

Kekuatan dan Permeabilitas Beton Abu Terbang Volume Tinggi

I Made Alit Karyawan Salain

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana
Jl. Raya Kampus Unud, Jimbaran - Bali, E-mail: imaksalain@unud.ac.id

Abstrak

Tulisan ini menyajikan hasil penelitian tentang properti dari beton abu terbang volume tinggi (ATVT) yang telah mengeras yang dibuat dengan mengganti sebagian semen Portland biasa (SPI) dengan abu terbang kelas C (ATC). Tujuan dari penelitian adalah untuk memeriksa perkembangan kekuatan dan permeabilitas beton ATVT terhadap waktu hidrasi. Tiga campuran beton ATVT, M1, M2, dan M3, dibuat dengan mengganti berturut-turut 40%, 50% dan 60% SPI dengan ATC, dalam perbandingan berat. Satu campuran kontrol, M0, dibuat dengan menggunakan 100% SPI. Proporsi campuran beton yaitu 1,0 perekat : 2,0 agregat halus : 3,0 agregat kasar dengan faktor air perekat sebesar 0,3. Pada setiap campuran ditambahkan 1,5% superplastisizer dari berat perekat. Uji yang dilaksanakan menyangkut kuat tekan, kuat tarik belah, dan permeabilitas pada umur 28, 56, dan 90 hari. Hasil uji menunjukkan bahwa kuat tekan, kuat tarik belah, dan impermeabilitas meningkat secara gradual dengan waktu hidrasi dan mampu mencapai yang dihasilkan oleh M0, terutama untuk campuran M1, setelah umur 90 hari. Mengacu pada hasil uji kuat tekan pada umur 28 hari, campuran beton ATVT tersebut dapat dipergunakan sebagai beton struktural.

Kata-kata Kunci: Abu terbang kelas C, kuat tekan, kuat tarik belah, permeabilitas.

Abstract

This paper presents the result of research concerning the harden properties of high volume abu terbang (HVFA) concrete created by substituting ordinary Portland cement (OPC) with Class C fly ash (CFA). The goals of the research is to verify the strength and permeability evolution of the HVFA concrete with hydration time. Three HVFA concrete mixtures, M1, M2, and M3, were created by substituting OPC, by weight, with 40%, 50%, and 60% of CFA, successively. One control mixture, M0, was created by utilizing 100% OPC. The mix proportion of concrete was 1.0 binder : 2.0 fine aggregate : 3.0 coarse aggregate, and the water-binder ratio was 0.3. In each mixture, it was added 1.5% superplasticizer by binder weight. Tests conducted regarding compressive strength, splitting tensile strength and permeability at the age of 28, 56, and 90 days. The results show that the compressive strength, the splitting tensile strength and the impermeability of HVFA concrete improve gradually with hydration time and could reach those of M0, especially for M1 mixture, after 90 days of hydration. Based on the compressive strength test results at 28 days, the HVFA concrete mixtures could be used for structural concrete.

Keywords: Class C fly ash, compressive strength, permeability, splitting tensile strength.

1. Pendahuluan

Semen Portland adalah perekat hidrolik yang umum dipergunakan sebagai bahan pengikat dan penyatu agregat dalam pembuatan beton. Penggunaan semen Portland sebagai bahan bangunan semakin meningkat dewasa ini. Menurut Armstrong (2020) dari *The Global Cement Report*TM konsumsi semen dunia pada tahun 2019 meningkat 2,8% mencapai 4,08 milyar ton, dengan konsumsi rata-rata perkapita mencapai 521 kg. Di Indonesia, mengacu Garside (2020), produksi semen sebesar 65 juta ton pada tahun 2015 meningkat 15,7% pada tahun 2018 menjadi 75,2 juta ton dan diperkirakan menjadi 74 juta ton pada tahun 2019. Tingkat produksi ini nampaknya cenderung bertambah sesuai dengan perkembangan pembangunan infrastruktur yang diperlukan oleh masyarakat. Namun demikian telah disadari belakangan ini bahwa industri semen telah mempergunakan sumber daya alam dengan begitu massif sehingga berpengaruh terhadap turunnya kualitas lingkungan. Fenomena ini berhubungan dengan aktivitas penggalian bahan baku utama semen

Portland yaitu batuan kapur dan tanah liat serta pelepasan gas CO₂ ke udara, yang merupakan gas rumah kaca, dalam tahapan produksinya. Menurut Mehta dan Meryman (2009), Benhelal dkk (2013), Zhang dkk (2018) maupun Andrew (2019) industri semen telah menyumbangkan sekitar 4%-7% dari total emisi gas CO₂ ke atmosfer. Selain itu, semakin tinggi kualitas beton yang dibuat, karena tuntutan teknis, maka diperlukan kuantitas semen Portland yang semakin tinggi. Hal ini mengakibatkan jumlah emisi gas CO₂ yang dibebaskan ke udara juga semakin tinggi. Kondisi ini pada akhirnya akan mempengaruhi ketersediaan sumber daya alam serta meningkatnya temperatur bumi akibat pengaruh gas rumah kaca.

Berbagai upaya telah dilakukan oleh para ahli, pengusaha maupun pelaku industri jasa konstruksi untuk mengurangi dampak ini, salah satunya dengan pengembangan semen Portland pozolan. Berdasarkan SNI 15-0302 (2004), disebutkan bahwa tipe semen ini dapat dibuat dengan menghaluskan secara bersama-sama terak semen Portland dengan pozolan, atau

dengan menggabungkan secara homogen serbuk semen Portland dengan serbuk pozolan, atau kombinasi dari menghaluskan serta menggabungkan kedua material tersebut. Dalam standar tersebut ditentukan bahwa kandungan pozolan dalam tipe semen ini berada dalam rentang 6%-40% dari beratnya. Umum diketahui bahwa hidrasi semen Portland pozolan menghasilkan panas yang lebih sedikit, mudah pengerjaannya dan mampu menghasilkan properti fisik, mekanik dan keawetan yang lebih tinggi dibandingkan dengan semen Portland biasa.

Pozolan merupakan bahan mineral yang mengandung terutama silika (Si-O_2) dan alumina (Al_2O_3) yang tidak mempunyai kemampuan sebagai bahan perekat, namun jika digiling hingga ukuran butirannya seperti semen mampu bereaksi, pada suhu ruang dan adanya air, dengan kapur dan menghasilkan senyawa perekat kalsium silikat hidrat C-S-H serta kalsium aluminat hidrat C-A-H, sejenis dengan produk hidrasi semen Portland. Dipahami bahwa, dua mineral utama yang ada pada semen Portland, trikalsium silikat C3S dan dikalsium silikat C2S, bila bereaksi dengan air memproduksi C-S-H dan kalsium hidroksida Ca(OH)_2 yang disebut kapur bebas (portlandite). Menurut Lea (1970), Mehta (1986), Neville dan Brooks (1998), kontribusi kapur bebas terhadap kekuatan pasta semen hidrat sangat rendah dan malahan cenderung tidak baik dari sudut pandang durabilitas, karena mampu menghasilkan senyawa ekspansif jika sampai bereaksi dengan unsur sulfat. Dengan menghaluskan/menggabungkan terak/bubuk semen Portland dengan pozolan, kalsium hidroksida yang diperoleh melalui reaksi semen Portland dengan air selanjutnya akan bereaksi dengan silika dan alumina dari pozolan. Reaksi ini yang dikenal dengan sebutan reaksi pozolanik yang memproduksi senyawa bersifat perekat generasi tahap kedua dalam bentuk C-S-H serta C-A-H.

Salah satu jenis pozolan yang umum dipergunakan dalam pembuatan semen Portland pozolan yaitu abu terbang. Abu terbang merupakan residu heterogen yang diperoleh dari pembakaran batu bara pada pembangkit listrik. Penggunaan abu terbang dalam teknologi beton, sebagai bahan pembuat semen, bukanlah merupakan hal yang baru dan bahkan menjadi lebih populer dewasa ini. Hal ini, seperti disebutkan Lea (1970) terkait dengan sifat pozolanik dan atau sifat perekat dari residu industri tersebut yang tergantung dari jenis batu bara yang dipergunakan dalam pembangkit listrik. ASTM C 618 (1985) mengklasifikasi abu terbang menjadi 2 berdasarkan jumlah relatif kandungan konstituen kimia utamanya yaitu abu terbang kelas C dan abu terbang kelas F. Abu terbang yang mengandung jumlah oksida silika, aluminium dan besi ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) paling sedikit 50% tetapi kurang dari 70% diklasifikasikan sebagai kelas C. Jika jumlah dari ketiga oksida tersebut minimal 70%, abu terbang diklasifikasikan sebagai kelas F. Abu terbang kelas F, yang diperoleh dari pembakaran antrasit atau batubara bituminous, memiliki sifat pozolanik sedangkan abu terbang kelas C, yang didapat dari pembakaran lignit atau batubara sub-bituminous, karena kandungan CaO -nya, secara bersamaan memiliki sifat pozolanik dan sifat perekat.

Sifat perekat abu terbang kelas C yang dimiliki abu ini memungkinkan abu terbang ini bereaksi dengan air membentuk senyawa perekat dan mengeras sampai tingkat kekerasan tertentu. Untuk kebutuhan praktis, penggunaan abu terbang sebagai pengganti sebagian semen Portland biasanya berkisar antara 15%-20% dari total berat bahan pengikat. Namun, ini hanya berguna untuk meningkatkan kemampuan kerja dan mengurangi biaya produksi beton. Untuk meningkatkan keawetan beton, penggunaan abu terbang umumnya ditingkatkan menjadi sekitar 25%-35%.

Dengan kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi, belakangan ini telah dikembangkan teknologi beton abu terbang volume tinggi (ATVT) dengan memanfaatkan 50% atau lebih abu terbang sebagai pengganti sebagian semen Portland. Mengacu pada Malhotra dan Mehta (2002), karakter dasar dari beton ATVT yaitu beton yang mempergunakan paling sedikit 50% abu terbang dari berat total bahan perekat, sedikit air pengaduk, umumnya kurang dari 130 kg/m^3 dan umumnya diinginkan pemakain semen tidak lebih dari 200 kg/m^3 .

Banyak penelitian terkait beton ATVT telah dilakukan para peneliti dan praktisi. Siddique (2004) mempelajari pengaruh substitusi semen dengan 40%-50% abu terbang kelas F terhadap sifat beton. Ditemukan bahwa penggunaan abu terbang kelas F dalam beton mengurangi kekuatan 28 hari serta ketahanan abrasi beton. Namun, dalam jangka panjang diperoleh bahwa properti ini menunjukkan perkembangan yang kontinu dan signifikan. Crouch dkk (2007) membandingkan dua campuran ATVT yang menggunakan 50% abu terbang (kelas C dan kelas F) dengan campuran yang menggunakan 20%-25% abu terbang dari kelas yang sama. Hasil kajian menunjukkan bahwa kekuatan dan impermeabilitas beton ATVT sama atau lebih tinggi dari beton yang menggunakan persentase abu terbang yang lebih kecil. Salain dkk (2011) mengkaji pemanfaatan abu terbang kelas F sebagai pengganti semen Portland dalam pembuatan beton. Rentang penggantian semen Portland yang dikaji sebesar 50%-60%. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan abu terbang sejumlah 50%, 55%, dan 60% untuk mengganti semen Portland dapat menghasilkan kuat tekan sebesar 37,5 MPa, 32,1 MPa, dan 30,5 MPa pada umur 90 hari. Hasil ini setara dengan 105%, 90% dan 85% dari kemampuan beton dibuat dengan hanya mempergunakan perekat berupa semen Portland. Volz dkk (2013) meneliti sifat pengerasan beton ATVT menggunakan substitusi 70% semen Portland dengan abu terbang. Mereka menemukan bahwa kinerja beton ATVT sebanding dengan beton konvensional. Rashad dkk (2014) mempelajari pengaruh *silica fume* (SF) dan terak tanur tinggi terhadap kuat tekan dan ketahanan abrasi pada beton ATVT. Dalam hal ini sebagian semen Portland diganti dengan 70% abu terbang kelas F. Disebutkan bahwa ketahanan abrasi yang lebih tinggi ditemukan pada beton ATVT yang dicampur dengan SF atau kombinasi yang sama dari SF dan terak tanur tinggi (TTT), sementara ketahanan abrasi yang lebih rendah tercatat pada beton ATVT yang dicampur hanya dengan TTT.

Hasil-hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa penggunaan abu terbang dengan volume tinggi, umumnya dari jenis kelas F, dalam campuran meningkatkan sifat mekanik dan ketahanan beton ATVT dibandingkan dengan beton konvensional. Namun, dalam penelitian tersebut terlihat bahwa kinerja dari beton ATVT sangat bervariasi. Tampaknya hal itu sangat tergantung pada kelas dan sifat abu terbang yang digunakan. Oleh karena itu, tentunya masih menarik untuk merealisasikan penelitian tentang pemanfaatan abu terbang dalam volume tinggi yang dipergunakan dalam pembuatan beton, mengingat sifat fisika dan kimia abu terbang, seperti disebutkan oleh Salain dkk (2001), Crouch dkk (2007), Anggarwal dkk (2010), dari berbagai sumber dan bahkan dari pembangkit yang identik namun periode pengambilan yang berlainan, sangat bervariasi.

Terkait dengan hal itu, pada penelitian ini dilakukan pengujian properti beton ATVT yang telah mengeras dengan memanfaatkan abu terbang kelas C untuk mensubstitusi secara parsial semen Portland biasa. Tiga buah campuran beton ATVT telah dibuat dengan masing-masing campuran mempergunakan 40%, 50%, dan 60% abu terbang kelas C sebagai pengganti semen Portland biasa. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk memeriksa perkembangan kekuatan dan permeabilitas beton ATVT pada usia hidrasi 28, 56, dan 90 hari dibandingkan dengan beton kontrol yang dibuat dengan hanya menggunakan SPI.

2. Bahan dan Metode

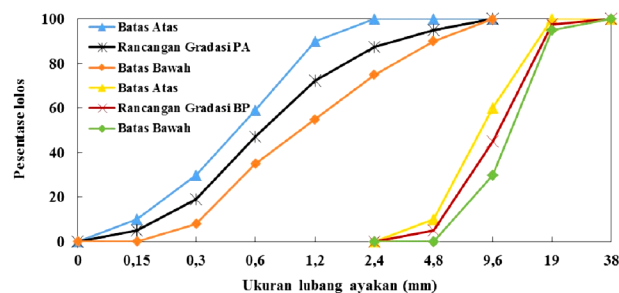
2.1 Bahan

Bahan perekat yang dipergunakan pada adukan beton ATVT yaitu campuran semen Portland biasa (SPI) dengan abu terbang, kecuali pada beton kontrol yang hanya mempergunakan SPI. Abu terbang diperoleh dari salah satu pembangkit listrik di Jawa Timur, sedangkan SPI dibeli dari *supplier* bahan bangunan. Pada **Tabel 1** ditampilkan komposisi oksida utama dari SPI dan abu terbang. Mengacu pada ASTM-C618 (1985) dan memperhatikan kandungan oksida kalsium (CaO) di dalamnya, abu terbang tersebut termasuk dalam kelas C (ATC).

Sebagai agregat halus dan agregat kasar dipergunakan berturut-turut pasir alami (PA) dan batu pecah (BP). Distribusi butiran dari PA serta BP untuk setiap adukan beton dirancang mengacu pada SNI 03-2834 (2000) sehingga sesuai dengan kriteria gradasi Zona 2 untuk agregat halus serta butiran dengan diameter maksimum 20 mm untuk agregat kasar. Dengan rancangan ini, modulus kehalusan untuk PA dan BP masing-masing yaitu 2,74 dan 6,55. Pada **Gambar 1** diperlihatkan rancangan kurva gradasi dari PA dan BP terhadap

Tabel 1. Komposisi kimia dari SPI dan ATC

Oksida	SPI	ATC
Al ₂ O ₃ (%)	6,2	8,0
CaO (%)	61,5	24,9
SiO ₂ (%)	28,4	22,1
Fe ₂ O ₃ (%)	0,6	38,9



Gambar 1. Rancangan kurva gradasi PA dan BP terhadap standar

Tabel 2. Properti fisik dari PA dan BP

Agregat	Berat Volume (g/cm ³)	Berat Jenis	Abrasi (%)	Penyerapan (%)
PA	1,45	2,5	-	2,8
BP	1,43	2,7	22,2	0,8

standar, sedangkan pada **Tabel 2** ditampilkan properti fisiknya.

Untuk mencampur beton dipergunakan air yang bersumber dari saluran PDAM, sedangkan untuk superplastisizer (SP) dipergunakan tipe modifikasi *naphthalene formaldehyde sulfonate* yang dibeli dari *supplier* khusus *admixture* beton. Tipe ini merupakan jenis *admixture* Tipe F yang dapat mereduksi jumlah air pengaduk beton dengan dosis tinggi, mengacu pada ketentuan ASTM C 494-92 (1994).

2.2 Metode

2.2.1 Proporsi campuran

Dalam penelitian ini dibuat 4 (empat) campuran adukan beton yang terdiri dari 3 (tiga) campuran beton ATVT, dinamakan M1, M2, dan M3, dan 1 (satu) campuran beton kontrol, dinamakan M0. Tiga campuran beton ATVT M1, M2, dan M3 dibuat dengan mengganti berturut-turut 40%, 50%, dan 60% berat dari SPI dengan ATC, sedangkan beton kontrol M0 dibuat dengan menggunakan perekat 100% SPI.

Proporsi bahan pembuat beton meliputi perekat, agregat halus, agregat kasar, faktor air perekat (fap) maupun kandungan SP ditetapkan konstan untuk setiap campuran. Proporsi, dalam perbandingan berat, dari perekat: agregat halus: agregat kasar ditetapkan sebesar 1:2:3, dengan fap sebesar 0,3. Dalam setiap adukan ditambahkan SP sebesar 1,5% dari berat perekat. Perekat pada beton ATVT merupakan campuran dari SPI dan ATC, sedangkan pada beton M0 hanya menggunakan SPI. Untuk setiap adukan beton dipergunakan fap sebesar 0,3 dan SP/perekat sebesar 1,5% dalam adukan ditujukan untuk memastikan terjadinya reaksi hidrasi perekat secara optimal serta untuk memperoleh, secara simultan, adukan dengan konsistensi yang memadai. Secara lengkap, komposisi bahan pembuat beton untuk setiap campuran ditampilkan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Proporsi campuran

Bahan	Campuran			
	M0	M1	M2	M3
SPI (kg/m ³)	395	237	197,5	158
ATC (kg/m ³)	0	158	197,5	237
PA (kg/m ³)	790	790	790	790
BP (kg/m ³)	1185	1185	1185	1185
Air (kg/m ³)	118,5	118,5	118,5	118,5
SP (kg/m ³)	5,925	5,925	5,925	5,925
Total perekat (kg/m ³)	395	395	395	395
Air/perekat	0,3	0,3	0,3	0,3
SP/perekat (%)	1,5	1,5	1,5	1,5

2.2.2 Pembuatan benda uji

Proses pencampuran adukan beton untuk setiap campuran dilaksanakan dengan cara yang identik untuk menghasilkan adukan dengan homogenitas yang sama. Terlebih dahulu agregat dicampur dalam *mixer* selama 2 menit. Selanjutnya, tiga perempat bagian dari air pengaduk dimasukkan ke dalam *mixer* dan diaduk kembali selama 3 menit. Akhirnya superplastisiser dan sisa air pengaduk ditambahkan ke dalam *mixer* dan adukan diaduk lagi selama 3 menit hingga adukan menjadi homogen.

Selesai mencampur adukan beton dalam *mixer*, adukan untuk setiap campuran kemudian dipergunakan untuk mencetak benda uji silinder berukuran diameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Setelah adukan dimasukkan ke dalam cetakan dalam 3 tahap, dipadatkan serta

diratakan permukaannya, benda uji kemudian dibiarkan selama 1 hari dalam cetakannya dan setelahnya baru dibuka dari cetakannya. Selanjutnya benda uji ditempatkan di dalam bak perendaman untuk dirawat di dalam air hingga sampai saatnya dipergunakan untuk uji kuat tekan dan permeabilitas. Pada **Gambar 2** ditampilkan dokumentasi dari pembuatan dan perawatan benda uji silinder.

2.2.3 Properti beton keras

Properti beton keras, meliputi kuat tekan, kuat tarik belah, dan permeabilitas terhadap air, ditentukan dengan mempergunakan benda uji silinder. Uji untuk ketiga properti ini dilaksanakan pada saat benda uji berumur 28, 56, dan 90 hari, dengan mempergunakan 3 benda uji untuk setiap jenis pengujian. Pada **Gambar 3** ditampilkan dokumentasi pelaksanaan uji kuat tekan, kuat tarik belah, dan permeabilitas.

Uji kekuatan dilaksanakan mengacu pada ketentuan SNI 03-1974 (1990) untuk kuat tekan dan SNI 03-2491 (2002) kuat tarik belah. Uji permeabilitas benda uji terhadap air dilaksanakan dengan mempergunakan alat uji permeabilitas beton dengan 3 sel individu.

3. Hasil dan Diskusi

3.1 Hasil

3.1.1 Kuat tekan

Hasil uji kuat tekan yang telah dilaksanakan pada umur 28, 56, dan 90 hari untuk setiap campuran diperlihatkan pada **Gambar 4**. Nilai ini merupakan nilai



Gambar 2. Pembuatan benda uji silinder



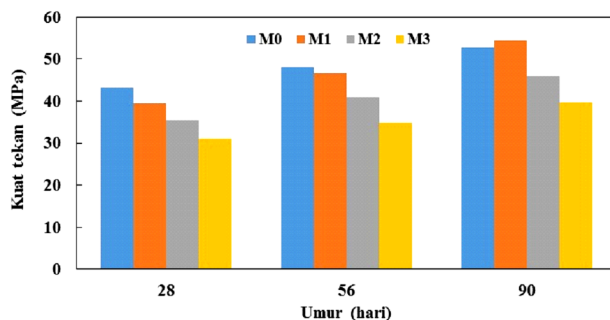
Gambar 3. Pelaksanaan uji kuat tekan (a), kuat tarik belah (b), dan permeabilitas (c)

rata-rata dari 3 benda uji silinder. Mengacu pada gambar tersebut tampak bahwa kuat tekan beton pada setiap campuran meningkat dengan meningkatnya waktu hidrasi. Dari umur 28 hari ke 56 hari, kuat tekan dari beton campuran M0, M1, M2, dan M3 meningkat berturut-turut sebesar 11%, 18%, 16%, dan 12% dan dari umur 28 hari ke 90 hari meningkat berturut-turut sebesar 22%, 38%, 30%, dan 28%. Dapat dicatat dengan jelas bahwa persentase peningkatan kuat tekan yang terjadi pada beton ATVT (M1, M2, dan M3) lebih tinggi dibandingkan dengan pada beton kontrol M0.

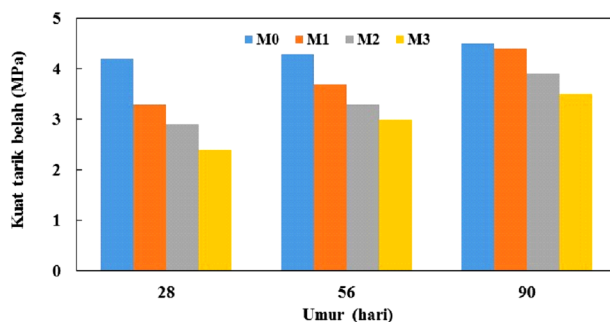
Selanjutnya, dari **Gambar 4** tersebut dapat juga dilihat bahwa penggantian sebagian dari berat SPI dengan ATC dalam adukan beton mengakibatkan turunnya kuat tekan beton ATVT (M1, M2, dan M3) pada umur 28 hari dibandingkan dengan beton kontrol M0. Pada umur hidrasi tersebut kuat tekan dari M1, M2, dan M3 hanya sekitar 91%, 82%, dan 72% dari kuat tekan dari beton kontrol M0. Namun demikian, jelas terlihat bahwa dengan bertambahnya usia hidrasi, kuat tekan dari M1, M2, dan M3 meningkat dan menjadi berturut-turut 103%, 87%, dan 75% dari yang dihasilkan beton kontrol, pada umur 90 hari. Pada periode hidrasi ini, tercatat bahwa kuat tekan dari beton ATVT M1 bahkan mampu sedikit melampaui kuat tekan yang dihasilkan oleh beton kontrol.

3.1.2 Kuat tarik belah

Nilai rata-rata dari hasil uji kuat tarik belah pada umur 28, 56, dan 90 hari diilustrasikan pada **Gambar 5**. Dari ilustrasi tersebut, seperti halnya fenomena yang telah diamati pada kasus kuat tekan, terlihat bahwa kuat tarik



Gambar 4. Perkembangan kuat tekan M0, M1, M2, dan M3 pada berbagai umur uji



Gambar 5. Perkembangan kuat tarik belah M0, M1, M2, dan M3 pada berbagai umur uji

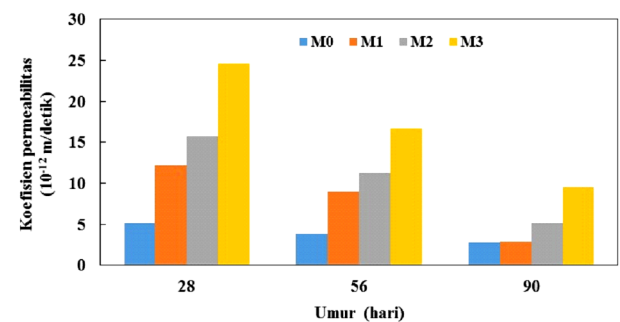
belah juga meningkat pada semua campuran beton dengan bertambahnya usia hidrasi. Dari umur 28 hari ke 56 hari, kuat tarik belah dari beton campuran M0, M1, M2, dan M3 meningkat berturut-turut sebesar 2%, 12%, 14%, dan 25% dan dari umur 28 hari ke 90 hari meningkat berturut-turut sebesar 7%, 33%, 34%, dan 46%. Hasil ini juga menunjukkan dengan jelas bahwa persentase peningkatan kuat tarik belah pada beton ATVT (M1, M2, dan M3) lebih tinggi dibandingkan dengan pada beton kontrol M0.

Dari **Gambar 5** juga dapat dilihat dengan jelas bahwa penggunaan ATC sebagai pengganti sebagian dari berat SPI berdampak pada menurunnya kuat tarik belah dari beton ATVT M1, M2, dan M3 pada umur 28 hari. Pada periode hidrasi ini kuat tarik belah dari M1, M2, dan M3 berturut-turut sebesar 79%, 69%, dan 57% dari kuat tarik belah benda uji kontrol. Meskipun demikian, dapat dilihat dengan jelas bahwa dengan bertambahnya usia hidrasi, kuat tarik belah dari M1, M2, dan M3 meningkat dan mencapai berturut-turut 98%, 87%, dan 78% dari yang dihasilkan beton kontrol, setelah umur hidrasi 90 hari. Pada periode hidrasi ini, dicatat bahwa kuat tarik belah dari beton ATVT M1 hampir menyamai kuat tarik belah yang dihasilkan oleh beton kontrol.

3.1.3 Permeabilitas

Nilai rata-rata permeabilitas terhadap air dari 3 benda uji silinder pada umur 28, 56, dan 90 hari untuk setiap campuran beton ditampilkan pada **Gambar 6**. Uji yang dilaksanakan menunjukkan bahwa koefisien permeabilitas dalam semua campuran berkurang dengan bertambahnya waktu hidrasi. Dari umur 28 hari ke 56 hari, kuat tekan dari beton campuran M0, M1, M2, dan M3 berkurang berturut-turut sebesar 24%, 26%, 29%, dan 32% dan dari umur 28 hari ke 90 hari berkurang berturut-turut sebesar 45%, 76%, 68%, dan 61%. Terlihat dengan jelas bahwa persentase pengurangan koefisien permeabilitas yang terjadi pada beton ATVT (M1, M2, dan M3) lebih tinggi dibandingkan dengan pada beton kontrol M0.

Lebih lanjut, dari **Gambar 6** tersebut dapat dilihat bahwa penggantian sebagian dari berat SPI dengan ATC dalam adukan beton mengakibatkan meningkatnya permeabilitas dari beton ATVT (M1, M2, dan M3) pada umur 28 hari. Pada umur hidrasi ini, koefisien permeabilitas dari M1, M2, dan M3 berturut-turut sebesar 239%, 308%, and 482% dari koefisien



Gambar 6. Perkembangan permeabilitas M0, M1, M2, dan M3 pada berbagai umur uji

permeabilitas benda uji kontrol. Namun demikian, dapat dicermati bahwa dengan bertambahnya waktu hidrasi, koefisien permeabilitas dari M1, M2, dan M3 berkurang dan mencapai berturut-turut 104%, 182%, dan 339% dari yang dihasilkan beton kontrol, setelah umur hidrasi 90 hari. Pada umur hidrasi ini, tercatat bahwa koefisien permeabilitas dari beton ATVT M1 relatif sama dengan koefisien permeabilitas yang dihasilkan oleh beton kontrol M0.

3.2 Diskusi

Hasil uji kuat tekan, kuat tarik belah, serta permeabilitas dari beton yang disiapkan baik dengan menggunakan 100% SPI maupun yang menggunakan perekat dengan mengganti sebesar 40%-60% SPI dengan ATC memperlihatkan perkembangan yang serupa yaitu kuat tekan dan kuat tarik belah meningkat dan permeabilitas berkurang dengan meningkatnya waktu hidrasi. Kecenderungan yang sama juga telah disampaikan oleh Siddique (2004), Crouch dkk (2007), dan Salain, dkk (2011). Tercatat bahwa dari umur hidrasi 28 hari ke 90 hari kuat tekan M0, M1, M2, dan M3 meningkat berturut-turut sebesar 22%, 38%, 30%, dan 28%, kuat tarik belah meningkat berturut-turut sebesar 7%, 33%, 34%, dan 46%, dan koefisien permeabilitas berkurang berturut-turut sebesar 45%, 76%, 68%, dan 61%. Perbaikan dari properti mekanik dan fisik ini dengan bertambahnya waktu hidrasi berhubungan erat dengan bertambahnya produk hidrasi berkarater perekat yang dihasilkan dari reaksi hidrasi SPI serta kombinasi reaksi perekat dan pozolanik dari ATC. Umum dipahami bahwa dengan meningkatnya waktu hidrasi serta dengan pelaksanaan perawatan yang cukup, intensitas produk hidrasi berkarater perekat dalam adukan beton bertambah. Peningkatan produk hidrasi ini mengakibatkan ikatan antara agregat dan perekat menjadi lebih kuat dan porositas dalam beton berkurang. Menurut Lea (1970) dan Mehta (1986), fenomena ini memberikan kontribusi bagi peningkatan kekuatan dan impermeabilitas pada sistem.

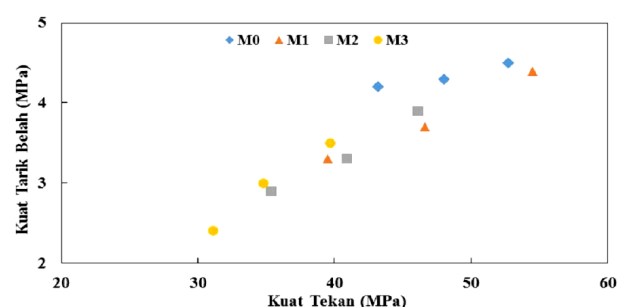
Selanjutnya, relatif lebih rendahnya kekuatan dan lebih tingginya permeabilitas yang diamati selama waktu hidrasi pada beton ATVT M1, M2, dan M3 dibandingkan dengan beton M0 dapat disebabkan karena berkurangnya ketersediaan SPI untuk bereaksi dalam campuran beton tersebut mengingat campuran beton ATVT M1, M2, dan M3 hanya mengandung berturut-turut 60%, 50% and 40% SPI. Selain itu kondisi ini juga dipengaruhi oleh relatif lebih lambatnya reaksi yang terjadi antara unsur reaktif dari ATC dengan kapur bebas yang dihasilkan SPI. Gejala lambatnya perkembangan kekuatan pada beton yang menggunakan perekat hidrolik berupa campuran antara SPI dan abu terbang kelas F maupun berupa semen Portland pozzolan juga telah dilaporkan masing-masing oleh Salain (2017) dan Salain (2019). Seperti dinyatakan oleh Malhotra dan Ramezaniapour (1994) bahwa faktor-faktor penting yang mempengaruhi perkembangan kekuatan dan permeabilitas beton yang menggunakan abu terbang yaitu properti dari abu terbang, komposisi kimia, ukuran partikel, reaktivitas, serta kondisi temperatur dan perawatan. Dengan

perlakuan temperatur dan perawatan yang sama untuk semua campuran beton, maka lambatnya perkembangan properti mekanik dan fisik yang terjadi dalam penelitian ini selain ditentukan oleh jumlah SPI yang berkurang dalam campuran juga erat hubungannya dengan properti, komposisi kimia, ukuran partikel, dan reaktivitas dari abu terbang yang mana semuanya ini merupakan karakter internal dari abu terbang yang dipergunakan. Fenomena ini, mengacu pada hasil penelitian Salain dkk (2001), berhubungan erat dengan jenis batubara yang dibakar serta efektivitas dan efisiensi dari teknologi pembakaran yang dipergunakan pada suatu pembangkit listrik.

Namun demikian, akibat reaksi perekat pada umur awal dikombinasi dengan reaksi pozolanik pada jangka panjang dari ATC, kekuatan dan impermeabilitas dari beton ATVT secara bertahap mengalami peningkatan dan bahkan, setelah usia hidrasi 90 hari, kekuatan dan permeabilitas pada campuran beton ATVT M1 dapat melampaui dan atau praktis sama dengan yang dihasilkan beton kontrol M0. Selanjutnya, jelas juga dapat digaris bawahi bahwa persentase peningkatan kekuatan dan penurunan permeabilitas pada beton ATVT M1, M2, dan M3 lebih tinggi dibandingkan dengan pada beton kontrol M0.

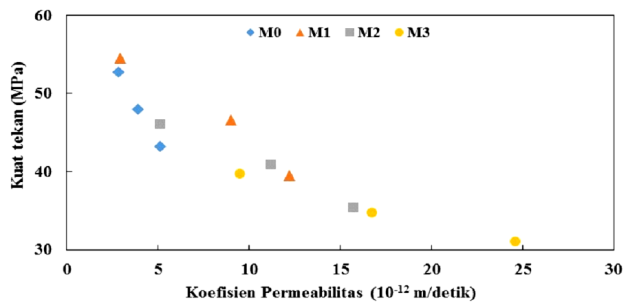
Selain itu, mencermati perkembangan kekuatan pada semua adukan beton, dengan bertambahnya waktu hidrasi, jelas terlihat bahwa kuat tarik belah meningkat dengan meningkatnya kuat tekan seperti diilustrasikan pada **Gambar 7**. Umum diketahui bahwa bila kuat tekan beton meningkat kuat tarik juga meningkat namun dengan kecepatan yang lebih rendah. Dengan demikian semakin tinggi kuat tekan semakin rendah rasio kuat tarik dan kuat tekan yang dihasilkan, sehingga hubungan antara dua kekuatan tersebut cenderung melandai dengan meningkatnya kuat tekan. Gejala ini, seperti yang disampaikan Mehta (1986), berhubungan erat dengan efek dari berbagai faktor terhadap perkembangan properti dari matriks maupun daerah transisi pada beton.

Namun seperti terlihat pada **Gambar 7**, peningkatan yang terjadi pada beton ATVT relatif lebih tinggi dibandingkan dengan pada beton M0. Semakin banyak kandungan ATC dalam adukan beton, peningkatan yang terjadi bahkan cenderung semakin tajam. Perbedaan gejala yang terjadi ini jelas diakibatkan

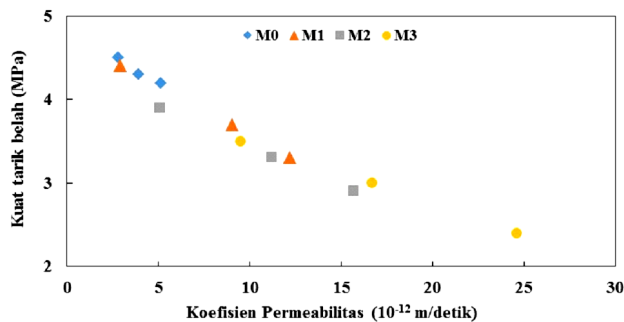


Gambar 7. Hubungan kuat tarik belah dengan kuat tekan M0, M1, M2, dan M3

Salain.



Gambar 8. Hubungan kuat tekan dengan koefisien permeabilitas M0, M1, M2, dan M3



Gambar 9. Hubungan kuat tarik belah dengan koefisien permeabilitas M0, M1, M2, dan M3

karena kehadiran ATC yang mempengaruhi proses dan kecepatan perkembangan terbentuknya produk hidrasi dalam beton, berhubungan dengan kandungan serta reaktivitas unsur utama pada SPI dan ATC yaitu Al_2O_3 , CaO , SiO_2 , dan Fe_2O_3 .

Di sisi lain, hubungan antara kekuatan dengan permeabilitas pada adukan beton menunjukkan bahwa kekuatan meningkat dengan berkurangnya nilai koefisien permeabilitas. Hal ini diperlihatkan pada **Gambar 8** untuk hubungan kuat tekan dengan koefisien permeabilitas dan **Gambar 9** untuk hubungan kuat tarik belah dengan koefisien permeabilitas. Fenomena ini terkait, seperti telah diuraikan sebelumnya, dengan proses dan kecepatan terbentuknya produk hidrasi berkarakter perekat dalam beton. Dengan bertambahnya umur, tingkat hidrasi meningkat sehingga kepadatan sistem bertambah dan porositas berkurang serta hubungan antar pori semakin terputus. Dengan demikian kekuatan beton, mencakup kuat tekan serta kuat tarik belah, meningkat sejalan dengan turunnya nilai koefisien permeabilitas beton.

Namun demikian, berbeda halnya dengan yang terjadi pada hubungan kuat tarik belah dengan kuat tekan, dalam hal ini peningkatan kekuatan yang terjadi dengan turunnya nilai koefisien permeabilitas pada beton ATVT relatif lebih landai dibandingkan pada beton M0 dengan bertambahnya umur hidrasi. Semakin banyak kandungan ATC dalam beton peningkatan yang terjadi cenderung semakin landai. Gejala ini berhubungan dengan relatif lebih lambat reaksi pozolanik yang terjadi pada beton ATVT serta perubahan jumlah kandungan unsur kimia yang dapat membentuk senyawa perekat sehubungan dengan persentase penggunaan ATC sebagai pengganti

SPI. Semakin banyak kandungan ATC dalam adukan, mengakibatkan proses pembentukan produk hidrasi semakin lambat. Selain itu, intensitas produk hidrasi yang terbentuk, pada penggunaan ATC yang lebih banyak, semakin berkurang. Kondisi ini berimplikasi akhirnya pada peningkatan peningkatan kekuatan dengan turunnya nilai koefisien permeabilitas yang relatif lebih landai.

Ditinjau dari sisi komposisi perekat campuran yang dipergunakan terlihat jelas bahwa jumlah kandungan ATC yang dipergunakan dalam adukan beton menentukan kekuatan dan permeabilitas yang dihasilkan oleh beton ATVT. Fenomena ini terkait dengan ketersediaan unsur kimia reaktif yang ada dalam ATC untuk bereaksi dengan kapur bebas, diperoleh melalui proses hidrasi C3S dan C2S dari SPI yang digantikannya, untuk membentuk senyawa berkarakter perekat tambahan selain yang dihasilkan oleh SPI yang berada dalam perekat campuran tersebut. Dengan demikian, kesesuaian jumlah unsur reaktif pada ATC dengan kapur bebas untuk membentuk senyawa perekat menentukan kinerja dari beton ATVT. Untuk suatu campuran perekat, kandungan unsur reaktif yang berlebih karena penggunaan proporsi ATC yang relatif lebih besar akan secara simultan diikuti dengan ketersediaan kapur bebas yang relatif lebih rendah karena berkurangnya kandungan SPI. Hal ini mengakibatkan produk hidrasi yang dihasilkan tidak optimal sehingga mempengaruhi kinerja akhir dari beton ATVT. Dalam hal ini, komposisi unsur pembentuk senyawa perekat yang ada pada SPI dan ATC pada adukan M1 nampaknya lebih sesuai dibandingkan dengan pada adukan M2 dan M3. Kondisi inilah yang mengakibatkan kinerja beton ATVT M1 menjadi lebih baik dibandingkan dengan M2 dan M3. Namun demikian, menarik untuk dicatat bahwa meskipun penggantian 40%-60% SPI dengan ATC dalam campuran beton mengakibatkan kuat tekan beton ATVT M1, M2, dan M3 pada umur 28 hari lebih rendah relatif terhadap beton M0, namun mengacu pada persyaratan kuat tekan pada SNI 2847:2019, beton ATVT tersebut dapat dipergunakan sebagai beton struktural. Menurut standar tersebut, kekuatan tekan beton yang disyaratkan (f_c) minimum 17 MPa untuk kegunaan umum dan minimum 21 MPa untuk sistem rangka pemikul momen khusus serta dinding struktural khusus. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kuat tekan beton ATVT M1, M2, dan M3 pada umur 28 hari sebesar berturut-turut 39,5 MPa, 35,4 MPa, dan 31,1 MPa.

4. Kesimpulan

1. Abu terbang kelas C yang dipergunakan dalam penelitian ini memiliki sifat pozolanik dan perekat yang signifikan.
2. Kuat tekan, kuat tarik belah, dan impermeabilitas dari beton ATVT yang dibuat dengan mengganti 40%, 50%, dan 60% berat dari SPI dengan abu terbang meningkat secara bertahap dengan waktu hidrasi dan pada penggunaan 40% ATC dapat melampaui dan atau mencapai kuat tekan, kuat tarik

belah, dan impermeabilitas yang dihasilkan oleh beton dengan 100% SPI.

3. Tiga campuran beton ATVT yang dikaji dapat dipergunakan sebagai beton struktural berdasarkan hasil dari uji kuat tekan pada umur 28 hari.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada kolega, teknisi, dan mahasiswa yang telah mendukung terlaksananya penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Aggarwal, V., Gupta, S. M., and Sachdeva, S. N., 2010, Concrete Durability Through High Volume Fly Ash Concrete (HVFC) A Literature Review, *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 2, No. 9, 4473-4477.
- Andrew, R. M., 2019, Global CO₂ emissions from cement production, 1928-2018, *Earth System Science Data*, <https://doi.org/10.5194/essd-2019-152>
- Armstrong, T., 2020, *World Cement Consumption Rises by 2.8% in 2019*, The Global Cement Report, 13th Edition.
- ASTM C 618, 1985, *Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete*, American Society for Testing and Materials, USA.
- ASTM C 494-92, 1994, *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*, Annual Book of ASTM Standards, Concrete and Aggregates, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., & Bahadori, A., 2013, Global Strategies and Potentials to Curb CO₂ Emissions in Cement Industry, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 51, 142-161, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.049>
- Crouch, L. K., Hewitt, R., and Byard, B., 2007, High Volume Fly Ash Concrete, *2007 World of Coal Ash (WOCA)*, Northern Kentucky, USA, 1-14.
- Dreux, G. et Festa, J., 1995, *Nouveau guide du béton*, 7^{ème} édition, Eyrolles, Paris.
- Garside, M., 2020, Major countries in worldwide cement production 2015-2019, <https://www.statista.com/statistics/267364/world-cement-production-by-country/>
- Lea F. M., 1970, *The Chemistry of Cement and Concrete*, Third edition, Edward Arnold Ltd., London.
- Malhotra, V. M., and Mehta, P. K., 2002, *High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete*, Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development, Inc., Ottawa, Canada.
- Malhotra, V. M., and Ramezani pour, A. A., 1994, *Fly Ash In Concrete*, Second edition, CANMET, Natural Resources Canada, Ottawa, Canada.
- Mehta, P. K., 1986, *Concrete Structure Properties, and Materials*, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Mehta, P. K. and Meryman H., 2009, Tools for Reducing Carbon Emissions Due to Cement Consumption, *Structure Magazine*.
- Neville, A. M. and Brooks, J. J., 1998, *Concrete Technology*, Longman Singapore Publishers Pte Ltd, Singapore.
- Rashad, A. M., Seleem, H. E. H., and Shaheen, A. F., 2014, Effect of Silica Fume and Slag on Compressive Strength and Abrasion Resistance of HVFA Concrete, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol. 8, No. 1, 69-81.
- Salain I M. A. K., Clastres P., Bursi J. M., and Pellissier C., 2001, Circulating Fluidized Bed Combustion Ashes as an Activator of Ground Vitriified Blast Furnace Slag, *Proceeding of Three-day International Symposium on Sustainable Development and Concrete Technology*, San Francisco, U.S.A., September, SP 202-15, 225-244.
- Salain, I M. A. K., Giri, I. B. D., Saraswati, M. A. A., 2011, Pemanfaatan Abu Terbang dalam Jumlah Besar Pada Pembuatan Beton, *Prosiding Seminar Nasional AVoER ke-3*, Palembang, 26-27 Oktober, Paper M-1, 342-350.
- Salain, I M. A. K., 2017, Effect of Accelerator on Compressive Strength Development of Class F Fly Ash Concrete, *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 9, No. 5, 3954-3957, DOI: 10.21817/ijet/2017/v9i5/170905172
- Salain, I M. A. K., 2019, Using Calcium Chloride as an Accelerator for Portland Pozzolan Cement Concrete Compressive Strength Development, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 615, 012016, 1-7, doi:10.1088/1757-899X/615/1/012016
- Siddique, R., 2004, Performance Characteristic of High -Volume Class F Fly Ash Concrete, *Cement and Concrete Research*, vol. 34, 487-493.
- SNI 0302:2014, Semen Portland Pozolan, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta, Indonesia.

Salain.

- SNI 03-2834-2000, Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal (Methods for design of normal concrete mixes), Badan Standarisasi Nasional, Jakarta, Indonesia.
- SNI 1974:2011, Metode Pengujian Kuat Tekan Beton, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta, Indonesia.
- SNI 2491:2014, Metode Pengujian Kuat Tarik Belah Beton, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta, Indonesia.
- SNI 2847:2019, *Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan*, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta, Indonesia
- Volz, J. S., Arezoumandi, M., Looney, T., and Ortega, C., 2013, *High-Volume Fly Ash Concrete* (Technical Final Report), Center for Transportation Infrastructure and Safety/NUTC program Missouri University of Science and Technology 220 Engineering Research Lab Rolla, MO 65409.
- Zhang, C., Han, R., Yu, B., and Wei, Y., 2018, Accounting Process-related CO₂ Emissions from Global Cement Production under Shared Socioeconomic Pathways, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 184, 451-465, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.284>

