

## **BAB II**

### **KAJIAN PUSTAKA**

#### **A. Beton**

Secara umum beton dapat didefinisikan sebagai campuran antara agregat dan pasta semen dengan atau tanpa bahan tambah yang jika dituangkan ke dalam cetakan kemudian didiamkan maka akan menjadi keras seperti batuan (Widodo, 2008). Proses pengerasan beton terjadi karena adanya reaksi kimia antara semen dengan air yang menghasilkan bahan pengikat dan pengisi rongga antarbutir agregat yang terus berlangsung secara bertahap. Beton sering digunakan pada infrastuktur kecil seperti trotoar, saluran drainase, dan lapangan parkir. Beton juga sering digunakan pada infrastruktur besar seperti gedung pencakar langit, jalan layang, dan bendungan gravitasi. Hal tersebut karena beton merupakan bahan bangunan yang kuat, tahan lama, perawatannya mudah, tahan api, mudah diaplikasikan, dapat dibuat sesuai ukuran dan bentuk yang diinginkan, dan murah jika dibandingkan dengan bahan bangunan lain seperti baja.

#### **B. Bahan Penyusun Beton**

Campuran beton terdiri dari semen hidrolis, agregat halus, agregat kasar, dan air dengan atau tanpa bahan tambah yang secara keseluruhan membentuk massa padat dan keras (SNI 03-2834-2000).

##### **1. Semen Hidrolis**

Semen hidrolis adalah bahan bangunan yang jika bereaksi dengan air akan mengalami hidrasi sehingga memiliki sifat kohesif dan dapat mengeras. Dalam

campuran beton semen hidrolis berperan sebagai bahan pengikat dan pengisi rongga antarbutir agregat sehingga membentuk suatu massa yang keras, kompak, dan padat. Beberapa bahan baku pembuatan dan kandungan oksida semen hidrolis secara berurutan diperlihatkan pada Tabel 1 dan 2.

**Tabel 1.** Bahan Baku Semen Hidrolis

Bahan Baku	Perbandingan Berat (%)
Batu kapur	80 - 85
Tanah liat	6 - 10
Pasir silika	6 - 10
Pasir besi	1
Gips	3 - 5

(Firdaus, 2007)

**Tabel 2.** Kandungan Oksida Bahan Baku Semen Hidrolis

Oksida	Percentase (%)
Kalsium (CaO)	60 - 65
Silikon (SiO <sub>2</sub> )	7 - 25
Aluminium (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3 - 8
Ferik (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.5 - 0.6
Magnesium (MgO)	0.5 - 0.4
Sulfur (SO <sub>3</sub> )	1 - 2
Sodium (Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O)	0.5 - 1

(Widojoko, 2010)

Untuk menghasilkan semen hidrolis, bahan baku pada Tabel 1 dicampur dan dibakar pada suhu antara 1400 - 1600 °C sehingga menghasilkan klinker yang ditambahkan gips, kemudian dibakar kembali dan dihancurkan sampai menjadi serbuk dengan ukuran partikel sangat kecil. Akibat dari proses pencampuran dan pembakaran, kandungan oksida semen pada Tabel 2 bergabung dengan satu sama lain yang kemudian menghasilkan empat senyawa kimia baru yakni trikalsium silikat, dikalsium silikat, trikalsium aluminat, dan tetrakalsium aluminoferat. Keempat senyawa baru tersebut kemudian akan berperan pada saat proses hidrasi

semen berlangsung. Secara umum semen hidrolis yang digunakan dalam campuran beton dibagi menjadi empat jenis yakni semen Portland, semen Portland pozolan, semen Portland komposit, dan semen Portland campur.

a. Semen Portland

Menurut SNI 15-2049-2004 semen Portland atau *Ordinary Portland Cement* (OPC) adalah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen Portland terutama yang terdiri atas kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain. Semen Portland terbagi menjadi lima tipe yakni:

- 1) Tipe I digunakan untuk konstruksi beton umum yang tidak menuntut persyaratan khusus terhadap panas hidrasi dan kekuatan tekan awal seperti rumah pemukiman, gedung bertingkat, perkerasan jalan, dan bantalan rel kereta api.
- 2) Tipe II digunakan untuk konstruksi beton pada lokasi tanah dengan air berkadar sulfat antara 0.10% - 0.20% seperti saluran irigasi, pondasi bendungan, dan pilar jembatan yang memerlukan panas hidrasi sedang dan ketahanan terhadap sulfat.
- 3) Tipe III digunakan untuk konstruksi beton yang memerlukan kuat tekan awal tinggi pada fase permulaan setelah pengikatan terjadi seperti gedung pencakar langit, jalan beton, dan konstruksi bawah air yang tidak memerlukan ketahanan terhadap sulfat.
- 4) Tipe IV digunakan untuk keperluan konstruksi beton massa yang memerlukan kenaikan panas hidrasi sangat rendah seperti bendungan gravitasi.

- 5) Tipe V digunakan untuk konstruksi pada tanah atau lingkungan air yang mengandung sulfat melebihi 0.20% seperti instalasi pengelolaan limbah pabrik, pelabuhan, dan pembangkit tenaga nuklir.

b. Semen Portland Pozolan

Menurut SNI 15-0302-2004 semen Portland pozolan atau *Portland Pozzolan Cement* (PPC) adalah semen hidrolis yang terdiri dari campuran yang homogen antara semen Portland dan pozolan halus, yang diproduksi dengan menggiling klinker semen Portland dan pozolan bersama-sama, atau mencampur secara merata bubuk semen Portland dengan bubuk pozolan, atau gabungan antara menggiling dan mencampur, dimana kadar pozolan 6% sampai dengan 40% massa semen Portland. Jenis dan masing-masing penggunaan dari semen portland pozolan adalah:

- 1) Jenis IP-U digunakan untuk semua tujuan pembuatan campuran beton.
- 2) Jenis IP-K digunakan untuk semua tujuan pembuatan konstruksi beton di lingkungan berkadar sulfat sedang dengan tingkat panas hidrasi sedang.
- 3) Jenis P-U digunakan untuk pembuatan konstruksi beton yang tidak disyaratkan memiliki kekuatan awal tinggi.
- 4) Jenis P-K digunakan untuk pembuatan beton yang tidak disyaratkan memiliki kekuatan awal tinggi, memiliki ketahanan terhadap sulfat sedang, dan dengan kebutuhan tingkat panas hidrasi rendah.

c. Semen Portland Komposit

Menurut SNI 15-7064-2004 semen Portland komposit atau *Portland Composite Cement* (PCC) adalah bahan pengikat hidrolis hasil penggilingan

bersama-sama terak semen Portland dan gips dengan satu atau lebih bahan anorganik, atau hasil pencampuran antara bubuk semen Portland dengan bubuk bahan anorganik lain. Bahan anorganik tersebut antara lain terak tanur tinggi (*blast furnace slag*), pozolan, senyawa silikat, batu kapur, dengan kadar total bahan anorganik 6 - 35% dari massa semen Portland komposit. Semen Portland komposit dapat digunakan secara luas untuk konstruksi umum seperti pekerjaan beton, pasangan bata, selokan, jalan, pagar dinding, beton pracetak, beton pratekan, panel beton, dan bata beton.

d. Semen Portland Campur

Menurut SNI 15-3500-2004 semen Portland campur atau *mixed Cement* adalah pengikat hidrolis hasil penggilingan bersama-sama dari terak semen Portland dan gips dengan satu atau lebih bahan anorganik yang bersifat tidak bereaksi. Semen Portland campur dapat digunakan dalam semua pembuatan campuran mortar dan beton untuk konstruksi yang tidak memerlukan persyaratan khusus dengan kuat tekan karakteristik setinggi-tingginya 20 MPa (200 kg/m<sup>3</sup>) pada umur 28 hari.

2. Agregat Halus

Menurut SNI 03-2847-2002 agregat halus adalah pasir alami sebagai hasil desintegrasi secara alami dari batu atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir terbesar 5 mm. Fungsi agregat halus dalam beton adalah sebagai bahan pengisi antarbutir agregat kasar. Persyaratan agregat halus untuk campuran beton dengan berbagai mutu adalah (SK SNI S-04-1989-F):

- a. Terdiri dari butiran yang tajam, kuat, dan keras.
- b. Butir harus tidak pecah atau hancur oleh pengaruh cuaca. Jika diuji dengan natrium sulfat dan magnesium sulfat maka secara berurutan batas maksimal bagian yang hancur adalah 12% dan 10%.
- c. Tidak mengandung lumpur (butiran yang dapat melewati ayakan 0.06 mm) lebih dari 5%. Jika kadar lumpur melibih 5% maka harus dicuci.
- d. Tidak mengandung banyak zat organik. Jika direndam dalam larutan 3% NaOH maka warna cairan di atas endapan tidak boleh lebih gelap dari warna pembanding.
- e. Modulus halus butir antara 1.5 - 3.8 dengan variasi ukuran butiran sesuai dengan standar gradasi menurut SNI 03-22834-2000 yang diperlihatkan pada Tabel 3.
- f. Tidak boleh mengandung garam.

**Tabel 3.** Syarat Gradasi Agregat Halus

<b>Ukuran Ayakan (mm)</b>	<b>Persentase Lolos Ayakan Komulatif</b>			
	<b>Zona 1</b>	<b>Zona 2</b>	<b>Zona 3</b>	<b>Zona 4</b>
9.6	100 - 100	100 - 100	100 - 100	100 - 100
4.8	90 - 100	90 - 100	90 - 100	95 - 100
2.4	60 - 95	75 - 100	85 - 100	95 - 100
1.2	30 - 70	55 - 90	75 - 100	90 - 100
0.6	15 - 34	35 - 59	60 - 79	80 - 100
0.3	5 - 20	8 - 30	12 - 40	15 - 50
0.15	0 - 10	0 - 10	0 - 10	0 - 15

(SNI 03-2834-2000)

### 3. Agregar Kasar

Menurut SNI 03-2847-2002, agregat kasar adalah kerikil sebagai hasil disintegrasi ‘alami’ dari batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri

pemecah batu dan mempunyai butir antara 5 mm sampai 40 mm. Fungsi agregat kasar dalam beton adalah sebagai bahan pengisi dan penguat. Persyaratan agregat kasar untuk campuran beton berbagai mutu adalah (SK SNI S-04-1989-F):

- a. Harus terdiri dari butiran yang tajam, kuat, dan keras.
- b. Butiran harus tidak pecah atau hancur oleh pengaruh-pengaruh cuaca. Jika diuji dengan natrium sulfat dan magnesium sulfat maka secara berurutan batas maksimal bagian yang hancur adalah 12 dan 10%.
- c. Tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 1%. Jika kadar lumpur melebihi 1% maka agregat kasar harus dicuci.
- d. Tidak boleh mengandung zat-zat organik dan reaktif terhadap alkali.
- e. Modulus halus butir antara 6 - 7.1 dengan variasi ukuran butiran sesuai standar gradasi meurut SNI 03-22834-2000 yang diperlihatkan pada Tabel 4.
- f. Tidak boleh mengandung garam.

**Tabel 4.** Syarat Gradasi Agregat Kasar

Ukuran Ayakan (mm)	Percentase Lulos Ayakan Komulatif		
	Ukuran Maksimum 10 mm	Ukuran Maksimum 20 mm	Ukuran Maksimum 40 mm
76	-	-	100 - 100
38	-	100 - 100	95 - 100
19	100 - 100	95 - 100	35 - 70
9.6	50 - 85	30 - 60	10 - 40
4.8	0 - 10	0 - 10	0 - 5

(SNI 03-2834-2000)

Dalam SII 0052-80, terdapat persyaratan tambahan yakni kekerasan agregat kasar untuk beton yang diperlihatkan pada Tabel 5.

**Tabel 5.** Syarat Kekerasan Agregat Kasar

Mutu Beton	Bagian Hancur (Lolos Ayakan 2 mm) dengan Bejana Rudellof (%)		Bagian Hancur (Lolos Ayakan 1.7 mm) dengan Mesin Los Angeles (%)
	Fraksi Butir 19 - 30 mm	Fraksi Butir 9.5 - 19 mm	
B <sub>0</sub>	22 - 30	24 - 32	40 - 50
B <sub>0</sub> , K-125, K-175, dan K-225	14 - 22	16 - 24	27 - 40
Di atas K-225	< 14	< 16	< 27 (SII 0052-80)

#### 4. Air

Air merupakan bahan dasar yang sangat penting dalam campuran beton karena air berguna sebagai rekatan dalam hidrasi semen. Tanpa kehadiran air maka semen hidrolis tidak dapat menjadi bahan perekat antarbutir agregat. Air juga berguna sebagai bahan pelumas butiran agregat sehingga berpengaruh pada kelayakan penggerjaan campuran beton segar. Persyaratan air untuk campuran beton segar dengan berbagai mutu adalah (Tjokrodimuljo, 1996):

- a. Air harus bersih, tidak berwarna, dan tidak berbau.
- b. Kandungan garam dan zat organik dalam air tidak melebihi 15 gr/lit.
- c. Kadar lumpur dan zat-zat lain tidak melebihi 2 gr/lit.
- d. Tidak mengandung klorida lebih dari 0.5 gr/lit.
- e. Tidak mengandung senyawa sulfat SO<sub>3</sub> lebih dari 1 gr/lit.

#### 5. Bahan Tambahan

Menurut SNI 03-2495-1991, bahan tambahan adalah bahan berupa bubukan atau cairan, yang dibubuhkan kedalam campuran beton selama pengadukan dalam

jumlah tertentu untuk mengubah beberapa sifatnya. Bahan tambah menurut SNI 03-2495-1991 diklasifikasikan menjadi:

- a. Tipe A digunakan untuk mengurangi air dengan menghasilkan beton sesuai direncanakan.
- b. Tipe B digunakan untuk memperlambat waktu pengikatan beton.
- c. Tipe C digunakan untuk mempercepat waktu pengikatan dan menambah kekuatan awal beton.
- d. Tipe D digunakan untuk mengurangi air dengan menghasilkan beton sesuai direncanakan dan memperlambat waktu pengikatan beton.
- e. Tipe E digunakan untuk mengurangi air dengan menghasilkan beton sesuai direncanakan dan mempercepat waktu pengikatan serta menambah kekuatan awal beton.
- f. Tipe F digunakan untuk mengurangi air sebanyak 12% atau lebih dengan menghasilkan beton sesuai direncanakan.
- g. Bahan tambahan tipe G digunakan untuk mengurangi air sebanyak 12% atau lebih dengan menghasilkan beton sesuai direncanakan dan memperlambat waktu pengikatan beton.

### **C. Rancang Campur Beton**

Rancang campur beton adalah suatu cara untuk menentukan komposisi dari bahan penyusun beton yang tersedia untuk memperoleh campuran adukan yang memenuhi persyaratan umum campuran beton. Perancangan campuran beton harus didasarkan oleh perbandingan berat yang dihitung menggunakan metode perhitungan baku dan memperhatikan karakteristik setiap bahan penyusunnya agar

diperoleh beton yang memenuhi persyaratan (Widodo, 2008). Secara umum beton harus memenuhi syarat kelayakan penggerjaan, keawetan, kuat tekan, dan ekonomis (SNI 03-2834-2000).

### 1. Kelayakan penggerjaan

Kelayakan penggerjaan (*workability*) adalah parameter yang digunakan dalam mengukur kemudahan campuran beton segar untuk diangkut, dituang, dipadatkan, dan dilakukan perataan dan penghalusan (*finishing*) yang biasanya diukur dengan pengujian nilai *slump* (Widodo, 2013). Menurut Nji (2012) kelayakan penggerjaan secara umum diasosiasikan dengan homogenitas, kohesifitas, kemampuan alir (*flowability*), mobilitas, dan plastitisas campuran beton segar. Kelayakan penggerjaan ditentukan berdasarkan kejelasan dan ketepatan deskripsi dari fungsi bangunan, lokasi penggerjaan, dan metode konstruksi yang akan digunakan. Faktor-faktor yang mempengaruhi kelayakan penggerjaan adalah metode dan durasi pengangkutan, kuantitas dan karakteristik semen yang digunakan, karakteristik fisik agregat, kuantitas dan karakteristik bahan tambah yang digunakan, kuantitas air yang digunakan, dan temperatur lingkungan (Widodo, 2013).

### 2. Kuat Tekan

Menurut SNI 03-1974-1990 kuat tekan beton adalah besarnya beban per satuan luas, yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani dengan gaya tekan tertentu, yang dihasilkan oleh mesin tekan. Kuat tekan merupakan parameter utama dalam menilai kekuatan mekanik beton. Faktor-faktor yang mempengaruhi kekuatan beton yakni *water-cement ratio*, *aggregate-cement ratio*, kepadatan, umur

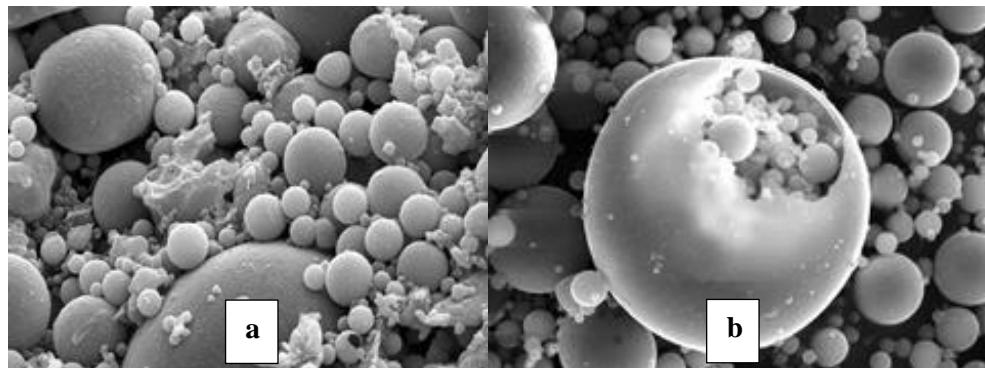
beton, cara perawatan, jenis semen dan jumlah semen, serta kualitas agregat yang meliputi gradasi, tekstur permukaan, bentuk, kekerasan, dan ukuran maksimum agregat (Widodo, 2008).

### 3. Keawetan

Keawetan beton adalah tingkat ketahanan beton terhadap ganguan-gangguan eksternal selama waktu layan. Gangguan-gangguan eksternal ini dapat berupa kelembaban dan temperatur udara, penetrasi karbon dioksida dari udara, serangan sulfat dan asam-asam lain, abrasi oleh gelombang laut, dan cuaca ekstrim. Keawetan beton sangat bergantung pada kualitas dari seluruh bahan campuran beton seperti kehalusan dan kandungan senyawa semen, kandungan alkali pada agregat, dan kandungan asam pada air (Ekaputri, 2014).

## D. Abu Terbang

Menurut SNI 06-6867-2002 abu terbang (*fly ash*) adalah sisa hasil pembakaran serbuk batu bara dari tungku pembangkit tenaga uap yang terbawa gas buangan cerobong asap. Abu terbang sudah lama digunakan pada berbagai aplikasi teknik sipil seperti beton semen Portland, stabilisasi dasar tanah dan jalan, bahan pengisi yang mudah mengalir, *grouting*, dan pengisi struktural pada aspal (ACAA, 2003). Pada umumnya abu terbang memiliki berat jenis antara 1.6 - 3.1 dan ukuran butiran antara 1 - 100  $\mu\text{m}$  yang terdiri dari partikel padat berbentuk bulat, partikel bulat berongga, dan partikel bulat berisi partikel bulat lain seperti yang diperlihatkan pada Gambar 1 (Nji, 2012).



**Gambar 1.** Partikel Abu Terbang: (a) partikel abu terbang yang berbentuk bulat, (b) partikel abu terbang yang di dalamnya terdapat banyak partikel lain yang lebih kecil (Nji, 2012)

Batu bara sebagai sumber penghasil abu terbang dikelompokkan menjadi empat tingkat kategori yakni (Nji, 2012):

1. *Lignite* yang mempunyai kemampuan menghasilkan panas terendah dan kadar air tertinggi.
2. *Subbituminous* yang mempunyai kemampuan menghasilkan panas sedang dan kadar air sedang.
3. *Bituminous* yang mempunyai kemampuan menghasilkan panas tinggi dan kadar air rendah.
4. *Anthracite* yang bersifat lambat terbakar akan tetapi dapat menghasilkan panas tertinggi.

Adapun jumlah senyawa kimia abu terbang berdasarkan kategori batu bara penghasil diperlihatkan pada Tabel 6.

**Tabel 6.** Jumlah Senyawa Kimia Abu Terbang berdasarkan Kategori Batu Bara

Parameter	Jumlah Senyawa (%)		
	<i>Bituminous</i>	<i>Subbituminous</i>	<i>Lignite</i>
SiO <sub>2</sub>	20 - 60	40 - 60	15 - 45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 - 35	20 - 30	10 - 25
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10 - 40	4 - 10	4 - 15
CaO	1 - 12	5 - 30	15 - 40

**Tabel 6.** Lanjutan

<b>Parameter</b>	<b>Bituminous</b>	<b>Jumlah Senyawa (%)</b>	
		<b>Subbituminous</b>	<b>Lignite</b>
MgO	0 - 5	1 - 6	3 - 10
SO <sub>3</sub>	0 - 4	0 - 2	0 - 10
Na <sub>2</sub> O	0 - 4	0 - 2	0 - 6
K <sub>2</sub> O	0 - 3	0 - 4	0 - 4
<i>Loss on Ignition</i> (LOI)	0 - 15	0 - 3	0 - 5

(U.S. Departement of Transportation, 2016)

ASTM C 618 membagi abu terbang menjadi dua kelas yang digunakan untuk beton semen Portland yakni Kelas C dan Kelas F. Persyaratan kimia untuk kedua kelas ini jika diaplikasikan pada beton semen Portland diperlihatkan pada Tabel 7.

**Tabel 7.** Persyaratan Kimia Abu Terbang untuk Beton Semen Portland

<b>Paramater</b>	<b>Syarat Jumlah Senyawa (%)</b>	
	<b>Kelas F</b>	<b>Kelas C</b>
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≥ 70	≥ 50
SiO <sub>3</sub>	≤ 5	≤ 5
Kadar lengas	≤ 3	≤ 3
LOI	≤ 5	≤ 5

(ASTM C 618)

Kelas C biasanya dihasilkan dari batu bara *subbituminous* dan mengandung lebih dari 20% CaO, sedangkan Kelas F biasanya dihasilkan dari batu bara *bituminous* dan *anthracite* yang mengandung kurang dari 10% CaO. Abu terbang juga dapat dibedakan berdasarkan warna yakni berwarna sawo matang (*tan*) dan terang biasanya mengandung CaO yang tinggi, berwarna kecokelatan biasanya mengandung ferik yang tinggi, dan berwarna abu-abu gelap sampai hitam mengandung karbon yang tinggi (ACAA, 2003).

## **E. Abu Terbang dalam Beton Semen Portland**

Penggunaan abu terbang dalam beton semen Portland dapat menghasilkan banyak keunggulan. Keunggulan paling utama dari penggunaan abu terbang dalam beton semen Portland adalah ekonomis, dan secara umum dapat menghasilkan cukup banyak keunggulan pada campuran beton segar dan beton keras.

### 1. Keunggulan pada Campuran Beton Segar

Adapun keunggulan-keunggulan penggunaan abu terbang yang dihasilkan pada campuran beton segar adalah (ACAA, 2003):

- a. Dengan bentuk partikel berukuran kecil dan bulat dapat meningkatkan kelayakan pengerjaan karena dapat memberikan efek pelumas.
- b. Sebagai pengganti semen dapat mengurangi kebutuhan air atau tidak akan menyebabkan retak akibat penyusutan pada beton keras.
- c. Sebagai pengganti semen dapat mengurangi panas hidrasi campuran beton segar tanpa mengurangi peningkatan kekuatan dan keawetan beton keras.

### 2. Keunggulan pada Beton Keras

Adapun keunggulan-keunggulan penggunaan abu terbang yang dihasilkan pada beton keras adalah (ACAA, 2003):

- a. Dengan sifat pozolanik dapat meningkatkan kekuatan ultimet beton yang melebihi kekuatan beton semen Portland tanpa abu terbang pada umur lebih dari 90 hari.
- b. Dengan sifat pozolanik dan pengurangan kebutuhan air yang mengurangi jumlah pori dapat mengurangi permeabilitas beton.

- c. Dengan sifat pozolanik dapat meningkatkan ketahanan terhadap reaksi alkali, serangan sulfat, dan korosi baja tulangan sehingga meningkatkan keawetan beton.

## F. Hidrasi Semen Portland

Secara umum hidrasi semen Portland adalah proses terbentuknya padatan keras akibat reaksi kimia antara senyawa trikalsium silikat ( $C_3S$ ), dikalsium silikat ( $C_2S$ ), trikalsium alumant ( $C_3A$ ), tetrakalsium aluminofeberat ( $C_4AF$ ), dan gips dalam semen Portland dengan air ( $H_2O$ ). Proses hidrasi dan jumlah senyawa kimia semen Portland secara berurutan diperlihatkan pada Tabel 8 dan 9.

**Tabel 8.** Proses Hidrasi Semen Portland

Reaktan		Produk	
$2C_3S$	+ $6H_2O$	$3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ (Kalsium silikat hidrat)	$3Ca(OH)_2$ (Kalsium hidroksida)
$2C_2S$	+ $4H_2O$	$3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$	+ $Ca(OH)_2$
$C_3A$	+ $12H_2O$	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Ca(OH)_2 \cdot 12H_2O$ (Tetrakalsium aluminat hidrat)	
$C_4AF$	+ $10H_2O$	$6CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \cdot 12H_2O$ (Kalsium aluminofeberat hidrat)	
$C_3A$	+ $26H_2O$	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ (Gips)	(Kalsium trisulfoluminat hidrat atau <i>ettringite</i> )
$2C_3A$	+ $4H_2O$	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$ (Kalsium monosulfoluminat hidrat)

(PCA, 2001)

**Tabel 9.** Jumlah Senyawa Kimia Semen Portland

Tipe Semen Protland	Kisaran Jumlah Senyawa (%)			
	$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	$C_4AF$
I (min. - maks.)	40 - 63	9 - 31	6 - 14	5 - 13
I (rerata)	54	18	10	8

**Tabel 9.** Lanjutan

Tipe Semen Protland	Kisaran Jumlah Senyawa (%)			
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
II (min. - maks.)	37 - 68	6 - 32	2 - 8	7 - 15
II (rerata)	55	19	6	11
III (min. - maks.)	46 - 71	4 - 27	0 - 13	4 - 14
III (rerata)	55	17	9	8
IV (min. - maks.)	37 - 49	27 - 36	3 - 4	11 - 18
IV (rerata)	42	32	4	15
IV (min. - maks.)	43 - 70	11 - 31	0 - 5	10 - 19
IV (rerata)	54	22	4	13

(Gebhardt, 1995)

### 1. Hidrasi Trikalsium Silikat

C<sub>3</sub>S berhidrasi dengan cepat dari awal proses hidrasi semen Portland dan menghasilkan senyawa baru yakni kalsium silikat hidrat (CSH) serta kalsium hidroksida (CH). CSH adalah produk senyawa yang berfungsi sebagai pengikat yang menghasilkan kakuatan, sedangkan kalsium hidroksida berfungsi sebagai pengisi rongga pada semen keras. Hidrasi trikalsium silikat berlangsung selama satu minggu pertama proses hidrasi semen (PCA, 2001).

### 2. Hidrasi Dikalsium Silikat

Produk yang dihasilkan dari hidrasi C<sub>2</sub>S adalah sama dengan produk hidrasi trikalsium silikat yakni CSH dan CH. Perbedaan hidrasi C<sub>2</sub>S dengan C<sub>3</sub>S adalah hidrasi C<sub>2</sub>S terjadi selama setelah satu minggu pertama proses hidrasi semen (PCA, 2001).

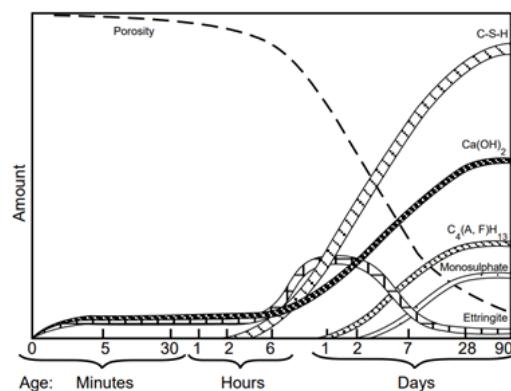
### 3. Hidrasi Trikalsium Aluminat

Pada awal proses hidrasi semen Portland C<sub>3</sub>A akan berhidrasi dengan CH dan menghasilkan tetrakalsium aluminat hidrat yang berkontribusi dalam peningkatan

kekuatan awal semen. Proses hidrasi ini menghasilkan panas yang sangat tinggi, sehingga gips ditambahkan dalam semen yang kemudian berhidrasi dengan C<sub>3</sub>A pada beberapa jam awal hidrasi semen untuk membentuk formasi kalsium trisulfominat hidrat (*ettringite*). Formasi *ettringite* berguna untuk mengontrol pengerasan awal untuk mengurangi panas hidrasi dalam pembentukan tetrakalsium aluminat hidrat. Saat proses ini berlangsung, *ettringite* tersebar secara merata ke seluruh pasta semen dalam ukuran lebih kecil dari 1  $\mu\text{m}$ . Dari hidrasi C<sub>3</sub>A dengan gips biasanya tetap menyisakan C<sub>3</sub>A yang akan berhidrasi dengan *ettringite* yang terbentuk sebelumnya sehingga menghasilkan senyawa kalsium monosulfoluminat hidrat. Kalsium monosulfoluminat hidrat adalah sangat stabil dan hanya mengisi sedikit ruang dibandingkan dengan *ettringite* (PCA, 2001).

#### 4. Hidrsai Tetrakalsium Aluminoferat

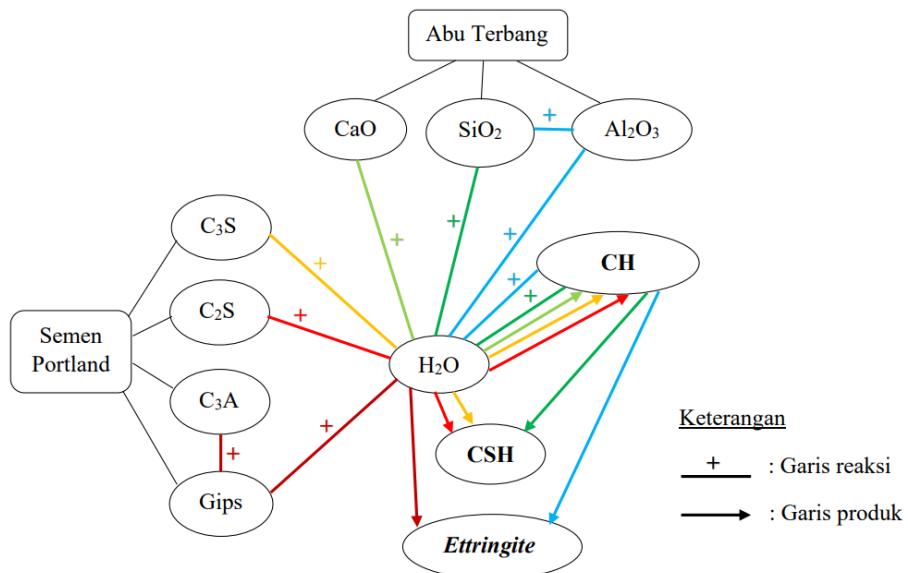
C<sub>4</sub>AF berguna untuk mengurangi temperatur klinker pada saat pembuatan semen Portland. Dari proses hidrasi C<sub>4</sub>AF akan menghasilkan kalsium aluminoferat hidrat yang berlangsung sangat lambat dan hanya memberikan sangat sedikit kekuatan (PCA, 2001).



**Gambar 2.** Ilustrasi Pembentukan Produk Hidrasi dan Penurunan Porositas Semen Portland berdasarkan Waktu (Locher dkk, 1976)

## G. Sifat Pozolanik Abu Terbang

Sifat pozolanik abu terbang adalah kemampuan abu terbang yang memiliki bentuk sangat halus untuk berhidrasi dengan semen Portland sehingga menjadi suatu bentuk massa padat. Massa padat ini terbentuk karena adanya proses hidrasi antara kandungan kalsium oksida ( $\text{CaO}$ ), silikon oksida ( $\text{SiO}_2$ ), dan alumunium oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dalam abu terbang dengan  $\text{CH}$  yang kemudian menghasilkan  $\text{CH}$ ,  $\text{CSH}$ , dan *ettringite* tambahan (Papadakis, 1999; Biernacki dkk, 2001; Zeng dkk, 2012). Sifat pozolanik abu terbang ini dipengaruhi oleh beberapa hal seperti sifat kimia dan fisik abu terbang, *water-cement ratio*, kuantitas abu terbang, dan suhu perawatan (Narmluk dan Nawa, 2014). Proses dan produk hidrasi pozolanik abu terbang secara keseluruhan diperlihatkan pada Gambar 3.

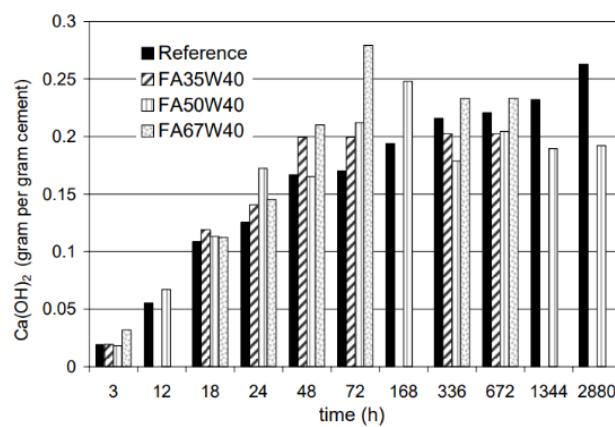


**Gambar 3.** Skema Proses dan Produk Reaksi Pozolanik Abu Terbang

### 1. Pembentukan Kalsium Hidroksida

Pembentukan  $\text{CH}$  terjadi karena partikel bulat abu terbang yang dapat menyerap ion kalsium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) yang dilepaskan pada saat proses hidrasi  $\text{C}_3\text{S}$  dimulai

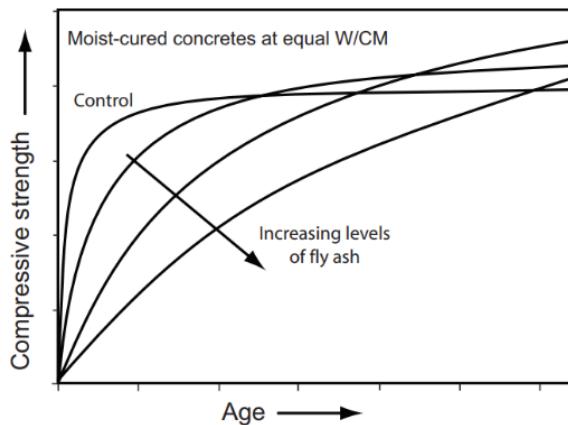
(Zeng dkk, 2012). Pembentukan CH juga dapat terjadi karena adanya pertemuan antara CaO dalam abu terbang dengan H<sub>2</sub>O (Wafi, 2015). Dari proses ini tentunya akan menambah kandungan CH pada saat proses hidrasi berlangsung, akan tetapi seiring dengan berjalannya waktu, kandungan CH akan berkurang seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4 karena berhidrasi kembali dengan abu terbang untuk menghasilkan CSH dan *ettringite*.



**Gambar 4.** Contoh Perbedaan Jumlah Kandungan Kalsium Hidroksida Semen (*Reference*) dengan Semen-Abu Terbang (FA35-67W40) berdasarkan Waktu (Baert dkk, 2007)

## 2. Pembentukan Kalsium Silikat Hidrat

Pembentukan CSH terjadi karena hidrasi antara SiO<sub>2</sub> dari abu terbang dengan CH hasil hidrasi semen (Ashad dkk, 2008). Pembentukan CSH juga dapat terjadi karena hidrasi SiO<sub>2</sub> dengan CH dari sifat pozolanik abu terbang itu sendiri seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Dengan terbentuknya CSH tambahan maka akan menambah kekuatan pada beton, akan tetapi penambahan kekuatan ini terjadi lebih lama jika dibandingkan dengan beton normal seperti yang diperlihatkan pada Gambar 5.



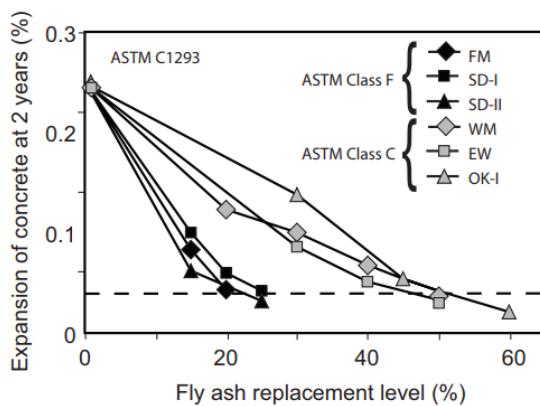
**Gambar 5.** Ilustrasi Perbedaan Peningkatan Kuat Tekan Beton dengan Abu Terbang terhadap Beton Normal (*Control*) berdasarkan Waktu (Thomas, 2007)

### 3. Pembentukan *Ettringite*

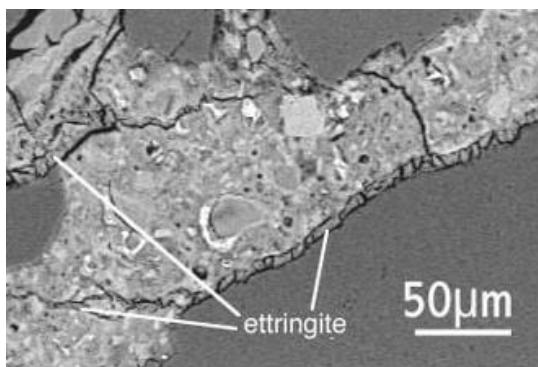
Pembentukan *ettringite* terjadi karena adanya hidrasi antara  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dari abu terbang dengan CH yang dihasilkan dari hidrasi  $\text{C}_3\text{S}$  dan  $\text{C}_2\text{S}$  dalam semen Portland (Ashad dkk, 2008). Sama halnya dengan pembentukan CSH, *ettringite* juga dapat terbentuk dari hidrasi antara  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  abu terbang dengan CH yang dihasilkan dari sifat pozolanik abu terbang itu sendiri. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa formasi *ettringite* berguna untuk mengontrol pengerasan awal sehingga mengurangi panas hidrasi semen Portland yang dalam hal ini khususnya panas hidrasi beton. Dengan penambahan jumlah *ettringite* dari reaksi pozolanik abu terbang maka memungkinkan peningkatan kekuatan beton abu terbang akan berlangsung lebih lama ketimbang beton normal seperti terlihat pada Gambar 5.

Berbeda dengan penambahan CSH, penambahan *ettringite* tidak memberikan pengaruh pada kekuatan beton akan tetapi dapat memberikan pengaruh terhadap keawetan beton. Penambahan *ettringite* dapat berguna untuk mengurangi ekspansi merusak (*deleterious expansion*) pada beton akibat reaksi silika-alkali seperti yang

diperlihatkan pada Gambar 6. PCA (2001) menjelaskan bahwa *ettringite* memiliki kemampuan untuk meninggalkan posisi awalnya pada pasta semen kemudian mengkristal ulang di tempat lebih besar seperti rongga atau retakan disebabkan oleh reaksi silika-alkali seperti yang diperlihatkan pada Gambar 7.



**Gambar 6.** Contoh Pengaruh Peningkatan Penggunaan Abu Terbang terhadap Ekspansi Merusak pada Beton akibat Reaksi Silika-Alkali (Thomas, 2007)



**Gambar 7.** *Ettringite* yang Mengkristal Ulang pada Retakan Beton akibat Reaksi Silika-Alkali (*Understanding Cement*, 2006)

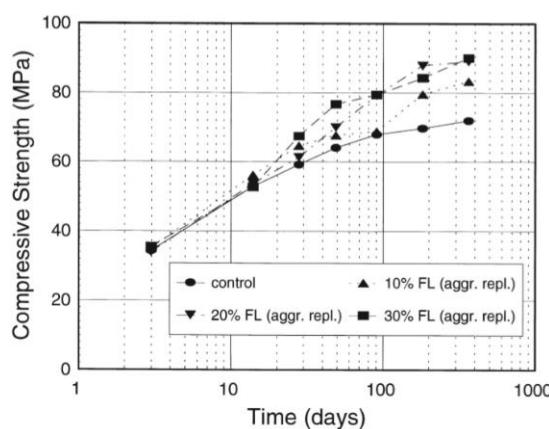
## H. Abu Terbang sebagai Pengganti Pasir

Penggantian sebagian pasir dengan abu terbang dalam campuran mortar atau beton telah dilakukan dari tahun 1999 hingga 2015. Hal ini dibuktikan dengan terbitnya jurnal-jurnal internasional mengenai hal tersebut yang akan dijelaskan sebagai berikut.

Papadakis (1999) melakukan penelitian tentang pengaruh abu terbang Kelas F terhadap kuat tekan mortar. Dalam penenilitan ini, Papadakis (1999) membuat empat tipe campuran mortar berbeda yakni kontrol, FLA1, FLA2, dan FLA3 yang secara berurutan memiliki persentase penggantian sebagian pasir sebanyak 0%, 10%, 20%, dan 30% berdasarkan proporsi berat masing-masing bahan terhadap kebutuhan semen Portland. Rancang campur mortar dalam penelitian ini diperlihatkan pada Tabel 10. Pengujian kuat tekan dilakukan setelah mortar berumur yakni 3, 14, 28, 49, 91, 182, dan 364 hari. Hasil dari pengujian kuat tekan yang diperlihatkan pada Gambar 8 menunjukan bahwa setalah berumur 14 hari mortar FL1, FL2, dan FL3 memiliki kuat tekan lebih tinggi ketimbang mortar kontrol.

**Tabel 10.** Rancang Campur Mortar dalam Penelitian Papadakis (1999)

Bahan (kg/m <sup>3</sup> )	Tipe Mortar			
	Kontrol	FLA1	FLA2	
Semen Portland	514.6	514.6	514.6	514.6
Air	257.4	257.4	257.4	257.4
Abu terbang	0	51.5	102.9	154.4
Pasir	1543.80	1482.7	1421.7	1360.6

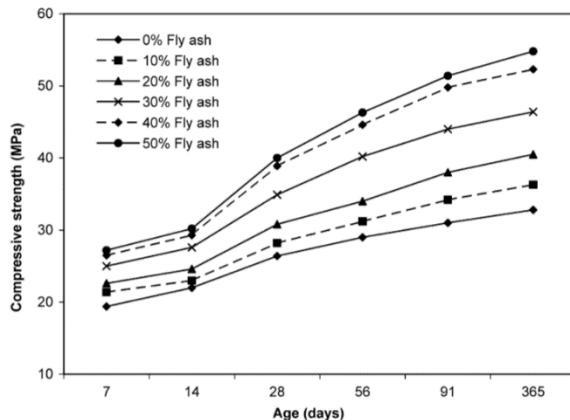


**Gambar 8.** Pengaruh Penggantian Sebagian Pasir dengan Abu Terbang terhadap Peningkatan Kuat Tekan Mortar berdasarkan Waktu dalam Penelitian Papadakis (1999)

Siddique (2003) melakukan penelitian tentang pengaruh penggantian pasir dengan abu terbang Kelas F terhadap kuat tekan beton. Dalam penelitian ini, dibuat enam tipe campuran beton yakni M-1, M-2, M-3, M-4, M-5, dan M-6 yang secara berurutan memiliki persentase penggantian sebagian pasir sebanyak 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50% berdasarkan berat kebutuhan pasir campuran beton M-1. Rancang campur beton untuk setiap tipe campuran beton yakni semen Portland (PC), abu terbang (FA), air (W), pasir (S), agregat kasar (CA), dan *superplasticizer* (SP) diperlihatkan pada Tabel 11. Nilai *slump* yang dihasilkan dari campuran beton segar M-1, M-2, M-3, M-4, M-5, dan M-6 secara berurutan adalah 100, 90, 65, 40, 30, dan 20 mm. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur beton yakni 7, 14, 28, 56, 91, dan 365 hari di dalam air. Hasil pengujian kuat tekan yang diperlihatkan pada Gambar 9 menunjukkan bahwa beton M-2, M-3, M-4, M-5, dan M-6 selalu memiliki kuat tekan yang lebih tinggi ketimbang beton M-1. Kemudian, semakin banyak pasir yang digantikan dengan abu terbang maka beton memiliki kuat tekan yang semakin tinggi.

**Tabel 11.** Rancang Campur Beton dalam Penelitian Siddique (2003)

Bahan	Tipe Beton					
	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6
PC (kg/m <sup>3</sup> )	390	390	390	390	390	390
FA (kg/m <sup>3</sup> )	0	50	110	170	220	280
W (l/m <sup>3</sup> )	185	187	190	190	192	195
S (kg/m <sup>3</sup> )	560	510	450	390	340	280
CA (kg/m <sup>3</sup> )	1170	1170	1170	1170	1170	1170
Sp (l/m <sup>3</sup> )	2.6	3.5	3.6	3.7	3.7	3.9



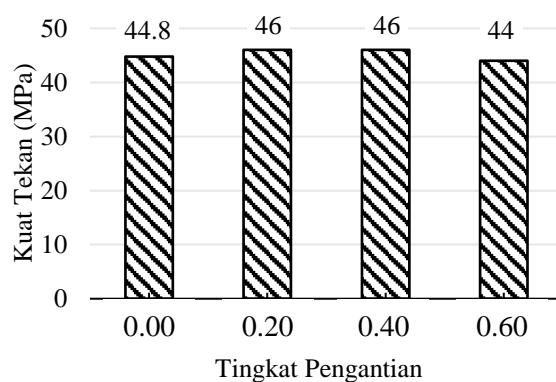
**Gambar 9.** Pengaruh Penggantian Sebagian Pasir dengan Abu Terbang terhadap Peningkatan Kuat Tekan Beton berdasarkan Waktu dalam Penelitian Siddique (2003)

Rajamane dan Ambily (2013) melakukan penelitian tentang penggunaan abu terbang Kelas F sebagai pengganti sebagian pasir terhadap kuat tekan beton. Dalam penelitian ini, dibuat empat tipe campuran beton dengan persentase penggantian sebagian pasir sebanyak 0%, 20%, 40%, dan 60% yang secara berurutan dinotasikan sebagai beton A, B, C, dan D. Penggantian sebagian pasir dengan abu terbang dalam penilitan ini dilakukan berdasarkan proporsi berat setiap bahan terhadap kebutuhan semen Portland dengan metode rancang campur beton berbasis *cementing efficiency* pozolan. Dengan cara tersebut, Rajamane dan Ambily (2013) dapat menghasilkan rancang campur beton yang lebih ekonomis. Rancang campur beton yang diperlihatkan pada Tabel 12 menunjukan bahwa jumlah kebutuhan semen Portland dan agregat berkurang akan tetapi jumlah kebutuhan air meningkat seiring dengan peningkatan jumlah abu terbang sebagai pengganti sebagian pasir. Kemudian dengan pengurangan kebutuhan semen dan agregat ini dapat menghasilkan beton yang jauh lebih ringan. Pengukuran tingkat kelayakan penggerjaan dilakukan dengan cara pemedatan dengan meja penggetar. Rajamane

dan Ambily (2013) menjelaskan bahwa sebagian jumlah abu terbang dapat tetap dianggap sebagai *binder* yang dapat mengatkan jumlah pasta. Sehingga campuran beton segar B, C, dan D memiliki tingkat kelayakan penggerjaan yang lebih tinggi ketimbang campuran beton segar A. Hasil pengujian kuat tekan saat beton berumur 28 hari yang diperlihatkan pada Gambar 10 menunjukkan bahwa antartipe beton memiliki kuat tekan yang relatif sama, dimana beton B dan C memiliki kuat tekan yang sedikit lebih tinggi ketimbang beton A dan D.

**Tabel 12.** Rancang Campur Beton dalam Penelitian Rajamane dan Ambily (2013)

Bahan (kg/m <sup>3</sup> )	Tipe Beton			
	A	B	C	D
Semen Portland	562	528	506	485
Abu terbang	0	106	203	291
Pasir	562	422	304	194
Agregat kasar	1123	1056	1013	970
Air	196	219	228	239
<i>Superplasticizer</i>	0.84	0.95	1.06	1.16



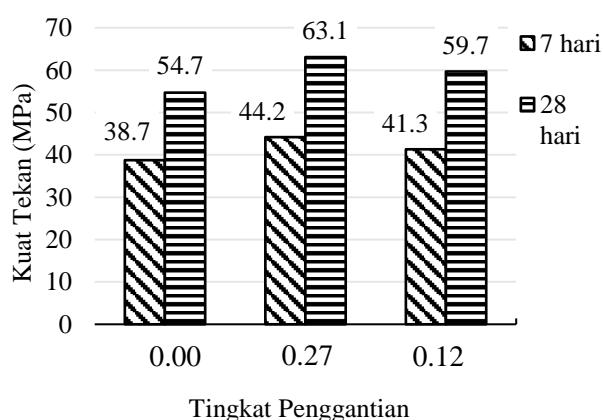
**Gambar 10.** Pengaruh Penggantian Sebagian Pasir dengan Abu Terbang terhadap Kuat Tekan Beton dalam Penelitian Rajamane dan Ambily (2013)

Deo dan Pofale (2015) melakukan penelitian tentang penggantian sebagian pasir dengan abu terbang Kelas F terhadap kuat tekan beton. Dalam penelitian ini, dibuat tiga tipe beton Kelas M45 dengan notasi C1 (kontrol), C2, dan C3.

Penggantian sebagian pasir pada seluruh tipe beton dilakukan berdasarkan berat kebutuhan pasir beton C1. C2 adalah campuran beton dengan persentase penggantian sebagian pasir sebanyak 12% berdasarkan metode rongga minimum. Kemudian C3 adalah campuran beton dengan persentase penggantian sebagian pasir sebanyak 27% berdasarkan metode berat satuan maksimum. Rancang campur beton dalam penelitian ini diperlihatkan pada Tabel 13. Nilai *slump* untuk campuran beton segar C1, C2, dan C3 secara berututan adalah 0, 25, dan 15 mm. Pengujian kuat tekan dilakukan setelah beton berumur 7 dan 28 hari. Hasil pengujian kuat tekan yang diperlihatkan pada Gambar 11 menunjukkan bahwa beton C2 dan C3 selalu memiliki kuat tekan yang lebih tinggi ketimbang beton C1.

**Tabel 13.** Rancang Campur Beton dalam Penelitian Deo dan Pofale (2015)

Bahan (kg/m <sup>3</sup> )	Benda Uji		
	C1	C2	C3
Semen Portland pozolan	450	450	450
Air	144	144	144
Pasir	531	388	467
Agregat kasar	1319	1319	1319
Abu terbang	0	130	58



**Gambar 11.** Pengaruh Penggantian Sebagian Pasir dengan Abu Terbang terhadap Kuat Tekan Beton dalam Penelitian Deo dan Pofelo (2015)

Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Papadakis (1999) dan Siddique (2003), Rajamane dan Ambily (2013), Deo dan Pofelo (2015) membuktikan bahwa penggunaan abu terbang sebagai pengganti sebagian pasir dapat meningkatkan kuat tekan mortar dan beton. Secara umum penggantian sebagian pasir dengan abu terbang dapat dilakukan dengan dua cara yakni berdasarkan berat kebutuhan pasir dan berat kebutuhan semen. Dalam proyek akhir ini penulis akan merujuk pada cara Rajamane dan Ambily (2013) untuk mengganti sebagian pasir dalam campuran beton dengan abu terbang yang berbasis *cementing efficiency* pozolan, karena selain dapat menghasilkan kuat tekan beton yang relatif sama juga dapat menghasilkan beton yang lebih ringan dan ekonomis.

## I. Penerapan *Cementing Efficiency* Pozolan

Perancangan campuran pozolanik yang dilakukan tanpa mempertimbangkan *water-cement ratio* akan memberikan pengaruh buruk bagi beton khususnya dalam hal kuat tekan. Hal ini dapat terjadi karena *water-cement ratio* adalah hal yang mempengaruhi pembentukan CH seperti terlihat pada Tabel 8, dimana jika *water-cement ratio* adalah rendah maka CH akan dihasilkan dalam jumlah lebih sedikit, sehingga mengakibatkan reaksi pozolanik abu terbang tidak akan terjadi secara optimal. Jika reaksi pozolanik yang tidak optimal tersebut terjadi pada campuran beton penggantian sebagian pasir dengan abu terbang maka akan memberikan pengaruh yang sama buruk pada kuat tekan. Hal ini dapat terjadi karena abu terbang yang tidak bereaksi secara pozolanik hanya akan menjadi bahan pengisi beton, dimana abu terbang bukan bahan pengisi ideal jika dilihat dari sifat fisik yang pada

umumnya tidak tajam, tidak keras, tidak kuat, sangat berongga, memiliki berat jenis (*specific gravity*) rendah, dan memiliki ukuran butiran seragam yang sangat kecil.

Yeh (2013) mendefinisikan *cementing efficiency* pozolan sebagai nilai sebagian massa semen yang dapat digantikan oleh sebagian pozolan tanpa mempengaruhi karakteristik beton yang direncanakan. Pada campuran beton penggantian sebagian semen dengan abu terbang, *cementing efficiency* diterapkan dengan menggunakan faktor efisiensi pozolan yang dapat dikatakan sebagai nilai reaktivitas abu terbang untuk mendapatkan *water-binder ratio* optimum, sehingga menghasilkan kuat tekan yang sama dengan beton normal. Dalam hal ini *water-binder ratio* dapat ditetapkan menggunakan Persamaan 1.

$$wb = wc \times (cb + k \times fab) \quad \text{Persamaan (1)}$$

dimana

*wb* : *water-binder ratio*

*cb* : *cement-binder ratio*

*k* : faktor efisiensi pozolan abu terbang

*fab* : *fly ash-binder ratio*

Penetapan faktor efisiensi pozolan dalam campuran beton penggantian sebagian pasir dengan abu terbang dapat dijadikan sebagai upaya untuk mendapatkan kuat tekan yang tidak lebih rendah ketimbang beton normal. Dalam hal ini pozolan dari abu terbang diharapkan dapat bereaksi secara optimal untuk menghasilkan CSH tambahan. Dengan penambahan jumlah CSH ini maka memungkinkan untuk didapatkannya kuat tekan pengganti dari yang hilang akibat

pengurangan kepadatan beton disebabkan oleh penggantian sebagian pasir dengan abu terbang. Walaupun abu terbang berperan sebagai pengganti sebagian pasir, dengan penerapan faktor efisiensi pozolan tentunya tetap membuat abu terbang memiliki hubungan dengan semen, hanya saja tidak terjadi pengurangan kebutuhan semen pada beton. Dengan demikian jika faktor efisiensi pozolan diterapkan pada campuran beton penggantian sebagian pasir dengan abu terbang maka *water-binder ratio* dapat ditetapkan menggunakan Persamaan 2 (Rajamane dan Ambily, 2013).

$$wb = wc \times [(1 - fab) + k \times fab] \quad \text{Persamaan (2)}$$

dengan

$$fab = \frac{FA}{(PC_{FS} + FA)} \quad \text{Persamaan (3)}$$

dimana

$FA$  : kebutuhan abu terbang ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$PC_{FS}$  : kebutuhan semen Portland beton dengan abu terbang ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

Pada Persamaan 2,  $[(1 - fab) + k \times fab]$  dapat didefinisikan sebagai nilai yang mewakili bahan *cementitious* yakni semen Portland dan pozolan abu terbang, dengan 1 adalah jumlah *binder* yang terdiri dari semen Portland dan abu terbang. Hal ini mengakibatkan kebutuhan air campuran beton penggantian sebagian pasir dengan abu terbang adalah lebih banyak ketimbang beton penggantian sebagian semen.

Menurut Rajamane dan Ambily (2013) faktor efisiensi pozolan abu terbang pada Persamaan 2 dapat berkisar dari 0.2 sampai 1.1 yang bergantung pada karakteristik semen, umur beton, kelas abu terbang, dan persentase abu terbang dalam *binder*. Dengan demikian maka sebenarnya diperlukan uji coba untuk menentukan faktor efisiensi pozolan dari abu terbang yang sedang digunakan. Hal ini dapat dilakukan dengan cara memperkirakan nilai *water-binder ratio* pada Persamaan 2 sampai kuat tekan yang didapatkan adalah sama pada setiap tipe beton. Dengan cara tersebut dan data penelitian selama bertahun-tahun, Rajamane dan Ambily (2013) menetapkan faktor efisiensi pozolan abu terbang 0.80 untuk setiap tipe beton penggantian sebagian pasir dengan abu terbang dalam penelitiannya, kemudian menghasilkan kuat tekan beton yang relatif sama seperti terlihat pada Gambar 10.

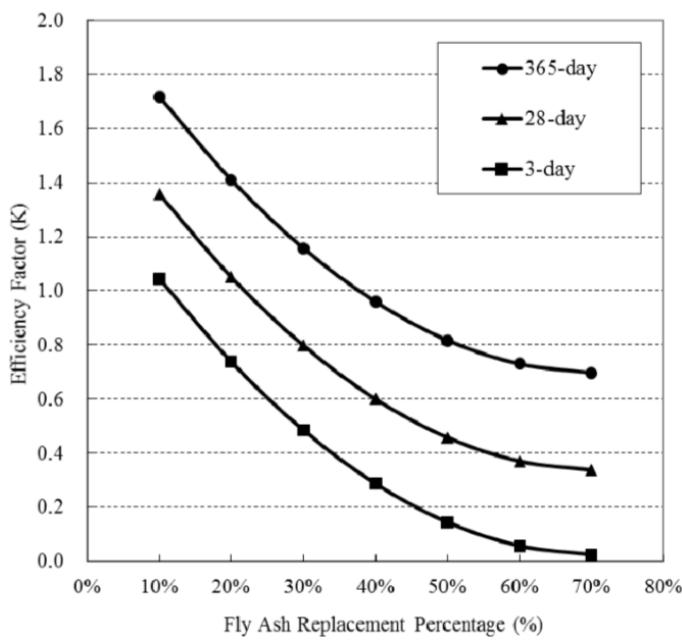
Dalam penelitian ini uji coba untuk menentukan faktor efisiensi pozolan abu terbang tidak dilakukan karena keterbatasan yang dimiliki, namun faktor efisiensi pozolan tetap tidak tepat jika ditentukan dengan asumsi semata-mata. Berdasarkan pendekatan unifikasi, Yeh (2013) membuat Persamaan 4 dan grafik yang diperlihatkan pada Gambar 12 yang dapat digunakan untuk menetapkan faktor efisiensi pozolan abu terbang pada umur beton berbeda dan dengan persentase penggantian semen yang berbeda.

$$k = 1.25 + 0.14 \times \ln T - 3.9 \times R + 2.75 \times R^2 \quad \text{Persamaan (4)}$$

dimana

$T$  : umur beton (hari)

$R$  : persentase abu terbang pengganti semen = 0.1 - 0.7



**Gambar 12.** Grafik Faktor Efisiensi Pozolan Abu Terbang (Yeh, 2013)

Persamaan 4 dan grafik pada Gambar 12 sebenarnya memang ditujukan untuk penetapan faktor efisiensi pozolan abu terbang pada beton penggantian sebagian semen, namun tidak menutup kemungkinan juga dapat digunakan pada beton penggantian sebagian pasir, karena faktor efisiensi pozolan tetap diterapkan untuk mengoptimalkan reaksi campuran pozolani. Dalam hal ini CSH yang pada dasarnya terbentuk sebagai pengganti dari yang hilang akibat pengurangan sebagian semen akan dianggap sebagai penghasil kuat tekan pengganti dari yang hilang akibat pengurangan kepadatan pada beton penggantian sebagian pasir.

#### J. Perancangan Campuran Beton Penggantian Pasir dengan Abu Terbang

Rajamane dan Ambily (2013) merancang campuran beton penggantian sebagian pasir dengan abu terbang berdasarkan proporsi berat antarbahannya campuran

beton, dimana jika proporsi oleh berat antarbahan campuran beton kontrol yakni semen Portland: pasir: agregat kasar: air adalah  $PC_p: S_p: CA_p: wc$  maka proporsi antarbahan campuran beton dengan abu terbang ditetapkan menggunakan Persamaan 5.

$$PC_p: (S_p - FA_p): CA_p: wc = (PC_{FSp}: FA_p): S_{FSp}: CA_{FSp}: wb \quad \text{Persamaan (5)}$$

dimana

$PC_{FSp}$  : proporsi semen Portland pada beton dengan abu terbang = 1

$FA_p$  : proporsi abu terbang

$S_{FSp}$  : proporsi pasir pada beton dengan abu terbang

$CA_{FSp}$  : proporsi agregat kasar pada beton dengan abu terbang

Pada Tabel 12 dapat dilihat bahwa dalam penelitian Rajamane dan Ambily (2013) terjadi pengurangan kebutuhan semen Portland yang diikuti dengan pengurangan seluruh kebutuhan bahan lainnya di setiap peningkatan penggantian pasir dengan abu terbang. Penyebab dilakukannya pengurangan semen Portland sebenarnya masih belum diketahui secara pasti, namun dapat diindikasikan bahwa ini dilakukan untuk mendapatkan volume campuran beton segar dengan abu terbang yang sama dengan campuran beton segar kontrol. Hal ini karena pada umumnya abu terbang memiliki berat jenis jauh lebih kecil ketimbang pasir, sehingga memungkinkan abu terbang akan menempati ruang lebih besar ketimbang yang ditempati oleh pasir, kemudian mengakibatkan penambahan volume campuran beton segar. Penambahan volume campuran beton segar juga dapat

terjadi karena penambahan kebutuhan air akibat penerapan faktor effisiensi pozolan dalam penetapan *water-binder ratio* pada Persamaan 2.

Hal-hal yang dipertimbangkan dalam pengurangan kebutuhan semen Portland juga masih belum diketahui, namun jika dilihat dari rancang campur beton dalam penelitian Rajamane dan Ambily (2013) pada Tabel 12 maka pengurangan kebutuhan semen Portland dapat ditetapkan menggunakan Persamaan 6.

$$PC_{FSred} = 0.2 \times R + 2 \quad \text{Persamaan (6)}$$

dimana

$PC_{FSred}$  : pengurangan kebutuhan semen portland beton dengan abu terbang (%)

$$R = 20 - 60\%$$

Dengan pengurangan kebutuhan semen Portland hasil Persamaan 6 maka kebutuhan semen Portland beton dengan abu terbang dapat dihitung menggunakan Persamaan 7. Berdasarkan proporsi berat antarbahannya campuran beton hasil Persamaan 5 maka kebutuhan abu terbang, pasir, agregat kasar, dan air pada beton dengan abu terbang secara berurutan dapat dihitung menggunakan Persamaan 8, 9, 10, dan 11.

$$PC_{FS} = PC - PC_{FSred} \times PC \quad \text{Persamaan (7)}$$

$$FA = FA_p \times PC_{FS} \quad \text{Persamaan (8)}$$

$$S_{FS} = S_{FS_p} \times PC_{FS} \quad \text{Persamaan (9)}$$

$$CA_{FS} = CA_{FSp} \times PC_{FS} \quad \text{Persamaan (10)}$$

$$W_{FS} = wb \times (PC_{FS} + FA) \quad \text{Persamaan (11)}$$

dimana

$PC$  : kebutuhan semen Portland pada beton kontrol ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$S_{FS}$  : kebutuhan pasir pada beton dengan abu terbang ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$CA_{FS}$  : kebutuhan agregat kasar pada beton dengan abu terbang ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$W_{FS}$  : kebutuhan air pada beton dengan abu terbang ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

