

Desain *Over Slabbing* Dengan Bahan Tambah *Fly Ash* sebagai Material Penguat Perkerasan Kaku

Uu Saepudin *

Teknik Sipil Universitas Galuh
Jl. RE. Martadinata No. 150 Ciamis
uusaepudin20@gmail.com

*Corresponding author

Wahyu Sumarno

Teknik Sipil Universitas Galuh
Jl. RE. Martadinata No. 150 Ciamis
Wahyu180587@gmail.com

Gini Hartati

Teknik Sipil Universitas Galuh
Jl. RE. Martadinata No. 150 Ciamis
ginihartati70@gmail.com

Abstrak— Permasalahan kerusakan jalan yang terjadi, menunjukkan kinerja jalan yang ada saat ini tidak seperti yang diharapkan. Jalan dengan struktur perkerasan kaku mengalami kerusakan akibat beban lalu lintas yang melebihi kapasitas. Struktur perkerasan menjadi lemah atau berkurang kemampuannya untuk menerima beban sehingga perlu dilakukan penguatan struktur perkerasan kaku. Tujuan penelitian untuk mengetahui desain *over slabbing* yang meliputi kuat tekan, kuat lentur, modulus elastisitas, permeabilitas dan susut beton sebagai material penguat perkerasan kaku dengan bahan tambah *fly ash*. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimen. Penelitian dirancang dengan empat perlakuan, tiap perlakuan diulang tiga kali. Hasil penelitian menunjukkan bahwa material *over slabbing* untuk penguat perkerasan kaku menghasilkan nilai kuat tekan beton rata-rata tertinggi pada variasi kadar *fly ash* 10% sebesar 24,05 Mpa. Kuat lentur rata-rata tertinggi pada variasi kadar *fly ash* 10% sebesar 3,02 Mpa, ini tidak memenuhi syarat kekuatan rencana pada umur 28 hari sebesar 3,78 MPa. Modulus elastisitas beton rata-rata tertinggi pada variasi kadar *fly ash* 10% sebesar 23,066 10^3 Mpa. Nilai koefisien permeabilitas beton terbesar pada variasi kadar *fly ash* 30% sebesar $1,723 \cdot 10^{-5}$ m/det dan nilai koefisien permeabilitas beton terkecil pada variasi kadar *fly ash* 10% sebesar $3,393 \cdot 10^{-5}$ m/det, nilai koefisien permeabilitas beton seluruhnya memenuhi syarat ACI 301-729 sebesar $1,5 \cdot 10^{-11}$ m/det. Susut terbesar terjadi pada beton dengan variasi kadar *fly ash* 30% sebesar 702,222 *microstrain* sedangkan susut terkecil terjadi pada beton dengan variasi kadar *fly ash* 10% sebesar 502,500 *microstrain*.

Kata Kunci —Over Slabbing, Fly Ash, Perkerasan Kaku, Kuat Tekan, Kuat Lentur, Modulus Elastisitas, Permeabilitas, Susut Beton

I. PENDAHULUAN

Permasalahan kerusakan jalan yang terjadi dilapangan selama ini menunjukkan kinerja jalan yang ada saat ini tidak seperti yang diharapkan. Permasalahan tersebut diantaranya, ketidak-nyamanan berkendara karena struktur perkerasan jalan mengalami kerusakan. Menurut Liawan, D. A. (2019) faktor yang mempengaruhi

kerusakan jalan yaitu faktor teknik (geografis, kondisi tanah dasar, perencanaan, pelaksanaan dan pemeliharaan). Struktur perkerasan menjadi lemah atau berkurang kemampuannya untuk menerima beban yang disyaratkan, untuk itu perlu dilakukan suatu penelitian perkuatan struktur perkerasan kaku.

Material bahan bangunan yang paling banyak digunakan untuk struktur adalah beton, seperti pembangunan gedung, perkerasan jalan, bangunan irigasi dan lain-lain. Semakin meningkatnya proyek pembangunan pada saat ini maka makin meningkat pula kebutuhan akan penggunaan beton, sehingga dalam pelaksanaannya memerlukan keahlian dalam mendesain komposisi campuran beton.

Salah satu penggunaan beton pada bangunan teknik sipil yaitu perkerasan jalan beton atau yang biasa disebut perkerasan kaku (*rigid pavement*) yang terdiri dari plat beton semen *portland* dan lapis pondasi di atas tanah dasar. Hal yang perlu diperhatikan dalam perencanaan perkerasan kaku diantaranya kuat tekan, kuat lentur, modulus elastisitas dan susut beton. Menurut (Suhendra, 2017) bahwa terdapat hubungan antara kuat lentur dengan kuat tekan beton. Hubungan tersebut kurang lebih sama dengan rumus yang terdapat dalam SNI beton.

Fly ash merupakan limbah yang selama ini belum dimanfaatkan secara optimal, sehingga tidak menutup kemungkinan akan menimbulkan masalah lingkungan karena *fly ash* merupakan limbah industri, oleh karena itu perlu upaya pemanfaatan *fly ash* sebagai bahan tambah pada beton, yaitu untuk mengurangi jumlah pemakaian semen pada adukan beton tanpa mengurangi mutu beton dan menambah kekedapan beton terhadap air. Menurut (Setiawati, 2018) pada awal umur beton, penggunaan *fly ash* mempengaruhi kekuatan beton. Persentase penggunaan *fly ash* 12,5% pada beton akan menghasilkan beton dengan kuat tekan maksimum, dan menurut (Sultan, 2021) bahwa beton *fly ash* lebih tahan terhadap serangan asam sulfat dibandingkan dengan beton normal.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui desain *over slabbing* yang meliputi kuat tekan, kuat lentur (*modulus of rupture*), modulus elastisitas, permeabilitas dan susut (*shrinkage*) beton sebagai material perkuatan perkerasan kaku dengan menggunakan bahan tambah *fly ash*.

II. METODOLOGI

A. Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimen. Penelitian di rancang dengan empat perlakuan, tiap perlakuan diulang tiga kali. Benda uji pada penelitian ini berbentuk silinder dan balok dengan 3 buah benda uji untuk masing-masing perlakuan. Variasi penambahan *fly ash* 0%, 10%, 20% dan 30% sebagai beton *over slabbing*. Pengujian dilakukan pada umur beton 28 hari untuk kuat tekan, modulus elastisitas, kuat lentur, permeabilitas dan susut beton.

B. Bahan dan Peralatan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

- Agregat halus
- Agregat kasar
- Semen potland tipe I
- Air PDAM
- Fly Ash*

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi :

- Satu set saringan standar ASTM beserta alat penggetar (*sieve shaker*).
- Oven lengkap dengan pengatur suhu.
- Timbangan *triple beam* dengan ketelitian 0,1 gram.
- Timbangan digital dengan ketelitian 0,001 gram.
- Conical mould* untuk mengukur keadaan SSD agregat halus
- Mesin *Los Angeles* dan bola baja untuk pengujian abrasi agregat kasar.
- Mixer* untuk mencampur.
- Kerucut Abrams untuk pengujian *slump*.
- Satu set alat uji kuat tekan beton.
- Satu set alat uji kuat lentur beton.
- Satu set alat uji permeabilitas beton
- Satu set alat susut beton

III. HASIL PENGUJIAN

A. Uji Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada saat benda uji berumur 28 hari dengan menggunakan *Compression Testing Machine* untuk mendapatkan beban maksimum yaitu beban pada saat beton hancur ketika menerima beban tersebut (P_{max}). Dari data pengujian kuat tekan beton pada benda uji silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm dapat diperoleh kuat tekan maksimum beton. Perhitungan kuat tekan beton menggunakan persamaan (1).

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

$$P_{max} = 420 \text{ kN} = 420000 \text{ N}$$

$$A = 0,25 \times \pi \times D^2 = 0,25 \times \pi \times 150^2 \text{ mm}^2 = 17671,46 \text{ mm}^2$$

$$f'c = \frac{420000}{17671,46} = 23,77 \text{ MPa}$$

Hasil pengujian kuat tekan beton dengan benda uji silinder diameter 15 cm dan tinggi 30 cm umur 28 hari selengkapnya ditunjukkan pada Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

No	Kadar <i>Fly ash</i>	A (mm ²)	P (kN)	P (N)	Kuat Tekan (MPa)	f'c Rata-rata (MPa)
1		17671,46	420	420000	23,77	
2	0%	17671,46	410	410000	23,20	23,58
3		17671,46	420	420000	23,77	
1		17671,46	420	420000	23,77	
2	10%	17671,46	430	430000	24,33	24,05
3		17671,46	425	425000	24,05	
1		17671,46	370	370000	20,94	
2	20%	17671,46	380	380000	21,50	21,13
3		17671,46	370	370000	20,94	
1		17671,46	350	350000	19,80	
2	30%	17671,46	340	340000	19,24	19,52
3		17671,46	345	345000	19,52	

B. Uji Kuat Lentur (Modulus of Rufture)

Pengujian kuat lentur dilakukan pada saat benda uji berumur 28 hari dengan menggunakan alat uji kuat lentur untuk mendapatkan kuat lentur maksimum yaitu beban pada saat beton patah ketika menerima beban tersebut. Berdasarkan data pengujian kuat lentur beton pada benda uji balok dengan dimensi 15 x 15 x 60 cm dapat diperoleh kuat lentur maksimum beton. Perhitungan kuat lentur beton menggunakan persamaan (2).

$$Fr \text{ (MoR)} = \frac{P \times l}{(b \times d^2)} \quad (2)$$

$$P_{max} = 21 \text{ kN} = 21000 \text{ N}$$

$$b = 150 \text{ mm}, \quad d = 150 \text{ mm}, \quad l = 450 \text{ mm}$$

$$fr = \frac{21000 \times 450}{(150 \times 150^2)} = 2,80 \text{ Mpa}$$

Hasil pengujian kuat lentur beton benda uji balok dengan dimensi 15 x 15 x 60 cm umur 28 hari selengkapnya ditunjukkan pada Tabel 2 di bawah ini.

Tabel 2. Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton

No	Kadar <i>Fly ash</i>	b / d (mm)	l (mm)	P (N)	Kuat Lentur (MPa)	fr Rata-rata (MPa)
1		150	450	21000	2,80	
2	0%	150	450	20000	2,67	2,80
3		150	450	22000	2,93	
1		150	450	23000	3,07	
2	10%	150	450	23000	3,07	3,02
3		150	450	22000	2,93	
1		150	450	18000	2,40	
2	20%	150	450	19000	2,53	2,44
3		150	450	18000	2,40	
1		150	450	14000	1,87	
2	30%	150	450	15000	2,00	1,87
3		150	450	13000	1,73	

C. Modulus Elastisitas

Pengujian dilakukan pada benda uji silinder beton dengan menggunakan CTM (*Compression Testing Machine*) dengan pembebanan secara konstan untuk mengetahui besar beban yang diterima sampai dengan beban maksimum (saat beton mulai retak) dan

extensometer untuk mengetahui perubahan panjang yang terjadi sehingga dapat diketahui nilai regangan dan tegangan yang terjadi pada setiap pembebanan dengan persamaan sebagai berikut.

Sebagai contoh perhitungan diambil dari data benda uji dengan variasi 0% *fly ash* (beton normal) umur 28 hari pada saat menerima beban (P) = 20 kN

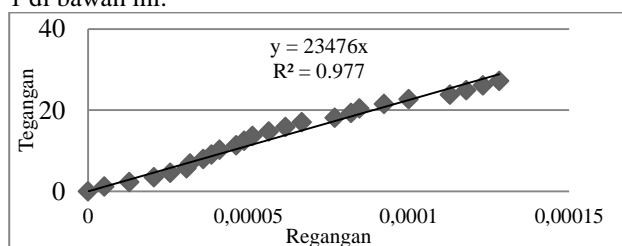
Menghitung regangan yang terjadi :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \times 10^{-3} = \frac{1}{195} \times 10^{-3} = 0,000000513$$

Menghitung tegangan (σ) yang terjadi :

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{20000}{0,25 \times \pi \times 150^2} \text{ N/mm}^2 = 1.1317685 \text{ MPa}$$

Kurva regangan tegangan diperoleh dengan memplotkan data tegangan pada setiap kenaikan 20 kN beban aksial dengan regangan yang terjadi pada setiap benda uji. Dengan analisa regresi pada program *Microsoft excel*, didapatkan grafik regangan tegangan dan persamaan regresi linier, seperti ditunjukkan pada Gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1. Hubungan Regangan Tegangan Beton

Selanjutnya dari persamaan regresi linier dapat dihitung nilai modulus elastisitas. Sebagai contoh diambil persamaan regresi regangan tegangan pada benda uji beton normal umur 28 hari. Untuk perbandingan, dilakukan perhitungan modulus elastisitas beton dengan variasi 0% *fly ash* (beton normal) umur 28 hari sebagai berikut:

Diketahui :

Persamaan regresi linier: $y = 23476 x$

$$P_{\max} = 420 \text{ kN} = 420000 \text{ N}$$

$$A = 0,25 \times \pi \times D^2 = 0,25 \times \pi \times 150^2 \text{ mm}^2 = 17671,46 \text{ mm}^2$$

$$\text{Maka } f_c' = \frac{420000 \text{ N}}{17671,46 \text{ mm}^2} = 23,77 \text{ MPa}$$

Kemudian dihitung nilai modulus elastisitas (E_c) menggunakan Persamaan :

$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0,00005}$$

$$\begin{aligned} S_2 &= 0,4 \times f_c' \\ &= 0,4 \times 23,77 \\ &= 9,508 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Dengan persamaan regangan tegangan:

$$y = 23476 x$$

Untuk:

$$S_2 = 9,506854555 \text{ MPa} \quad \text{didapat } \varepsilon_2 = 0,000404961$$

$$\varepsilon_1 = 0,00005 \quad \text{didapat } S_1 = 1,1738$$

Sehingga nilai modulus elastisitas betonnya adalah:

$$\begin{aligned} E_c &= \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0,00005} \\ &= \frac{9,506854555 - 1,1738}{0,000404961 - 0,00005} \\ &= 23475,97 \text{ Mpa} \approx 23476 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

Validasi Modulus elastisitas beton dengan formula SK SNI-T-15-1991 :

$$\begin{aligned} E &= 4700 \times \sqrt{f_c'} \\ &= 4700 \times \sqrt{23,77} \\ &= 22914,609 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Validasi Modulus elastisitas beton dengan formula ACI 318-89, *Revised* 1992, 1996 :

$$\begin{aligned} E &= 4730 \times \sqrt{f_c'} \\ &= 4730 \times \sqrt{23,77} \\ &= 23060,872 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan selengkapnya ditunjukkan pada Tabel 3 di bawah ini.

Tabel 3. Hasil Perhitungan Modulus Elastisitas

No.	Kadar Fly ash	E_c Perhitungan (10^3) (MPa)	E_c Perhitungan Rata-rata (10^3) (MPa)	E Validasi SNI (10^3) (MPa)	E Validasi ACI (10^3) (MPa)
1		23,476			
2	0%	21,824	22,899	22,822	22,968
3		23,398			
1		22,922			
2	10%	23,142	23,066	23,049	23,196
3		23,134			
1		21,793			
2	20%	20,802	21,450	21,603	21,741
3		21,755			
1		21,196			
2	30%	19,727	20,521	20,767	20,899
3		20,640			

D. Uji Permeabilitas Beton

Berdasarkan SK SNI S-36-1990-03 yang dimaksud dengan beton kedap air adalah beton yang tidak tembus air dan harus memenuhi ketentuan minimum beton kedap air agresif, bila diuji dengan tekanan air, maka tembusnya air ke dalam beton tidak melebihi batas agresif sedang 50 mm dan agresif kuat mm. Hasil pengujian permeabilitas seperti ditunjukkan pada Tabel 4 di bawah ini.

Tabel 4. Hasil Pengujian Permeabilitas

No	Fly ash	Air dalam selang		Penurunan air setelah 1 Jam (mm)	Tinggi air jatuh (mm)	Diameter Resapan (mm)	Kedalaman Penetrasi (mm)	
		Awal (mm)	Akhir (mm)					
1	0%	700	682	23	700	22	24	
2		700	680	25	700	20	21	
3		700	685	24	700	21	22	
		Rata-rata						22,33
1	10%	700	678	22	700	20	21	
2		700	678	22	700	18	23	
3		700	676	24	700	22	19	
		Rata-rata						21,00
1	20%	700	672	28	700	25	26	
2		700	670	30	700	24	25	
3		700	674	26	700	26	28	
		Rata-rata						26,33
1	30%	700	665	35	700	30	32	
2		700	664	36	700	28	30	
3		700	662	38	700	30	30	
		Rata-rata						30,67

Nilai permeabilitas beton dapat dihitung sebagai berikut :

Diameter selang = 0,8 cm = 0,008 m

Waktu aliran = 1 Jam = 3600 detik

Koefesien permeabilitas beton adalah :

$$dQ = 0,25 \times \pi \times 0,008^2 \times 0,023 = 1,156 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$A = 0,25 \times \pi \times 0,022^2 = 0,00038 \text{ m}^2$$

$$K = \left(\frac{1}{0,00038} \right) \left(\frac{1,156 \cdot 10^{-6}}{3600} \right) \left(\frac{0,70}{0,024} \right) = 2,464 \cdot 10^{-5} \text{ m/det}$$

Hasil perhitungan koefesien permeabilitas selengkapanya seperti terlihat pada Tabel 5 di bawah ini.

Tabel 5. Hasil Perhitungan Koefesien Permeabilitas

No	Kadar Fly ash	A (cm ²)	dQ (10 ⁻⁶ m ³)	Koefesien Permeabilitas k=(I/A)(dQ/dt)(L/dh) (m/dt) (10 ⁻⁵)
1	0%	0,00038	1,156	2,464
2		0,00031	1,256	3,704
3		0,00035	1,206	3,078
		Rata-rata		3,082
1	10%	0,00031	1,105	3,259
2		0,00025	1,105	3,674
3		0,00038	1,206	3,248
		Rata-rata		3,393
1	20%	0,00049	1,407	2,144
2		0,00045	1,507	2,593
3		0,00053	1,306	1,709
		Rata-rata		2,149
1	30%	0,00071	1,758	1,512
2		0,00062	1,809	1,905
3		0,00071	1,909	1,751
		Rata-rata		1,723

E. Uji Susut (Shrinkage)

Benda uji untuk pengujian susut berbentuk balok dengan dimensi 10x10x40 cm. Pengujian susut dimulai saat benda uji berumur 1,2,3,7,14,21 dan 28 hari. Nilai susut didapat dari perhitungan antara selisih perubahan panjang dibagi panjang mula-mula. Data pengujian susut seperti ditunjukkan pada Tabel 6 di bawah ini.

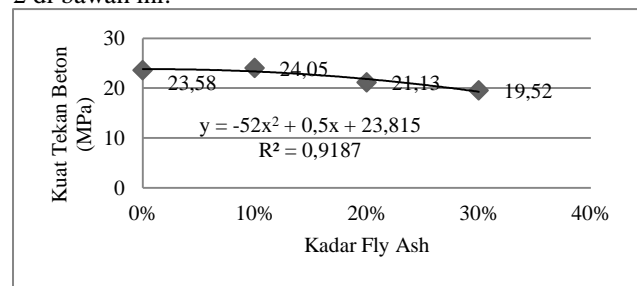
Tabel 6. Hasil Pengujian Susut (Shrinkage)

Hari ke	ϵ_{sh} 0% Fly ash (Beton Normal)	ϵ_{sh} 10% Fly ash	ϵ_{sh} 20% Fly ash	ϵ_{sh} 30% Fly ash
1	-	-	-	-
2	150,556	101,389	147,778	161,111
3	263,056	186,389	279,722	310,278
7	364,444	307,222	388,333	438,056
14	451,111	386,667	488,611	580,000
21	520,000	456,944	567,222	637,222
28	576,111	502,500	629,722	702,222

IV. PEMBAHASAN

A. Kuat Tekan

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan diperoleh grafik yang menggambarkan hubungan antara kadar fly ash dengan kuat tekan beton seperti terlihat pada Gambar 2 di bawah ini.

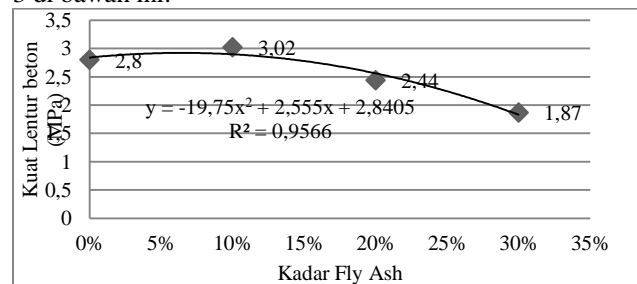


Gambar 2. Grafik Hubungan antara Kadar Fly ash dengan Kuat Tekan Beton

Kuat tekan beton semakin meningkat pada penambahan kadar fly ash 10% dengan menghasilkan nilai kuat tekan beton rata-rata sebesar 24,05 MPa dan pada penambahan kadar fly ash 20% terjadi penurunan kuat tekan beton dengan menghasilkan nilai kuat tekan beton rata-rata sebesar 21,13 Mpa serta pada penambahan kadar fly ash 30% masih terjadi penurunan kuat tekan beton dengan menghasilkan kuat tekan beton rata-rata sebesar 19,52 MPa, bahkan nilai kuat tekannya lebih rendah dari nilai kuat tekan beton rencana sebesar 20 MPa.

B. Kuat Lentur (Modulus of Rupture)

Berdasarkan hasil pengujian kuat lentur diperoleh grafik yang menggambarkan hubungan antara kadar fly ash dengan kuat lentur beton seperti terlihat pada Gambar 3 di bawah ini.

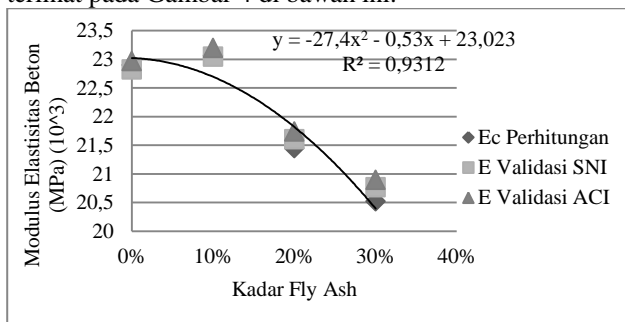


Gambar 3. Grafik Hubungan antara Kadar Fly ash dengan Kuat Lentur Beton

Kuat lentur beton semakin meningkat pada penambahan kadar *fly ash* 10%, pada penambahan kadar *fly ash* 20% dan 30% terjadi penurunan kuat lentur, bahkan nilai kuat lenturnya lebih rendah dari nilai kuat lentur beton normal. Menurut SNI 1991 kuat lentur (*flexural strength*) tidak boleh kurang dari 3,78 Mpa pada umur 28 hari dan kuat lentur beton minimum pada umur 7 hari disyaratkan 80% dari kuat lentur (*flexural strength*) minimum. Kuat lentur tertinggi terjadi pada beton dengan kadar *fly ash* 10% sebesar 3,02 MPa dan kuat lentur terendah terjadi pada beton dengan kadar *fly ash* 30% sebesar 1,87 MPa, ini tidak memenuhi kuat lentur yang disyaratkan pada umur 28 hari menurut SNI 1991 sebesar 3,78 MPa.

C. Modulus Elastisitas Beton

Berdasarkan hasil pengujian modulus elastisitas diperoleh grafik yang menggambarkan hubungan antara kadar *fly ash* dengan modulus elastisitas beton seperti terlihat pada Gambar 4 di bawah ini.

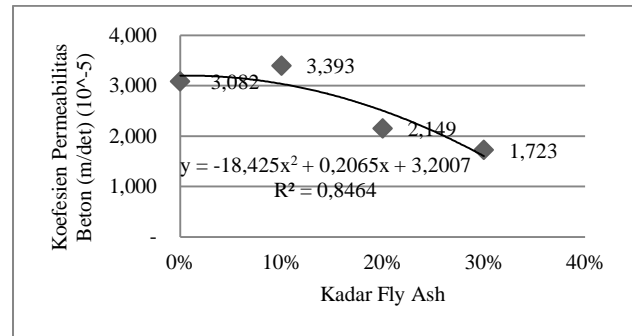


Gambar 4. Grafik Hubungan antara Kadar *Fly ash* dengan Modulus Elastisitas Beton

Modulus elastisitas merupakan suatu ukuran nilai yang menunjukkan kekakuan dan ketahanan beton untuk menahan deformasi (perubahan bentuk). Hal ini membantu untuk menganalisa perkembangan tegangan regangan pada elemen struktur yang sederhana dan untuk menentukan analisa regangan tegangan, momen dan lendutan pada struktur yang lebih kompleks. Modulus elastisitas beton ditentukan dari hubungan antara regangan tegangan beton pada daerah elastis. Modulus elastisitas beton rata-rata tertinggi terjadi pada beton dengan kadar *fly ash* 10% yaitu sebesar $23,066 \cdot 10^3$ MPa, sedangkan modulus elastisitas beton rata-rata terendah pada beton dengan kadar *fly ash* 30% sebesar $20,521 \cdot 10^3$ MPa.

D. Permeabilitas Beton

Berdasarkan hasil pengujian permeabilitas diperoleh grafik yang menggambarkan hubungan antara kadar *fly ash* dengan koefisien permeabilitas beton seperti terlihat pada Gambar 5 di bawah ini.



Gambar 5. Grafik Hubungan antara Kadar *Fly ash* dengan Koefisien Permeabilitas Beton

Beton kedap air adalah beton yang tidak tembus air dan harus memenuhi ketentuan minimum beton kedap air agresif, bila diuji dengan tekanan air, maka tembusnya air ke dalam beton tidak melampaui batas yang telah ditetapkan yaitu untuk agresif sedang 50 mm dan untuk agresif kuat 40 mm. Hasil analisis pengujian penetrasi seperti ditunjukkan pada Tabel 7 di bawah ini.

Tabel 7. Hasil Analisis Pengujian Penetrasi

Kadar <i>Fly ash</i>	Kedalaman Penetrasi	Syarat SK SNI S-36-1990-03	
		Syarat Agresif Kuat (40 mm)	Syarat Agresif Sedang (50 mm)
0%	22,33	Memenuhi Syarat	Memenuhi Syarat
10%	21,00	Memenuhi Syarat	Memenuhi Syarat
20%	26,33	Memenuhi Syarat	Memenuhi Syarat
30%	30,67	Memenuhi Syarat	Memenuhi Syarat

Nilai rata-rata penetrasi air ke dalam beton untuk setiap variasi mutu beton memenuhi syarat sebagai beton kedap air, baik sebagai beton kedap air untuk agresif kuat (40 mm) maupun sebagai beton kedap air untuk agresif sedang (50 mm). Hasil perhitungan koefisien permeabilitas seperti ditunjukkan pada tabel 8 di bawah ini.

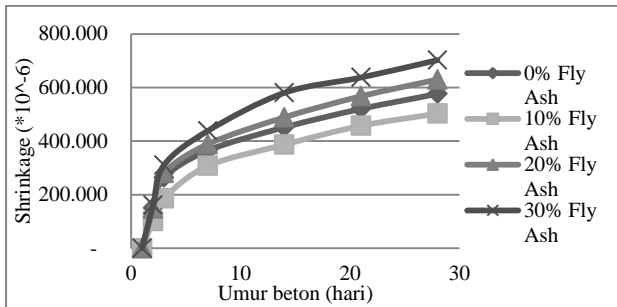
Tabel 8. Hasil Analisis Koefisien Permeabilitas

Kadar <i>Fly ash</i>	Koefisien Permeabilitas (m/det) (10^{-5})	Syarat ACI 301-729 (Revisi 1975) $1,5 \cdot 10^{-11}$ m/det
0%	3,082	memenuhi syarat
10%	3,393	memenuhi syarat
20%	2,149	memenuhi syarat
30%	1,723	memenuhi syarat

Menurut ACI 301-729 (revisi 1975) (Neville dan Brooks, 1987) nilai koefisien permeabilitas maksimum yang disyaratkan sebesar $1,5 \cdot 10^{-11}$ m/det. Hasil perhitungan terlihat bahwa keseluruhan nilai koefisien permeabilitas beton memenuhi syarat ACI 301-729.

E. Susut (*Shrinkage*)

Berdasarkan hasil pengujian susut (*shrinkage*) diperoleh grafik yang menggambarkan hubungan antara umur beton dengan *shrinkage* pada berbagai variasi kadar *fly ash* seperti terlihat pada Gambar 6 di bawah ini.



Gambar 6. Grafik Hubungan antara Umur Beton dengan Shrinkage dengan Berbagai Variasi Kadar Fly Ash

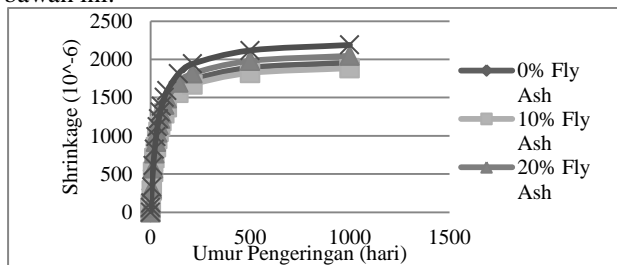
Shrinkage merupakan penyusutan volume yang tidak berhubungan dengan beban. Shrinkage dapat diartikan sebagai penyusutan beton yang diakibatkan oleh faktor hilangnya air dalam beton atau karena hidrasi semen. Seperti ditunjukkan pada grafik di atas semakin lama umur beton, maka akan semakin besar nilai susut yang terjadi.

Beton yang mengalami susut paling besar adalah baton dengan kadar fly ash 30% sebesar 702,222 microstrain pada saat beton berumur 28 hari, sedangkan beton dengan kadar fly ash 10% mengalami susut paling kecil sebesar 502,500 microstrain. Hal ini mengindikasikan bahwa variasi kadar fly ash mempengaruhi nilai susut yang terjadi, semakin besar kadar fly ash, maka semakin besar nilai susut yang terjadi.

Perhitungan prediksi shrinkage menggunakan metode ACI 209 R-92, susut $S_h(t-t_0)$ saat waktu t (hari) diukur dari permulaan pengeringan saat t_0 (hari) dengan contoh perhitungan sebagai berikut :

$$\epsilon_{sh}(t) = \frac{(t-t_0)}{35+(t-t_0)} \epsilon_{sh}(u) = \frac{1}{35+1} \times 2024 = 56,222$$

Perhitungan prediksi shrinkage akan ditinjau jangka panjang sampai umur 1000 hari. Jangka panjang ini akan diprediksi dengan metode ACI 209. R-92 dengan data jangka pendek 28 hari. Berikut ini grafik hasil perhitungan prediksi shrinkage dari masing-masing variasi kadar fly ash seperti ditunjukkan pada Gambar 7 di bawah ini.



Gambar 7. Grafik Hubungan antara Umur Pengeringan dengan Prediksi Shrinkage

Setelah mengalami pengeringan dalam jangka waktu yang relatif lama, maka susut pada beton akan semakin kecil seiring dengan bertambahnya umur beton. Nilai shrinkage akhir yang tidak akan bertambah lagi disebut dengan shrinkage ultimit. Prediksi ACI 209 R-92 tersebut di atas menghasilkan nilai shrinkage ultimit seperti ditunjukkan dalam Tabel 9 di bawah ini.

Tabel 9. Nilai Shrinkage Ultimit Metode ACI 209R-92

No	Kadar Fly ash	Shrinkage Ultimit (Metode ACI 209R-92)
1	0%	2024
2	10%	1950
3	20%	2118
4	30%	2265

Susut yang terjadi pada umur 28 hari mencapai 500 - 700 microstrain. Menurut International Concrete Repair Institute diklasifikasikan sebagai moderate shrinkage, dan memberi batas maksimum shrinkage pada umur 28 hari sebesar 400 microstrain.

V KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa material over slabbing untuk perkuatan perkerasan kaku menghasilkan nilai kuat tekan beton rata-rata tertinggi pada variasi kadar fly ash 10% sebesar 24,05 MPa. Kuat lentur rata-rata tertinggi pada variasi kadar fly ash 10% sebesar 3,02 MPa, ini tidak memenuhi syarat kekuatan rencana pada umur 28 hari sebesar 3,78 MPa. Modulus elastisitas beton rata-rata tertinggi pada variasi kadar fly ash 10% sebesar 23,066 10^3 MPa. Nilai koefisien permeabilitas beton terbesar pada variasi kadar fly ash 30% sebesar $1,723 \cdot 10^{-5}$ m/det dan nilai koefisien permeabilitas beton terendah pada variasi kadar fly ash 10% sebesar $3,393 \cdot 10^{-5}$ m/det, dari nilai koefisien permeabilitas beton tersebut seluruhnya memenuhi syarat ACI 301-729 sebesar $1,5 \cdot 10^{-11}$ m/det. Susut terbesar terjadi pada beton dengan variasi kadar fly ash 30% sebesar 702,222 microstrain sedangkan susut terkecil terjadi pada beton dengan variasi kadar fly ash 10% sebesar 502,500 microstrain.

DAFTAR PUSTAKA

- AG Ismail, A. M. (2017). *Pengaruh Beton Daur Ulang dan Bahan Tambah Fly Ash Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Lentur Beton Struktural Ramah Lingkungan*. Surakarta: Riset Rekayasa Sipil, 2017 - Jurnal.Uns.Ac.Id.
- Alfajrizal, M. (2018). *Kajian Perbandingan Pada Penggunaan Berbagai Merek Semen Terhadap Sampel Kuat Tekan Dan Kuat Lentur Beton Dengan Perawatan (Curing) Dan Tanpa Perawatan Pada Perkerasan Kaku (Rigid Pavement)*. Riau: repository.uir.ac.id.
- Adibrotto, F. (2018). *Eksperimen Beton Mutu Tinggi Berbahan Fly Ash Sebagai Pengganti Sebagian Semen*. Padang: Jurnal Ilmiah Rekayasa ..., 2018 - ejournal2.pnp.ac.id.
- Ananda, D. (2020). *Pengaruh Kalsium Stearate Terhadap Susut Beton dengan Campuran Abu Terbang*. Purwokerto: Repository.Unsoed.Ac.Id.
- Askarman. (2021). *Kajian Pengaruh Penggunaan Fly Ash Amp Dan Fly Ash Batu Bara Terhadap Kuat Tekan Dan Kuat Lentur Perkerasan Kaku (Rigid Pavement)*. Riau: repository.uir.ac.id.

- Atika Ulima Zhafiira, E. P. (2018). *Studi Eksperimental Pengujian Kuat Tekan, Kuat Tarik Belah dan Kuat Lentur Pada Campuran Beton dengan Penambahan Serat Kawat Bendrat Berkait*. Lampung: Jurnal Rekayasa Sipil 2018 - Journal.Eng.Unila.Ac.Id.
- Diah Larasati, E. K. (2020). *Uji Kuat Tekan dan Uji Kuat Lentur Beton dengan Campuran Limbah Plastik Sebagai Bahan Perkerasan Kaku (Rigid Pavement)*. Yogyakarta: Etd.Repository.Ugm.Ac.Id.
- Fitri, F. A. (2018). *Analisis Modulus Elastisitas Beton dengan Menggunakan Alat Pundit Pl-200*. Malang: Repository.Ub.Ac.Id.
- Fetra Venny Riza, D. S. (2019). *Analisis Mekanis Beton Busa Dengan Kombinasi Serat Sabut Kelapa Serta Bahan Tambahan Abu Sekam Padi Dan Serbuk Cangkang Telur*. Surabaya: Progress In Civil-Journal.Umsu.Ac.Id.
- Istanto, R. (2020). *Pengaruh Penggunaan dan Perawatan Berbagai Macam Air Terhadap Kuat Tekan dan Lentur Beton Perkerasan Kaku*. Riau: repository.uir.ac.id.
- Jeanicha Christiani Tampi, S. E. (2019). *Modulus Elastisitas Beton Geopolymer Pada Perawatan Temperatur Ruangan*. Manado: Tekno, 2019 - Ejournal.Unsrat.Ac.Id.
- Leonardus Malino, S. E. (2019). *Fanto Pardomuan Pane, H. T. (2015). Pengujian Kuat Tarik Lentur Beton dengan Variasi Kuat Tekan Beton*. Manado: Ejournal.Unsrat.Ac.Id.
- Liawan, D. A. (2019). *Analisis Faktor-Faktor Penyebab Kerusakan Jalan Pantura (Studi Kasus Pantura Demak – Semarang)*. Semarang: Repository.Unissula.Ac.Id.
- Monica Fransisca Khonado, H. M. (2019). *Kuat Tekan dan Permeabilitas Beton Porous Dengan Variasi Ukuran Agregat*. Manado: Jurnal Sipil Statik - Ejournal.Unsrat.Ac.Id.
- Nurkhasan, S. (2020). *Pemenuhan Kriteria Beton Memadat Mandiri Dengan Variasi Metakaolin Terhadap Kajian Kuat Tekan Tinggi Dan Modulus Elastisitas*. Surakarta: Matriks Teknik Sipil, 2020 - jurnal.uns.ac.id.
- Pratama, M. M. (2018). *Analisis Numerik Modulus Elastisitas Beton Gradasi*. Malang: Bangunan, 2018 - Journal2.Um.Ac.Id.
- Pandei, S. S. (2019). *Studi Eksperimen Pengaruh Pemanfaatan Superplasticizer Terhadap Kuat Tekan dan Permeabilitas Beton Berpori (Pervious Concrete)*. Jakarta: Jurnal Politeknik, 2019 - Jurnal.Pnj.Ac.Id.
- Sultan, M. A. (2021). *Pengaruh Rendaman Asam Terhadap Kuat Tekan Beton Dengan Penambahan Fly Ash*. Aceh: Aceh: Teras Jurnal, 2021 - teras.unimal.ac.id.
- Setiawati, M. (2018). *Fly Ash Sebagai Bahan Pengganti Semen Pada Beton*. Jakarta: Jurnal.Umj.Ac.Id.
- Suhendra. (2017). *Kajian Hubungan Kuat Lentur Dengan Kuat Tekan Beton*. Jambi: Jurnal Civronlit Unbari, 2017 - jt.unbari.ac.id.
- Suryani, A. (2018). *Korelasi Kuat Lentur Beton Dengan Kuat Tekan Beton*. Riau: Jurnal Saintis, Journal.Uir.Ac.Id.