

Perlakuan Abu Terbang dalam Campuran Beton

Armandino Mendes¹, Priyanto Saelan²

1. Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Bandung

Email: lutinho98@gmail.com

ABSTRAK

Sebagai bahan pengganti sebagian dalam campuran beton, abu terbang baru reaktif sebagai bahan pengikat pada umur beton 56 hari. Oleh karena itu pada umur beton 28 hari abu terbang belum reaktif dan diperlakukan sebagai bahan pengisi (filler). Berdasarkan perilaku abu terbang sebagai bahan pengisi, maka fenomena yang dialami oleh abu terbang pada umur 28 hari adalah fenomena fisika. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui fenomena fisika apa saja yang terjadi pada abu terbang dalam campuran beton umur 28 hari. Penelitian dilakukan menggunakan data sekunder hasil uji tekan dari campuran beton abu terbang yang menggantikan sebagian semen, yang diambil dari beberapa jurnal internasional. Analisis data sekunder hasil uji tekan ini dilakukan menggunakan formulasi kuat tekan beton menurut Dreux. Hasil analisis memberikan kesimpulan bahwa terjadi 2 fenomena fisika yang dialami oleh abu terbang. Sebagai bahan pengganti semen abu terbang akan menyerap sebagian air campuran beton, dan sebagai bahan berbutir halus abu terbang bersama pasir membentuk faktor granular baru (G'). Besarnya penyerapan air dan faktor granular (G') bergantung pada kehalusan abu terbang.

Kata kunci: Abu terbang; Kuat tekan 28 hari; Fenomena fisika.

1. PENDAHULUAN

Kandungan kimia abu terbang didominasi oleh senyawa SiO_2 yang merupakan salah satu dari bahan dasar semen. Oleh karena itu pemanfaatan abu terbang dalam dunia konstruksi digunakan sebagai bahan campuran beton, yaitu mengurangi penggunaan semen dalam beton. Karena ukuran butiran abu terbang mendekati ukuran butiran semen, maka abu terbang yang mengurangi penggunaan semen seringkali diperlakukan sebagai bahan pengikat bersama semen yang digantikan. Aktifitas abu terbang sebagai bahan pengikat baru terjadi pada umur beton 56 hari, sedangkan kuat tekan beton dirancang untuk kuat tekan 28 hari. Pada umur beton 28 hari aktifitas abu terbang sebagai bahan pengikat belum berperan sehingga diperlakukan sebagai pengisi (*filler*).

Sebagai bahan pengikat maka umur 56 hari fenomena yang terjadi pada abu terbang adalah fenomena kimia yaitu reaksi antara SiO_2 dan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ menjadi $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ atau CSH. Selanjutnya pada umur 28 hari abu terbang karena belum reaktif dan diperlakukan sebagai bahan pengisi maka fenomena yang dialami adalah fenomena fisika. Oleh karena itu pada umur beton 28 hari ini perlu ditinjau dan dikaji fenomena fisika yang dialami oleh abu terbang dalam campuran beton yang mensubstitusi sebagian semen.

1. TINJAUAN TEORITIS

2.1 Abu Terbang (*Fly Ash*)

Abu terbang (*fly ash*) adalah limbah yang dihasilkan oleh pembakaran batu bara pada pembangkit listrik yang memiliki butiran halus dan bersifat pozolanik.

Karakteristik abu terbang yang dihasilkan oleh pembakaran merupakan butiran yang sangat halus hampir mirip dengan semen dan berwarna abu-abu bervariasi dari abu muda sampai abu tua. Abu terbang merupakan hasil dari pembakaran batu bara *bituminous* dengan ukuran partikel lebih kecil dari 0,075 mm yang memiliki kerapatan berkisar 2100 kg/m^3 sampai 3000 kg/m^3 , sedangkan ukuran abu terbang dari batu bara yang berjenis *sub-bituminous* memiliki ukuran partikel 0,01 mm sampai 0,015 mm. Pada umumnya berat jenis abu terbang menurut *ACI Committee 226* memiliki berat jenis 2,15 sampai 2,8. Berat jenis abu terbang ini akan berubah sesuai dengan lokasi, kelas dan kualitas materialnya yang diproduksi (Irawan et al.,2015).

Senyawa kimia yang terkandung dalam abu terbang seperti silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), besi oksida (Fe_2O_3), kalsium (CaO) selain itu, terdapat juga senyawa lain yang ada pada abu terbang dengan kuantitasnya yang sangat sedikit seperti magnesium, potasium, sodium, titanium, dan belerang (*Sulfur*).

2.2 Abu Terbang dalam campuran beton sebagai bahan substitusi atau pengganti sebagian semen.

Abu terbang sudah banyak dipakai sebagai bahan bangunan dalam campuran beton, dimana abu terbang substitusi sebagian semen telah diuji coba oleh para peneliti diantaranya dilakukan oleh Dinesh W. Gawatre, dan V.G.Meshram (2013) dari *Engineering, Y.C.C.E.* Nagpuri, Maharashtra, India tentang berbagai kehalusan abu terbang (*fly ash*) sebagai pengganti sebagian semen pada beton. Abu terbang yang digunakan untuk substitusi sebagian semen mulai dari kadar 0%, 12,5%, 25% dan 37,5% dengan target kuat tekan beton M20, M25, M30 pada umur 7 hari, 28 hari dan 90 hari. Berat jenis yang digunakan pada pengujian yaitu semen dengan berat jenis 3,15, agregat halus dengan berat jenis 2,61, agregat kasar berat jenis 2,67, abu terbang hopper no 1, 2 dan 3 (2,04, 2,061,dan 2,173). Benda uji yang digunakan yaitu dengan kubus (15x15x15cm).

Pengujian berikutnya dilakukan oleh Shwetha P C , Praveena K , Ajith B.T . Chandrashekar A. (2015) dari College of engineering Sullia, Karnataka India melakukan penelitian tentang penggantian sebagian semen oleh abu terbang dan Glass Fiber. Berat jenis yang digunakan dalam pencampuran 1 m^3 adalah semen 3,1, agregat halus 2,62, agregat kasar 2,65 dan abu terbang 2,5. Benda uji yang digunakan yaitu dengan kubus (10x10x10cm).

Hasil penelitian dari Dinesh.W. Gawatre , V.G.Meshram (2013) dan Shwetha P C , Praveena K , Ajith B.T . Chandrashekar A. (2015) dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Abu terbang berperilaku sebagai bahan pengikat terjadi pada umur beton lebih dari 28 hari, yaitu pada umur 56 hari atau lebih. Hal ini terlihat dari kuat tekan pada umur 56 hari yang lebih besar dari kuat tekan pada umur 28 hari. Tambahan kuat tekan ini terjadi akibat reaksi kimia $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dengan SiO_2 menghasilkan $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ atau CSH.
2. Pada umur beton 28 hari, kuat tekan beton abu terbang lebih kecil dari kuat tekan beton abu terbang umur 56 hari, bahkan lebih kecil dari kuat tekan beton tanpa abu terbang pada umur 28 hari yang terjadi pada abu terbang dengan ukuran butiran lebih kasar dari butiran semen. Indikasi ini menandakan bahwa pada umur 28 hari fenomena yang terjadi adalah fenomena

fisika daripada fenomena kimia. Dengan demikian maka abu terbang pada umur 28 hari berperilaku sebagai bahan pengisi (*filler*), dan pada umur lebih dari 28 hari berperilaku sebagai bahan pengikat (*binder*).

Fenomena fisika yang terjadi akibat perilaku abu terbang sebagai pengisi (*filler*) masih harus diteliti. Fenomena fisika ini dapat diteliti dan dikaji dengan menggunakan formulasi kuat tekan beton tanpa abu terbang oleh Dreux (1979) pada **persamaan 1**, yaitu:

$$f_c = G \cdot f_{pc} \cdot \left(\frac{C}{W} - 0,50\right) \dots\dots\dots 1$$

- dengan :
- f_c = Kuat tekan beton 28 hari (Silinder 15 x 30 cm)
 - G = k . volume pasir
 - f_{pc} = Kekuatan semen (MPa)
 - C = Berat Semen (kg)
 - W = Berat Air (kg)
 - Harga k tercantum pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Nilai Koefisien k

Kadr volume mutlak pasir dalam volume mutlak agregat gabungan (Vol.pasir/Vool.Agregat gabungan) (%)	k
20 - 24	3,25
25 - 26	3,00
27 - 30	2,75
31 - 34	2,50
35 - 37	2,25
38 - 43	2,00
44 - 49	1,75
50 - 58	1,50
59 - 60	1,25
61 - 65	1,00

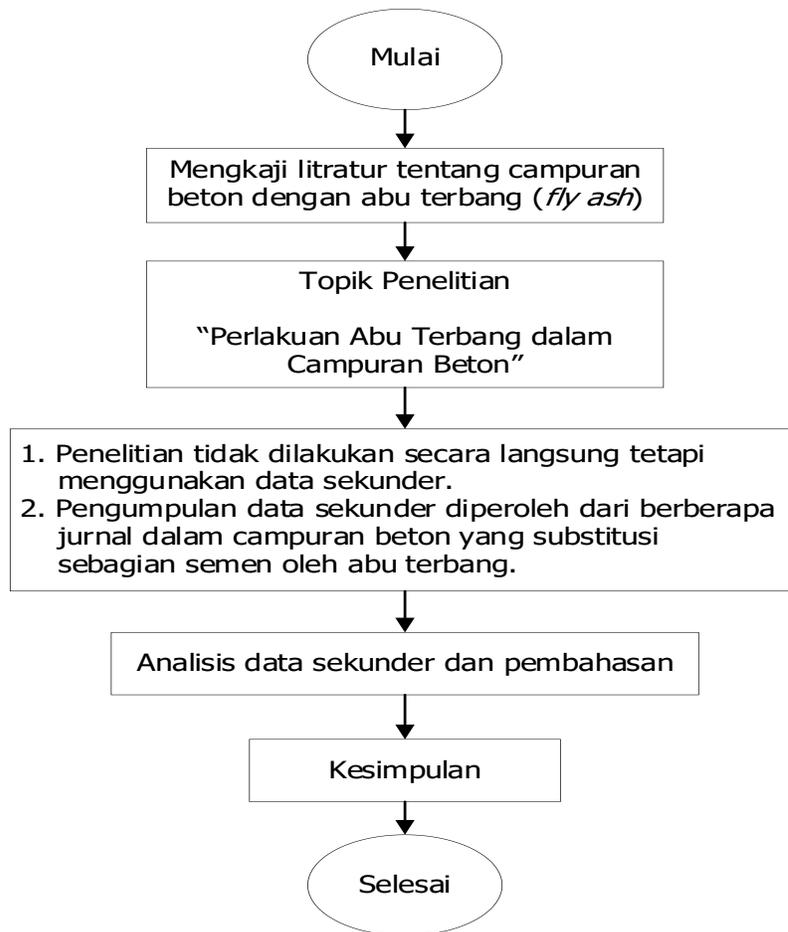
(Sumber : Priyanto Saelan 2020)

Berdasarkan formulasi Dreux pada persamaan 1 maka abu terbang, akan menimbulkan fenomena fisika yang mengakibatkan nilai parameter G, C, dan W berubah dibandingkan dengan nilai semula dari parameter tersebut sebelum dilakukan substitusi sebagian semen oleh abu terbang.

2. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Diagram alir penelitian menjelaskan mengenai langkah-langkah penulisan pada penelitian. Penelitian ini dapat dijelaskan melalui diagram alir pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Bagan alir penelitian

3.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data sekunder dalam penelitian ini adalah data dari hasil penelitian sebelumnya. Data sekunder yang digunakan terdapat dalam dua bagian yaitu kenaikan kuat tekan beton dan penurunan kuat tekan beton pada umur beton 28 hari yang substitusi sebagian semen oleh abu terbang, sebagai berikut:

1. Jurnal dari Şemsi Yazici dan Hasan Şahan Arel (2012) dengan judul *Effects of fly ash fineness on the mechanical properties of concrete*. Penelitian ini digunakan kuat tekan beton pada umur beton 28 hari dengan benda uji kubus (10x10x10 cm). Berat jenis semen 3,13 dengan kehalusan 3670 cm²/g, berat jenis abu terbang 2,45 dan 2,52 dengan kehalusan luas 2351 cm²/g dan 5239 cm²/g, berat jenis agregat halus 2,6, dan berat jenis agregat kasar 2,67. Proporsi pencampuran abu terbang pada beton mulai dari 0%, 5%, 10%, dan 15%. *Mix design* yang digunakan dapat dilihat pada **Tabel 1** dan **Tabel 2**.

Tabel 1. Mix Design pada abu terbang dengan kehalusan 2351 cm²/g

Bahan	Benda Uji			
No Benda Uji	1	2	3	4
Nama Benda Uji	UKB	UKB1	UKB2	UKB3
Abu Terbang (%)	0	5	10	15
Kehalusan Abu Terbang (cm ² /g)	0	2351	2351	2351
Semen (kg)	354	336	319	301
Abu Terbang (kg)	0	17.7	35.4	53.1
W/C	0.5	0.5	0.5	0.5
Agregat (0-5 mm) (kg)	986	990	983	978
Agregat (5-15 mm) (kg)	822	825	819	816
SP (kg)	1,75	1,70	1,68	1,58

(Sumber : Şemsi Yazici dan Hasan Şahan Arel 2012)

Tabel 2. Mix Design pada abu terbang dengan kehalusan 5239 cm²/g

Bahan	Benda Uji			
No Benda Uji	1	2	3	4
Nama Benda Uji	UKB	UKB7	UKB8	UKB9
Abu Terbang (%)	0	5	10	15
Kehalusan Abu Terbang (cm ² /g)	0	5239	5239	5239
Semen (kg)	354	336.3	318.6	300.9
Abu Terbang (kg)	0	17.7	35.4	53.1
W/C	0.5	0.5	0.5	0.5
Agregat (0-5 mm) (kg)	986	987	983	976
Agregat (5-15 mm) (kg)	822	823	819	813
SP (kg)	1.75	1.81	1.95	2.07

(Sumber : Şemsi Yazici dan Hasan Şahan Arel 2012)

2. Jurnal dari Shwetha P C , Praveena K , Ajith B.T . Chandrashekhar A. (2015) dengan judul *Experimental Study on Partial Replacement of cement by Fly Ash with Glass Fiber Reinforcement*. Penelitian ini kuat tekan beton yang ditarget yaitu, kuat tekan beton pada umur beton 28 hari. Benda uji yang digunakan yaitu kubus (10x10x10 cm) . Berat jenis seperti berat jenis semen 3,1 dengan kehalusan 5,3% tertahan, berat jenis abu terbang 2,5 dengan kehalusan 2,28%, berat jenis agregat halus 2,62, dan berat jenis agregat kasar 2,65. Proporsi pencampuran abu terbang mulai dari 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, dan 30%. *Mix design* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Mix Design dalam campuran 1 m³

Bahan	Benda Uji						
Nama Benda Uji	M	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Abu terbang (%)	0	5	10	15	20	25	30
Abu terbang (kg)	0	21.25	42.5	63.75	85	106.2	127.5
Semen (kg)	425	403.75	382.5	361.25	340	318.75	297.5
Agregat halus (kg)	684.25	684.25	684.25	684.25	684.25	684.25	684.25
Agregat kasar (kg)	1126.25	1126.25	1126.25	1126.25	1126.25	1126.25	1126.25
Air (W/C 0,4) (liters)	170	170	170	170	170	170	170

(Sumber : Shwetha .P .C , Praveena .K , Ajith B.T, Chandrashekhar A. 2015)

3. Jurnal dari Shihwen Hsu, Maochieh Chi, dan Ran Huang (2019) dengan judul *Influence Of Fly Ash Fineness And High Replacement Ratios on Concrete Properties*. Pada penelitian ini ditargetkan kuat tekan beton pada umur beton 28 hari dengan benda uji silinder ($\phi 10 \times 20$ cm²). Berat jenis seperti berat jenis semen 3,14 dengan kehalusan 3650 cm²/g. Berat jenis abu terbang (3F) 2,18 dengan kehalusan 3150 cm²/g, dan berat jenis abu terbang (5F) 2,58 dengan kehalusan 5690 cm²/g. Berat jenis agregat halus 2,6, dan berat jenis agregat kasar 2,7. Proporsi pencampuran abu terbang mulai dari 0%, 30%, 40%, 50%, dan 60%. *Mix Design* dalam pengujian ini dapat dilihat pada **Tabel 4** dan **Tabel 5**.

Tabel 4. Mix Design untuk abu terbang 3F

Bahan	Benda Uji				
No Benda Uji	1	2	3	4	5
Nama Benda Uji	OPC	3F30	3F40	3F50	3F60
Air (kg/m ³)	203	203	203	203	203
Semen (kg/m ³)	420	294	252	210	168
Abu Terbang (%)	0	30	40	50	60
Abu Terbang (kg/m ³)	0	126	168	210	252
Pasir (kg/m ³)	792	739	722	704	687
Agregat Kasar (kg/m ³)	946	946	946	946	946

(Sumber : Shihwen Hsu, Maochieh Chi, dan Ran Huang 2019)

Tabel 5. Mix Design untuk abu terbang 5F

Bahan	Benda Uji				
No Benda Uji	1	2	3	4	5
Nama Benda Uji	OPC	5F30	5F40	5F50	5F60
Air (kg/m ³)	203	203	203	203	203
Semen (kg/m ³)	420	294	252	210	168
Abu Terbang (%)	0	30	40	50	60
Abu Terbang (kg/m ³)	0	126	168	210	252
Pasir (kg/m ³)	792	739	722	704	687
Agregat Kasar (kg/m ³)	946	946	946	946	946

(Sumber : Shihwen Hsu, Maochieh Chi, dan Ran Huang 2019)

3.3 Analisis Data

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perilaku abu terbang dalam campuran beton yang mensubstitusi sebagian semen, yang menggunakan data sekunder dari penelitian pada jurnal rujukan. Hasil penelitian pada jurnal rujukan merupakan data sekunder yang akan diteliti dan dianalisis. Analisis data sekunder terdiri dari:

1. Menganalisis perilaku kuat tekan beton pada umur 28 hari, sebelum dan sesudah substitusi sebagian semen oleh abu terbang dilakukan.
2. Menganalisis perubahan perilaku kuat tekan beton umur 28 hari, sebelum dan sesudah substitusi sebagian semen oleh abu terbang dilakukan, serta faktor-faktor penyebab perubahannya menggunakan formulasi kuat tekan beton dari Dreux Gorisse.
3. Mengajukan formulasi kuat tekan beton abu terbang berdasarkan formulasi Dreux Gorisse.
4. Menghitung prediksi kuat tekan beton 28 hari menggunakan formulasi yang diajukan.
5. Membandingkan kuat tekan beton prediksi dengan data sekunder kuat tekan beton yang diperoleh dari jurnal rujukan untuk memvalidasi formulasi yang diajukan.
6. Membuat kesimpulan.

3. ANALISIS HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

Data sekunder hasil uji kuat tekan 28 hari diperlihatkan pada **Tabel 1** sampai dengan **Tabel 5**.

Tabel 1. Hasil penelitian Şemsi Yazici dan Hasan Şahan Arel

Bahan	Benda Uji			
No Benda Uji	1	2	3	4
Nama Benda Uji	UKB	UKB7	UKB8	UKB9
Abu Terbang (%)	0	5	10	15
Kehalusan Abu Terbang (cm ² /g)	0	5239	5239	5239
Kehalusan semen (cm ² /g)	3670			
Kuat tekan semen (Fpc) (MPa)	42,5			
Semen (kg)	354	336.3	318.6	300.9
Abu Terbang (kg)	0	17.7	35.4	53.1
W/C	0.5	0.5	0.5	0.5
Agregat (0-5 mm) (kg)	986	987	983	976
Agregat (5-15 mm) (kg)	822	823	819	813
SP (kg)	1.75	1.81	1.95	2.07
Kuat tekan 28 hari (K10) (MPa)	43.1	49.7	46.9	44.3

(Sumber : Şemsi Yazici dan Hasan Şahan Arel 2012)

Tabel 2. Hasil penelitian kuat tekan beton untuk abu terbang 5F

Bahan	Benda Uji				
No Benda Uji	1	2	3	4	5
Nama Benda Uji	OPC	5F30	5F40	5F50	5F60
Air (kg/m ³)	203	203	203	203	203
Kuat tekan semen (Fpc) (MPa)	42				
Kehalusan Abu Terbang (cm ² /g)	0	5690	5690	5690	5690
Kehalusan semen (cm ² /g)	3650				
Semen (kg/m ³)	420	294	252	210	168
Abu Terbang (%)	0	30	40	50	60
Abu Terbang kg/m ³)	0	126	168	210	252
Pasir (kg/m ³)	792	739	722	704	687
Agregat Kasar (kg/m ³)	946	946	946	946	946
Kuat tekan 28 hari (S10x20) MPa	37.5	37.3	36	30	25

(Sumber : Shihwen Hsu, Maochieh Chi, dan Ran Huang 2019)

Tabel 3. Hasil penelitian Şemsi Yazici dan Hasan Şahan Arel

Bahan	Benda Uji			
No Benda Uji	1	2	3	4
Nama Benda Uji	UKB	UKB1	UKB2	UKB3
Abu Terbang (%)	0	5	10	15
Kehalusan Abu Terbang (cm/g)	0	2351	2351	2351
Kehalusan semen (cm ² /g)	3670			
Kuat tekan semen (Fpc) (MPa)	42.5			
Semen (kg)	354	336	319	301
Abu Terbang (kg)	0	17.7	35.4	53.1
W/C	0.5	0.5	0.5	0.5

Tabel 3. Hasil penelitian Şemsi Yazici dan Hasan Şahan Arel lanjutan

Agregat (0-5 mm) (kg)	986	990	983	978
Agregat (5-15 mm) (kg)	822	825	819	816
SP (kg)	1.75	1.70	1.68	1.58
Kuat tekan 28 hari (K10) MPa	43.1	39.7	38.1	36.8

(Sumber : Şemsi Yazici dan Hasan Şahan Arel 2012)

Tabel 4. Hasil penelitian Shwetha P C, dan rekan

Bahan	Benda Uji						
Nama Benda Uji	M	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Abu terbang (%)	0	5	10	15	20	25	30
Kuat tekan semen (Fpc) (MPa)	43	43	43	43	43	43	43
Kehalusan semen (%)	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3
Kehalusan Abu Terbang (%)	2.28	2.28	2.28	2.28	2.28	2.28	2.28
Abu terbang (kg)	0	21.25	42.5	63.75	85	106.2	127.5
Semen (kg)	425	403.75	382.5	361.25	340	318.75	297.5
Agregat halus (kg)	684.25	684.25	684.25	684.25	684.25	684.25	684.25
Agregat kasar (kg)	1126.25	1126.25	1126.25	1126.25	1126.25	1126.25	1126.25
Air (W/C 0,4) (liters)	170	170	170	170	170	170	170
Kuat tekan 28 hari (K15) MPa	49.5	52.3	52.9	52.1	50.0	48.2	48.0

(Sumber : Shwetha .P .C , Praveena .K , Ajith B.T, Chandrashekhar A. 2015)

Tabel 5. Hasil penelitian Shihwen Hsu, dan rekan, untuk abu terbang 3F

Bahan	Benda Uji				
No Benda Uji	1	2	3	4	5
Nama Benda Uji	OPC	3F30	3F40	3F50	3F60
Kuat tekan semen (Fpc) (MPa)	42				
Kehalusan semen (cm ² /g)	3650	3650	3650	3650	3650
Kehalusan Abu Terbang (cm ² /g)		3150	3150	3150	3150
Air (kg/m ³)	203	203	203	203	203
Semen (kg/m ³)	420	294	252	210	168
Abu Terbang (%)	0	30	40	50	60
Abu Terbang (kg/m ³)	0	126	168	210	252
Pasir (kg/m ³)	792	739	722	704	687
Agregat Kasar (kg/m ³)	946	946	946	946	946
Kuat tekan 28 hari (S10x20) MPa	37.5	32.5	28	21.5	17.5

(Sumber : Shihwen Hsu, Maochieh Chi, dan Ran Huang 2019)

4.2 Pembahasan

Data sekunder hasil pengujian kuat tekan beton umur 28 hari menunjukkan:

1. Pada abu terbang yang lebih halus dari semen, sampai dengan substitusi $\pm 30\%$ - 40% , kuat tekan beton abu terbang tidak mengalami penurunan dan masih berdekatan dengan kuat tekan beton tanpa abu terbang.

2. Pada abu terbang yang lebih kasar dari semen, kuat tekan beton abu terbang selalu mengalami penurunan.
3. Jika kuat tekan abu terbang ini dianalisis menggunakan formulasi Dreux Gorisse maka formulasinya menjadi:

$$f_c = G' \cdot f_{pc} \cdot \left(\frac{C'}{W'} - 0,50 \right) \dots\dots\dots 1$$

dengan : f_c = Kuat tekan beton 28 hari (Silinder 15 x 30 cm)
 G' = Faktor granular baru akibat abu terbang sebagai filler yang berkontribusi pada agregat halus.
 C' = Berat semen akibat yang tersisa akibat substitusi abu terbang (kg).
 W' = Berat air yang terpakai oleh berat semen tersisa, yaitu berat semen semula dikurangi berat air yang diserap oleh abu terbang (kg).

4. Berdasarkan data sekunder hasil uji tekan pada **Tabel 1**, yaitu untuk abu terbang lebih halus dari semen, maka secara *trial and error* dicari formulasi untuk W' dan G' . Formulasi empirik yang diajukan berdasarkan cara *trial and error* ini adalah sebagai berikut:

$$W' = \left(1 - \frac{\text{Berat jenis } C}{\text{Berat jenis } FA} \cdot \%FA \right) \cdot W \dots\dots\dots 2$$

$$G' = \left[\frac{\text{Berat jenis } C}{\text{Berat jenis } FA} \cdot (100 - \%FA) \right] \cdot G \dots\dots\dots 3$$

5. Dengan cara yang sama maka untuk abu terbang lebih kasar dari semen, berdasarkan data sekunder hasil uji tekan pada **Tabel 3**, *formulasi empirik yang diajukan berdasarkan cara trial and error* ini adalah sebagai berikut:

$$W' = \left(1 - \frac{\text{Berat jenis } FA}{\text{Berat jenis } C} \cdot \%FA \right) \cdot W \dots\dots\dots 4$$

$$G' = C_f \cdot G \dots\dots\dots 5$$

$C_f = 1$ jika $\% FA \leq 40$
 $C_f = 0,8$ jika $\% FA > 40$

6. Validasi rumus empirik yang diajukan dilakukan dengan cara menghitung kuat tekan prediksi menggunakan rumus ini pada data sekunder hasil uji kuat tekan pada penelitian lainnya, yaitu:
 - a. Validasi rumus empirik untuk abu terbang lebih halus dari semen dilakukan pada data sekunder hasil uji kuat tekan pada **Tabel 2**.
 - b. Validasi rumus empirik untuk abu terbang lebih kasar dari semen dilakukan pada data sekunder hasil uji kuat tekan pada **Tabel 4** dan **Tabel 5**.

Hasil validasi ini ditunjukkan pada **Tabel 7** untuk abu terbang lebih halus dari semen, dan **Tabel 9** dan **Tabel 10** untuk abu terbang lebih kasar.

Tabel 6. Hasil penelitian Şemsi Yazici dan Hasan Şahan Arel

Bahan	Benda Uji			
	1	2	3	4
No Benda Uji	1	2	3	4
Nama Benda Uji	UKB	UKB7	UKB8	UKB9
Abu Terbang (%)	0	5	10	15
Kehalusan Abu Terbang (cm ² /g)	0	5239	5239	5239

Tabel 6. Hasil penelitian Şemsi Yazici dan Hasan Şahan Arel lanjutan

Kehalusan semen (cm ² /g)	3670			
Kuat tekan semen (Fpc) (MPa)	42,5			
Semen (kg)	354	336.3	318.6	300.9
Abu Terbang (kg)	0	17.7	35.4	53.1
W/C	0.5	0.5	0.5	0.5
Agregat (0-5 mm) (kg)	986	987	983	976
Agregat (5-15 mm) (kg)	822	823	819	813
SP (kg)	1,75	1,81	1,95	2,07
Kuat tekan 28 hari (K10) (MPa)	43.1	49.7	46.9	44.3
Konversi kuat tekan (K10) menjadi (K15) (MPa)	46.117	53.179	50.183	47.401
Kuat tekan prediksi 28 hari (K15) (MPa)	43.691	52.494	50.487	48.376

(Sumber : Şemsi Yazici dan Hasan Şahan Arel 2012)

Tabel 7. Hasil penelitian Shihwen Hsu, dan rekan untuk abu terbang 5F

Bahan	Benda Uji				
No Benda Uji	1	2	3	4	5
Nama Benda Uji	OPC	5F30	5F40	5F50	5F60
Kuat tekan semen (Fpc) (MPa)	42				
Kehalusan Abu Terbang (cm ² /g)	0	5690	5690	5690	5690
Kehalusan semen (cm ² /g)	3650				
Air (kg/m ³)	203	203	203	203	203
Semen (kg/m ³)	420	294	252	210	168
Abu Terbang (%)	0	30	40	50	60
Abu Terbang (kg/m ³)	0	126	168	210	252
Pasir (kg/m ³)	792	739	722	704	687
Agregat Kasar (kg/m ³)	946	946	946	946	946
Kuat tekan 28 hari (S10x20) MPa	37.5	37.3	36	30	25
Kuat tekan prediksi 28 hari (S15x30) MPa	36.100	37.232	33.592	30.475	28.513

(Sumber : Shihwen Hsu, Maochieh Chi, dan Ran Huang 2019)

Tabel 8. Hasil penelitian Şemsi Yazici dan Hasan Şahan Arel

Bahan	Benda Uji			
No Benda Uji	1	2	3	4
Nama Benda Uji	UKB	UKB1	UKB2	UKB3
Abu Terbang (%)	0	5	10	15
Kehalusan Abu Terbang (cm ² /g)	0	2351	2351	2351
Kehalusan semen (cm ² /g)	3670	3670	3670	3670
Semen (kg)	354	336	319	301
Kuat tekan semen (Fpc) (MPa)	42			
Abu Terbang (kg)	0	17.7	35.4	53.1
W/C	0.5	0.5	0.5	0.5
Agregat (0-5 mm) (kg)	986	990	983	978
Agregat (5-15 mm) (kg)	822	825	819	816
SP (kg)	1,75	1,70	1,68	1,58
Kuat tekan 28 hari (K10) MPa	43.1	39.7	38.1	36.8
Konversi kuat tekan (K10) menjadi (K15) MPa	46.117	42.479	40.767	39.376
Kuat tekan prediksi 28 hari (K15) MPa	43.691	42.978	41.722	40.488

(Sumber : Şemsi Yazici dan Hasan Şahan Arel 2012)

Tabel 9. Hasil penelitian Shwetha P C, dan rekan

Bahan	Benda Uji						
Nama Benda Uji	M	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Abu terbang (%)	0	5	10	15	20	25	30
Kuat tekan semen (Fpc) (MPa)	43	43	43	43	43	43	43
Kehalusan semen (%)	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
Kehalusan Abu Terbang (%)	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28
Abu terbang (kg)	0	21.25	42.5	63.75	85	106.2	127.5
Semen (kg)	425	403.75	382.5	361.25	340	318.75	297.5
Agregat halus (kg)	684.25	684.25	684.25	684.25	684.25	684.25	684.25
Agregat kasar (kg)	1126.25	1126.25	1126.25	1126.25	1126.25	1126.25	1126.25
Air (W/C 0,4) (liters)	170	170	170	170	170	170	170
Kuat tekan 28 hari (K15) MPa	49.5	52.3	52.9	52.1	50.0	48.2	48.0
Konversi kuat tekan (K10) menjadi (K15) MPa	52.965	55.961	56.603	55.747	53.5	51.574	51.36
Kuat tekan prediksi 28 hari (K15) MPa	54.537	53.850	53.102	52.286	51.391	50.405	49.315

(Sumber : Shwetha .P .C , Praveena .K , Ajith B.T, Chandrashekhar A. 2015)

Tabel 10. Hasil penelitian Shihwen Hsu, dan rekan untuk abu terbang 3F

Bahan	Benda Uji				
No Benda Uji	1	2	3	4	5
Nama Benda Uji	OPC	3F30	3F40	3F50	3F60
Kuat tekan semen (Fpc) (MPa)	42				
Kehalusan semen (cm ² /g)	3650	3650	3650	3650	3650
Kehalusan Abu Terbang (cm ² /g)		3150	3150	3150	3150
Abu Terbang (%)	0	30	40	50	60
Abu Terbang (kg/m ³)	0	126	168	210	252
Pasir (kg/m ³)	792	739	722	704	687
Agregat Kasar (kg/m ³)	946	946	946	946	946
Kuat tekan 28 hari (S10x20) MPa	37.5	32.5	28	21.5	17.5
Kuat tekan prediksi 28 hari (S15x30) MPa	36.100	32.615	29.213	20.280	16.760

(Sumber : Shihwen Hsu, Maochieh Chi, dan Ran Huang 2019)

7. Membandingkan data sekunder hasil uji kuat tekan dengan kuat tekan prediksi menggunakan formulasi empirik yang diajukan, ternyata hasilnya sangat berdekatan.
8. Berdasarkan formulasi empirik kuat tekan beton abu terbang ini maka perilaku abu terbang yang mensubstitusi sebagian semen dapat dijelaskan dengan baik. Pada umur beton 28 hari, abu terbang yang mensubstitusi sebagian semen berperilaku sebagai bahan pengisi (filler), dan fenomena fisika yang terjadi pada abu terbang adalah:
 - a. Sebagai bahan pengisi yang menggantikan sebagian semen, abu terbang menyerap sebagian air campuran dalam beton segar.
 - b. Sebagai bahan pengisi yang berbutir halus, abu terbang membentuk faktor granular baru (G') bersama pasir.

9. Kehalusan abu terbang menentukan banyaknya air yang diserap dan besarnya faktor granular G' yang terbentuk.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis data sekunder uji kuat tekan beton menggunakan formulasi yang diajukan, disimpulkan :

1. Sampai dengan umur 28 hari abu terbang yang menggunakan sebagian semen berperilaku sebagai bahan pengisi (*filler*).
2. Fenomena fisika yang terjadi pada abu terbang adalah:
 - a. Sebagai bahan pengisi yang menggantikan sebagian semen, abu terbang menyerap sebagian air dalam campuran beton sehingga air yang dipakai oleh semen menjadi W' , yang dirumuskan pada **persamaan 2** dan **persamaan 4**.
 - b. Sebagai bahan pengisi yang berbutir halus, abu terbang bersama pasir membentuk faktor granular G' , yang dirumuskan pada **persamaan 3** dan **persamaan 5**.
3. Kehalusan abu terbang menentukan besarnya air yang diserap dalam faktor granular G' .
4. Substitusi semen oleh abu terbang yang lebih kasar dari semen akan mengakibatkan berkurangnya kuat tekan beton.
5. Substitusi semen oleh abu terbang yang lebih halus dari semen tidak mengakibatkan berkurangnya kuat beton sampai dengan persen substitusi tertentu, dan mengakibatkan berkurangnya kekuatan jika persen substitusi ini dilampaui.
6. Formulasi yang diajukan pada **persamaan 2** sampai dengan **persamaan 5** dapat digunakan menjadi salah satu acuan dalam merancang campuran beton abu terbang.

6. SARAN

Hasil penelitian ini perlu dilanjutkan kembali melalui percobaan langsung di laboratorium untuk memvalidasi formulasi empirik yang diajukan menggunakan data primer hasil pengujian.

KEPUSTAKAAN

- Gawatre, W. D. (2013). Study of Various Finenss of Fly Ash as a Partial Replacement of Cement in Concree. *International Journal of Scientific & Engineering Research* , 4, 2-5.
- Hsu Shihwen, Chi, M., Huang, R. (2019). Influence of Fly Ash Finenss and High Replacement Ration on Concrete Properties. *Journal of Marine Science and Technology*, 27,162-166.
- Irwan, R. R. (2015). *Beton Dengan Sedikit Semen Portlan dan Tanpa Semen Portland Memanfaatkan Abu Terbang dari PLTUBatubara*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jemebatan.
- Nurandy, F. R. (2020). Pengaruh Substitusi Pasir oleh Fly Ash terhadap Ketahanan dan Kekuatan Beton yang Terendam Air Laut. *Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*, 20, 3-4.
- Saelan, Priyanto. (2020). *Perancangan Campuran Beton Cara SNI Termodifikasi (Modified SNI Method)*. Bandung: Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Nasional.
- Şemesi, Y, H. .. (2012). Effect of Fly Ash Finenss on the Mechanical Properties of Concrete. *Indian Academy of Sciences*, 37, 391-394.
- Shwetha, P. C. (2015). Experimental Study on Partial Replacement of cement by Fly Ash with Glass Fiber Reinforcement. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 4 (05), 1206-208.