

PENINGKATAN KUAT TEKAN PADA BETON GEOPOLIMER AKIBAT METODE PERAWATAN DIPANASKAN

Kevin Aprilio Wibowo¹, Daniel Christianto^{2*}, dan Jack Widjajakusuma³

*Penulis korespondensi

¹Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
kevin.327212009@stu.untar.ac.id

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
danielc@ft.untar.ac.id

³Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Pelita Harapan, Jl. Jend. Sudirman No.50 Jakarta
jack.widjajakusuma@uph.edu

Masuk: 22-09-2023, revisi: 27-09-2023, diterima untuk diterbitkan: 11-10-2023

ABSTRACT

Studies about pozzolan material to reduce cement usage have been conducted for many times. Concrete made of pozzolan material was known as geopolymer concrete. Geopolymer concrete's weaknesses were low duration of setting time and the low level of workability. The precast method was used to overcome these weaknesses. Concrete with a high initial compressive strength enable a more efficient implementation of the precast method due to it able to be released from the formwork without getting damaged. This study aims to see the increase in compressive strength due to the method of dry curing. In addition to that, differing from the geopolymer concrete without palm oil fuel ash, this study added 5% of palm oil fuel ash to see the effect of it on compressive strength. Constructed specimens were then cured at room temperature or heated in an oven with a temperature of 60°C for 24 hours. The ratio of alkaline activator to fly ash that were used in this research are 0,55:1 and 0,825:1. The specimen which was only a day old with 0,55:1 ratio experienced 2 times increase in compressive strength when being heated compared to the specimen cured at room temperature. The specimen which was of the same age with 0,825:1 ratio also experienced 3,5 times increase in compressive strength after being heated compared to those at room temperature. The increase of compressive strength was due to the heating process enabling the chemical reaction to occur faster.

Keywords: geopolymer concrete; palm oil fuel ash; dry curing

ABSTRAK

Penelitian untuk memanfaatkan material *pozzolan* untuk mengurangi penggunaan semen sudah banyak dilakukan. Beton yang menggunakan material *pozzolan* disebut beton geopolimer. Kelemahan dari beton geopolimer adalah durasi *setting time* dan tingkat kelecakan yang rendah. Oleh karena itu, metode pracetak dapat digunakan untuk mengatasi kelemahan tersebut. Beton dengan kuat tekan awal yang tinggi dapat membuat metode pracetak semakin efisien karena beton dapat dilepaskan dari bekisting dan tidak rusak. Penelitian ini bertujuan untuk melihat peningkatan kuat tekan akibat metode perawatan benda uji dengan cara dipanaskan. Selain itu, pada penelitian ini ditambahkan abu cangkang kelapa sawit sebanyak 5% untuk dilihat pengaruhnya terhadap kuat tekan dibanding beton geopolimer tanpa abu cangkang kelapa sawit. Benda uji yang sudah dibuat, dirawat pada suhu ruangan atau dipanaskan pada oven dengan suhu 60°C selama 24 jam. Rasio alkali aktivator terhadap abu terbang yang digunakan pada penelitian ini adalah 0,55:1 dan 0,825:1. Hasil peningkatan kuat tekan yang didapat pada saat benda uji berumur 1 hari adalah benda uji dengan rasio 0,55:1 yang dipanaskan mengalami peningkatan kuat tekan sekitar 2 kali dan pada rasio 0,825:1 mengalami peningkatan kuat tekan sekitar 3,5 kali dibanding benda uji yang dirawat pada suhu ruangan. Hal itu disebabkan oleh pemanasan benda uji membuat reaksi kimia terjadi lebih cepat dan kuat tekan meningkat.

Kata kunci: beton geopolimer; abu cangkang kelapa sawit; perawatan dipanaskan

1. PENDAHULUAN

Semen merupakan salah satu material yang digunakan untuk membuat beton. Pada proses pembuatannya, semen melepaskan banyak karbon dioksida ke atmosfer. Karbon dioksida menyebabkan pemanasan global sehingga terjadi mencairnya es di kutub, hujan asam, cuaca ekstrim, dan dampak negatif pada produksi pangan (Ali et al., 2020). Upaya untuk mengurangi penggunaan semen telah dilakukan. Salah satunya adalah memanfaatkan material *pozzolan* yang dapat merekatkan seperti semen. Material *pozzolan* merupakan material yang di dalamnya memiliki kandungan silika,

aluminium, besi, dan kalsiu. Beton yang menggunakan material *pozzolan* disebut beton geopolimer. Kelemahan dari beton geopolimer adalah durasi *setting time* yang singkat dan tingkat kelecakan yang rendah (Hasnaoui et al., 2019). Beton pracetak merupakan metode yang dapat digunakan untuk mengatasi kelemahan tersebut. Beton pracetak yang memiliki kuat tekan awal tinggi, dapat membuat produksi lebih efisien karena beton pracetak dapat dilepaskan dari bekisting dan dapat menanggung beratnya sendiri. Beton dengan kuat tekan awal tinggi dapat mempercepat durasi pembangunan (Yasin et al., 2017).

Penelitian untuk melihat dampak dari penambahan abu hasil pembakaran limbah ke dalam beton geopolimer telah dilakukan. Fernando (2018) menggunakan limbah berupa sekam padi yang dibakar menjadi abu, kemudian ditambahkan ke dalam abu terbang untuk membuat beton geopolimer. Penambahan abu sekam padi sebanyak 5% meningkatkan kuat tekan menjadi 49,64 MPa atau sebesar 5,42% dibanding beton geopolimer tanpa abu sekam padi yang memiliki kuat tekan 47,09 MPa. Penambahan sebanyak 10% meningkatkan kuat tekan menjadi 50,59 MPa atau 7,43%. Penelitian lain yang dilakukan Alfi (2017) dengan cara menambahkan abu ampas tebu. Penambahan sebanyak 20% tidak merubah kuat tekan secara signifikan, tetapi dapat memperpanjang durasi *setting time*.

Indonesia banyak memproduksi kelapa sawit yang menghasilkan limbah berupa cangkang, tandan kosong, dan serat. Beberapa penelitian untuk memanfaatkan cangkang kelapa sawit telah dilakukan. Serwinda (2013) menggunakan cangkang kelapa sawit sebagai agregat kasar dalam membuat beton normal. Penambahan sebanyak 10% meningkatkan kuat tekan sebesar 12,8%. Penambahan sebanyak 20% dan 30% membuat kuat tekan menurun. Salih et al. (2013) membuat pasta geopolimer dari abu cangkang kelapa sawit dengan variasi konsentrasi larutan natrium hidroksida. Pada umur 28 hari, pasta geopolimer memiliki kuat tekan 26,83-31,08 MPa. Jumlah komposisi silika, aluminium, besi, dan kalsium pada abu cangkang kelapa sawit (Yuliana et al., 2014) lebih sedikit dibanding jumlah pada abu terbang (Bhatt et al., 2019) sehingga kurang efektif menggunakan abu cangkang kelapa sawit sebagai bahan utama membuat pasta geopolimer. Vitri dan Herman (2019) melakukan penelitian dengan cara mengganti 10% dari berat agregat halus dengan abu cangkang kelapa sawit dan 30% dari berat agregat kasar dengan cangkang kelapa sawit untuk membuat beton normal dengan target kuat tekan 25 MPa. Hasil kuat tekan pada benda uji berumur 28 hari adalah sebesar 21 MPa. Kuat tekan beton tidak mencapai target karena cangkang kelapa sawit memiliki kekuatan yang lebih rendah dibanding agregat kasar dan halus. Keunggulan cangkang kelapa sawit adalah memiliki berat jenis yang lebih rendah.

Proses pembuatan beton normal dan beton geopolimer melibatkan reaksi kimia. Faktor yang mempengaruhi reaksi kimia adalah konsentrasi reaktan, suhu, kondisi fisik, luas permukaan, dan katalisator. Semakin tinggi konsentrasi reaktan dan semakin tinggi suhu, maka reaksi kimia semakin cepat (Sodiqovna dan Orifjon, 2020). Metode perawatan benda uji merupakan hal yang penting karena dapat mempercepat reaksi kimia pada beton. Pada beton normal, merendam benda uji dengan air menghasilkan kuat tekan yang paling tinggi karena membuat benda uji tetap lembap (Mulyati dan Arkis, 2020). Pada beton geopolimer, metode *steam curing* meningkatkan kuat tekan benda uji dari 41,5%-155% (Amalo, 2018). Metode yang paling efektif adalah dengan *dry curing*. Hasil penelitian Hardjito dan Rangan (2005) menyatakan bahwa benda uji yang dipanaskan pada suhu 60°C selama 24 jam meningkatkan kuat tekan yang paling signifikan.

Faktor lain yang dapat meningkatkan kuat tekan dari beton geopolimer adalah larutan alkali aktivator. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Putra et al. (2021), semakin tinggi perbandingan natrium silikat terhadap natrium hidroksida maka kelecakan beton semakin rendah, tetapi menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi.

Berdasarkan latar belakang dan referensi penelitian mengenai pemanfaatan cangkang kelapa sawit yang telah dilakukan, pada penelitian ini cangkang kelapa sawit yang sudah dibakar dan dihaluskan dimanfaatkan sebagai material tambahan pada abu terbang. Penelitian ini memiliki tujuan untuk mencari besar peningkatan kuat tekan pada beton geopolimer yang ditambahkan abu cangkang kelapa sawit akibat metode perawatan dipanaskan di oven pada suhu 60°C selama 24 jam.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan melihat pengaruh metode perawatan dengan cara dipanaskan terhadap peningkatan kuat tekan beton geopolimer yang ditambahkan abu cangkang kelapa sawit. Langkah awal yang dilakukan adalah studi literatur mengenai faktor yang dapat meningkatkan kuat tekan beton geopolimer, terutama akibat metode perawatan. Setelah itu, menyediakan alat dan material yang dibutuhkan untuk membuat benda uji. Material yang digunakan pada penelitian ini adalah agregat halus, abu terbang, abu cangkang kelapa sawit, natrium silikat, natrium hidroksida, dan air. Hasil uji karakteristik dan informasi dari material yang digunakan adalah:

- 1) Agregat halus yang digunakan merupakan pasir dari Bangka yang didapat di daerah Tangerang Selatan. Berdasarkan hasil uji, agregat halus memiliki berat jenis sebesar 2405 kg/m³, kadar lumpur sebesar 1,29% berdasarkan uji berat, dan sebesar 1,88% berdasarkan uji volume.

- 2) Abu terbang yang digunakan berasal dari PLTU Paiton, Probolinggo. Abu terbang yang digunakan memiliki berat jenis sebesar 2560 kg/m^3 dengan komposisi kimia 34,7% SiO_2 , 23,6% Al_2O_3 , 14,2% Fe_2O_3 , dan 15,1% CaO yang berarti tergolong ke dalam abu terbang kelas C.
- 3) Cangkang kelapa sawit yang digunakan didapat dari kebun kelapa sawit di desa Kandis, kabupaten Siak, kota Pekanbaru, provinsi Riau. Abu cangkang kelapa sawit yang digunakan memiliki berat jenis sebesar 1720 kg/m^3 dengan komposisi kimia 36,9% SiO_2 , 2% Al_2O_3 , 9,2% Fe_2O_3 , dan 25,6% CaO .
- 4) Natrium hidroksida yang digunakan memiliki kandungan 98% dan berbentuk *flakes*. Natrium silikat yang digunakan memiliki kandungan 55% dan berupa cairan kental. Kedua material tersebut didapatkan dari toko kimia di sekitar daerah Tangerang Selatan.

Penelitian ini merupakan penelitian awal sehingga belum ada informasi mengenai jumlah yang optimal untuk penambahan abu cangkang kelapa sawit. Pada penelitian ini dilakukan penambahan abu cangkang kelapa sawit sebanyak 5%. Jumlah penambahan sebanyak 5% dipilih karena beberapa penelitian mengenai penambahan material menggunakan jumlah yang sama (Yanuari, 2020 dan Fernando, 2018). Konsentrasi larutan natrium hidroksida yang digunakan pada penelitian ini adalah sebesar 12 molaritas. Semakin tinggi konsentrasi larutan natrium hidroksida, maka semakin tinggi kuat tekan yang dihasilkan (Amalo, 2018), tetapi menurunkan kelecakan dari beton segar. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Susanto (2020), nilai uji *slump* dari konsentrasi larutan natrium hidroksida sebesar 12 molaritas masih memenuhi rekomendasi ACI 211.1.91 untuk semua tipe konstruksi sehingga digunakan pada penelitian ini. Terdapat 2 rasio alkali aktivator terhadap abu terbang yaitu sebesar 0,55:1 dan 0,825:1. Benda uji yang dibuat pada penelitian ini berukuran $5 \times 5 \text{ cm}$ dan berjumlah 6 untuk setiap desain campuran. Benda uji yang dirawat pada suhu ruangan berjumlah 3 buah dan yang dipanaskan berjumlah 3.

Proses pembuatan abu cangkang kelapa sawit dilakukan dengan cara cangkang kelapa sawit dibakar pada suhu 600°C selama 2 jam. Cangkang kelapa sawit yang sudah berubah menjadi abu didiamkan selama 2 hari agar suhu turun dan dihaluskan menggunakan mesin *Los angeles* selama 2 jam. Cara tersebut diadaptasi dari penelitian Bediako et al. (2016) karena mudah untuk dilakukan. Gambar 1. menampilkan proses pembakaran cangkang kelapa sawit di tungku.

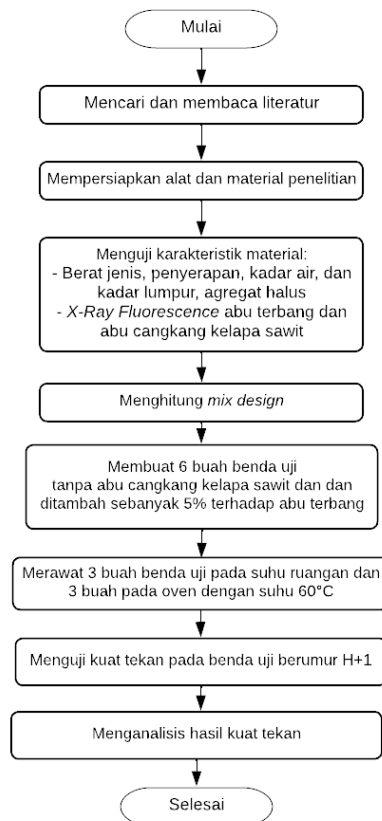


Gambar 1. Proses pembakaran cangkang kelapa sawit

Tahapan pembuatan benda uji diawali dengan menimbang material sesuai dengan kebutuhan dan mempersiapkan seluruh alat. Natrium hidroksida dicampur dengan air dan didiamkan selama 1 hari agar homogen. Setelah itu larutan natrium hidroksida dicampur dengan natrium silikat menggunakan *hand mixer* selama 1.5 menit agar menjadi alkali aktivator. Alkali aktivator dicampur dengan abu terbang dan abu cangkang kelapa sawit selama 1.5 menit agar menjadi pasta geopolimer. Pasta geopolimer dicampur dengan agregat halus selama 2 menit agar menjadi beton geopolimer. Gambar 2. menampilkan proses pencampuran dalam membuat beton geopolimer. Proses selanjutnya adalah merawat benda uji pada suhu ruangan dan dipanaskan pada suhu 60°C di oven selama 24 jam. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Hardjito dan Rangan (2005), peningkatan kuat tekan yang paling signifikan terjadi ketika dilakukan pemanasan benda uji pada suhu 60°C selama 24 jam sehingga digunakan pada penelitian ini. Benda uji yang sudah berumur 1 hari, ditimbang dan diuji kuat tekannya menggunakan mesin tekan. Hasil kuat tekan setiap benda uji dicatat untuk dianalisis. Diagram alir penelitian ditampilkan pada gambar 3.



Gambar 2. Proses pembuatan beton geopolimer



Gambar 3. Diagram alir penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kuat tekan rata-rata pada umur 1 hari dari benda uji yang menggunakan perbandingan alkali aktivator dan abu terbang 0,55:1 tanpa tambahan abu cangkang kelapa sawit ditampilkan pada tabel 1. Benda uji yang dirawat pada suhu ruangan menghasilkan kuat tekan rata-rata sebesar 16,3 MPa. Ketika dipanaskan, kuat tekan rata-rata yang dihasilkan meningkat menjadi 33,2 MPa. Kuat tekan rata-rata benda uji ketika ditambah abu cangkang kelapa sawit sebanyak 5% ditampilkan pada tabel 2. Benda uji yang dirawat pada suhu ruangan menghasilkan kuat tekan rata-rata sebesar 14,7 MPa. Ketika dipanaskan, kuat tekan rata-rata yang dihasilkan meningkat menjadi 30,5 MPa.

Tabel 1. Hasil kuat tekan rasio 0,55:1 tanpa tambahan abu cangkang kelapa sawit

Metode perawatan	Kuat tekan (MPa)	Kuat tekan rata-rata (MPa)
Suhu ruangan	16,8	16,3
	16,8	
	15,2	
Dipanaskan	34,6	33,2
	33,2	
	31,7	

Tabel 2. Hasil kuat tekan rasio 0,55:1 dengan tambahan abu cangkang kelapa sawit 5%

Metode perawatan	Kuat tekan (MPa)	Kuat tekan rata-rata (MPa)
Suhu ruangan	15,2	14,7
	15,2	
	13,6	
Dipanaskan	28,8	30,5
	29,2	
	33,6	

Kuat tekan rata-rata pada umur 1 hari dari benda uji yang menggunakan menggunakan perbandingan alkali aktivator dan abu terbang 0,825:1 tanpa tambahan abu cangkang kelapa sawit ditampilkan pada tabel 3. Benda uji yang dirawat pada suhu ruangan menghasilkan kuat tekan rata-rata sebesar 8,7 MPa. Ketika dipanaskan, kuat tekan rata-rata yang dihasilkan meningkatkan menjadi 31,5 MPa. Kuat tekan rata-rata benda uji ketika ditambah abu cangkang kelapa sawit sebanyak 5% ditampilkan pada tabel 4. Benda uji yang dirawat pada suhu ruangan menghasilkan kuat tekan rata-rata sebesar 8,1 MPa. Ketika dipanaskan, kuat tekan rata-rata yang dihasilkan meningkatkan menjadi 27,6 MPa.

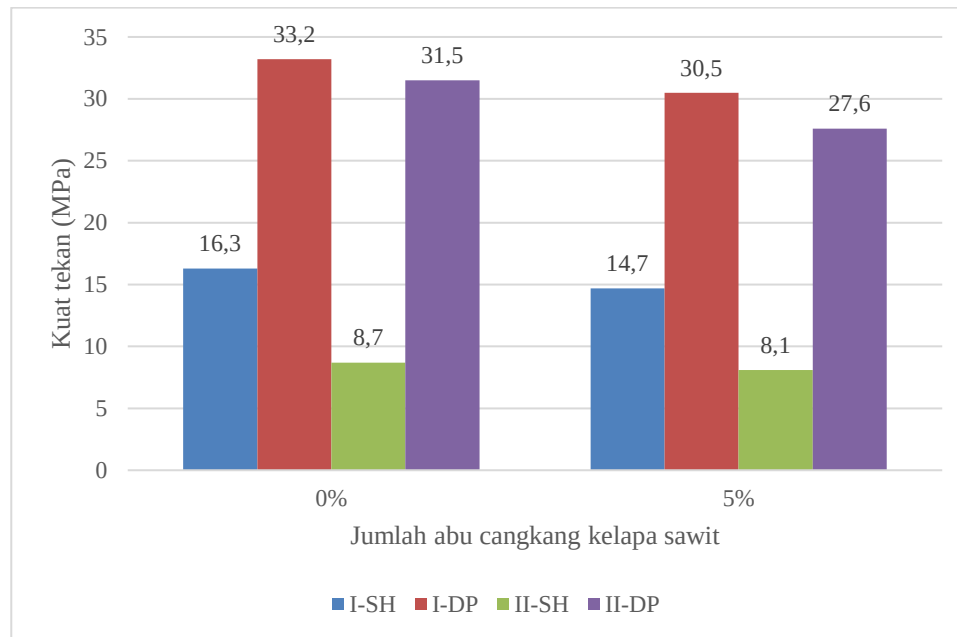
Tabel 3. Hasil kuat tekan rasio 0,825:1 tanpa tambahan abu cangkang kelapa sawit

Metode perawatan	Kuat tekan (MPa)	Kuat tekan rata-rata (MPa)
Suhu ruangan	8,4	8,7
	9,2	
	8,4	
Dipanaskan	35,2	31,5
	30,4	
	28,8	

Tabel 4. Hasil kuat tekan rasio 0,825:1 dengan tambahan abu cangkang kelapa sawit 5%

Metode perawatan	Kuat tekan (MPa)	Kuat tekan rata-rata (MPa)
Suhu ruangan	7,2	8,1
	9,6	
	7,6	
Dipanaskan	26,8	27,6
	28,4	
	27,6	

Hasil kuat tekan dari seluruh benda uji ditampilkan pada gambar 4. Benda uji dengan rasio 0,55:1 yang dipanaskan pada suhu 60°C memiliki kuat tekan 203% lebih besar dibanding yang dirawat pada suhu ruangan. Pada benda uji yang ditambahkan cangkang kelapa sawit sebanyak 5%, kuat tekan benda uji yang dipanaskan 207% lebih besar dibanding yang dirawat pada suhu ruangan. Selanjutnya, benda uji dengan rasio 0,825:1 yang dipanaskan memiliki kuat tekan 362% lebih besar dibanding yang dirawat pada suhu ruangan. Pada benda uji yang ditambahkan cangkang kelapa sawit sebanyak 5%, kuat tekan benda uji yang dipanaskan 340% lebih besar dibanding yang dirawat pada suhu ruangan. Suhu merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi reaksi kimia (Sodiqovna dan Orifjon, 2020). Suhu yang meningkat membuat reaksi kimia terjadi semakin cepat sehingga meningkatkan kuat tekan dari benda uji.



Gambar 4. Hasil kuat tekan seluruh benda uji

Catatan: I-SH: Rasio alkali aktivator terhadap abu terbang sebesar 0,55:1 pada suhu ruangan, I-DP: Rasio 0,55:1 saat dipanaskan, II-SH: Rasio alkali aktivator terhadap abu terbang sebesar 0,825:1 pada suhu ruangan, dan II-DP: Rasio 0,825:1 saat dipanaskan.

4. KESIMPULAN

Benda uji dengan rasio alkali aktivator terhadap abu terbang sebesar 0,55:1 yang dipanaskan memiliki kuat tekan sekitar 2 kali lebih besar dibanding benda uji yang dirawat pada suhu ruangan. Benda uji dengan rasio alkali aktivator terhadap abu terbang sebesar 0,825:1 memiliki kuat tekan sekitar 3.5 kali lebih besar dibandingkan yang dirawat pada suhu ruangan. Hal tersebut disebabkan oleh peningkatan suhu sehingga menyebabkan reaksi kimia pada benda uji berlangsung lebih cepat. Saran untuk penelitian selanjutnya adalah menutup seluruh permukaan benda uji pada saat proses pemanasan agar tidak ada cairan yang menguap, meneliti variasi lainnya dari jumlah penambahan abu cangkang kelapa sawit, variasi lain dari konsentrasi larutan natrium silikat, dan menguji kuat tekan ketika benda uji berumur 28 dan 56 hari.

DAFTAR PUSTAKA

- Alfi, M. (2017). *Studi penggunaan abu ampas tebu dan fly ash pada pasta geopolimer*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Ali, K. A., Ahmad, M.I., & Yusup, Y. (2020). Issues, impacts, and mitigations of carbon dioxide emissions in the building sector. *Sustainability*, 12, 7427. <https://doi.org/10.3390/su12187427>
- Amalo, P. S. (2018). *Pengaruh parameter molaritas naoh, metode curing, dan bahan admixture terhadap kuat tekan dan workability beton geopolimer*. Tangerang: Universitas Pelita Harapan.
- Bediako, M., Gawu, S. K., Adjaottor, A. A., Ankrah, J. S., & Atiemo, E. (2016). Analysis of co-fired clay and palm kernel shells as a cementitious material in Ghana. *Case studies in Construction Materials*, 5, 46-52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2016.06.001>
- Bhatt, A., Priyadarshini, S., Mohanakrishnan, A. A., Abri, A., Sattler, M., & Techapaphawit, S. (2019). Physical, chemical, and geotechnical properties of coal fly ash: A global review. *Case Studies in Construction Materials* 11. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00263>
- Fernando, I. (2018). *Pengaruh penggunaan abu sekam padi terhadap kuat tekan dan kuat lentur beton geopolimer*. Tangerang: Universitas Pelita Harapan.
- Hardjito, D. & Rangan, B. V. (2005). *Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete*. Australia: Curtin University of Technology.
- Hasnaoui, A., Ghorbel, E., & Wardeh, G. (2019). Comparison between Portland cement concrete and geopolymer concrete based on metakaolin and granulated blast furnace slag with the same binder volume. *Academic Journal of Civil Engineering*, 37(2), 127-132. <https://doi.org/10.26168/icbbm2019.18>

- Mulyati & Arkis, Z. (2020). Pengaruh metode perawatan beton terhadap kuat tekan beton normal. *Jurnal Teknik Sipil ITP*, Vol. 7, No. 2. <https://doi.org/10.21063/JTS.2020.V702.05>
- Putra, A. F. K., Hasyim, S., Nurjannah, S. A., Usman, A. P., Hanafiah, H., & Juliantina, I. (2021, July). The properties of palm oil fuel ash-fly ash based geopolymer mortar. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2347, No. 1). AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/5.0051723>
- Salih, M. A., Demirboga, R., Ali, A. A. A., & Abdullah, M. M. A. B. (2013). Properties of fresh palm oil fuel ash based geopolymer material. *Advances in Environmental Biology*, 7(12), 3572-3579.
- Serwinda, Hidayat, A., & Lumba, P. (2014). Pengaruh penambahan cangkang sawit terhadap kuat tekan beton f'c 25 MPa. *Jurnal mahasiswa teknik*, Universitas Pasir Pengairan.
- Sodiqovna, O. M. & Orifjon qizi, I. G. (2020). The rate of a chemical reaction and factors affecting it. *EPRA International Journal of Research and Development*, Vol. 5, issue 8. <https://doi.org/10.36713/epra2016>
- Susanto, J. (2020). *Pengaruh penggunaan superplasticizer terhadap workability dan kuat tekan beton geopolimer*. Tangerang: Universitas Pelita Harapan.
- Vitri, G., & Herman, H. (2019). Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit Sebagai Material Tambahan Beton. *Jurnal Teknik Sipil Institut Teknologi Padang*, 6(2), 78-87. <https://doi.org/10.21063/JTS.2019.V602.06>
- Yanuari, R., Ikrammullah, M., Septari, D., Wijaya, M. F., & Olivia, M. (2020). Studi parametrik mortar geopolimer hybrid abu sawit (palm oil fuel ash/POFA). *Rekayasa sipil*, 14(2), 83-90. <https://doi.org/10.21776/ub.rekayasasipil.2020.014.02.1>
- Yasin, A. K., Bayuaji, R., & Susanto, T. E. (2017, November). A review in high early strength concrete and local materials potential. In *IoP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 267, No. 1, p. 012004). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/267/1/012004>
- Yuliana, R., Muhardi, & Fatnanta, F. (2014). Karakteristik fisis dan mekanis abu sawit (palm oil fuel ash) dalam geoteknik. *Jurnal online mahasiswa fakultas teknik Universitas Riau*, 1(1), 1-13. <https://jom.unri.ac.id/index.php/JOMFTEKNIK/article/view/3760>

