

Studi Perbandingan Pengaruh Pembakaran Terhadap Kuat Tekan Beton Berbasis Semen Dan Beton Geopolimer

Euneke Widyaningsih^{1*}, Bernardinus Herbudiman² dan Yasser Gillan Emerson³

^{1*}Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Jl. PH. H. Mustofa No. 23, Bandung
e-mail: eunekewidya@itenas.ac.id

²Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Jl. PH. H. Mustofa No. 23, Bandung
e-mail: herbudiman@itenas.ac.id

³Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Jl. PH. H. Mustofa No. 23, Bandung
e-mail: yassergillan@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kuat tekan beton berbasis semen Portland dan beton geopolimer berbasis dasar fly ash sebelum dan setelah terpapar suhu tinggi simulasi kebakaran. Metode eksperimen melibatkan pembuatan sampel silinder beton (diameter 10 cm, tinggi 20 cm) dengan mutu rencana $f_c'30$ MPa, variasi durasi pembakaran (0, 30, 60, 90, 120 menit), serta pengujian kuat tekan pada umur 28 hari. Hasil menunjukkan bahwa beton berbasis semen mengalami penurunan kuat tekan rata-rata 15,63%, sedangkan beton geopolimer menunjukkan peningkatan rata-rata 6,76%. Hal ini membuktikan beton geopolimer lebih unggul dalam ketahanan terhadap suhu tinggi dan berpotensi sebagai material konstruksi berkelanjutan.

Kata kunci: beton geopolimer, beton berbasis semen, kuat tekan pasca bakar, ketahanan api

1. PENDAHULUAN

Indonesia adalah salah satu negara berkembang yang sedang mengalami pembangunan infrastruktur yang masif di seluruh wilayahnya. Namun, perkembangan yang pesat ini juga membawa tantangan, salah satunya adalah risiko kebakaran yang dapat membahayakan keselamatan dan mengancam keamanan struktural. Kasus kebakaran Pasar Seririt, Buleleng (2014), misalnya menunjukkan kerentanan beton berbasis semen terhadap paparan suhu tinggi. Penelitian Herlambang dan Sudiarta (2015) kerusakan elemen struktur akibat kebakaran di Pasar Seririt Buleleng berupa keretakan ringan hingga retak berat yang meliputi sebagian besar penampang, pengelupasan selimut beton dan perubahan warna permukaan beton. Kerusakan tersebut lebih jauh lagi mengakibatkan beton menjadi getas dan rapuh. Hal ini menjelaskan bahwa beton berbasis semen memiliki kelemahan terhadap paparan suhu tinggi.

Beton konvensional berbasis semen Portland merupakan material yang paling banyak digunakan. Meskipun relatif tahan api dibandingkan baja dan kayu, beton ini memiliki kelemahan fundamental ketika terpapar suhu sangat tinggi. Di sisi lain, produksi semen Portland menyumbang 4-8% emisi CO_2 global yang bertentangan dengan prinsip infrastruktur berkelanjutan.

Beton geopolimer hadir sebagai solusi alternatif yang menjanjikan. Didefinisikan oleh Davidovits sebagai material yang terbentuk dari reaksi alkaliaktivasi pada bahan berunsur silika dan alumina (seperti fly ash), beton geopolimer tidak hanya lebih ramah lingkungan tetapi juga dikenal memiliki ketahanan panas yang lebih baik. Penelitian Desimaliana dkk. menunjukkan bahwa metode curing dengan pendekatan suhu tinggi justru dapat meningkatkan kuat tekan beton geopolimer, berbeda dengan beton berbasis semen yang memerlukan suhu terjaga untuk proses hidrasi.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis dan membandingkan performa kuat tekan beton berbasis semen dan beton geopolimer dalam kondisi pasca bakar. Fokusnya adalah pada pengaruh variasi durasi paparan api terhadap kuat tekan kedua jenis beton tersebut.

2. METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Material Konstruksi Teknik Sipil Itenas Bandung dengan menggunakan pendekatan metode pengujian serta ketentuan dari Standar Nasional Indonesia. Penelitian melalui tahapan pengujian sebagai berikut.

2.1 Material dan Perencanaan Campuran

Penelitian menggunakan semen Portland tipe I, agregat kasar (batu pecah maksimal 20 mm), agregat halus (pasir galunggung), dan fly ash PLTU Paiton. Perencanaan campuran beton berbasis semen mengacu SNI 03-2834-2000 dengan mutu rencana $f_c'30$ MPa. Dalam penelitian ini terdapat 2 komposisi beton yaitu beton berbasis semen

dan beton geopolimer yang disampaikan pada **Tabel 1** dan **Tabel 2**. Komposisi pada beton berbasis semen terdiri dari agregat kasar, agregat halus, semen dan air, dengan kuat tekan rencana f_c' 30 MPa. Komposisi pada beton geopolimer terdiri dari agregat kasar, agregat halus, fly ash dan alkali aktivator (NaOH dan Na_2SiO_3). Alkali aktivator ini gabungan dua larutan yaitu Natrium hidroksida dan Natrium silika dengan perbandingan 2:4 dan molaritas yang digunakan pada larutan NaOH yaitu 10 M.

Tabel 1. Proporsi Beton Berbasis Semen 1 m³

Agregat kasar (kg)	Agregat Halus (kg)	Semen (kg)	Air (kg)
1168,83	656,99	412,53	189,71

Tabel 2. Proporsi Beton Geopolimer 1 m³

Agregat kasar (kg)	Agregat Halus (kg)	Fly Ash (kg)	NaOH (kg)	Na_2SiO_3 (kg)
1319,71	621,34	549,40	45,20	91,04

2.2 Pembuatan Sampel dan *Curing*

Dibuat 40 sampel silinder (Ø10 cm × 20 cm), terdiri dari 20 sampel beton berbasis semen dan 20 sampel beton geopolimer. *Curing* beton berbasis semen menggunakan metode perendaman selama 28 hari, sedangkan beton geopolimer menggunakan metode membran kedap udara.

2.3 Variasi dan Proses Pembakaran

Variasi durasi pembakaran: 0, 30, 60, 90, dan 120 menit. Suhu pembakaran dipantau setiap 30 menit menggunakan termometer inframerah. Proses pembakaran dilakukan untuk mensimulasikan kondisi beton yang mengalami paparan suhu tinggi seperti dalam peristiwa kebakaran. Metode pembakaran menggunakan tong baja sebagai ruang pembakaran dan torch burner berbahan bakar gas LPG sebagai sumber panas utama. Proses ini dilakukan secara manual namun terukur, dengan pengecekan suhu berkala setiap 30 menit untuk mengetahui suhu yang dihasilkan sebagaimana terlihat pada **Gambar 1** di bawah ini.



Gambar 1. Proses Pembakaran

2.4 Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan bertujuan agar dapat mengetahui kuat tekan beton yang telah *setting* pada umur beton 7, 14, dan 28 hari. Pada penelitian ini pengujian dilakukan pada benda uji yang telah *setting* pada umur beton 28 hari. Nilai rencana mutu untuk kedua varian beton adalah 30 MPa. Metode pengujian kuat tekan terdapat pada SNI-03-1974-1990 menggunakan alat uji kuat tekan beton (**Gambar 2**).



Gambar 2. Pengujian Kuat Tekan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut ini merupakan hasil pengujian yang dilakukan, dimulai dari hasil pengujian awal dari kualitas material yang digunakan serta hasil luaran dari proses pembakaran benda uji hingga analisis kuat tekan yang diperoleh.

3.1 Hasil Pengujian Kualias Material Agregat Kasar

Pengujian kualitas ini bertujuan untuk kontrol material terhadap standar mutu dan kualitas yang ditetapkan oleh spesifikasi atau ketentuan yang berlaku. Parameter yang diuji pada material agregat kasar yaitu berat jenis, kadar air, berat isi, kadar lumpur dan modulus kehalusan.

Tabel 4. Hasil Pengujian Kualitas Material Agregat Kasar

Jenis Pengujian	Sample I	Sample II	Rata- Rata	Ketentuan	Keterangan
Berat Jenis					
a. Apparent Specific Gravity	2,798	2,813	2,805	specific gravity 2.1 – 2.9 penyerapan <5%	OK
b. Bulk Specific Gravity Kondisi Kering	2,575	2,611	2,593		
c. Bulk Specific Gravity Kondisi SSD	2,694	2,683	2,688		
d. Persentase Penyerapan (%)	3,092	2,739	2,915		
Kadar Air (%)	2,04	2,564	2,302	3% - 5%	NOT OK
Berat isi		1,439		1.2 - 1.75	OK
Kadar Lumpur (%)	0,219	0,234	0,226	< 1%	OK
Analisa saringan (%)		6,813		6 - 6.9	OK

Berdasarkan hasil pengujian kualitas material agregat kasar pada **Tabel 4**, terdapat parameter pengujian yang tidak memenuhi standar, pada pengujian kadar air diperoleh hasil pengujian sebesar 2,302 %, dimana persyaratan standar pada SNI (15-1990-30) nilai yang memenuhi harus berkisar pada 3-5%, dengan persyaratan tersebut nilai kadar air tidak memenuhi persyaratan. Faktor yang menyebabkan nilai kadar air tidak memenuhi standar yaitu saat proses dikeringkan nya agergat kasar setelah proses pembersihan oleh air, agregat kasar berada diruang terbuka dan terpapar langsung oleh matahari yang menyebabkan kandungan air yang ada didalam agregat menguap. Sehingga menyebabkan pori-pori internal terbuka lebih lebar. Ketika agregat terkena air, dapat menyerap lebih banyak daripada kondisi normal. Pengaruh penyerapan yang tinggi dapat diminimalisir ketika pencampuran material, dimana agregat harus dibuat SSD (*Saturated Surface-Dry*).

3.2 Hasil Pengujian Kualitas Material Agregat Halus

Pengujian kualitas ini bertujuan untuk kontrol material terhadap standar mutu dan kualitas yang ditetapkan spesifikasi atau ketentuan yang berlaku. Parameter yang diuji pada material agregat kasar yaitu berat jenis, kadar air, berat isi, kadar lumpur dan saringan.

Tabel 5. Hasil Pengujian Kualitas Material Agregat Halus

Jenis Pengujian	Sample I	Sample II	Rata- Rata	Ketentuan	Keterangan
Berat Jenis					
a. Apparent Specific Gravity	3,752	3,468	3,61	specific gravity 2.1 – 2.9 penyerapan <5%	OK
b. Bulk Specific Gravity Kondisi Kering	1,242	2,763	2,002		
c. Bulk Specific Gravity Kondisi SSD	1,911	2,97	2,44		
d. Persentase Penyerapan (%)	3,092	7,526	5,3		NOT OK
Kadar Air (%)	4,167	2,04	3,103	3% - 5%	OK
Berat isi		1,63		1.2 - 1.75	OK
Kadar Lumpur (%)	0,123	0,098	0,11	< 5%	OK
Analisa saringan (%)		2,751		2.3 - 3.1	OK

Berdasarkan hasil pengujian kualitas material agregat halus terdapat parameter yang tidak sesuai standar yang ditetapkan. Pada **Tabel 5** nilai persentase diperoleh sebesar 5.3 % yang dimana pada SNI (1970:2008) *specific gravity* nilai persentase yang disyaratkan sebesar < 5%, maka dari itu nilai persentase penyerapan tidak sesuai. Penyebab hal tersebut terjadi dikarenakan saat proses pengeringan agregat halus setelah pencucian oleh air, agregat halus berada diruang terbuka dan terpapar langsung oleh matahari yang menyebabkan kandungan air yang ada didalam agregat menguap. Sehingga menyebabkan pori-pori internal terbuka lebih lebar. Ketika agregat terkena air, dapat menyerap lebih banyak daripada kondisi normal. Pengaruh penyerapan yang tinggi dapat diminimalisir ketika pencampuran material, dimana agregat harus dibuat SSD (*Saturated Surface-Dry*).

3.3 Berat Jenis Fly Ash

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui berat jenis fly ash. Hasil dari pengujian berat jenis Fly Ash ditampilkan pada **Tabel 6** tanpa nilai ketentuan dari SNI maupun peraturan lainnya.

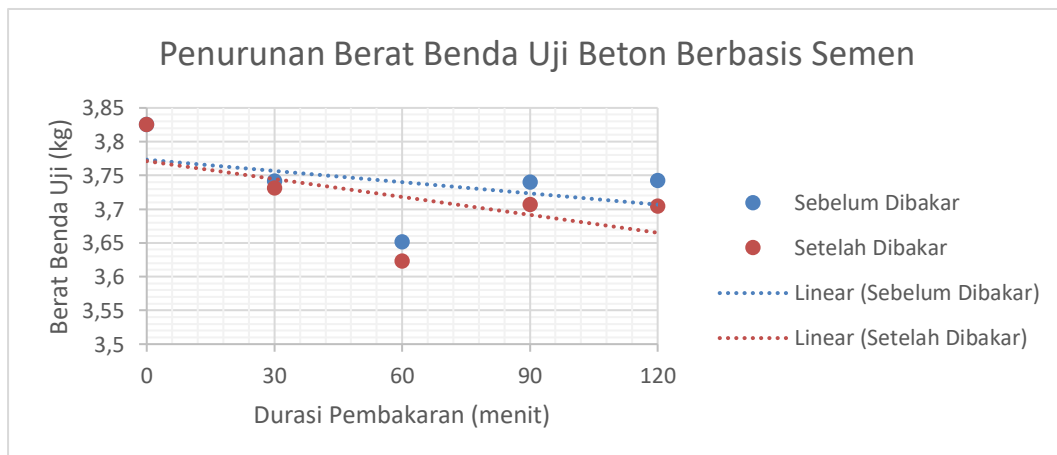
Tabel 6. Berat Jenis Fly Ash

Jenis Pengujian	Sample I	Sample II	Rata- Rata	Ketentuan	Keterangan
Berat Jenis fly ash	2,79	3,076	2,933	-	-

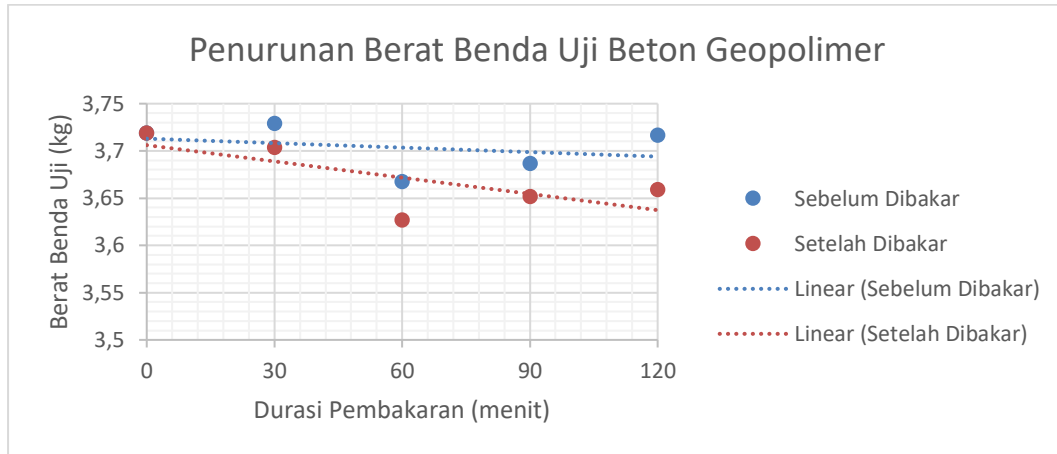
Karena tidak ada SNI yang mengatur berat jenis dari material Fly Ash yang digunakan dalam beton geopolimer, maka data ini hanya digunakan untuk perhitungan komposisi beton geopolimer.

3.4 Pengukuran Kontrol Berat Volume Beton

Kedua jenis beton mengalami penurunan berat volume setelah pembakaran. Beton berbasis semen mengalami penurunan bertahap dari 0,26% (30 menit) hingga 0,99% (120 menit) seperti ditunjukkan pada grafik **Gambar 3**. Sementara untuk beton geopolimer menunjukkan penurunan lebih besar: 0,67% (30 menit) hingga 1,53% (120 menit) seperti ditunjukkan pada grafik **Gambar 4**.



Gambar 3. Perbandingan Berat Volume Beton Berbasis Semen



Gambar 4. Rata-rata Kehilangan Berat Volume Beton Geopolimer

Menurut Phan, L.T., & Carino, N.J. (2001), menjelaskan bahwa beton masih mengandung 3-5% air saat proses hidrasi telah selesai. Saat terpapar api pada beton berbasis semen, kandungan air yang tersisa pada beton berbasis semen mengalami penguapan saat terpapar api, hal ini menyebabkan terjadinya penurunan berat volume pada beton. Tekanan uap air yang terperangkap pada beton menyebabkan retak pada internal beton yang menyebabkan partikel terlepas sehingga berat volume pada beton berbasis semen berkurang.

Berat volume beton geopolimer menunjukkan penurunan berat lebih besar sesudah terpapar api dibandingkan berat volume beton berbasis semen. Menurut (Bakharev 2006) ketika pasta dari beton geopolimer terpapar suhu tinggi menyebabkan pengurangan rata-rata ukuran pori yang berakibat penurunan porositas. Hal ini menjadi penyebab beton geopolimer mengalami kehilangan berat volume lebih tinggi dibandingkan beton berbasis semen.

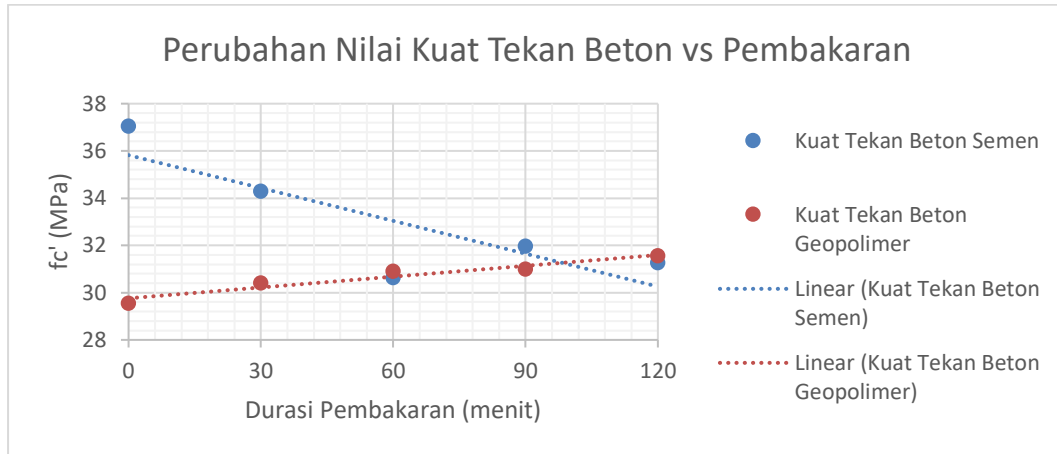
3.5 Perbandingan Kuat Tekan Beton Paska Pembakaran

Kuat tekan beton berbasis semen mengalami penurunan progresif seiring peningkatan durasi pembakaran. Data pada **Tabel 7** menunjukkan kuat tekan awal 37,05 MPa (0 menit) menurun menjadi 34,28 MPa (30 menit), 30,63 MPa (60 menit), 31,97 MPa (90 menit), dan 31,26 MPa (120 menit). Penurunan maksimal mencapai 15,63% setelah 120 menit pembakaran. Penurunan ini disebabkan oleh hasil dari proses hidrasi yang menghasilkan gel pengikat C-S-H (kalsium-silika-hidrasi) yang mana saat terpapar suhu tinggi mengakibatkan dekomposisi senyawa kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) menjadi kalsium oksida (CaO) dan uap air (H_2O) melemahkan ikatan antara agregat dan pasta semen. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa beton berbasis semen memiliki batasan dalam mempertahankan kekuatannya saat terpapar suhu tinggi, dan cenderung mengalami penurunan struktur.

Kontras dengan beton berbasis semen, beton geopolimer menunjukkan kecenderungan peningkatan kuat tekan setelah pembakaran. **Tabel 7** juga menyajikan kuat tekan awal beton geopolimer yaitu 29,55 MPa (0 menit) meningkat menjadi 30,41 MPa (30 menit), 30,89 MPa (60 menit), 30,99 MPa (90 menit), dan 31,55 MPa (120 menit). Peningkatan maksimal mencapai 6,76% setelah 120 menit pembakaran. Peningkatan kuat tekan ini disebabkan stabilitas struktur N-A-S-H (sodium alumino silicate hydrate) hasil polimerisasi yang tidak bergantung pada hidrasi air. Struktur aluminosilikat tiga dimensi tetap stabil pada suhu tinggi dan bahkan mengalami densifikasi yang meningkatkan kekuatan mekanis.

Tabel 7. Perbandingan Nilai Kuat Tekan Pada Beton Berbasis Semen dan Beton Geopolimer

Durasi (menit)	Beton Semen (MPa)	Perubahan (%)	Beton Geopolimer (MPa)	Perubahan (%)
0	37,05	-	29,55	-
30	34,28	-7,46	30,41	+2,93
60	30,63	-17,32	30,89	+4,54
90	31,97	-13,71	30,99	+4,88
120	31,26	-15,63	31,55	+6,76



Gambar 5. Perubahan Nilai Kuat Tekan Beton Berbasis Semen

Hasil yang terlihat pada grafik di **Gambar 5** menunjukkan beton geopolimer memiliki ketahanan secara nilai kuat tekan terhadap paparan api dengan mempertahankan bahkan meningkatkan kekuatan struktural, sementara beton berbasis semen mengalami degradasi signifikan

4. KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa beton geopolimer memiliki kinerja superior dibanding beton berbasis semen dalam kondisi pasca bakar. Beton berbasis semen mengalami penurunan kuat tekan hingga 15,63% akibat terganggunya proses hidrasi dan dekomposisi senyawa kalsium hidroksida. Sebaliknya, beton geopolimer menunjukkan peningkatan kuat tekan hingga 6,76% berkat stabilitas struktur aluminosilikat hasil polimerisasi.

Beton geopolimer tidak hanya menawarkan ketahanan api yang superior, tetapi juga memberikan solusi konstruksi berkelanjutan melalui pemanfaatan limbah fly ash PLTU. Hasil penelitian ini merekomendasikan penggunaan beton geopolimer untuk aplikasi konstruksi yang memerlukan ketahanan tinggi terhadap kebakaran, seperti gedung tinggi, terowongan, dan fasilitas industri.

Penelitian lanjutan disarankan untuk mengeksplorasi optimasi komposisi aktivator alkali, pengujian pada suhu pembakaran lebih tinggi, dan evaluasi properti durabilitas jangka panjang beton geopolimer pasca pembakaran.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional (BSN). (1990). Pengujian Analisa Saringan Agregat (SNI 03-1968-1990). Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2000). Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal (SNI 03-2834-2000). Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2008). Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar (SNI 03-1969-2008). Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2008). Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus (SNI 03-1967-2008). Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2019). *Tata cara perhitungan struktur beton untuk bangunan gedung (SNI 2847:2019)*. Jakarta.
- Bakharev, T. (2006). Thermal behaviour of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and Concrete Research*, Vol. 36(6), 1134–1147.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials. *Journal of Thermal Analysis*, Vol. 37, 1633–1656.
- Davidovits, J. (1994). Properties of Geopolymer Cements. Dalam *Alkaline Cements and Concretes* (hlm. 131-149). Kyiv: Scientific Research Institute on Binders and Materials.
- Desimaliana, E., Widyaningsih, E., dan Kaltsum, N. (2023). "The Effect of Curing Method on Geopolymer Concrete Compressive Strength". Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil, Bandung, 7-8 November 2023, 100-110.
- Dipohusodo, I. (1996). *Manajemen proyek konstruksi: Perencanaan, penjadwalan, dan pengendalian proyek*. Jakarta: PT Pradnya Paramita.
- Ferdiansyah, N. (2019). "Kajian Kuat Tekan Beton Berdasarkan Kondisi Bakar dan Tanpa Bakar (Studi Mutu Beton 20 MPa Menggunakan Metode American Concrete Institute)". Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil, Aceh, 10-11 September 2019, 50-60.
- Hardjito, D., dan Rangan, B. V. (2005). *Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete (Research Report GC 1)*. Faculty of Engineering, Curtin University of Technology.
- Herlambang, S. F., dan Sudiarta, K. I. (2015). "Kuat Tekan Beton Pasca Kebakaran pada Struktur Beton Bertulang di Pasar Seririt, Buleleng, Bali". Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil, Bali, 15-16 Agustus 2015, 200-210.
- Joint Research Centre (JRC). (2016). *Decarbonisation options for the cement industry*. European Commission.
- McCaffrey, R. (2002). Climate change and the cement industry. *Global Cement and Lime Magazine*, Vol. 8(3), 15-19.
- Phan, L.T., dan Carino, N.J. (2001). Mechanical properties of high-strength concrete at elevated temperatures. *Fire Safety Journal*, Vol. 36(1), 1-17.
- Sarker, P. K., dan Maneerat, N. (2019). Performance of fly ash based geopolymer concrete at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, Vol. 223, 1005-1015.
- Xu, H., dan Van Deventer, J. S. J. (2000). The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 59(3), 247–266.