2	3	0	0.000	0	0.000	0	0.000
2-Jun	67%, 28.6	4	0.01	0.020	0.01	0.020	0	0.000
3-Jun	72%, 27.8	5	0.01	0.020	0.01	0.020	0.01	0.020
4-Jun	78%, 28.2	6	0.01	0.020	0.02	0.040	0.01	0.020
5-Jun	75%, 28.4	7	0.02	0.040	0.01	0.020	0.01	0.020
6-Jun	77%, 28.7	8	0.02	0.040	0.07	0.140	0.02	0.040
7-Jun	72%, 28.3	9	0.01	0.020	0.04	0.080	0.02	0.040
8-Jun	63%, 28.3	10	0.02	0.040	0.02	0.040	0.03	0.060
9-Jun	69%, 28.9	11	0.02	0.040	0.02	0.040	0.03	0.060
10-Jun	64%, 28.4	12	0.03	0.060	0.02	0.040	0.03	0.060
11-Jun	70%, 27.8	13	0.04	0.080	0.02	0.040	0.04	0.080
12-Jun	75%, 28.5	14	0.05	0.100	0.02	0.040	0.04	0.080
13-Jun	78%, 27.8	15	0.05	0.100	0.02	0.040	0.06	0.120
14-Jun	77%, 27.2	16	0.04	0.080	0.01	0.020	0.06	0.120
15-Jun	79%, 28.2	17	0.05	0.100	0.01	0.020	0.06	0.120
16-Jun	80%, 27.5	18	0.04	0.080	0.02	0.040	0.07	0.140
17-Jun	79%, 29	19	0.06	0.120	0.02	0.040	0.07	0.140
18-Jun	82%, 26.8	20	0.06	0.120	0.03	0.060	0.08	0.160
19-Jun	80%, 27.4	21	0.06	0.120	0.03	0.060	0.08	0.160
20-Jun	82%, 27.3	22	0.07	0.140	0.03	0.060	0.08	0.160
21-Jun	83%, 27.1	23	0.07	0.140	0.02	0.040	0.08	0.160
22-Jun	73%, 28.6	24	0.07	0.140	0.02	0.040	0.09	0.180
23-Jun	76%, 28.8	25	0.08	0.160	0.04	0.080	0.09	0.180
24-Jun	71%, 28.1	26	0.09	0.180	0.05	0.100	0.09	0.180
25-Jun	75%, 28.3	27	0.08	0.160	0.05	0.100	0.1	0.200
26-Jun	69%, 29.6	28	0.09	0.180	0.05	0.100	0.11	0.220
27-Jun	75%, 28.3	29	0.1	0.200	0.05	0.100	0.03	0.060
28-Jun	83%, 27.5	30	0.09	0.180	0.05	0.100	0.03	0.060
29-Jun	84%, 27.5	31	0.1	0.200	0.05	0.100	0.11	0.220
30-Jun	86%, 27.4	32	0.1	0.200	0.05	0.100	0.1	0.200
1-Jul	74%, 28.4	33	0.11	0.220	0.03	0.060	0.11	0.220
2-Jul	81%, 27.6	34	0.11	0.220	0.03	0.060	0.12	0.240
3-Jul	85%, 28.2	35	0.11	0.220	0.03	0.060	0.11	0.220
4-Jul	85%, 26.8	36	0.12	0.240	0.03	0.060	0.11	0.220
5-Jul	85%, 27.2	37	0.12	0.240	0.03	0.060	0.11	0.220
6-Jul	91%, 26.5	38	0.12	0.240	0.04	0.080	0.12	0.240
7-Jul	84%, 27.3	39	0.13	0.261	0.06	0.120	0.12	0.240
8-Jul	89%, 27.3	40	0.12	0.240	0.07	0.140	0.12	0.240
9-Jul	85%, 26.6	41	0.13	0.261	0.08	0.160	0.12	0.240
10-Jul	72%, 29.1	42	0.13	0.261	0.08	0.160	0.13	0.261
11-Jul	75%, 28.7	43	0.14	0.281	0.08	0.160	0.13	0.261
12-Jul	76%, 29.1	44	0.14	0.281	0.07	0.140	0.12	0.240
13-Jul	80%, 27	45	0.14	0.281	0.07	0.140	0.13	0.261
14-Jul	81%, 27.3	46	0.14	0.281	0.08	0.160	0.13	0.261
15-Jul	79%, 27.1	47	0.16	0.321	0.09	0.180	0.13	0.261
16-Jul	82%, 27.1	48	0.15	0.301	0.09	0.180	0.14	0.281
17-Jul	90%, 26.4	49	0.14	0.281	0.1	0.200	0.14	0.281
18-Jul	83%, 27.6	50	0.15	0.301	0.09	0.180	0.14	0.281
19-Jul	79%, 28	51	0.15	0.301	0.11	0.220	0.13	0.261
20-Jul	78%, 27.8	52	0.15	0.301	0.11	0.220	0.13	0.261
21-Jul	81%, 27.6	53	0.15	0.301	0.12	0.240	0.14	0.281
22-Jul	71%, 28.6	54	0.16	0.321	0.12	0.240	0.14	0.281
23-Jul	73%, 28.4	55	0.16	0.321	0.12	0.240	0.14	0.281
24-Jul	74%, 28.2	56	0.15	0.301	0.12	0.240	0.15	0.301
25-Jul	79%, 28.3	57	0.16	0.321	0.13	0.261	0.15	0.301
26-Jul	87%, 26.5	58	0.16	0.321	0.13	0.261	0.15	0.301
27-Jul	83%, 27.2	59	0.16	0.321	0.13	0.261	0.15	0.301
28-Jul	84%, 26.8	60	0.16	0.321	0.13	0.261	0.15	0.301



Gambar 4.9 Grafik Susut Beton

Ketiga benda uji diamati perubahan panjangnya selama masa *curing* 60 hari. Benda uji dilapisi oleh kain yang selalu dibasahi setiap hari. Susut beton yang terjadi mengalami kenaikan secara parabolik. Grafik untuk sampel pertama dan ketiga berupa parabola tertutup, yang berarti susut beton pada sampel semakin lama semakin mengecil. Besar persentase susut setelah 60 hari untuk sampel pertama sebesar 0.321%, yang merupakan sampel dengan persentase susut terbesar. Kemudian sampel ketiga mempunyai besar persentase susut sebesar 0.301%.

Sedangkan, pada sampel kedua mempunyai perilaku susut yang berbeda. Grafik susutnya berupa parabola terbuka, yang berarti semakin lama susutnya semakin besar, dengan besar persentase susut pada hari ke-60 sebesar 0.261%. Kemungkinan sampel kedua ini mengalami kesalahan baik pada perawatan dan pembacaan, karena disamping bentuk parabola yang berbeda juga mempunyai perbedaan besar susut yang cukup signifikan dibandingkan dua sampel lainnya.

Perubahan susut dipengaruhi oleh perubahan suhu ruangan dan kelembaban akibat perubahan cuaca, yang terkadang cerah dan dapat berubah hujan. Penggunaan fly ash yang halus dan memiliki bentuk partikel bulat mampu meningkatkan kohesi dan *workability* beton, selain itu juga memperlambat *time setting* dan boleh mereduksi penggunaan air, seharusnya mampu mengurangi susut yang terjadi. Akan tetapi, jika dilihat dari hasil yang ada, sepertinya penggunaan PCC tidak terlalu berpengaruh terhadap nilai susut beton dibanding beton normal.

