

## 2. LANDASAN TEORI

Beton telah menjadi material konstruksi yang paling banyak dipilih dan digunakan karena beberapa alasan. Selain memiliki daya tahan atau *durability* (terutama terhadap air) yang lebih baik, dibandingkan material konstruksi lain seperti besi dan kayu, beton juga dapat dengan mudah dicetak menjadi berbagai macam bentuk dan ukuran sesuai dengan desain yang diharapkan (Mehta & Monteiro, 2006). Penggunaan beton juga terus meningkat seiring dengan berjalannya waktu yang ditandai dengan jumlah produksi semen di dunia dalam 1 dekade terakhir mencapai lebih dari 4 miliar ton setiap tahunnya (Garside, 2023; Global Cement and Concrete Association, 2023; International Energy Agency, 2023).

Dengan meningkatnya produksi semen, yang menandakan semakin tingginya konsumsi beton sebagai material konstruksi, lingkungan juga menjadi salah satu elemen yang harus diperhatikan dalam dunia konstruksi. Penggunaan beton dapat berpotensi menyebabkan dampak negatif pada lingkungan, baik dari sisi material penyusunnya maupun pengaplikasian yang tidak bertanggung jawab atas material beton itu sendiri. Penutupan lapisan permukaan tanah dengan beton tanpa pertimbangan yang matang dapat menyebabkan berkurangnya penyerapan air ke dalam tanah, sehingga dapat berpotensi menyebabkan polusi air hingga bencana banjir (Kováč & Sičáková, 2018; Xie et al., 2019). Produksi semen *Portland* (yang merupakan material utama yang berperan sebagai pengikat material lain dalam campuran beton) sendiri dapat menyebabkan pencemaran udara hingga pemanasan global, karena CO<sub>2</sub> yang dilepaskan selama produksinya menyebabkan terjadinya efek rumah kaca. Dalam perkembangannya, selain efisiensi energi dalam proses produksi semen, penggantian sebagian kandungan *clinker* dengan *Supplementary Cementing Material (SCM)* dilakukan untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan (Detwiler et al., 1996; Schneider et al., 2011).

### 2.1 Material Pengganti Semen *Portland*

Semen secara umum dapat didefinisikan sebagai material perekat (*adhesive*) yang memiliki kemampuan mengikat partikel lain, seperti agregat, untuk menjadi suatu material komposit utuh yang baru. Dalam kaitannya dengan dunia konstruksi dan teknik sipil, tipe semen yang digunakan memiliki kandungan utama kalsium yang didapat dari batu kapur (CaCO<sub>3</sub>). Material lain seperti tanah liat yang memiliki kandungan silika dan alumina juga ditambahkan pada proses produksi *clinker*. Oleh karena itu komposisi kimia utama semen terdiri dari kalsium,

silika, alumina, dan ferit yang pada umumnya terbentuk dalam 4 fase utama atau dikenal dengan istilah *alite*, *belite*, *aluminat*, & *ferrite* (Taylor, 1997).

Material pengganti sebagian semen umumnya juga memiliki kandungan kimia yang hampir sama dengan semen *Portland*, sehingga sering disebut sebagai *cementitious material*. Penggunaan material lain untuk menggantikan sebagian semen *Portland* ini pada mulanya dilakukan dengan alasan ekonomi, di mana material pengganti yang digunakan umumnya memiliki nilai ekonomi lebih murah. Hal tersebut karena material pengganti umumnya merupakan material yang tidak (atau sedikit) memerlukan proses lebih lanjut untuk dapat digunakan. Material tersebut dapat berupa material alam maupun material produksi sampingan (*by-product*) bahkan material limbah hasil produksi suatu industri (Neville, 2011). Beberapa material pengganti semen atau *supplementary cementing material (SCM)* yang sering digunakan diantaranya adalah *fly ash*, *ground-granulated blast furnace slag*, *silica fume*, dan *natural pozzolan* seperti *volcanic ash*, *calcined clay* atau *shale*, *diatomaceous earth*, dan *rice husk ash* (Siddique & Iqbal Khan, 2011; M. Thomas, 2013).

## 2.2 Jenis dan Karakteristik Batu Bara



Gambar 2.1 Tingkatan Batubara Berdasarkan Lamanya Tertimbun

Sumber: (Alpha Natural Resources, 2012).

Batu bara merupakan material fosil yang terbentuk dari endapan sedimen organik seperti sisa-sisa tumbuhan yang membusuk. Seperti halnya mineral yang ditemukan dalam batuan, sisa-sisa tumbuhan yang tertimbun mengalami metamorfosis selama jutaan tahun karena adanya tekanan dan suhu tertentu hingga terbentuk berbagai jenis batu bara (Alpha Natural Resources, 2012). Oleh karena proses metamorfosis tersebut, batu bara yang terbentuk terbagi menjadi beberapa tingkatan tergantung suhu, tekanan, dan umur endapan sedimen tersebut. Seperti dapat dilihat pada Gambar 2.1. semakin lama proses metamorfosis yang

terjadi, semakin tinggi tingkatan atau kualitas batu bara yang dihasilkan. Batubara yang terbentuk dapat digolongkan menjadi tipe *lignite*, *subbituminous*, *bituminous*, dan yang paling tinggi adalah *anthracite*.

Di Indonesia, batu bara yang akan dimanfaatkan sebagai bahan bakar PLTU dibagi menjadi 4 (empat) kelompok kualitas sesuai dengan tingkat kadar kalorinya. Kualitas I atau kalori sangat tinggi yaitu untuk batu bara dengan tingkat kalori > 7100 kkal/kg, kualitas II atau kalori tinggi untuk batu bara dengan tingkat kalori > 6100 kkal/kg sampai dengan 7100 kkal/kg, kualitas III atau kalori sedang untuk batu bara dengan tingkat kalori 5100 kkal/kg sampai dengan 6100 kkal/kg, dan terakhir kualitas IV atau kalori rendah di mana tingkat kalorinya < 5100 kkal/kg (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2016).

Berdasarkan *World Energy Council* (2011), produksi mayoritas batu bara di Indonesia pada umumnya mempunyai nilai kandungan kalori sedang, yaitu sekitar 5000 – 7000 kkal/kg. Nilai kandungan kalori tersebut mengindikasikan jenis batu bara yang dihasilkan mayoritas adalah jenis *lignite* dan *sub-bituminous*. *Fly ash* yang dihasilkan dari dua jenis batu bara tersebut cenderung memiliki kandungan CaO yang lebih besar dibandingkan dengan *fly ash* yang dihasilkan dari batu bara tipe *bituminous* dan *anthracite*.

### **2.3 Definisi, Klasifikasi, dan Standardisasi Fly Ash**

Abu terbang atau *fly ash* adalah abu yang dihasilkan pada pembakaran batu bara, di mana partikel yang terbang ditangkap oleh *electrostatic precipitator* dan kemudian dikumpulkan dalam tempat penyimpanan. *Fly ash* sendiri memiliki karakteristik material (baik sifat fisik maupun sifat kimiawi) yang sangat bervariasi, tergantung dari tipe batu bara yang digunakan, proses dan cara pembakaran, serta proses pendinginan yang dilakukan setelah pembakaran (Kutchko & Kim, 2006). Proses pembakaran dengan temperatur yang tinggi memungkinkan kandungan mineral di dalam batu bara dapat teroksidasi, terurai, melebur, hancur, atau menggumpal untuk kemudian menghasilkan partikel-partikel yang bulat dan amorf (*non-crystalline*) (Kutchko & Kim, 2006). Oleh karena itu, *fly ash* yang lebih banyak dimanfaatkan dalam teknologi beton adalah *fly ash* dari sisa pembakaran batu bara pada PLTU, di mana temperatur pembakarannya lebih maksimal dibandingkan pembakaran batu bara pada industri lain. Pada pembakaran batu bara menggunakan *boiler* tipe PCC (*Pulverized Coal Combustion*), temperatur puncak pada tungku dapat mencapai  $1450 \pm 200^\circ\text{C}$  (Sear, 2001). Suhu tersebut lebih tinggi dari titik leleh mayoritas mineral yang terdapat di dalam batu bara, sehingga mengalami berbagai perubahan fisik dan kimia.

Seperti telah dikatakan sebelumnya, tipe *fly ash* yang dihasilkan sangat tergantung dari tipe batu bara yang digunakan dalam proses pembakaran, yang dalam ASTM D388 (2019) diklasifikasikan menjadi *lignite*, *sub-bituminous*, *bituminous*, atau *anthracite*. Secara global, persediaan batu bara yang diketahui untuk tipe *anthracite* dan *bituminous* adalah sebesar 45.6% dan untuk tipe *lignite* dan *sub-bituminous* sebesar 54.4%. Untuk daerah Asia Tenggara sendiri, termasuk di dalamnya Indonesia, persediaan batu bara tipe *lignite* dan *sub-bituminous* jauh lebih besar, yaitu sekitar 65% (World Energy Council, 2016).

*Fly ash* secara umum menurut ASTM C618 (2023) dapat diklasifikasikan menjadi 2 kelas, yaitu kelas F dan kelas C. Klasifikasi yang lain diberikan oleh *Canadian Standard Association* dalam CAN/CSA-A3001-13 (2019), dengan membagi *fly ash* dalam 3 tipe. Perbedaan utama dari ketiga tipe tersebut terletak pada jumlah kandungan *Calcium Oxide* (CaO) dalam *fly ash*. Beberapa standar yang lain seperti *European Standards*, *Australian Standards*, *Chinese Standards*, dan *Japan Standards* juga memberikan klasifikasi pada *fly ash*, namun klasifikasi tersebut lebih berdasar kepada perbedaan nilai LOI (*Loss on Ignition*) dan kehalusan dari butir *fly ash* (*Fineness 45  $\mu$ m Retained*) (Kelly, 2015).

ASTM C618 (2023) membagi *fly ash* menjadi 2 kelas, yaitu kelas F dan kelas C, di mana perbedaannya terdapat pada komposisi kimianya. Hingga tahun 2017, ASTM C618 (2017) membedakan kelas *fly ash* berdasarkan jumlah kandungan  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ , di mana jika lebih besar dari 50%, *fly ash* termasuk dalam kelas C, namun jika lebih dari 70%, maka *fly ash* termasuk dalam kelas F. Sejak tahun 2019 hingga saat ini, ASTM C618 (2023) tidak lagi menggunakan jumlah kandungan  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  untuk membedakan kelas *fly ash*, namun menggunakan kadar CaO sebagai batasan. *Fly ash* dengan kadar CaO lebih dari 18% digolongkan ke dalam kelas C, sedangkan *fly ash* kelas F memiliki kadar CaO 18% atau lebih rendah. Dijelaskan pula dalam standar tersebut bahwa *fly ash* kelas F memiliki sifat *pozzolanic*, sedangkan *fly ash* kelas C selain memiliki sifat *pozzolanic*, juga memiliki sifat *cementitious* karena adanya kandungan CaO yang cukup tinggi. Namun demikian, dalam ASTM C618 (2023) tidak menyebutkan jumlah persentase CaO yang pasti untuk sebuah *fly ash* supaya dapat dikatakan memiliki sifat *cementitious*.

Tabel 2.1

Pembagian Tipe *Fly Ash* dalam *Canadian Standard*

Tipe <i>Fly Ash</i>	Kandungan CaO
<i>Type F</i>	< 8%
<i>Type CI</i>	8 – 20%
<i>Type CH</i>	> 20%

Sumber: CAN/CSA A3001-13

Berbeda dengan ASTM C618 (2023), *Canadian Standard Association* dalam CSA A3001-13 (2019) membagi *fly ash* menjadi tiga tipe dan hanya berdasarkan kandungan CaO dalam *fly ash* seperti dapat dilihat pada Tabel 2.1. Kadar CaO dalam standar tersebut mengklasifikasikan apakah *fly ash* tersebut hanya memiliki sifat *pozzolanic* ataukah juga memiliki sifat *hydraulic (cementitious)*. *Fly ash* yang memiliki kandungan CaO (dalam % berat) tinggi atau lebih dari 20% dapat menghasilkan beton dengan kekuatan yang cukup, bahkan tanpa menggunakan semen (Cross et al., 2005b; Georgiou & Pantazopoulou, 2016).

## 2.4 Pemanfaatan dan Penggunaan *Fly Ash*

### 2.4.1 *Fly Ash* sebagai Material *Pozzolan*

*Pozzolan material* adalah material yang memiliki bentuk atau susunan partikel tidak teratur (*amorphous*) serta memiliki kandungan oksida silika dan alumina. Kandungan oksida tersebut dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida, yang merupakan produk sampingan hasil reaksi hidrasi semen, untuk membentuk kristal yang sama dengan produk hidrasi semen. Kristal yang terbentuk dapat berupa *calcium silicate hydrate (CSH)* maupun *calcium silicate aluminate hydrate (CSAH)* (Kosmatka et al., 2003; Walker & Pavía, 2011).

*Fly ash* sebagai material *pozzolan* telah banyak digunakan sebagai material tambahan dalam industri semen baik sebagai bahan tambahan dalam produksi klinker maupun sebagai pengganti sebagian klinker dalam produksi semen. Pada produksi klinker, *fly ash* dapat menggantikan bahan dasar klinker seperti *clay* dan *shale* hingga sebesar 8% dari total klinker. Sedangkan dalam produksi semen komposit, kandungan *fly ash* paling banyak dapat mencapai 30% dari total semen (Wesche, 2005). Berbeda dengan semen tipe I atau yang biasa kita kenal sebagai OPC (*Ordinary Portland Cement*), semen dengan bahan tambahan *fly ash* ini sering dikenal dengan nama PCC (*Portland Composite Cement*) atau PPC (*Portland Pozzolan Cement*) atau dengan nama dagang yang lain. Dalam SNI 0302 (2014) yang merupakan standar untuk

material semen *Portland pozzolan*, kadar material *pozzolan* dalam semen yang diizinkan berada pada kisaran 6% hingga 40% (dari berat massa). Selain kadar material *pozzolan*, semen *Portland Pozzolan* tersebut juga harus memenuhi syarat kimia maupun syarat fisika yang diatur dalam SNI 0302 (2014). Penambahan *fly ash* ini selain untuk mengurangi dampak lingkungan akibat pelepasan CO<sub>2</sub> yang sangat besar pada proses produksi semen, juga dapat mengurangi panas yang dihasilkan pada saat proses hidrasi karena jumlah klinker yang berkurang dan digantikan dengan *fly ash*.

Dalam produksi beton, khususnya beton *ready mix*, *fly ash* juga sudah banyak digunakan sebagai material *pozzolan* pengganti sebagian semen dengan persentase penggantian sebesar maksimum 25% jika mengikuti rekomendasi dalam SNI 2847 (2019). Manfaat penggunaan *fly ash* dalam campuran beton dapat dibedakan menjadi dua, yaitu pada kondisi beton segar (*fresh properties*) dan pada saat beton telah mengeras (*hardened properties*). Pada kondisi beton segar, penggunaan *fly ash* dapat mengurangi penggunaan air, kemudahan pengerjaan seperti pemadatan, kemampuan untuk mengalir, dan sifat plastis beton meningkat yang berdampak pada peningkatan kemampuan beton untuk dipompa, serta dapat mengurangi terjadinya segregasi dan *bleeding* (Wesche, 2005). Sedangkan pada kondisi beton keras, *fly ash* memiliki kontribusi pada hampir semua aspek karakteristik beton keras. Karena ukuran partikel *fly ash* yang kecil dan bulat, *fly ash* dapat mengisi rongga yang ada pada beton, dan dengan semakin sedikitnya jumlah pori pada beton, maka akan meningkatkan kekuatan beton dan juga *durability* beton (Wesche, 2005). Selain dari sisi sifat fisiknya (bentuk dan ukuran partikel), sifat kimia *fly ash* juga berkontribusi pada kekuatan beton. Sebagai material *pozzolanic*, reaksi *fly ash* tidak terjadi pada 7 hari pertama, namun kontribusi *fly ash* terhadap perkembangan kekuatan beton terjadi pada umur beton setelah 28 hari, dan pada umumnya perkembangan kekuatan dapat terlihat pada umur 91 sampai 360 hari di mana pada saat itu, kandungan kalsium hidroksida sudah hampir habis bereaksi (Sakai et al., 2005).

#### **2.4.2 High Volume Fly Ash Concrete (HVFA)**

Penggunaan *fly ash* sebagai material pengganti semen dalam jumlah yang lebih banyak, yaitu lebih dari 50% dari total *cementitious material* biasa disebut sebagai *high volume fly ash concrete* (Antoni, Widiyanto, et al., 2017; Awanti & Harwalkar, 2016; Crouch et al., 2007; Mehta, 2004). Salah satu potensi keuntungan penggunaan *fly ash* dalam jumlah besar (HVFA) adalah berkurangnya kebutuhan air dalam campuran beton yang mana dapat meningkatkan performa beton secara umum (Mehta, 2004). Berkurangnya kebutuhan air tersebut karena peranan *fly*

*ash* dalam mencegah terjadinya flokulasi semen ketika bertemu air. Selain itu bentuk fisik dari *fly ash* yang berupa bola dan permukaannya yang halus dapat mengurangi gesekan yang terjadi antar partikel sehingga lebih memudahkan partikel untuk bergerak. *Particle packing effect* yang terjadi karena ukuran partikel *fly ash* yang lebih kecil dari semen juga berperan dalam berkurangnya kebutuhan air dalam campuran beton. Dari percobaan yang dilakukan oleh Jiang & Malhotra (2000) dengan menggunakan beberapa sumber *fly ash*, kebutuhan air dalam campuran beton dapat berkurang mulai dari sekitar 9% hingga 19%. Penggunaan *fly ash* dalam jumlah besar juga dapat meningkatkan performa dan karakteristik beton keras khususnya dalam hal ketahanan atau *durability*.

Walaupun penggantian semen dengan material *fly ash* hingga 60 – 70% sudah dapat diterapkan dalam skala produksi massal, namun dalam praktik di lapangan, hingga saat ini belum banyak proyek di Indonesia yang menggunakan *high volume fly ash concrete* ini. Hal tersebut disebabkan baik karena standar atau peraturan mengenai penggunaannya belum ada maupun karena terlalu bervariasinya karakteristik dari *fly ash* itu sendiri yang pada dasarnya merupakan material limbah. Variasi karakteristik *fly ash* tidak hanya bervariasi terhadap sumber atau tempat pengambilan *fly ash*. Pada sumber *fly ash* yang sama, namun waktu pengambilan berbeda, dapat memberikan karakteristik yang berbeda pula (Antoni, Satria, et al., 2017; Antoni, Wibiatma Wijaya, et al., 2016).

### 2.4.3 Fly Ash Based Geopolymer Concrete

Pada tahun 1975, Joseph Davidovits menemukan bahwa metakaolin, yang merupakan salah satu sumber material geologi, dapat bereaksi dengan NaOH menghasilkan produk padat hanya dalam waktu 2 menit (Davidovits, 2008). Istilah *geopolymer* sendiri diciptakan oleh Davidovits sekitar tahun 1976 karena keterlibatan material geologi dalam suatu reaksi kimia yang disebut polimerisasi. Proses polimerisasi melibatkan kandungan silika dan alumina dalam sebuah material yang bereaksi secara kimia dengan larutan alkali dan menghasilkan sebuah rantai polimer yang terdiri dari ikatan Si-O dan Al-O yang saling berbagi ion O yang dirumuskan sebagai berikut (Davidovits, 2008):



Di mana M merupakan elemen alkali seperti kalium dan natrium, n adalah derajat polimerisasi, tanda “-” menandakan adanya ikatan, dan z adalah sebuah nilai 1,2,3 atau lebih, hingga 32.

*Fly ash* sebagai sumber material *aluminosilicate* juga dapat digunakan sebagai material utama dalam pembuatan beton geopolimer yang dalam proses polimerisasinya menggunakan larutan alkali sebagai aktivator untuk mengaktifkan kandungan silika dan aluminanya (Van Jaarsveld et al., 2003). Penggunaan *fly ash* dengan kandungan oksida kalsium tinggi (yang tergolong kelas C berdasarkan ASTM C618) sering kali menjadikan waktu pengikatan beton geopolimer sangat singkat (Topark-ngarm et al., 2014). Sebaliknya, penggunaan *fly ash* kelas F (berdasarkan ASTM C618), yang memiliki kandungan oksida kalsium rendah, dalam pembuatan beton geopolimer justru memerlukan panas agar reaksi polimerisasi dapat berjalan dengan baik (Hardjito & Rangan, 2005).

## 2.5 **Self-Cementing Fly Ash**

*Fly ash* dengan kandungan kalsium yang cukup tinggi (> 20%) atau biasa disebut dengan istilah *high calcium fly ash*, selain memiliki sifat *pozzolanic* juga memiliki sifat *hydraulic* di mana *fly ash* tersebut akan bereaksi dan mengeras ketika bertemu air (Thomas, 2013). Penelitian terkait pemanfaatan *high calcium fly ash* juga telah banyak dilakukan baik sebagai pengganti sebagian semen *Portland* (Liu et al., 2018; Miera et al., 2019) maupun sebagai material beton geopolimer (Antoni, Wijaya, et al., 2016; Topark-ngarm et al., 2014). Dalam bidang *soil stabilization*, pemanfaatan *high calcium fly ash* juga banyak diteliti karena sifat *hydraulic*-nya dapat menggantikan penggunaan semen (Jafer et al., 2018; Mackiewicz & Ferguson, 2005; Ozdemir, 2016). Material *high calcium fly ash* tersebut juga dikenal dengan istilah *self-cementing fly ash* karena memiliki sifat seperti semen *Portland* yang dapat mengeras ketika bertemu dengan air. Penggunaan *self-cementing fly ash* dalam bidang geoteknik telah terbukti dapat meningkatkan kapasitas tahanan (*bearing*) tanah (Ozdemir, 2016) serta mengurangi efek pengembangan volume pada tanah ekspansif (Jafer et al., 2018).

Berdasarkan ASTM D5239 (2012), istilah *self-cementing fly ash* ditujukan untuk *fly ash* yang selain memiliki sifat *pozzolanic*, juga dapat bereaksi secara kimiawi dengan air dan kemudian mengeras melalui proses hidrasi. Dalam pemanfaatannya sebagai material stabilisasi tanah, kemampuan *fly ash* sebagai material *self-cementing* digolongkan ke dalam tiga kategori berdasarkan kekuatan tekannya dalam fase pasta, yaitu *Very self-cementing fly ash* (dengan kuat tekan lebih besar dari 3.45 MPa), *Moderately self-cementing fly ash* (dengan kuat tekan antara 0.70 MPa – 3.45 MPa), dan *non-self-cementing fly ash* (dengan kuat tekan lebih kecil dari 0.70 MPa) (ASTM D5239, 2012). Berbeda dengan konsep kuat tekan beton yang umumnya

merupakan kuat tekan pada umur beton 28 hari, kuat tekan pasta pada ASTM D5239 merupakan kuat tekan pada umur pasta 7 hari.

## 2.6 Beton 100% Fly Ash

Pemanfaatan *self-cementing fly ash* sebagai material pengikat tunggal dalam beton atau beton 100% *fly ash* (tanpa alkali aktivator) belum banyak diteliti. Salah satu penelitian yang memanfaatkan *fly ash* melalui proses hidrasi dan tanpa menggunakan larutan aktivator menunjukkan dapat menghasilkan kuat tekan lebih dari 28 MPa (Berry et al., 2011; Cross et al., 2005a). Kandungan kalsium yang sangat tinggi dalam *fly ash* (bahkan hingga lebih dari 25%) merupakan kunci atau faktor utama untuk dapat terjadinya reaksi hidrasi *fly ash* ketika bertemu dengan air (Berry et al., 2009). Namun demikian, tidak semua *fly ash* yang memiliki kandungan kalsium tinggi (lebih dari 20%) dapat menghasilkan beton dengan kuat tekan minimum (17-20 MPa) yang cukup untuk disebut sebagai beton struktural, bahkan beberapa campuran menghasilkan kuat tekan kurang dari 5 MPa (Roskos et al., 2011).

Kandungan kalsium yang tinggi dalam *fly ash*, selain menjadi kunci utama untuk memberikan sifat *self-cementing*, juga berpotensi menjadi hambatan dalam pemanfaatan *fly ash* tersebut. Reaksi kimia yang terjadi pada saat *fly ash* bertemu air (atau dapat disebut reaksi hidrasi) berjalan dengan sangat cepat sehingga terjadi *flash setting* (Berry et al., 2009). Dalam penelitian tersebut penambahan *borax* (sebagai *set retarder*) ke dalam campuran dilakukan untuk mengatasi masalah *flash setting* yang terjadi. Dosis *borax* yang digunakan sekitar 2.5% dari berat *fly ash* untuk menjaga *initial setting time* beton di kisaran 2.5 jam.

Beton yang memanfaatkan hanya *fly ash* sebagai material pengikat tunggal menunjukkan penggunaan rasio *water-to-cementitious material* yang lebih rendah jika dibandingkan dengan beton yang menggunakan semen *Portland*, yaitu pada kisaran 0.20 hingga 0.24 untuk mendapatkan *slump* 10 – 15 cm (Berry et al., 2009). Penentuan rasio *water-to-cementitious material* lebih didasarkan pada target *workability* beton segar, berbeda dengan *mix design* beton pada umumnya yang mana rasio *water-to-cementitious material* ditentukan sesuai dengan target mutu atau kuat tekan beton yang diharapkan. Kuat tekan beton yang dihasilkan pada umumnya berkisar antara 25 – 30 MPa pada umur 28 hari, namun dapat lebih rendah dan bervariasi tergantung dari sumber *fly ash* (Roskos et al., 2011).

Hubungan kuat tekan dengan sifat mekanis yang lain pada beton 100% *fly ash* menunjukkan adanya perbedaan dengan beton konvensional. Hasil uji kuat tarik beton 100% *fly ash* lebih rendah sekitar 15 – 30% ketika dibandingkan dengan formula hubungan kuat tekan

dengan kuat tarik yang digunakan pada beton konvensional. Sedangkan dari hasil pengujian *stress-strain* didapati untuk nilai *modulus of elasticity* beton 100% *fly ash* masih mendekati nilai hasil perhitungan menggunakan formula yang digunakan untuk memperkirakan *modulus of elasticity* pada beton konvensional (Cross et al., 2005b).

Pengujian beton 100% *fly ash* sebagai material struktural khususnya pada pengujian balok beton bertulang menunjukkan performa yang kurang lebih sama dengan beton yang menggunakan *Portland* semen sebagai material pengikat (Roskos et al., 2015). Dalam hal *durability* atau ketahanan terhadap kondisi lingkungan, beton dengan 100% *fly ash* memiliki ketahanan terhadap *freeze-thaw* yang cukup baik. Demikian pula pada pengujian *Alkali Silica Reactivity (ASR)*, beton 100% *fly ash* menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan beton dengan semen *Portland* (Cross et al., 2008). Beton 100% *fly ash* ini juga telah dibuktikan dapat diaplikasikan pada skala konstruksi dengan metode yang sama pada proses pengecoran beton konvensional pada umumnya (Cross et al., 2005a, 2010).