

KUAT TEKAN DAN POROSITAS BETON POFA DENGAN PENAMBAHAN SILIKA FUME DI AIR GAMBUT

Ririn Asmanovita¹⁾, Panca Setia Utama²⁾, Monita Olivia²⁾

¹⁾Mahasiswa Program Studi S1 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

²⁾Dosen Program Studi S1 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

Kampus Bina Widya Jl. HR. Soebrantas Km 12,5 Pekanbaru, Kode 28293

Email: ririn.asmanovita2994@student.unri.ac.id

ABSTRACT

This study examined the compressive strength and porosity of PCC concrete and POFA concrete with the addition of silica fume soaked in peat water. POFA is used as a cement substitute with variations of 0% and 20% and the addition of silica fume is 10%. The design compressive strength is 20 MPa. Treatment of the specimens was carried out in normal water for 28 days and then immersed in peat water for 0, 7 and 28 days. The results of testing the compressive strength of concrete at 28 days of immersion in peat have increased 16.73% with 29.24 MPa in PCC concrete, 29.49% with 32.69 MPa in POFA 0% concrete and 17.58% with 25.77 MPa in POFA 20% concrete. The porosity value of PCC concrete at 28 days of peat decreased by 6.55%. A decrease in porosity values also occurred in POFA 0% concrete and POFA 20% concrete by 20% and 26.78% at 28 days of peat. Based on the test results, it can be concluded that replacing cement with POFA and adding silica fume to concrete has a positive impact on the compressive strength and porosity of concrete in peat water.

Key words: Compressive strength, porosity, POFA, silica fume, peat water

A. PENDAHULUAN

Luas lahan gambut yang berada di Indonesia diperkirakan sekitar 20,6 juta hektar atau 10,8% dari luas daratan di Indonesia. Sekitar 35% atau 7,2 juta hektar dari luasan tersebut terdapat di pulau Sumatera (Wahyunto, 2003). Beton sangat rentan terhadap serangan asam. Beton yang direndam dengan air gambut menyebabkan pengurangan material beton secara perlahan sehingga dapat mengurangi kuat tekan dalam kurun waktu lama, dimulai dari sisi luar beton yang mempunyai kontak langsung dengan air gambut (Purba, 2007).

Pada tahun 2010 luas perkebunan kelapa sawit di Riau semakin meningkat telah mencapai 2,1 juta hektar dan produktivitasnya 22,8 ton per tahun per hektar (Syahza, 2012). Produksi kelapa sawit menghasilkan limbah padat. Limbah padat yang dihasilkan oleh pabrik juga semakin meningkat dengan adanya

peningkatan produksi kelapa sawit. Abu limbah tersebut belum dimanfaatkan secara maksimal sehingga perlu adanya inovasi untuk pemanfaatan limbah tersebut. Abu limbah kelapa sawit atau POFA (*Palm Oil Fuel Ash*) mengandung \pm 60% silika yang berasal dari pembakaran cangkang dan sabut sawit (Graille et al. 1985). Sidek et al. (2018) menyatakan bahwa POFA (*Palm Oil Fuel Ash*) memiliki sifat pozzolan karena sangat reaktif dan dapat digunakan sebagai bahan pengganti semen sebagai bahan konstruksi.

Pengurangan kuat tekan beton akibat air gambut dapat dikurangi dengan bahan tambah yang bersifat pozzolan dan mempunyai partikel yang sangat halus. Bahan tambah tersebut dapat berupa silika fume. Silika fume dalam bentuk bubuk ukuran partikelnya 100 kali lebih dari semen *Portland* (Imam et al. 2018).

Pada penelitian ini akan diuji kuat tekan dan porositas beton POFA dengan

penambahan silika fume yang direndam pada air gambut. Penambahan POFA (*Palm Oil Fuel Ash*) dan silika fume diharapkan dapat meningkatkan kuat tekan dan menurunkan porositas beton sehingga dapat diaplikasikan pada konstruksi di lahan gambut.

B. TINJAUAN PUSTAKA

B.1 Beton

Beton adalah campuran antara semen *Portland* atau semen hidraulik yang lain, agregat halus, agregat kasar dan air, dengan atau tanpa bahan campuran tambahan membentuk massa padat. Beton sangat banyak digunakan untuk bahan bangunan ataupun konstruksi dilapangan. Hal ini dikarenakan beton kuat menahan tekan dan dapat dibentuk sesuai keinginan, awet atau tahan lama, dan tidak membutuhkan perawatan khusus.

Beton dapat dikatakan berkualitas baik apabila memenuhi dua kriteria, yaitu baik dalam keadaan sudah mengeras dan dalam keadaan segar. Keadaan beton mengeras berkaitan dengan sifat-sifat mekanismenya seperti kuat tekan, kuat tarik, kuat lentur, permaibilitas, ketahanan terhadap sulfat, ketahanan terhadap abrasi, durabilitas dan sebagainya. Sedangkan keadaan beton segar berkaitan dengan masalah *workability*, waktu ikat yang berpengaruh pada saat pengangkutan dan homogenitas beton.

B.2 Lingkungan Asam

B.2.1 Definisi Lingkungan Asam

Menurut *ACI Guide to Durable Concrete* (2008) lingkungan agresif merupakan lingkungan yang cenderung memiliki kandungan kimia di atas konsentrasi minimum yang dapat bereaksi dengan beton dan menyebabkan kerusakan pada beton.

Lingkungan asam dapat dibagi menjadi dua yaitu lingkungan asam sulfat dan asam klorida. Asam ini dapat merusak beton dan dapat mengakibatkan terjadinya retak pada permukaan beton. Kerusakan pada beton diakibatkan dari serangan sulfat yaitu pembentukan gipsium dan

ettringite yang mana dari hasil dua molekul ini dapat menambah volume beton sehingga membuat pengembangan pada beton sehingga beton dapat retak. Asam klorida merupakan larutan yang dapat menyebabkan korosi dan pengeroposan pada beton karena klorida dapat menyerang sistem pengikat pada kalsium silikat (Ikomudin et al. 2016). Larutan asam klorida dapat menyebabkan pengikisan pada beton karena bersifat sangat korosif. Lingkungan asam yang mengandung zat-zat kimia yang berbahaya seperti asam sulfat dan asam klorida yang sangat berpotensi menimbulkan kerusakan pada struktur beton.

B.2.2 Beton di Lingkungan Asam

Lingkungan yang mengandung asam dapat menurunkan kuat tekan pada beton, karena sifatnya yang secara perlahan menyebabkan pelepasan butiran-butiran partikel beton sehingga ketahanannya akan menurun. Serangan asam yang terjadi pada beton dapat merusak beton yang disebabkan oleh beberapa proses kompleks. Menurut Beddoe & Dorner (2005) proses kompleks ini adalah proses pengangkutan kimiawi yang terjadi dalam beton, struktur reaktif dari pasta beton, reaksi agregat, proses dari gabungan *dissolusi* (pelarutan beton), kurva gradasi dan komposisi beton.

Emrizal (1998) menyatakan bahwa asam sulfat dapat merusak dan meluruhkan campuran material beton sehingga mengurangi berat beton dan menurunkan kualitas. Asam sulfat berpengaruh terhadap kuat tekan beton yaitu dapat memperkecil kuat tekan beton akibat perendaman di dalam asam sulfat. Penggunaan bahan pozzolan dalam suatu campuran yang tepat dapat berpotensi untuk meningkatkan ketahanan beton terhadap serangan sulfat dan klorida, sehingga dapat diaplikasikan pada bangunan-bangunan yang rentan terhadap serangan asam sulfat dan korosi seperti bangunan dekat pantai, tiang pancang, jembatan yang dibangun di air laut dan dermaga (Supit et al. 2020).

B.2.3 Beton di Lingkungan Gambut

Secara umum beton yang berada di lingkungan gambut memiliki ketahanan yang rendah. Pada lingkungan gambut beton dapat rusak bila terpapar langsung dengan air gambut yang bersifat asam. Reaksi yang terjadi pada beton yang terpapar air gambut ada dua yaitu reaksi karbonasi dan reaksi serangan asam.

Reaksi karbonasi terjadi antara kalium hidroksida yang merupakan hasil hidrasi semen selain gel C-S-H atau gel tubermorite. Kalsium hidroksida bereaksi dengan karbondioksida yang berada di lingkungan dan menghasilkan kalsium karbonat. Kalsium karbonat tidak berbahaya bagi beton, namun reaksi yang terjadi saat Kalsium karbonat bertemu dengan CO₂ dan H₂O akan menghasilkan senyawa kalsium bikarbonat yang dapat menurunkan pH beton. Terjadinya penurunan pH dapat menyebabkan korosi mudah terjadi pada beton yang memiliki tulangan.

Reaksi serangan asam pada beton yaitu terjadi antara senyawa hasil hidrasi semen Ca(OH)₂ dan kalsium aluminat hidrat dengan ion asam. Ca(OH)₂ yang bereaksi dengan asam sulfat akan menghasilkan gypsum. Selanjutnya gypsum akan bereaksi dengan kalsium aluminat hidrat dan menghasilkan kalsium sulfoaluminat (*ettringite*). *Ettringite* dalam jumlah besar dapat menyebabkan penetrasi ke dalam beton, hal ini akan menyebabkan terjadi pengembangan pada beton dan sehingga beton dapat hancur (Monteny et al., 2000).

B.3 Bahan Penyusun Beton Campuran

SNI 2847 (2013) menyatakan bahwa beton adalah campuran semen *Portland* atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan campuran (*admixture*). Beton sering kali dikombinasikan dengan bahan tambah untuk membuat beton yang ramah lingkungan. Material campuran tambahan (*admixture*) adalah material selain air agregat, atau semen hidrolis, yang

digunakan sebagai bahan penyusun beton dan ditambahkan pada beton sebelum atau selama pencampurannya untuk memodifikasi properti.

B.3.1 Agregat

Agregat terbagi menjadi dua bagian yaitu agregat kasar dan agregat halus. Agregat kasar adalah material yang terdiri dari butiran yang tertahan saringan No.4, sedangkan agregat halus adalah agregat yang lolos saringan No.4 dan tertahan saringan No.200 (SNI 03-1968, 1990).

B.3.2 Semen *Portland*

Semen *Portland* adalah semen hidrolis yang didapatkan dengan menggiling terak semen *Portland* yang terdiri dari kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling dengan bahan tambah (SNI 15-2049, 2004).

B.3.3 Air

Berdasarkan SNI 7974 (2013) air yang digunakan dalam campuran beton harus bersih, tidak boleh mengandung minyak, asam alkali, zat organik atau bahan lainnya yang dapat merusak beton dan tulangan. Air diperlukan pada pembuatan beton untuk memicu reaksi kimiawi pada semen, membasahi agregat dan memberi kemudahan pada pekerjaan beton. Air juga digunakan sebagai campuran karena dapat mengubah semen menjadi pasta semen sehingga memudahkan pada saat pencampuran beton. Air yang digunakan adalah air yang dapat diminum dan bersih tidak banyak mengandung kotoran yang dapat merusak.

B.3.4 POFA (*Palm Oil Fuel Ash*)

POFA (*Palm Oil Fuel Ash*) adalah abu yang dihasilkan dari limbah kelapa sawit seperti serat dan cangkang kelapa sawit pada suhu yang dibakar dengan suhu 800-1000°C pada pembangkit listrik tenaga uap di pabrik kelapa sawit (Tangchirapat et al. 2009).

Menurut Sidek et al. (2018) POFA mengandung silika murni yang bertindak sebagai reaktif pozzolan untuk

meningkatkan kinerja beton sehingga dapat digunakan sebagai pengganti semen untuk konstruksi bangunan. Berdasarkan penelitian Graille et al. (1985) didapatkan bahwa hasil pembakaran cangkang dan sabut sawit dapat menghasilkan bahan campuran beton berupa silika yang cukup besar yaitu $\pm 60\%$.

Menurut Sata et al. (2004) Beton dengan penggantian semen hingga 30% POFA memberikan nilai kuat tekan lebih tinggi dari beton kontrol pada umur 28 hari. Menurut Momeen et al. (2016) pada umur 90 hari beton dengan penggantian semen 10% POFA memiliki nilai kuat tekan lebih besar dari beton kontrol dan penggantian semen 30% POFA memiliki kuat tekan yang hampir sama dengan beton kontrol.

B.3.5 Silika Fume

Silika fume merupakan hasil produksi sampingan dari reduksi quarsa murni dengan batu bara di tanur listrik dalam pembuatan campuran silikon atau ferro silikon. Silika fume mengandung kadar SiO_2 yang tinggi, merupakan bahan yang sangat halus, berbentuk bulat, dan berdiameter 1/100 kali diameter semen.

Basuki et al. (2012) menyatakan bahwa penambahan silika fume pada campuran semen PCC dapat meningkatkan kuat tekan sebesar 4,2% dibandingkan dengan beton normal. Hal ini mengindikasikan bahwa beton dengan penambahan silika fume mempunyai kepadatan yang baik dan tidak porous sehingga dapat dikatakan mempunyai durabilitas yang baik.

Menurut Ferawati (2015) silika fume dapat digunakan sebagai bahan pengganti semen karena menghasilkan nilai kuat tekan yang baik dari nilai kuat tekan beton normal. Güneyisi et al. (2004) menyatakan bahwa dengan penambahan silika fume dapat meningkatkan kuat tekan dan kuat tarik masing-masing sebesar 43% dan 27%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan silika fume dalam beton dapat meningkatkan kinerja beton dalam aspek kekuatan dan daya tahan

beton. Menurut Afif (2013) persentase kuat tekan beton dengan penambahan silika fume lebih tinggi dibandingkan dengan beton tanpa silika fume.

B.3.6 Superplasticizer

Superplasticizer merupakan bahan kimia tambah yang digunakan untuk meningkatkan kemudahan dalam pengerjaan pada saat pencampuran beton. Kelebihan menggunakan *superplasticizer* adalah mengurangi jumlah air pada campuran beton, mempercepat waktu pengerasan dan meningkatkan kemampuan kerja (Zai et al., 2014).

C. METODOLOGI PENELITIAN

C.1 Pengujian Karakteristik Material

Pemeriksaan material terdiri dari pemeriksaan agregat kasar dan halus. Material yang digunakan berasal dari PT. Mitra Beton, Pekanbaru.

C.2 Pelaksanaan Penelitian

Pelaksanaan penelitian terdiri atas tahap persiapan alat dan bahan yaitu agregat kasar dan halus, semen, POFA, silika fume, *superplasticizer*, dan air gambut. Selanjutnya perencanaan komposisi job mix, lalu pembuatan benda uji dan perendaman benda uji, kemudian pengujian benda uji. Tahap selanjutnya mendapatkan hasil pengujian, pembahasan dan kesimpulan.

C.3 Tahap Pengujian

Sebelum dilakukan pengujian beton direndam terlebih dahulu pada air biasa selama 28 hari kemudian direndam pada air gambut. Pengujian beton dilakukan sesuai umur rencana yaitu 0, 7 dan 28 hari gambut. Pengujian yang dilakukan yaitu pengujian kuat tekan dan porositas.

D. HASIL DAN PEMBAHASAN

D.1 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik dan spesifikasi agregat kasar dan halus yang akan digunakan dalam campuran beton. Agregat

kasar yang digunakan berasal dari PT. Mitra Beton, Pekanbaru.

Berdasarkan Tabel 1 diketahui bahwa agregat kasar yang digunakan memiliki berat jenis kondisi SSD atau kering permukaan yaitu 2,56 yakni sudah memenuhi standar SNI 1969-2008. Nilai absorpsi sebesar 1,63% menunjukkan bahwa agregat kasar yang digunakan memiliki nilai yang lebih kecil dari spesifikasi yang ditetapkan. Nilai keausan agregat kasar diperoleh sebesar 40,26%. Berdasarkan nilai tersebut diketahui bahwa agregat tidak memenuhi standar spesifikasi yaitu 40%. Modulus kehalusan agregat yang didapatkan sebesar 6,81, nilai tersebut sudah memenuhi standar ASTM C 136-2012. Berat volume agregat kasar yang diuji dalam dua kondisi yaitu kondisi padat dan kondisi gembur dengan masing-masing mempunyai nilai 1,33 gr/cm³ dan 1,49 gr/cm³. Nilai tersebut menunjukkan bahwa pada kondisi padat memenuhi standar ASTM C 29-2003 tetapi pada kondisi gembur tidak memenuhi standar yang telah ditetapkan.

Tabel 1 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Kasar

Jenis Pemeriksaan	Hasil Uji	Standar Spesifikasi
Berat jenis (gr/cm ³)		
a. <i>Apparent specific gravity</i>	2,63	2,50 – 2,70
b. <i>Bulk specific gravity (dry)</i>	2,52	2,50 – 2,70
c. <i>Bulk specific gravity (SSD)</i>	2,56	2,50 – 2,70
d. <i>Absorption (%)</i>	1,63	2,00 – 7,00
Kadar air	0,11	3,00 – 5,00
Keausan (%)	40,26	<40
Modulus kehalusan	6,81	6,00 – 7,10
Berat volume (gr/cm ³)		
a. Kondisi gembur	1,33	1,40 – 1,90
b. Kondisi padat	1,49	1,40 – 1,90

Berdasarkan Tabel 2 diketahui bahwa agregat halus yang digunakan memiliki kadar lumpur sebesar 0,64. Nilai tersebut sudah memenuhi standar ASTM C 142. Nilai berat jenis SSD atau kering permukaan agregat halus yang diperoleh

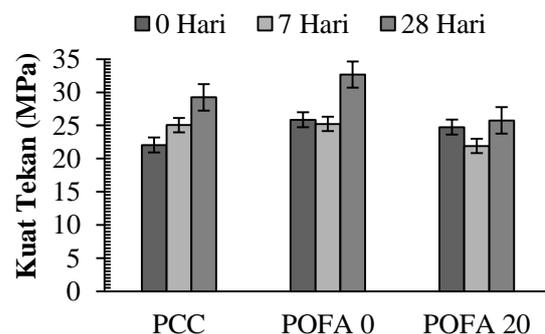
yaitu 2,67 yang telah memenuhi standar SNI 03-1979-1990. Nilai absorpsi 1,16% yang diperoleh lebih kecil dari spesifikasi yang ditetapkan yaitu 2-7 %. Modulus kehalusan sebesar 2,98 dan sudah memenuhi standar ASTM C 136-2012. Berat volume yang diuji pada kondisi padat sebesar 1,55 dan kondisi gembur 1,72 yang kedua sudah memenuhi standar ASTM C 29-2003. Kadar organik yang diperoleh No.2 dan sudah memenuhi standar SNI 03-2816-1992.

Tabel 2 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Halus

Jenis Pemeriksaan	Hasil Uji	Standar Spesifikasi
Kadar lumpur	0,64	<5
Berat jenis (gr/cm ³)		
a. <i>Apparent specific gravity</i>	2,67	2,50 – 2,70
b. <i>Bulk specific gravity (dry)</i>	2,59	2,50 – 2,70
c. <i>Bulk specific gravity (SSD)</i>	2,62	2,50 – 2,70
d. <i>Absorption (%)</i>	1,16	2,00 – 7,00
Kadar air	0,02	3,00 – 5,00
Modulus kehalusan	2,98	1,50 – 3,80
Berat volume (gr/cm ³)		
a. Kondisi gembur	1,55	1,40 – 1,90
b. Kondisi padat	1,72	1,40 – 1,90
Kadar organik	2	<No. 3

D.2 Hasil Pengujian Kuat Tekan

Hasil pengujian kuat tekan beton dapat dilihat pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Hasil Uji Kuat Tekan

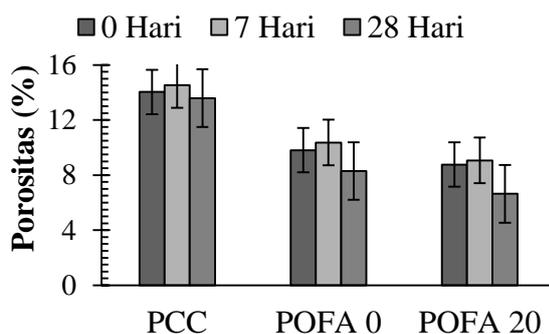
Hasil pengujian kuat tekan pada Gambar 1 menunjukkan secara umum kuat tekan beton POFA 0% dengan silika fume lebih tinggi dari pada variasi lainnya yaitu beton PCC dan beton POFA 20%. Beton

mengalami penurunan kuat tekan pada umur 7 hari kecuali variasi beton PCC dan mengalami peningkatan pada umur 28 hari pada semua variasi beton.

Hal ini dikarenakan penggunaan bahan tambah silika fume yang bersifat pozzolanik dengan ukuran butiran 0,1 μm sehingga pori-pori beton dapat terisi dengan silika fume, yang pada akhirnya akan meningkatkan kekuatan beton. Hal ini sesuai dengan penelitian Sebayang (2011) yang menunjukkan bahwa penggunaan silika fume dapat meningkatkan kuat tekan beton dikarenakan ukuran butiran yang lebih halus dapat meningkatkan kerapatan beton. Menurut penelitian Yusra & Amir (2016) yang menunjukkan bahwa penggunaan POFA dapat meningkatkan kuat tekan. Pradana et al. (2016) yang menyatakan bahwa beton dengan penggantian dengan POFA dapat meningkatkan kuat tekan pada beton yang direndam pada lingkungan gambut pada umur 28 hari.

D.3 Hasil Pengujian Porositas

Hasil pengujian porositas beton PCC dan beton POFA dengan silika fume dapat dilihat pada Gambar 2 berikut:



Gambar 2. Porositas

Berdasarkan Gambar 2 nilai porositas mengalami peningkatan pada umur 7 hari rendaman air gambut. Sedangkan pada umur rendaman 28 hari gambut terjadi penurunan nilai porositas.

Nilai porositas beton PCC cenderung lebih besar daripada beton dengan campuran POFA dan silika fume. Hal ini disebabkan karena ukuran POFA

dan silika fume yang lebih kecil akan membuat beton lebih padat sehingga air akan sulit masuk ke dalam beton. Semakin bertambahnya umur rendaman nilai porositas juga terus menurun. Pandiangan et al. (2014) menyatakan bahwa penurunan nilai porositas diakibatkan perbaikan pori di dalam inti beton oleh proses hidrasi, proses ini kembali beraksi akibat tertutupnya kembali pori pada permukaan beton akibat dekomposisi hasil reaksi asam dengan beton.

E. KESIMPULAN DAN SARAN

E.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan dan porositas terhadap beton PCC dan beton POFA dengan silika fume, dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Kuat tekan beton POFA 0% memiliki kuat tekan tertinggi dibandingkan dengan beton PCC dan beton POFA 20% dengan nilai kuat tekan sebesar 32,67 MPa pada umur 28 hari rendaman air gambut.
2. Porositas pada beton POFA dengan silika fume secara umum memiliki nilai yang lebih rendah daripada beton PCC. Hal ini dikarenakan POFA dan silika fume memiliki ukuran yang lebih kecil daripada semen sehingga dapat membuat beton menjadi lebih kedap. Terjadi peningkatan nilai porositas pada umur 7 hari gambut akibat serangan asam dan peningkatan umur 28 hari gambut akibat reaksi pozzolanik yang semakin sempurna.

E.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat dikemukakan saran untuk penelitian selanjutnya, sebagai berikut.

1. Perlu ditambahkan variasi dari silika fume untuk mendapatkan nilai kuat tekan optimum dengan kombinasi antara POFA dan silika fume.
2. Perlu ditambahkan dengan membahas reaksi kimia yang terjadi pada POFA dan silika fume yang direndam pada

air gambut. Serta pengaruhnya terhadap umur rendaman beton.

3. Pada penelitian selanjutnya diharapkan dapat mengontrol keadaan alat-alat pengujian sebelum melaksanakan pengujian agar hasil yang didapat lebih mendekati hasil tujuan.

Daftra Pustaka

- ACI 201. (2008). *Guide to Durable Concrete*. Farmington Hills : American Concrete Institute.
- Afif, M. (2013). Pengaruh Penambahan Silika Fume Dan Superplasticizer Dengan Pemakaian Semen Tipe PPC Dan Tipe PCC Terhadap Peningkatan Mutu Beton.
- Basuki, A., Sadikin, I., Besar, B., Teknik, B., No, J. S., & Fax, B. T. (2012). Pengaruh Jenis Semen Dan Penambahan Silika Fume Terhadap Kekuatan Dan Durabilitas Beton. *Jurnal Teknologi Bahan Dan Barang Teknik*, 2(1), 25–34.
- Beddoe, R. E., & Dorner, H. W. (2005). *Modelling acid attack on concrete : Part I . The essential mechanisms*. *Cement and Concrete Research*, 35, 2333–2339.
- Emrizal. (1998). Penelitian Pengaruh Penambahan Abu Umbah Batu Bara (Fly Ash) Terhadap Kuat Desak Beton Dan Ketahanan Asam Sulfat.
- Ferawati, M. (2015). Pengaruh Penambahan Pozzolan Mineral (Fly Ash Dan Silika Fume) Terhadap Sifat Mekanik Dan Durabilitas Beton *Self Compacting Concrete*. 45.
- Graille, J., Lozano, P., Pioch, D., & Geneste, P. (1985). *Essais d'â€™alcoololyse d'â€™huiles végétales avec des catalyseurs naturels pour la production de carburants diesels*. 1.
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., & Özturan, T. (2004). Properties of rubberized concretes containing silica fume. *Cement and Concrete Research*, 34(12), 2309–2317.
- Ikomudin, R. A., Herbudiman, B., & Irawan, R. R. (2016). Ketahanan Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash terhadap Sulfat dan Klorida. *Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*, 2(4), 1–11.
- Imam, A., Kumar, V., & Srivastava, V. (2018). *Effect of Silica Fume on the fresh and hardened properties of concrete*.
- Momeen, M., Islam, U., Mo, K. H., & Alengaram, U. J. (2016). *Durability properties of sustainable concrete containing high volume palm oil waste materials*. *Journal of Cleaner Production*, 137, 167–177.
- Monteny, J., Vincke, E., Beeldens, A., De Belie, N., Taerwe, L., Van Gemert, D., & Verstraete, W. (2000). *Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete*. *Cement and Concrete Research*, 30(4), 623–634.
- Pandiangan, J., Olivia, M., & Darmayanti, L. (2014). Ketahanan Beton Mutu Tinggi Di Lingkungan Asam. 12(7), 1483–1490.
- Pradana, T., Olivia, M., & Sitompul, I. R. (2016). Kuat Tekan dan Porositas Beton Semen OPC, PCC, dan OPC POFA di Lingkungan Gambut. *Jom FTEKNIK*, 3(2), 8.
- Purba, P. (2007). Pengaruh Kandungan Sulfat Terhadap Kuat Tekan Beton. *METANA*, 4(1).
- Sata, V., Jaturapitakkul, C., & Kiattikomol, K. (2004). *Utilization of Palm Oil Fuel Ash in High-Strength Concrete*. *Journal of Material in Civil Engineering*, December, 623–628.
- Sebayang, S. (2011). Tinjauan sifat-sifat mekanik beton alir mutu tinggi dengan silika fume sebagai bahan tambahan. *Jurnal Rekayasa*, 1.
- Sidek, M. N. M., Hashim, N. H., Rosseli, S. R., Nor, M. R. M., Ismail, S., Saman, M. H., Arshad, M. F., Zainudin, A., & Alisibramulisi. (2018). *Utilisation of palm oil fuel ash (POFA) as cement replacement by using powder and liquidation*

- technique Utilization of Palm Oil Fuel Ash (POFA) as Cement Replacement by Using Powder and Liquidation Technique. AIP Conference Proceedings, 20069(October 2018).*
- SNI 03-1968. (1990). Metode Pengujian Tentang Analisis Saringan Agregat Halus dan Kasar. *Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.*
- SNI 15-2049. (2004). Semen Portland. *Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.*
- SNI 2847. (2013). Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung. *Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 1–265.*
- Supit, S. W. M., Sondakh, F., Waworuntu, R., Studi, P., Bangunan, K., Sipil, J. T., & Manado, P. N. (2020). Ketahanan sulfat dan laju korosi beton yang menggunakan kaolin dan abu terbang. *Jurnal Teknik Sipil Terapan, 2(1), 36–45.*
- Syahza, A. (2012). *Potensi Pembangunan Industri Hilir Kelapa Sawit di Daerah Riau.* 1–11.
- Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C., & Chindaprasirt, P. (2009). *Use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material for producing high-strength concrete. Construction and Building Materials, 23(7), 2641–2646.*
- Wahyunto, S. R. dan H. S. (2003). *Peta Luas Sebaran Lahan Gambut dan Kandungan Karbon di Pulau Sumatera / Maps of Area of Peatland Distribution and Carbon Content in Sumatera, 1990 – 2002.*
- Yusra, A., & Amir, A. (2016). Pengaruh Zat Tambah Abu Cangkang Sawit Terhadap Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi. *Jurnal Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Teuku Umar, 2(1), 29–36.*
- Zai, K. A., Syahrizal, & Karolina, R. (2014). Pengaruh Penambahan Silica Fume Dan Superplasticizer Terhadap Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi

Dengan Metode ACI (*American Concrete Institute*). 1.