

PENGARUH SIFAT-SIFAT FISIK DAN KIMIA BAHAN POZOLAN PADA BETON KINERJA TINGGI

Ade Ilham¹

ABSTRACT

High-performance concrete is concrete type resulted from mixing pozzolanic materials into concrete mixture. Materials properties of pozzolan in the form of fine powder, contains high silica and reactivity in a condition. This study uses three type of pozzolan covering fume silica, rice husk ash, and fly ash. Naming of concrete adapted for mixed pozzolan, that is silica fume concrete (SFC), rice husk ash concrete (RHAC), and fly ash concrete (FAC). Materials of concrete mixture use elementary materials (cement, water, coarse aggregate, and fine aggregate) which is equal to air-binder factor between 0.25 - 0.39. The results of indicating that different chemical composition and physical properties of each materials of pozzolan can cause different of fresh concrete, demand of water achieved and also compressive strength reached by SFC, RAHC and FAC.

Keywords : *silica fume, rice husk ash, fly ash, high-performance concrete, high workability, high-strength concrete.*

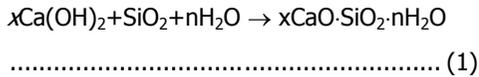
PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi bahan dan konstruksi terus mengalami peningkatan, hal ini tidak terlepas dari tuntutan dan kebutuhan fasilitas infrastruktur yang semakin maju. Fasilitas tersebut menuntut penggunaan bahan-bahan bangunan yang berkualitas tinggi, salah satunya adalah bahan beton. Dalam dua dekade ini telah berkembang dengan pesat jenis beton yang memiliki sifat-sifat unggul, yaitu beton kinerja tinggi (BKT). Ciri-ciri BKT adalah memiliki kecacakan, kekuatan dan durabilitas yang tinggi. Untuk menghasilkan BKT, selain bahan-bahan dasar beton konvensional digunakan juga bahan tambah, seperti bahan tambah mineral dan bahan tambah kimia. Yang termasuk bahan tambah mineral adalah bahan pozolan seperti silika fume, abu sekam padi, abu terbang, slag, metakaolin dan lain-lain, sedangkan yang

termasuk bahan tambah kimia, seperti *superplasticizer, retarder*, dan lain-lain.

Bahan pozolan adalah bahan alami atau bahan tiruan yang mengandung silika tinggi yang bersifat reaktif. Menurut standar ASTM C 618-94a (1993), pozolan ialah bahan yang mempunyai silika atau silika alumina yang memiliki sedikit atau tidak ada sifat semen tetapi apabila dalam bentuk butiran yang halus dan dengan kehadiran kelembaban, bahan ini dapat bereaksi secara kimia dengan Ca(OH)_2 pada suhu biasa untuk membentuk senyawa bersifat semen. Dengan mencampurkan bahan pozolan pada jumlah yang sesuai dengan semen, unsur aktif SiO_2 akan bereaksi secara sekunder dengan Ca(OH)_2 untuk menghasilkan kalsium hidrosilikat. Lea (1970) mengatakan peningkatan kandungan SiO_2 atau $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ akan meningkatkan reaksi pozolan. Menurut Brown (1999), dasar reaksi pozolan adalah sebagai berikut:

¹ Pengajar Jurusan Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta



dengan $0.833 \leq x \leq 1.7$

SiO₂ diperoleh dari sumber silika yang reaktif seperti *silica fume*, abu sekam padi, abu terbang serta bahan pozolan alami yang lain. Pozolan harus berada dalam keadaan yang sangat halus serta amorfus supaya dapat bereaksi dengan Ca(OH)₂ (Mehta, 1986 dan Lee dkk., 1999).

Dalam kajian ini akan dibahas pengaruh bahan-bahan pozolan seperti *silica fume*, abu sekam padi dan abu terbang terhadap sifat-sifat beton segar (kelecekan) dan beton keras pada beton kinerja tinggi.

EKSPERIMEN

Bahan

Bahan-bahan dasar yang digunakan terdiri dari batu pecah jenis batu granit sebagai agregat kasar, pasir sungai sebagai agregat halus, semen Portland, *silica fume* (SF), abu sekam padi (ASP), dan abu terbang (AT). Agregat halus dan kasar berasal dari wilayah Selangor, Malaysia. Semen yang digunakan sesuai standar ASTM C-150 (1993) untuk semen jenis I. Bahan-bahan mineral *silica fume*, abu sekam dan abu terbang digunakan sebagai bahan pozolan. *Silica fume* diperoleh dari pasaran yang dijual secara bebas dalam kemasan 20 kg per sak. Abu sekam yang dihasilkan dengan cara pembakaran yang terkontrol menggunakan tungku

pembakaran yang memenuhi standar BS 3892 (British Standard Institution, 1996). Abu terbang yang digunakan memenuhi syarat yang ditetapkan oleh standar ASTM C 618-94a (1993) sebagai abu terbang kelas F dengan kandungan kapur (CaO) rendah (1.37%). *Superplasticizer* (SP) berbasis *sulfonated naphthalene formaldehyde condensate* dan agen perangkap udara (*air entrained agent/AEA*) digunakan sebagai bahan tambah kimia. Air yang digunakan mempunyai pH 6.9 untuk keperluan campuran beton dan perawatan benda uji.

Gradasi ukuran butir pozolan diukur dengan teknik penembakan sinar lesar menggunakan alat Malvern Versi 2.15. Struktur butiran bahan pozolan diteliti dengan menggunakan *scanning electron micrograph* (SEM). Komposisi kimia semen dan bahan pozolan diperoleh dengan uji *X-ray floreson* (XRF). Fase *amorphus* silika ditentukan dengan menggunakan pengujian *X-ray diffraction* (XRD). Kandungan karbon dideteksi dengan peralatan CHNS-932 *Elemental Analyzer*. Jari-jari pori rata-rata, luas permukaan spesifik (*specific surface area*) dan volume kumulatif diukur dengan porosimeter tipe Pascal 440 yang menggunakan metode penyerapan larutan merkuri. Seluruh pengujian ini dilakukan di Laboratorium Fakultas Teknik, Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia. Hasil-hasil yang didapat yang terdiri dari sifat-sifat fisik bahan ditunjukkan di dalam Tabel 1 dan Tabel 2, sedangkan komposisi kimia semen dan bahan tambah mineral (SF, ASP, dan AT) ditunjukkan di dalam Tabel 3.

Tabel 1. Sifat fisik bahan semen, *silica fume*, abu sekam padi, dan abu terbang

Bahan	Semen	<i>Silica fume</i>	Abu sekam padi	Abu terbang
Jari-jari pori rata-rata, μm	4.85	0.13	0.56	0.16
Berat jenis	3.15	2.23	2.00	2.24
Distribusi butiran median, μm	15.33	8.53	28.78	14.83
Luas permukaan spesifik, m ² /g	89.94	216.0	183.8	78.8
Volume kumulatif, m ³ /g	-	1134.3	1263.3	880.0

Tabel 2. Sifat-sifat fisik agregat, SP dan AEA

Bahan	Agregat kasar	Agregat halus	SP	AEA
Berat jenis	2.61	2.57	1.21	1.02
Penyerapan air, %	0.83	1.82	-	-
Ukuran butir maksimum, mm	19.00	4.75	-	-
Kandungan solid, %	-	-	40-41	7.59

Tabel 3. Komposisi kimia semen dan bahan tambah mineral

Elemen	Semen	<i>Silica fume</i>	Abu sekam	Abu terbang
<i>Silicon diokside</i> (SiO ₂)	19.97	96.57	86.49	57.30
<i>Aluminum oxide</i> (Al ₂ O ₃)	5.39	0.29	0.01	26.05
<i>Ferric oxide</i> (Fe ₂ O ₃)	3.52	0.09	0.91	5.47
<i>Calcium oxide</i> (CaO)	66.14	0.36	0.50	1.37
<i>Magnesium oxide</i> (MgO)	0.45	< 0.01	0.13	0.34
<i>Sodium oxide</i> (Na ₂ O)	0.09	< 0.01	0.05	0.30
<i>Potassium oxide</i> (K ₂ O)	0.52	0.32	2.70	0.50
<i>Phosphorus oxide</i> (P ₂ O ₅)	0.07	0.03	0.69	0.31
<i>Titanium oxide</i> (TiO ₂)	0.26	< 0.01	0.00	1.46
<i>Sulfur trioxide</i> (SO ₃)	-	-	-	-
<i>Mangan oxide</i> (MnO)	0.01	0.01	0.07	0.06
<i>Carbon</i> (C)	0.71	2.19	3.21	2.65
<i>Loss on Ignition</i> (LOI)	3.75	3.37	8.83	3.36

Komposisi campuran bahan beton

Dalam kajian ini digunakan tiga jenis beton kinerja tinggi dengan faktor air-pengikat (W/B) dari 0.25 sampai 0.39 dengan kuat tekan rencana sebesar 50, 60, 70, dan 80 MPa. Beton tersebut terdiri dari beton *silica fume* (BSF), beton abu sekam (BASP), dan beton abu terbang (BAT). Komposisi campuran direncanakan dengan *slump* minimal 180 mm serta kandungan udara antara 1-3%. Komposisi campuran bahan beton diperoleh dengan formula perancangan campuran metode Sherbrooke (*Sherbrooke mix design method*) yang dikembangkan oleh Aitcin (1997). Adapun Komposisi campuran beton yang didapat seperti diperlihatkan dalam Tabel 4.

Pembuatan, pemeliharaan dan pengujian benda uji

Setelah pengadukan dan beton segar tidak mengalami *bleeding* dan segregasi, dilakukan uji kecacakan dengan mengukur nilai *slump* untuk seluruh variasi campuran beton. Selanjutnya beton segar dimasukkan ke dalam cetakan silinder (diameter 100 mm dan tinggi 200 mm) untuk digunakan sebagai benda uji pengujian kuat tekan. Jumlah benda uji untuk setiap variasi campuran sebanyak 3 buah. Cetakan dibuka setelah 24 jam dari pengadukan. Setelah dikeluarkan dari cetakan, benda uji diberi tanda/nama agar tidak tertukar antara satu dengan lainnya dan dimasukkan ke dalam bak air untuk tujuan perawatan basah (*wet curing*). Suhu air ditetapkan sesuai suhu ruang, yaitu antara 23 – 32°C. Pengujian kuat tekan dilakukan berdasarkan standar

ASTM C 39-86 (1993) pada umur 7 dan 28 hari. Proses pembuatan sampai pengujian benda uji dilakukan di Laboratorium bahan

dan struktur, Jurusan Sipil, Universiti Kebangsaan Malaysia.

Tabel 4. Komposisi campuran bahan-bahan beton

Jenis beton	W/B	Air	Semen	Ag. kasar	Ag. halus	SF	ASP	AT	SP	AEA
		Kg/m ³					%			
Kuat tekan rencana 50 MPa										
BSF	0.39	174.0	386.0	1019	675.0	14.20	-	-	0.74	0.03
BASP	0.39	171.7	387.3	1019	681.6	-	12.50	-	0.78	0.04
BAT	0.37	162.6	385.4	1013	724.1	-	-	13.40	0.43	0.03
Kuat tekan rencana 60 MPa										
BSF	0.35	166.0	408.0	1027	665.0	13.40	-	-	0.92	0.03
BASP	0.35	162.7	408.5	1030	670.6	-	11.80	-	1.00	0.04
BAT	0.34	158.8	414.2	1020	701.7	-	-	12.40	0.53	0.03
Kuat tekan rencana 70 MPa										
BSF	0.32	158.0	431.0	1034	653.0	12.60	-	-	1.13	0.03
BASP	0.33	149.9	424.3	1046	693.6	-	7.40	-	1.69	0.04
BAT	0.31	155.5	442.5	1025	681.2	-	-	11.40	0.58	0.03
Kuat tekan rencana 80 MPa										
BSF	0.29	152.0	517.0	1068	643.0	12.30	-	-	1.18	0.04
BASP	0.30	143.6	476.3	1048	678.8	-	6.90	-	2.18	0.04
BAT	0.29	152.4	525.7	1029	661.8	-	-	10.50	0.64	0.03

HASIL DAN PEMBAHASAN

Keleccakan (*Workability*)

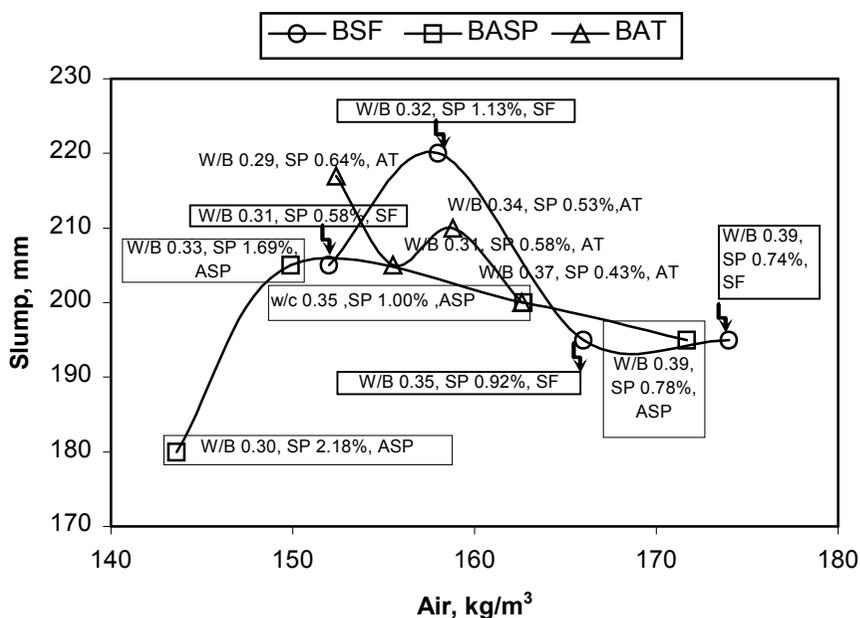
Berdasarkan hasil penelitian, kandungan udara beton untuk semua jenis beton yang diuji mempunyai kandungan udara antara 1.35 sampai 2.20%, hasil ini sesuai dengan yang di dapatkan Aitcin (1997), yaitu kandungan udara BKT berada di antara 1 sampai 3%. Dengan kandungan udara ini, adonan beton segar terlihat sangat memuaskan dengan keleccakan tinggi. Keadaan tersebut tidak terlepas dari peran antara kombinasi air dan *superplasticizer* yang digunakan. Gambar 1 menunjukkan kebutuhan air untuk BSF antara 152-174 kg/m³, sedangkan nilai *slump* yang

dihasilkan antara 195 sampai 220 mm. Kebutuhan air tertinggi terjadi pada BSF dibanding beton yang lain, sedangkan dosis *superplasticizer* berkisar antara 0.74-1.18%. BASP memerlukan jumlah air sebanyak 143.6-171.7 kg/m³. Nilai *slump* untuk BASP yang terjadi berada di sekitar 195-205 mm. Untuk mempertahankan nilai *slump* tersebut, BASP menggunakan dosis *superplasticizer* sebesar 0.78-2.18% dan merupakan penggunaan tertinggi. Penggunaan dosis *superplasticizer* ini terlihat meningkat lebih tinggi pada nilai W/B yang rendah, yaitu pada W/B lebih kecil dari 0.33. Kebutuhan air terendah diperoleh BAT sebesar 158.8-162.6 kg/m³, tetapi nilai *slump* yang terjadi cukup tinggi, yaitu 205-217 mm, sedangkan kebutuhan

superplasticizer terendah untuk seluruh variasi campuran dihasilkan BAT, yaitu berada di bawah 1% dari berat pengikat.

Kebutuhan air tinggi yang terjadi pada BSF disebabkan luas permukaan spesifik dari SF yang besar, yaitu 216 m²/g dibanding 183.8 m²/g untuk butiran abu sekam padi dan 78.8 m²/g untuk butiran abu terbang. Luas

permukaan besar dan ukuran butir yang sangat halus menyebabkan BSF memerlukan air yang banyak. Gambar 2b dengan skala yang sama menunjukkan partikel *silica fume* lebih halus dibanding partikel abu sekam (Gambar 2c) dan abu terbang (Gambar 2d).

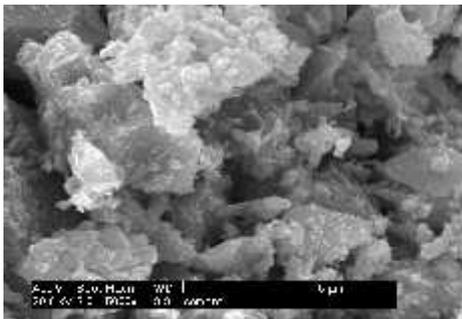


Gambar 1. Hubungan *slump* dan kebutuhan air pada BSF, BASP dan BAT

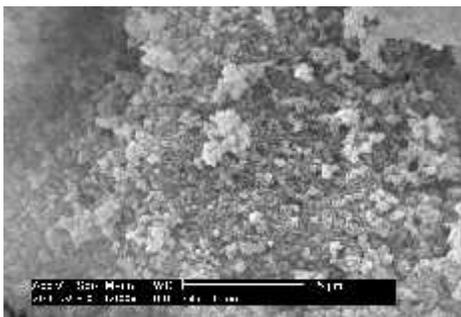
BASP tidak hanya membutuhkan air yang tinggi bahkan membutuhkan dosis *superplasticizer* paling tinggi dibanding beton dengan bahan tambah lain, hal ini sesuai dengan yang diperoleh dari hasil penelitian Sugita dkk. (1992). Ini disebabkan oleh luas permukaannya yang agak besar (hanya 15% lebih kecil daripada luas permukaan *silica fume*). Luas permukaan yang besar ini disebabkan bentuk butiran abu sekam yang porous dan berongga seperti membentuk sel-sel kecil (Gambar 2b). Menurut Mehta (1989), abu

sekam mempunyai ukuran butir sebesar 10-75 μm yang dapat mencapai luas permukaan sampai dengan 50000 m²/g (menggunakan metode penyerapan nitrogen) walaupun butirnya porous dan berongga. Berdasarkan sifat-sifat fisik tersebut, bisa dipahami adanya peningkatan kebutuhan *superplasticizer* lebih tinggi. Selain itu, kandungan karbon yang tinggi pada abu sekam, yaitu sebesar 3.21% (lihat Tabel 3) turut meningkatkan penyerapan air dan mengurangi kelecakan.

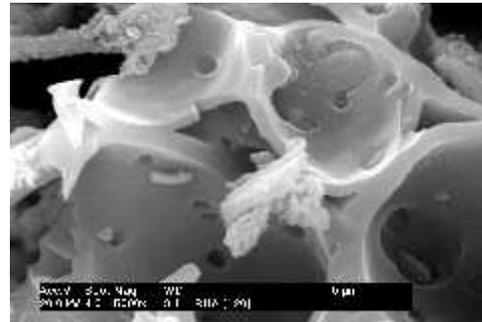
BAT merupakan campuran beton yang memerlukan kandungan air paling rendah serta menghasilkan nilai *slump* lebih tinggi dan stabil. Penggunaan dosis *superplasticizer* adalah yang paling rendah dibanding jenis BSF dan BASP, karena ukuran partikelnya hampir sama besar dengan partikel semen (Gambar 2a). Keunggulan lain adalah butiran abu terbang yang berbentuk bulat seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2d, membantu mengurangi kebutuhan air dan melicinkan pergerakan adonan beton. Pengaruh bentuk bulat butiran abu terbang dan berakibat penggunaan air menjadi rendah ini dinamakan *ball-bearing effect* (Neville 1995).



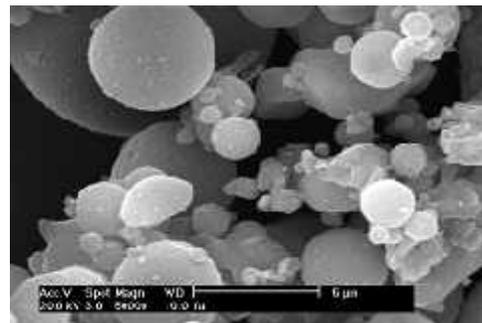
(a) semen



(b) *silica fume*



(c) abu sekam



(d) abu terbang

Gambar 2. Hasil *scanning electron micrograph* (SEM) bahan pozolan

Kuat tekan

Gambar 3 memperlihatkan persentase hasil kuat tekan beton pada umur 7 dan 28 hari. BSF, BASP dan BAT pada umur 7 hari mampu mencapai kuat tekan berturut-turut antara 75-85%, 70-80% dan 60-70% dari kuat tekan rencana umur 28 hari. Sedangkan kuat tekan pada umur 28 hari untuk BSF, BASP dan BAT berturut-turut mencapai antara 100-110%, 90-100% dan 80-90% dari kuat tekan rencana. Khusus untuk BAT dengan kuat tekan rencana 80 MPa hanya mencapai antara 70-80%.

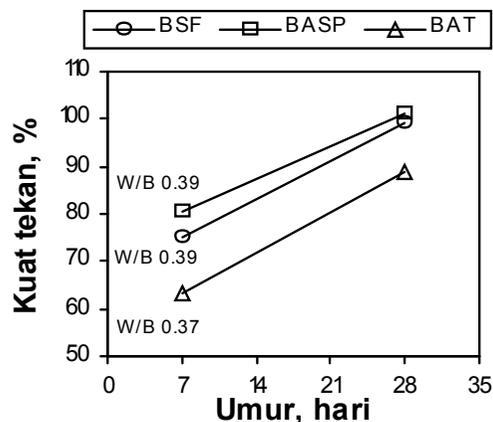
Kuat tekan tertinggi ditunjukkan oleh BSF, hal ini disebabkan oleh pengaruh penggunaan SF yang memiliki kandungan SiO_2 yang tinggi, kandungan karbon yang

rendah, luas permukaan yang besar, saiz partikelnya yang halus dan sifat abu yang amorfus. Sebagaimana yang dinyatakan oleh banyak peneliti, seperti Artigues dkk. (1990), Yueming dkk. (1999), Kuroda dkk. (2000), dan Saifuddin dkk. (2001), bahwa *silica fume* di dalam beton memiliki 2 pengaruh, yaitu sebagai bahan *filler* dan bahan pozolan yang bereaksi secara kimia.

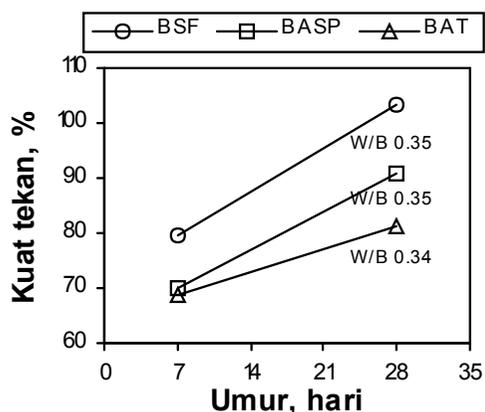
Pengaruh *filler* yang dikenal sebagai faktor fisik memberi andil terhadap kepadatan beton yang terjadi pada tahap awal dimana reaksi kimia masih berlangsung lambat. Ukuran partikel *silica fume* yang sangat halus (0,1-0,2 μm) mengisi ruang-ruang kosong yang berisi air dan Ca(OH)_2 yang terdapat antara agregat dan bahan pengikat serta memasuki sampai ke rongga-rongga yang paling kecil antara agregat dan pasta semen, yaitu daerah pertemuan *agregat-pasta semen*. Daerah ini paling lemah kerana terdapat *wall effect* yang menyebabkan partikel semen portland tidak dapat masuk karena ukuran partikelnya lebih besar. Dengan terisinya daerah pertemuan *agregat-pasta semen* ini, berarti lapisan tersebut mengalami proses penjenuhan (lebih rapat) yang dapat meningkatkan kuat tekan dan impermeabilitas beton.

Fungsi kedua sebagai bahan pozolan, dimana SiO_2 bereaksi dengan Ca(OH)_2 yang merupakan bahan tak berguna (sisa) dari hasil hidrasi semen. Hasil reaksi keduanya menghasilkan kalsium silikat hidrat (CSH) sebagaimana yang dihasilkan hidrasi semen yang memberikan kekuatan pada beton kerasnya. Reaksi tersebut tersebar merata pada seluruh tempat di dalam beton termasuk pada ruang-ruang kosong pada lapisan *agregat-pasta semen*, sehingga menambah kekuatan lekatan antara agregat-pasta semen. Menurut Cook (1986), Mehta (1989), dan Neville (1995), kehalusan *silica fume* juga memberikan tempat untuk melekatnya nuklei dalam jumlah banyak sekaligus memacu proses hidrasi serta menghasilkan penguraian

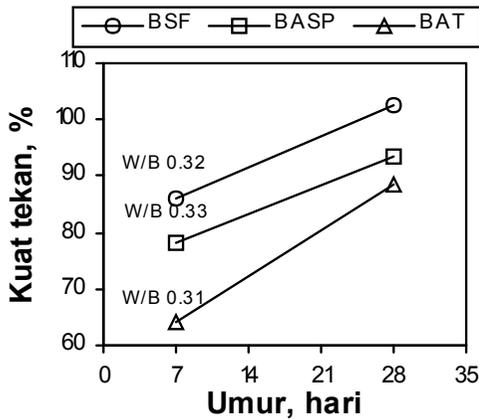
Ca(OH)_2 yang lebih halus. Neville (1995) juga menambahkan, dengan reaksi pozolan tersebut, kandungan Ca(OH)_2 semakin berkurang dan kepadatan lapisan-lapisan *agregat-pasta semen* bertambah. Selain itu, sifat reaktif *silica fume* yang cepat larut dalam larutan Ca(OH)_2 membantu reaksi pozolan ini.



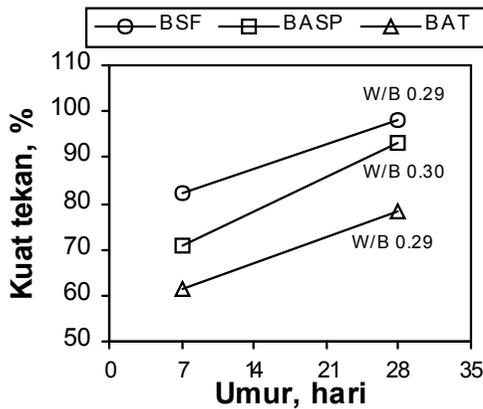
(a) kuat tekan 50 MPa



(b) kuat tekan 60 MPa



(c) kuat tekan 70 Mpa



(d) kuat tekan 80 MPa

Gambar 3. Hubungan kuat tekan yang dicapai dengan umur untuk SF, ASP dan BAT

BASP sudah menunjukkan kinerja yang baik pada umur 7 hari, kuat tekan yang mampu dicapai lebih besar dari 70% terhadap kuat tekan rencana, walaupun lebih kecil dari BSF. Hal ini menunjukkan sifat reaktif yang sangat tinggi dari abu sekam. Kuat tekan yang terjadi lebih rendah dibanding BSF mungkin disebabkan perbedaan tingkat kehalusan butir antara ASP dan SF, dimana diameter butir SF jauh lebih halus dibanding

ASP. Demikian pula dengan kuat tekan pada umur 28 hari mampu mencapai 90-100% dari kuat tekan rencana. Secara umum ASP memiliki luas permukaan yang besar serta kandungan SiO_2 yang tinggi. Luas permukaan yang besar menghasilkan banyak tempat untuk melekatnya nuklei, hal ini menyebabkan Ca(OH)_2 dapat terurai dalam jumlah yang banyak menjadi bentuk CSH. Zhang dkk. (1996) dalam penelitiannya mengatakan bahwa pasta semen dengan campuran abu sekam padi memiliki kandungan Ca(OH)_2 yang rendah. Pengurangan porositas dan kandungan Ca(OH)_2 menyebabkan lapisan daerah pertemuan *agregat-pasta semen* menjadi tipis sekaligus meningkatkan kuat tekan beton. Mehta (1986) juga mengatakan bahwa sifat reaktif abu sekam padi berasal dari luas permukaan spesifiknya yang besar, yang disebabkan bentuk partikelnya yang berongga (seperti pada Gambar 2c) yang dapat mempercepat reaksi. Berdasarkan keadaan ini, ukuran partikel abu sekam padi yang berada dalam interval 1-100 μm mampu memberikan sifat pozolan yang tinggi.

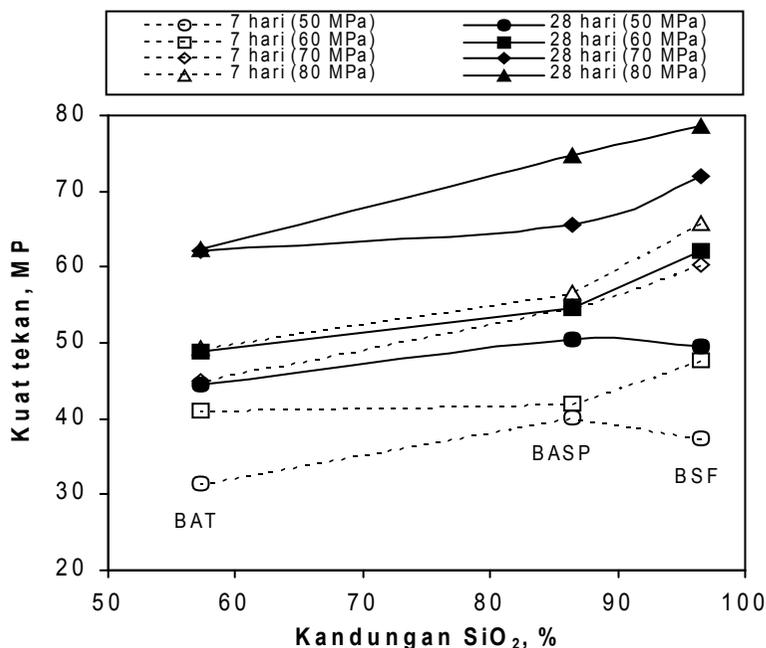
Untuk BAT, banyak peneliti mendapatkan bahwa pada umur awal diperoleh kuat tekan beton yang rendah (Yueming dkk., 1999 dan Saifuddin dkk., 2001). Untuk abu terbang kelas F, setelah selesai pengadukan, reaksi pozolan yang terjadi masih rendah dan memerlukan waktu minimal selama 7 hari. Ukuran partikel abu terbang yang relatif besar menyebabkan proses hidrasi terjadi secara perlahan di dalam medium beralkali hidrasi semen (Khatri dan Sirivatnanon 1995). Selain itu, beberapa peneliti (Yueming dkk., 1999 dan Mehta, 1986) mengatakan bahwa pada beton abu terbang terdapat suatu lapisan yang berkaca, jenuh serta stabil (keadaan kimia) menyelimuti bagian dalam partikel abu terbang yang bersifat porous, berongga, amorfus dan reaktif ini. Lapisan yang terdiri dari Si, Al, dan Ca ini hanya dapat dipecahkan pada pH air pori minimal 13.2 (Khatri dan Sirivatnanon, 1995). Di

dalam pasta semen normal reaksi berjalan perlahan kerana nilai pH yang rendah. Apabila kondisi alkali air pori (kepekatan ion OH^-) memenuhi, proses hidrasi dapat diaktifkan dan lapisan *tipis berkaca silika-alumina* ini menyebarkan menyebabkan luas permukaan dan reaksi dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ meningkat. Hasil hidrasi berbentuk bulat yang menyerupai bentuk partikel abu terbang yang larut secara perlahan-lahan ke dalam pori-pori kapilar kosong dan memadatinya sampai porositas matrik beton menjadi rendah. Berdasarkan sifat-sifat tersebut peningkatan kuat tekan BAT lebih rendah dibanding BASP maupun BSF.

Pengaruh komposisi kimia

Dari Gambar 4 dan Tabel 2 di atas terlihat bahwa beton yang mempunyai kandungan SiO_2 yang tinggi menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi untuk umur 7 dan 28 hari.

BSF menunjukkan kekuatan yang tertinggi diikuti dengan BASP dan terakhir BAT. Abu terbang memiliki komposisi SiO_2 terendah yaitu 57.3%, abu sekam padi sebesar 86.49%, dan *silica fume* memiliki komposisi tertinggi sebesar 96.57%. Beberapa peneliti (Lea, 1970 dan Kuroda, 2000) menyatakan bahwa sifat reaktif bahan pozolan dan kekuatan ikatan pada lapisan *agregat-pasta semen* sangat tergantung kepada komposisi kimia bahan pozolan tersebut. Kuroda (2000) juga menerangkan bahwa peningkatan kekuatan ikatan pada lapisan *agregat-pasta semen* tergantung pada komposisi kimia terutama kandungan SiO_2 dan CaO . Hal ini sesuai dengan hasil kajian ini sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 4, bahwa diperoleh kuat tekan beton yang tinggi pada umur 7 dan 28 hari berdasarkan bahan pozolan dengan kandungan SiO_2 yang tinggi.



Gambar 4. Hubungan antara kuat tekan dengan kandungan SiO_2 .

KESIMPULAN

1. Beton abu sekam padi menghasilkan nilai *slump* paling rendah serta membutuhkan dosis *superlasticizer* yang tertinggi disebabkan bentuk partikel yang porous dan luas permukaan spesifiknya yang besar.
2. Bentuk partikel *silica fume* yang bulat dan sangat halus menghasilkan campuran air lebih tinggi dan *superplasticizer* yang dibutuhkan lebih rendah dibanding abu sekam padi. Dari segi kelecakan beton segar juga lebih baik dibanding beton abu sekam padi.
3. Bentuk partikel abu terbang yang bulat membantu mengurangi kebutuhan air dan SP serta membantu melicinkan pergerakan beton segar. Pengaruh ini dinamakan *ball-bearing effect*.
4. Beton *silica fume* menunjukkan pencapaian kuat tekan melebihi yang direncanakan pada umur 28 hari. Beton abu sekam padi menunjukkan kuat tekan yang tinggi pada umur 28 hari, yaitu melebihi 90-100% dari kuat tekan rencana yang disebabkan kandungan SiO_2 yang tinggi. Sedangkan beton abu terbang hanya mampu mencapai 70-90% dari kuat tekan rencana.
5. Kuat tekan BKT tergantung pada bahan pozolan dengan kandungan SiO_2 yang tinggi. Lebih tinggi kandungan SiO_2 , maka kuat tekan yang dicapai juga lebih tinggi. Berdasarkan hal tersebut, kuat tekan tertinggi berturut-turut dicapai oleh beton *silica fume*, beton abu sekam padi dan beton abu terbang sesuai urutan SiO_2 yang dikandungnya.

DAFTAR PUSTAKA

Aitcin, P.C., 1997, *Sherbrooke mix design method*. Proceedings of the One-Day Short Course on Concrete Technology/High Performance Concrete: Properties and Durability. 9th May, Universiti Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia.

Artigues, J.C., Curado, J., dan Iglesias, E., 1990, *Study of the effectiveness of water reducing additives on concrete with microsilica*, *Admixtures for concrete*, Proceeding of the International Symposium held by RILEM, Barcelona. London: Chapman and Hall, hal. 156-167.

ASTM C 39-86, 1993, *Test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. Annual Book of ASTM Standards: Concrete and Aggregates. Vol. 04.02. American Society for Testing and materials, Philadelphia, USA.

ASTM C 150-92a, 1993, *Standard specification for portland cement*. Annual Book of ASTM Standards. Vol. 04.02. American Society for Testing and materials, Philadelphia, USA.

ASTM C 618-94a, 1993, *Standard specification for fly ash and raw calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in portland cement concrete*. Annual Book of ASTM Standards. Vol. 04.02. American Society for Testing and materials, Philadelphia, USA.

Brown, P., 1999, *Hydration behaviour of calcium phosphates is analogous to hydration behaviour of calcium silicates*. Cement and Concrete Research, Vol. 29, hal. 1167-1171.

BS 3892: Part 2, 1996, *Spesification for pulverized-fuel ash to be used as a type I addition*. *Pulverished-fuel ash*. British Standard Institution. London.

Cook, D.J., 1986, *Natural pozolanas*. Cement replacement materials (Volume 3). Edited by R.N Swamy. London: Surrey University Press, hal. 1-39

Erdođdu, K. dan Türker, P., 1998, *Effects of fly ash particle size on strength of portland cement fly ash mortars*. Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 9, hal. 1217-1222.

Khatri, R.P., dan Sirivatnanon, V., 1995, *Effect of different supplementary*

cementitious materials on mechanical properties of high performance concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 1, hal. 209-220.

Kuroda, M., Watanabe, T., dan Terashi, N., 2000, *Increase of bond strength at interfacial transition zone by the use of fly ash.* Cement and Concrete Research, Vol. 30, hal. 253-258.

Larrard, F.D. dan Aitcin, P.C., 1993, *Apparent strength retrogression of silica fume concrete.* ACI Material Journal, Vol. 90, No. 6, hal. 581-585.

Lea, F.M., 1970, *The chemistry of cement and concrete (3^d edition).* New York: Chemical Publishing Co. Inc, hal. 727.

Lee, S. H., Sakai, E., Daimon, M dan Bang, W. K., 1999, *Characterization of fly ash directly collected from electrostatics preapiterator.* Cement and Concrete Research, Vol. 29, hal. 1791-1797.

Neville, A.M., 1995, *Properties of concrete,* Fourth and Final Edition, Longman Group Limited, Longman House, Burnt Mill, Harlow Essex CM20 2JE, England.

Mehta, P.K., 1986, *Influence of pozzolanic admixtures on the transition zone in concrete.* Proceeding of International Seminar on Durability of Concrete: Aspects of admixtures and industrial by-products, Sweden, April 1986.

Mehta, P.K., 1989, *Rice husk ash as a mineral admixture in concrete.* Proceeding of 2nd International Seminar on Durability of Concrete: Aspects of admixtures and industrial by-products, Gothenburg, Sweden, June 1989, hal. 131-136.

Safiuddin, M., Zain, M.F.M., dan Mahamud, F., 2001, *An experimental study on the durability of high performance concrete,* Proceeding of Seventh International Conference on Concrete Engineering and Technology (CONSET 2001), Shah Alam, Malaysia. hal.150-161.

Sugita, S., Yu, Q., Shoya, M., Tsukinaga, Y., dan Isojima, Y., 1992, *The Resistance of Rice Husk Ash Concrete to Carbonation, Acid Attack, and Chloride Ion Penetration,* Proceeding of the 4th International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolan in Concrete, 1992, Istanbul, hal. 29-43.

Yueming, F., Suhong, Y., Zhiyun, W. dan Jingyu, Z., 1999, *Activation of fly ash and its effect on cement properties.* Cement and Concrete Research, Vol. 29, hal. 467-472.

Zhang, M.H., Lastra, R., and Malhotra, V.M., 1996, *Rice husk ash paste and concrete: Some aspects of hydration and the microstructure of the interfacial zone between the aggregate and paste.* Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 6, hal. 963-677.