

Studi Perilaku Fisika Modulus Kehalusan Agregat dalam Campuran Beton

REZALDY WAHYU, PRIYANTO SAELAN

Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Bandung
Email: rezaldywahyud@gmail.com

ABSTRAK

Modulus kehalusan agregat berperan dalam membentuk workability campuran beton segar. Pada perancangan campuran beton cara SNI 03-2834-2000, parameter modulus kehalusan agregat gabungan tidak diikutsertakan dalam penentuan kebutuhan jumlah air yang diperlukan untuk mencapai nilai slump rencana tetapi menentukan workability beton segar. Mengingat SNI 03-2834-2000 tidak menyertakan parameter ini, maka dilakukan penelitian lanjut untuk mengetahui fenomena fisika modulus kehalusan agregat dalam campuran beton. Berdasarkan analisis formulasi modulus kehalusan, hasilnya menunjukkan bahwa fenomena fisika yang terjadi pada modulus kehalusan adalah fenomena rangkaian seri pegas yang berperan dalam membentuk kekakuan campuran beton segar. Penelitian berdasarkan data sekunder ini membuktikan bahwa sesungguhnya parameter modulus kehalusan agregat gabungan telah disertakan dalam menentukan kebutuhan jumlah air, namun dipersyaratkan di dalam persyaratan batas gradasi agregat gabungan dalam bentuk rentang nilai modulus kehalusan yang dengan sendirinya menghasilkan nilai slump dalam bentuk rentang tanpa menyebutkan parameter modulus kehalusan agregat gabungan.

Kata kunci: modulus kehalusan, campuran beton, slump

ABSTRACT

The aggregate fineness modulus plays a key role in the function of freshly mixed concrete workability. In the concrete mix design based on SNI 03-2834-2000, the combined aggregate fineness modulus parameter is not included in determining the amount of water required to achieve the planned slump value but determining the workability of fresh concrete. In view of this parameter is not included in the SNI 03-2834-2000, so further research was carried out to evaluate the physical phenomena found in the aggregate fineness modulus in the concrete mixture. The results of the analysis of the fineness modulus formulation indicated that the physical phenomenon found in the fineness modulus was the phenomenon of a series of springs that played a role in forming the stiffness of the fresh concrete mix. This research was successfully conducted based on secondary data, and the results showed that the aggregate fineness modulus parameter had actually been included in determining the amount of water required, but was included in the aggregate gradation limit requirements in the form of a fine modulus value range, which in turn automatically generated the slump value in range form without specifying the parameter.

Keywords: fineness modulus, concrete mix design, slump

1. PENDAHULUAN

Beton merupakan material komposit yang bahan penyusunnya terdiri dari campuran agregat halus (pasir) dan agregat kasar (kerikil) yang diikat bersama secara kimiawi oleh semen setelah bercampur dengan air. Batas modulus kehalusan agregat gabungan pada campuran beton cara SNI adalah 5,06 – 6,5 untuk ukuran maksimal 40 mm, 4,58 – 5,75 untuk ukuran maksimal 20 mm, dan 3,59 – 5,18 untuk ukuran maksimal 10 mm. Modulus kehalusan agregat gabungan dalam campuran beton dapat dimodelkan secara fisika, yaitu dengan pemodelan rangkaian seri pegas. Berbagai ukuran agregat dapat dianalogikan sebagai berbagai pegas yang terangkai secara seri. Berdasarkan analogi ini, modulus kehalusan agregat gabungan merupakan kekakuan ekuivalen (K_e) dari rangkaian pegas secara seri.

Pada perancangan campuran beton cara SNI, modulus kehalusan tidak digunakan dalam menentukan jumlah air yang dibutuhkan untuk mencapai nilai *slump* yang direncanakan, jumlah air hanya ditentukan oleh ukuran maksimum agregat. Pada modulus kehalusan yang sama tetapi memiliki ukuran maksimal agregat kasarnya berbeda akan membutuhkan jumlah air yang berbeda. Hal ini bertentangan dengan fenomena fisika yang terjadi pada parameter modulus kehalusan agregat yang dapat dimodelkan sebagai rangkaian seri pegas. Pada pemodelan ini, jumlah air juga ditentukan oleh parameter modulus kehalusan agregat gabungan. Jika modulus kehalusan sama, maka kebutuhan air akan sama pula. Didasarkan pada perbedaan ini, maka perlu diteliti fenomena fisika sesungguhnya yang terjadi pada modulus kehalusan agregat gabungan dalam campuran beton.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gradasi Agregat Dalam Campuran Beton

Dalam campuran beton, gradasi agregat dapat dibedakan atas 3 (tiga) macam, yaitu:

- a. Gradasi Seragam (*Uniform Graded*).
- b. Gradasi Senjang/Gradasi bercelah (*Gap Graded*).
- c. Gradasi Menerus/Gradasi rapat (*Dense Graded*).

Tingkat gradasi merupakan salah satu hal yang perlu diperhatikan dalam rencana campuran beton, mengingat gradasi secara umum sangat mempengaruhi terhadap total volume pori beton. Jenis gradasi yang baik dalam pembuatan beton pada umumnya adalah gradasi menerus karena untuk mendapatkan kepadatan beton yang maksimal serta campuran beton masih workable maka agregat dalam campuran beton harus terdistribusi dalam berbagai ukuran (Yakti, D.F., dan Priyanto saelan, 2016).

2.2 Modulus Kehalusan Agregat

Gradasi agregat mempengaruhi sifat beton yang dihasilkan, karena itu pencampuran agregat kasar dan agregat halus hendaknya memperhitungkan gradasinya yang dinyatakan dalam parameter modulus kehalusan agregat (Pertwi, Nurlita, 2015). Modulus kehalusan agregat (*Fineness Modulus*) digunakan untuk mengukur kehalusan atau kekasaran partikel agregat. Modulus kehalusan (MK) agregat juga didefinisikan sebagai persentase kumulatif agregat yang tersisa pada satu set saringan, dan kemudian dibagi dengan seratus, hal ini dinyatakan dengan **Persamaan 1**.

$$MK = \frac{\text{berat tertinggal kumulatif (\%)}}{100} \quad \dots(1)$$

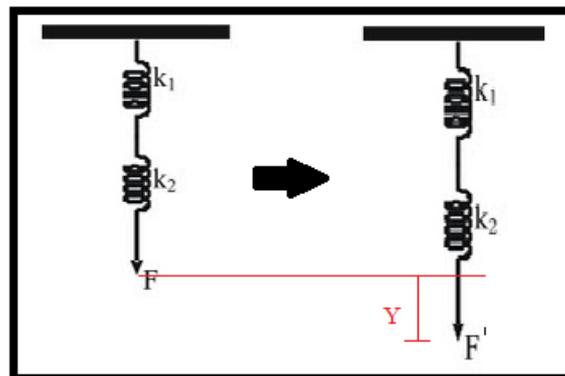
Batas modulus kehalusan agregat kasar untuk setiap ukuran agregat maksimumnya yaitu 6,05 – 6,5 untuk agregat maksimum 10 mm; 6,3 – 6,75 untuk agregat maksimum 20 mm;

dan 6,86 – 7,6 untuk agregat maksimum 40 mm. pada agregat halus batas modulus kehalusan dikelompokan dalam 4 zona yaitu 2,71 – 3 untuk zona I (pasir kasar); 2,11 – 2,37 untuk zona II (pasir sedang); 1,71 – 1,83 untuk zona III (pasir agak halus); 1,25 – 1,35 untuk zona IV (pasir halus). Batas modulus kehalusan agregat gabungan untuk setiap ukuran agregat maksimumnya yaitu 5,06 – 6,5 untuk agregat maksimum 40 mm; 4,58 – 5,75 untuk agregat maksimum 20 mm; 3,59 – 5,18 untuk agregat maksimum 10 mm.

Menurut Ibrahim, Kemal (2021), jika modulus kehalusan agregat gabungan berada di luar rentang batasan yang disyaratkan maka diduga akan berakibat berkurangnya kuat tekan beton dan mengalami perubahan pada kelecakan campuran beton segar.

2.3 Perilaku Fisika Modulus Kehalusan Agregat

Modulus kehalusan agregat berperan dalam membentuk campuran beton segar, yakni workability beton segar. Analogi fenomena fisika pada rangkaian seri pegas dapat dijadikan salah satu studi perilaku fisika modulus kehalusan agregat dalam campuran beton. Pada aplikasinya, apabila suatu pegas ditarik atau ditekan dalam batas liniernya dengan gaya luar (F), maka pada pegas akan muncul gaya F' sebagai reaksi terhadap gaya luar F dan besarnya berbanding lurus dengan pertambahan panjang pegas (Hatimah, 2013). **Gambar 1** menunjukkan pertambahan panjang rangkaian seri pegas setelah diberikan gaya dari luar (F).



Gambar 1. Rangkaian seri pegas

Formula konstansta pegas pada rangkaian seri dinyatakan dengan **Persamaan 2** sebagai berikut:

$$\frac{1}{K_e} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} + \dots = \sum \frac{1}{K_i} \quad \dots(2)$$

Persamaan 2 dapat ditulis:

$$K_e = \frac{1}{\sum \frac{1}{K_i}} \quad \dots(3)$$

dengan :

K_e = kekakuan pegas ekivalen,

K_i = kekakuan masing-masing pegas yang merangkai seri.

Modulus kehalusan agregat yang dirumuskan pada **Persamaan 1**, dapat dinyatakan secara matematis seperti terlihat pada **Persamaan 4**.

$$MK = \frac{\sum P_i}{100} \quad \dots(4)$$

dengan :

P_i = kumulatif persen berat agregat tertinggal.

Persamaan 4 dapat ditulis :

$$\frac{1}{100 MK} = \frac{1}{\sum P_i} \quad \dots(5)$$

Pada **Persamaan 5** diperhatikan lebih cermat, persamaan tersebut memiliki bentuk yang serupa dengan **Persamaan 3** (persamaan kekakuan ekuivalen dari pegas yang dihubungkan secara seri). Maka, dari **Persamaan 5** dan **Persamaan 3** dapat disimpulkan:

$$P_i = \frac{1}{K_i} \quad \text{dan} \quad K_e = \frac{1}{100MK} \quad \dots(6)$$

Jika pada pegas dengan kekakuan (K_e) diberikan gaya F , maka berlaku hukum Hooke seperti yang tercantum **Persamaan 7**.

$$F = K_e Y = \frac{1}{100MK} Y \quad \text{dan} \quad Y = 100MK \times F \quad \dots(7)$$

dengan :

Y = simpangan pegas akibat gaya F .

Persamaan 7 menganalogikan fenomena fisika dari modulus kehalusan agregat dalam campuran beton segar. Fenomena ini dapat diuraikan sebagai berikut :

1. Simpangan pegas Y dapat dianalogikan sebagai nilai *slump* beton segar, sedangkan gaya pegas F sebagai gaya geser pada beton segar akibat penambahan jumlah air w (formulasi gaya geser pada beton segar tidak dibahas dalam penelitian ini).
2. Untuk gaya F yang sama, jika kekakuan (K_e) berkurang, maka simpangan pegas Y akan membesar. Fenomena fisika seperti ini akan serupa dengan beton segar. Jika modulus kehalusan agregat gabungan ($MK_{gabungan}$) bertambah (agregat semakin kasar karena ukuran butiran bertambah besar), maka kekakuan (K_e) adukan beton menjadi berkurang (adukan beton bertambah encer), sehingga untuk jumlah air w yang sama, nilai *slump* akan bertambah besar.

Dalam mewujudkan atau mengetahui sifat fisik beton segar yang akan dihasilkan, batas modulus kehalusan agregat gabungan dapat menjadi acuan dalam campuran beton segar yang akan direncanakan. Apabila suatu batasan modulus kehalusan agregat gabungan ($MK_{gabungan}$) berada pada kisaran nilai 4,60 – 5,75, hal itu menunjukkan bahwa batas bawah gradasi terletak diantara saringan urutan 4 dan 5, sedangkan batas atasnya terletak diantara saringan urutan 5 dan 6. Dengan batas rentang MK gabungan tersebut, campuran beton segar yang dibuat akan memiliki sifat fisik sebagai berikut :

1. Beton segar yang dihasilkan akan mencapai *Workability* dan kuat tekan beton sesuai dengan yang direncanakan, hal ini terjadi pada campuran beton segar (dalam keadaan SSD) yang memiliki nilai MK agregat gabungan yang berada pada batasnya (4,60 – 5,75) dan tidak ada penambahan maupun pengurangan nilai FAS pada campuran beton.
2. Beton segar yang dihasilkan akan tersegregasi akibat kurangnya jumlah pasir (tetapi adukan beton segar masih *workable*), hal ini terjadi pada campuran beton segar (dalam

keadaan SSD) yang memiliki nilai MK agregat gabungan melebihi batas atas 5,75, tetapi masih terletak pada rentang 5,75 – 6,00 (terletak diantara saringan 5 dan 6). Masalah ini dapat diatasi dengan cara menambahkan agregat halus (pasir) sehingga MK agregat gabungannya kembali pada batas rentang 4,60 – 5,75.

3. Beton segar yang dihasilkan akan tersegregasi akibat jumlah pasir yang terlalu sedikit (adukan beton segar *unworkable*), hal ini terjadi pada campuran beton segar (dalam keadaan SSD) yang memiliki nilai MK agregat gabungan lebih besar dari pada 6,00 (keluar dari saringan urutan 5 dan 6).
4. Beton segar yang dihasilkan tidak akan mencapai *Workability* dengan sempurna (tetapi adukan beton segar masih *workable*), hal ini terjadi pada campuran beton segar (dalam keadaan SSD) yang memiliki nilai MK agregat gabungan yang tidak mencapai batas bawah 4,60, tetapi masih terletak pada rentang 4,00 – 4,60 (terletak diantara saringan 4 dan 5). Masalah ini tidak dapat diatasi dengan hanya menambahkan air untuk mencapai *workability*, karena kuat tekan beton akan berkurang seiring dengan bertambahnya nilai FAS. Berdasarkan hal tersebut maka cara yang tepat adalah dengan menambahkan *superplastisizer* ke dalam adukan beton segar.
5. Beton segar yang dihasilkan akan bersifat *unworkable* akibat berlebihnya jumlah pasir dalam campuran beton segar, hal ini terjadi pada campuran beton segar (dalam keadaan SSD) yang memiliki nilai MK agregat gabungan tidak mencapai batas bawah 4,00 (keluar dari saringan urutan 4 dan 5).

Jika dilihat dari nilai modulus kehalusan agregat gabungan ($MK_{gabungan}$), maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Jika modulus kehalusan agregat gabungan ($MK_{gabungan}$) bertambah, maka adukan beton segar akan semakin encer (nilai *slump* semakin besar). Dengan demikian, semakin besar nilai *slump* membuat nilai faktor air-semen (w/c) semakin tinggi sehingga mengakibatkan berkurangnya kuat tekan pada beton.
2. Jika modulus kehalusan agregat gabungan ($MK_{gabungan}$) berkurang, maka adukan beton segar akan semakin kental (nilai *slump* semakin kecil), hal ini menyebabkan semakin rendah nilai faktor air-semen (w/c) sehingga mengakibatkan bertambahnya kuat tekan pada beton.

Pada perancangan campuran beton cara SNI, nilai *slump* hanya ditentukan oleh kadar air campuran dalam $1m^3$ beton dan ukuran maksimal agregat kasar, seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Perkiraan Kadar Air Bebas [kg/m^3]

Slump [mm]		0 – 10	10 – 30	30 – 60	60 – 180
Ukuran Besar Butir Agregat Maksimum	Jenis Agregat	-	-	-	-
10	Batu tak dipecahkan	150	180	205	225
	Batu Pecah	180	205	230	250
20	Batu tak dipecahkan	135	160	180	195
	Batu Pecah	170	190	210	225
40	Batu tak dipecahkan	115	140	160	175
	Batu Pecah	155	175	190	205

Jumlah air yang dibutuhkan dihitung dengan rumus FAS, yang dinyatakan dengan **Persamaan 8**.

$$W = \frac{2}{3} W_{agr\ halus} + \frac{1}{3} W_{agr\ kasar} \quad \dots(8)$$

dengan :

$W_{agr\ halus}$ = jumlah kebutuhan air untuk jenis agregat batu tak dipecahkan,

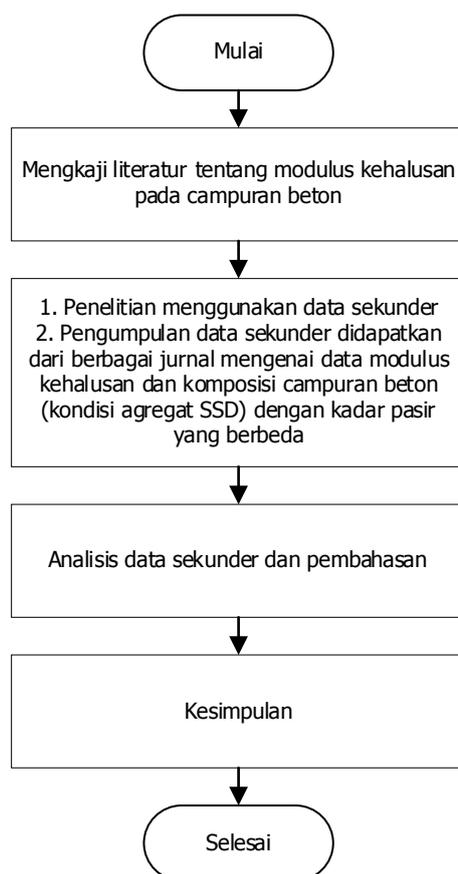
$W_{agr\ kasar}$ = jumlah kebutuhan air untuk jenis agregat batu pecah.

Persamaan 7 menunjukkan bahwa, jika modulus kehalusan agregat gabungan sama, maka jumlah air yang dibutuhkan sama pula. Perbedaan ini perlu diteliti agar perhitungan kebutuhan air pada **Tabel 1** dapat diperjelas batasannya.

3. METODOLOGI

3.1 Bagan Alir

Bagan alir penelitian menjelaskan mengenai langkah penyusunan pada penelitian. Metode penelitian ini ditunjukkan melalui bagan alir pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Bagan alir penelitian

3.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data sekunder dalam penelitian ini merupakan data yang dihasilkan oleh pihak lain dan akan diolah sebagai informasi yang digunakan pada penelitian ini. Data sekunder yang digunakan sebagai berikut:

1. Jurnal dari Gungun Gunawan dan Priyanto Saelan (2016) dengan judul studi mengenai batasan maksimum kadar volume pasir dalam campuran beton cara SNI. Data fisik material bahan yang digunakan seperti tertera pada **Tabel 2** dengan komposisi campuran beton menggunakan agregat kering udara dengan ukuran maksimum agregat 20 mm, dengan faktor air-semen (FAS) 0,50 dengan nilai *slump* 60 – 180 mm. Data komposisi campuran beton yang digunakan dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Tabel 2. Data Sifat Fisik Material

Material/Bahan	Berat Jenis [kg/m ³]	Modulus Kehalusan
Semen PCC Tiga Roda	3.150	-
Pasir	2.546 (SSD)	1,5 - 3,00
Batu Pecah maks. 20 mm	2.605 (SSD)	6,8

Tabel 3. Komposisi 1m³ Campuran Beton

Uraian	Campuran Acuan Hasil Mix Design	Campuran Mengalami Perubahan				
		MK 3,0	MK 2,5	MK 2,5	MK 2,0	MK 1,5
Semen	[kg]	410	410	410	410	410
Pasir (Kering Udara)	[%]	46	49	49	37	49
	[m ³]	0,33	0,322	0,321	0,242	0,321
	[kg]	763,8	819,8	819,8	616,1	819,8
Batu Pecah (Kering Udara)	[%]	54	51	51	63	51
	[m ³]	0,345	0,323	0,324	0,403	0,324
	[kg]	898,7	841,7	844,0	1049,8	844,0
Air	SSD [kg]	205	205	205	205	205
	Tambahan [kg]	ya	ya	ya	ya	ya
<i>w/c</i> rencana	-	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Syarat MK Gabungan	-	4,60 - 5,75				
<i>Slump</i> rencana	[mm]	60 - 180	60 - 180	60 - 180	60 - 180	60 - 180
Kuat Tekan Rencana	SNI [MPa]	31	31	31	31	31

(Sumber: Gunawan, G., 2016)

2. Jurnal dari Yudha H dan Priyanto Saelan (2015) dengan judul studi mengenai keberlakuan pengaruh permukaan spesifik agregat terhadap kuat tekan dalam campuran beton. Data fisik material bahan yang digunakan ditunjukkan pada **Tabel 4** dengan komposisi campuran beton menggunakan agregat kering udara dengan ukuran maksimum agregat 20 mm, dengan faktor air-semen (FAS) 0,442 dengan nilai *slump* 50 mm. Data komposisi campuran beton yang digunakan disajikan pada **Tabel 5**.

Tabel 4. Data Sifat Fisik Material

Material/Bahan	Berat Jenis (kg/m ³)	Modulus Kehalusan
Semen PCC Tiga Roda	3.150	-
Pasir	2.768 (SSD)	2,34
Batu Pecah maks. 20 mm	2.605 (SSD)	6,67

Tabel 5. Komposisi 1m³ Campuran Beton

Campuran		1	2	3	4	5	6	7	8
Semen	[kg]	450	450	450	450	450	450	450	450
	[%]	23	27	31	35	39	43	47	51
Pasir (Kering Udara)	[m ³]	0,150	0,175	0,200	0,225	0,250	0,275	0,300	0,325
	[kg]	415,38	484,58	533,78	624,05	692,00	761,20	830,40	899,60
	[%]	77	73	69	65	61	57	53	49
Batu Pecah (Kering Udara)	[m ³]	0,490	0,470	0,440	0,410	0,390	0,370	0,340	0,320
	[kg]	1.355,8	1.286,6	1.217,4	1.147,2	1.079,0	1.010,0	940,8	871,6
	[%]	77	73	69	65	61	57	53	49
Air	[kg]	198,7	198,7	198,7	198,7	198,7	198,7	198,7	198,7
w/c rencana	-	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
Syarat MK Gabungan	-	4,60 - 5,75							
Slump rencana	[mm]	50	50	50	50	50	50	50	50
Kuat Tekan Rencana SNI [MPa]		36	36	36	36	36	36	36	36

(Sumber: Adiputro, YH., 2015)

3.3 Analisis Data

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui penyebab perbedaan kebutuhan jumlah air pada komposisi campuran, sedangkan modulus kehalusan agregat gabungan tetap berada pada pada rentang batas. Hasil penelitian dalam jurnal referensi merupakan data sekunder yang akan diteliti dan dianalisis lebih lanjut. Analisis data sekunder terdiri dari:

1. Menganalisis data sekunder faktor air-semen aktual berdasarkan *slump* aktual.
2. Menghitung kuat tekan prediksi berdasarkan faktor air-semen aktual menggunakan grafik hubungan kuat tekan dan faktor air-semen pada cara SNI.
3. Membandingkan kuat tekan prediksi dengan kuat tekan hasil uji.
4. Mengolah data sekunder hubungan nilai *slump* yang terjadi dengan nilai modulus kehalusan agregat gabungan yang digunakan.
5. Membandingkan perilaku nilai *slump* yang terjadi dengan nilai *slump* menurut **Persamaan 7** dan nilai *slump* menurut SNI.
6. Membuat kesimpulan.

4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

Hasil uji kuat tekan beton selama 28 hari berdasarkan data sekunder terlampir pada **Tabel 6** dan **Tabel 7**.

Tabel 6. Hasil Uji Tekan Beton Data Sekunder 1

Uraian		Campuran acuan hasil mix design	Campuran mengalami perubahan					
			MK 3,0	MK 2,5	MK 2,5	MK 2,0	MK 1,5	
Semen	[kg]	410	410	410	410	410	410	
Pasir (Kering Udara)	[%]	46	49	49	37	49	44	
	[m ³]	0,33	0,322	0,321	0,242	0,321	0,289	
	[kg]	763,8	819,8	819,8	616,1	819,8	735,8	
Batu (Kering Udara) Pecah	[%]	54	51	51	63	51	56	
	[m ³]	0,345	0,323	0,324	0,403	0,324	0,356	
	[kg]	898,7	841,7	844,0	1049,8	844,0	927,0	
Air	SSD	[kg]	205	205	205	205	205	205
	Tambahan	[kg]	ya	ya	ya	ya	ya	ya
Syarat MK Gabungan	-		4,60 - 5,75					
MK Gabungan	-	5,05	4,94	4,69	5,21	4,4	4,47	
Slump Rencana (SNI)	[mm]		60 - 180					
Slump Aktual	[mm]	65	65	62	75	65	60	
W _{aktual}	[kg]	205	205	205	205	205	205	
w/c aktual	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
Kuat Tekan prediksi	SNI [MPa]	31	31	31	31	31	31	
Kuat Tekan Rata-rata Umur 28 hari	SNI [MPa]	33	34,810	31,993	26,068	32,585	31,785	

Tabel 7. Hasil Uji Tekan Beton Data Sekunder 2

Uraian		Komposisi Campuran dalam 1m ³ beton							
Campuran		1	2	3	4	5	6	7	8
Semen	[kg]	450	450	450	450	450	450	450	450
	[%]	23	27	31	35	39	43	47	51
Pasir (Kering Udara)	[m ³]	0,150	0,175	0,200	0,225	0,250	0,275	0,300	0,325
	[kg]	415,38	484,58	533,78	624,05	692,00	761,20	830,40	899,60
	[%]	77	73	69	65	61	57	53	49
Batu Pecah (Kering Udara)	[m ³]	0,490	0,470	0,440	0,410	0,390	0,370	0,340	0,320
	[kg]	1.355,8	1.286,6	1.217,4	1.147,2	1.079,0	1.010,0	940,8	871,6
	[%]	77	73	69	65	61	57	53	49
Air	[kg]	198,7	198,7	198,7	198,7	198,7	198,7	198,7	198,7
Syarat MK Gabungan	-	4,60 - 5,75							
MK Gabungan	-	5,65	5,49	5,31	5,14	4,98	4,82	4,67	4,50
Slump Rencana (SNI)	[mm]	50							
Slump aktual	[mm]	40	40	40	35	35	30	20	20
W _{aktual}	[kg]	190	190	190	190	190	190	170	170
w/c aktual	-	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,38	0,38
Kuat Tekan Prediksi SNI	[MPa]	38	38	38	38	38	38	43	43
Kuat Tekan Rata-rata Umur 28 hari	[MPa]	36,14	38,64	39,36	37,78	42,8	44,36	43,89	43,61

4.2 Pembahasan

Berdasarkan data sekunder hasil penelitian pada **Tabel 6** dan **Tabel 7** dilakukan analisis untuk penelitian ini yaitu :

1. Hasil nilai *slump* aktual digunakan untuk menghitung kebutuhan air aktual (*w* aktual) yaitu dengan menghitung menggunakan pendekatan cara SNI yang tertera pada **Tabel 1**. Sebagai contoh pada campuran acuan dalam **Tabel 6**, nilai *slump* aktual adalah 65 mm, berdasarkan **Tabel 1** didapatkan nilai *w* aktual sebesar 205 kg/m³.
2. Kebutuhan air aktual pada semua campuran ini digunakan untuk menghitung nilai faktor air-semen aktual (*w/c* aktual). Pada campuran acuan dalam **Tabel 6** dengan berdasarkan nilai air aktual sebesar 205 kg/m³ dengan penggunaan semen 410 kg maka dapat diperoleh nilai *w/c* aktual adalah 0,5.
3. Berdasarkan perhitungan *w/c* aktual, maka dapat ditentukan nilai kuat tekan prediksi pada setiap campuran menggunakan grafik hubungan antara kuat tekan beton dan faktor air-semen.
4. Pada seluruh campuran data sekunder hasil uji tekan ini menggunakan ukuran maksimal agregat 20 mm. Batas modulus kehalusan agregat gabungan ($MK_{gabungan}$) untuk ukuran maksimal agregat 20 mm berdasarkan SNI adalah 4,60 – 5,75. Modulus kehalusan agregat gabungan ($MK_{gabungan}$) yang terjadi pada data **Tabel 6** yaitu 4,40 – 5,21 dan Modulus kehalusan agregat gabungan ($MK_{gabungan}$) yang terjadi pada data **Tabel 7** yaitu 4,50 – 5,65. Semua campuran pada **Tabel 6** dan **Tabel 7** berada dalam batas modulus agregat gabungan, kecuali pada campuran 4 **Tabel 6** dengan nilai $MK_{gabungan}$ adalah 4,4 dan pada campuran 8 **Tabel 7** dengan nilai $MK_{gabungan}$ adalah 4,5 yang berada di luar

batas modulus agregat gabungan pada maksimal ukuran agregat 20 mm. Meskipun pada salah satu campuran pada **Tabel 6** berada diluar batas modulus agregat gabungan, tetapi *slump* yang dihasilkan pada setiap campuran tetap berada pada batas rentang *slump* 60 – 180 mm. Hal ini menunjukkan bahwa apabila nilai $MK_{gabungan}$ berada pada luar rentang tetapi masih berdekatan dengan batas bawah $MK_{gabungan}$ (masih terletak pada nomer saringan yang sama), maka *slump* yang dihasilkan akan berada pada rentangnya tetapi beton segar yang dihasilkan tidak akan mencapai *workability* dengan sempurna namun adukan beton segar masih *workable*.

5. Berdasarkan **persamaan 7** dengan fenomena fisika yang diuraikan sebagai berikut:
 - (a) Simpangan pegas Y dapat dianalogikan sebagai nilai *slump* beton segar, sedangkan gaya pegas F sebagai gaya geser pada beton segar akibat penambahan jumlah air w (formulasi gaya geser pada beton segar tidak dibahas dalam penelitian ini);
 - (b) Untuk gaya F yang sama, jika kekakuan (K_e) berkurang, maka simpangan pegas akan membesar. Fenomena fisika seperti ini akan serupa dengan beton segar. Jika modulus kehalusan agregat gabungan ($MK_{gabungan}$) bertambah (agregat semakin kasar karena ukuran butiran bertambah besar), maka kekakuan K_e adukan beton menjadi berkurang (adukan beton bertambah encer), sehingga untuk jumlah air w yang sama, nilai *slump* akan bertambah besar.
6. Dengan demikian penentuan kebutuhan air pada cara SNI 03-2834-2000 yang tidak menyertakan parameter modulus kehalusan agregat gabungan ($MK_{gabungan}$), sebenarnya telah mempertimbangkan nilai $MK_{gabungan}$ ini dalam persyaratan batas rentang modulus kehalusan agregat gabungan. Oleh karena itu, nilai *slump* yang tertera pada tabel penentuan kadar air bebas juga dinyatakan dalam rentang nilai *slump*. Rentang nilai *slump* mengandung arti perubahan nilai *slump* (sekalipun berada pada rentang nilai *slump*) akibat penambahan nilai $MK_{gabungan}$ pada rentang $MK_{gabungan}$ yang disyaratkan.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis data sekunder dan pembahasan hasil analisis maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Fenomena fisika yang terjadi pada modulus kehalusan agregat gabungan dalam campuran beton adalah fenomena rangkaian seri pegas, dimana modulus kehalusan agregat gabungan analogi dengan kekakuan ekivalen (K_e) dari rangkaian seri pegas karena memperlihatkan kesamaan bentuk (*identical*) pada setiap susunan ukuran agregat dengan susunan kekakuan pada setiap pegas.
2. Modulus kehalusan agregat gabungan ($MK_{gabungan}$) pada campuran beton membentuk kekakuan campuran. Hal ini ditunjukkan dengan adanya perubahan nilai *slump* yang terjadi akibat perubahan pada nilai modulus kehalusan agregat gabungan pada campuran beton. Untuk nilai faktor air-semen yang sama, apabila modulus kehalusan agregat bertambah maka kekakuan (K_e) adukan beton menjadi berkurang (adukan beton bertambah encer) yang menyebabkan nilai *slump* semakin tinggi dan demikian pula sebaliknya.
3. Modulus kehalusan agregat gabungan tidak disertakan pada tabel penentuan jumlah air yang diperlukan untuk mencapai nilai *slump* beton segar, hal ini tidak berarti bahwa modulus kehalusan agregat tidak berpengaruh. Sesungguhnya SNI telah menyertakan parameter $MK_{gabungan}$ namun dinyatakan dalam nilai rentang nilai *slump*. Nilai rentang *slump* mengandung arti perubahan nilai *slump* akibat dari persyaratan batas rentang modulus kehalusan agregat gabungan.

6. SARAN

Hasil penelitian ini sebaiknya diuji ulang secara langsung di laboratorium agar data sekunder ini dapat divalidasi dengan hasil pengujian menggunakan data primer.

DAFTAR RUJUKAN

- Adiputro Suryo, YH. (2015). Studi Mengenai Keberlakuan Pengaruh Permukaan Spesifik Agregat Terhadap Kuat Tekan Dalam Campuran Beton. Bandung: Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2000). SNI 03-2348-2000 tentang Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Fakhli. (2014, Mei 1). Pengertian dan Klasifikasi Gradasi Agregat. Diperoleh dari Kumpul Engineer: <https://www.kumpulengineer.com/2014/05/pengertian-dan-klasifikasi-gradasi.html>
- Gunawan, G. (2018). Studi Mengenai Batasan Maksimum Kadar Volume Pasir dalam Campuran Beton Cara SNI. Bandung: Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Nasional.
- Hatimah, H. (2013). Laporan Praktikum Fisika Dasar I. Bali: Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Udayana.
- Ibrahim, Kemal. (2021). Studi Mengenai Batasan Modulus Kehalusan Agregat Gabungan Dalam Campuran Beton Cara SNI. Bandung: Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Nasional.
- Pertiwi, Nurlita. (2014). Pengaruh Gradasi Agregat Terhadap Karakteristik Beton Segar. Makasar: Politeknik Negeri Ujung Pandang.
- Saelan, P. (2020). Perancangan Campuran Beton Cara SNI Termodifikasi (Modified SNI Method). Bandung: Laporan Penelitian Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Nasional.
- Tunjung, G. (2013). Kajian Optimasi Kuat Tekan Beton Dengan Simulasi Gradasi Ukuran Butir Agregat Kasar. Yogyakarta: Program Studi Teknik Sipil Universitas Negeri Yogyakarta.
- Yakti, D. F., dan Priyanto Saelan. (2016). Studi Mengenai Campuran Beton Dengan Kadar Pasir Tinggi Dalam Agregat Gabungan Pada Cara SNI. Bandung: Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Nasional