



PENGARUH SUBSTITUSI ABU CANGKANG KELAPA SAWIT (ABU BOILER) TERHADAP KUAT TEKAN DAN WORKABILITY BETON FC 21 MPA

Dimas Duwi Nugroho

Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat
Bukittinggi, Indonesia

Selpa Dewi

Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat
Bukittinggi, Indonesia

Deddy Kurniawan

Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat
Bukittinggi, Indonesia

Email: Ratuplaza44@gmail.com

Abstrak. Peningkatan industri konstruksi yang pesat berdampak pada meningkatnya konsumsi semen Portland, yang merupakan salah satu penyumbang emisi gas karbondioksida terbesar. Di sisi lain, pabrik kelapa sawit menghasilkan limbah abu boiler dalam jumlah melimpah dari sisa pembakaran cangkang dan serat kelapa sawit di PT. Perdana Inti Sawit Perkasa (PISP-1), Rokan Hulu, Riau, yang belum terkelola optimal dan berpotensi mencemari lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh substitusi sebagian semen dengan abu boiler terhadap sifat fisik/kemudahan pengerjaan (workability/slump test) adukan beton segar serta nilai kuat tekan beton mutu rencana Fc 21 MPa (K-250) pada umur 14 dan 28 hari. Penelitian menggunakan metode eksperimental laboratorium dengan variasi substitusi abu boiler sebesar 0% (beton normal), 5%, 10%, 15%, dan 20% dari berat semen. Benda uji berbentuk kubus berukuran 15×15×15 cm diuji menggunakan Universal Testing Machine (UTM) mengacu pada SNI 03-2834-2000 dan SNI 7656:2012. Hasil penelitian menunjukkan bahwa substitusi 5% abu boiler merupakan kadar optimum yang memberikan nilai kuat tekan terbaik sebesar 21,11 MPa (256,1 kg/cm²) pada umur 28 hari, setara dengan beton normal (21,11 MPa; 102,4% dari target rencana) dengan nilai slump 9-10 cm (workability sedang). Peningkatan substitusi menjadi 10%, 15%, dan 20% menyebabkan penurunan nilai slump berturut-turut menjadi 8-9 cm, 6-7 cm, dan 5-6 cm, serta penurunan kuat tekan 28 hari menjadi 20,17 MPa (244,7 kg/cm²), 21,67 MPa (221,0 kg/cm²), dan 18,67 MPa (190,3 kg/cm²). Dengan demikian, substitusi abu boiler sebesar 5% dari berat semen merupakan persentase optimum yang memenuhi syarat mutu struktural Fc 21 MPa dan memberikan solusi ramah lingkungan bagi limbah industri kelapa sawit.

Kata kunci: abu boiler kelapa sawit; substitusi semen; kuat tekan beton; workability; slump test; beton Fc 21 MPa.

Article History

Received: Oktober 2026
Reviewed: Oktober 2026
Published: Oktober 2026

Plagiarism Checker
No 237.u873247.fh8374

Copyright : Author
Publish by : Kohesi



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

1. PENDAHULUAN

Industri konstruksi di Indonesia terus mengalami perkembangan yang sangat pesat seiring dengan meningkatnya kebutuhan infrastruktur nasional, seperti gedung perkantoran, perumahan, serta sarana transportasi darat dan udara. Beton tetap menjadi material utama



yang paling dominan digunakan dalam dunia konstruksi karena memiliki berbagai keunggulan teknis, seperti kemudahan dalam pembentukan sesuai kebutuhan arsitektur, biaya perawatan yang relatif rendah, serta memiliki kuat tekan yang tinggi. Namun, ketergantungan yang besar terhadap penggunaan beton berimplikasi langsung pada peningkatan kebutuhan semen Portland sebagai bahan pengikat utamanya. Secara global, proses produksi semen dikenal sebagai salah satu penyumbang emisi gas karbondioksida (CO_2) terbesar ke atmosfer yang berkontribusi signifikan terhadap pemanasan global dan perubahan iklim. Oleh karena itu, diperlukan inovasi berkelanjutan dalam teknologi bahan bangunan untuk menemukan material alternatif ramah lingkungan yang mampu mengurangi penggunaan semen tanpa mengorbankan kualitas mekanis beton.

Di sisi lain, perkembangan pesat sektor industri pertanian dan perkebunan kelapa sawit di Indonesia menghasilkan limbah padat dalam jumlah yang sangat besar namun belum dimanfaatkan secara optimal. Salah satu limbah operasional yang memiliki potensi material cukup besar adalah abu boiler, yaitu sisa hasil pembakaran cangkang dan serabut kelapa sawit pada unit pembangkit uap pabrik minyak kelapa sawit. Di lokasi operasional PT. Perdana Inti Sawit Perkasa (PISP-1) yang berlokasi di Desa Kepenuhan Barat, Kecamatan Kepenuhan, Kabupaten Rokan Hulu, Provinsi Riau, limbah abu boiler terakumulasi dalam jumlah yang sangat melimpah dan belum terkelola secara maksimal. Penanganan limbah yang selama ini sebatas dibuang ke lingkungan terbuka (open dumping) berpotensi memicu pencemaran lingkungan serius, termasuk penurunan kualitas tanah, gangguan estetika lingkungan, hingga pencemaran udara berupa sebaran debu halus yang berisiko menyebabkan gangguan pernapasan bagi masyarakat di sekitar lokasi pabrik.

Secara fisik dan kimiawi, abu boiler memiliki karakteristik partikel yang halus serta kandungan silika (SiO_2) yang cukup tinggi, sehingga berpotensi besar untuk difungsikan sebagai material pozolanik sekaligus filler (bahan pengisi) dalam campuran beton. Sebagai pozolan, silika dalam abu boiler bereaksi dengan kalsium hidroksida $\text{Ca}(\text{OH})_2$ hasil hidrasi semen untuk membentuk kalsium silikat hidrat (C-S-H) sekunder yang berperan penting dalam meningkatkan kuat tekan beton. Selain itu, partikel abu boiler yang lolos saringan No. 200 ($< 0,075$ mm) bekerja pada tingkat mikro (micro-filling effect) untuk mengisi pori-pori antar-butiran, menutup rongga kapiler, serta menyempurnakan struktur padat pada daerah antarmuka atau Interfacial Transition Zone (ITZ). Mekanisme mikro ini tidak hanya berkontribusi pada peningkatan durabilitas dan kuat tekan beton, tetapi juga berpengaruh langsung terhadap sifat pengerjaan (workability), pencegahan bleeding, dan pemisahan butiran (segregation).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk (1) menganalisis pengaruh variasi substitusi abu boiler pabrik kelapa sawit sebesar 5%, 10%, 15%, dan 20% terhadap nilai slump (workability) campuran beton segar Fc 21 MPa, (2) mengevaluasi capaian kuat tekan beton Fc 21 MPa pada umur pengujian 14 dan 28 hari, serta (3) menentukan persentase substitusi abu boiler yang paling optimum yang menghasilkan kuat tekan maksimal tanpa menurunkan kinerja pengerjaan secara signifikan. Kebaruan penelitian ini terletak pada pemfokusan evaluasi batas optimum penggunaan abu boiler sisa pembakaran cangkang dan serat kelapa sawit PT. PISP-1 pada mutu beton rencana Fc 21 MPa (K-250) dengan analisis komprehensif terhadap kehalusan partikel (lolos No. 200) serta dampaknya terhadap sifat fisik adukan segar dan perkembangan kuat tekan mekanis.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan eksperimen laboratorium terhadap benda uji beton berbentuk kubus berukuran $15 \times 15 \times 15$ cm. Semen Portland Composite Cement (PCC) pada campuran beton disubstitusi sebagian dengan abu boiler cangkang dan serat kelapa sawit yang telah lolos saringan No. 200 ($0,075$ mm), dengan variasi persentase substitusi sebesar 0% (beton normal), 5%, 10%, 15%, dan 20% dari berat semen.

Pengujian material dan benda uji beton dilaksanakan di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat, Bukittinggi, sedangkan material limbah abu boiler diperoleh secara spesifik dari unit pengolahan PKS PT. Perdana Inti Sawit Perkasa (PISP-1), Desa Kepenuhan Barat, Kecamatan Kepenuhan, Kabupaten Rokan Hulu, Riau. Material penyusun beton yang digunakan meliputi semen PCC Tipe I merek Semen Padang, agregat halus (pasir alam), agregat kasar (kerikil/batu pecah), air bersih, serta abu boiler. Sebelum digunakan, seluruh material diperiksa sifat fisiknya (berat jenis, berat volume, analisis saringan/gradasi, kadar lumpur, kadar air, dan zat organik) mengacu pada SNI dan ASTM guna memastikan kelayakannya sebagai bahan penyusun beton normal mutu Fc 21 MPa (K-250).

Persiapan abu boiler dilakukan melalui pengambilan limbah sisa pembakaran cangkang dan serat sawit, pengeringan, serta penyaringan menggunakan saringan No. 200 (0,075 mm). Hasil pengujian kehalusan menunjukkan persentase abu boiler yang lolos saringan No. 200 mencapai 85,50%, yang memenuhi syarat sebagai bahan pengisi mikro (micro-filler) dan material pozzolanik.

Perencanaan komposisi campuran beton (mix design) dilakukan mengacu pada SNI 03-2834-2000 dan SNI 7656:2012, dengan parameter rencana meliputi slump target 10 ± 2 cm, kuat tekan rencana Fc 21 MPa (K-250), faktor air semen (FAS) konstan 0,53, serta ukuran maksimum agregat kasar 20 mm. Komposisi berat bahan untuk satu benda uji kubus 15×15×15 cm pada masing-masing variasi disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1: Komposisi campuran material untuk satu benda uji kubus 15×15×15 cm

Variasi Substitusi	Abu Boiler (kg)	Semen PCC (kg)	Agregat Halus (kg)	Agregat Kasar (kg)	Air (L)
0% (Normal)	0,00	1,415	2,372	4,206	0,749
5%	0,071	1,344	2,372	4,206	0,749
10%	0,142	1,274	2,372	4,206	0,749
15%	0,212	1,203	2,372	4,206	0,749
20%	0,283	1,132	2,372	4,206	0,749

Benda uji dicetak berbentuk kubus 15×15×15 cm, masing-masing sebanyak 6 buah untuk setiap variasi substitusi (3 buah diuji pada umur 14 hari dan 3 buah pada umur 28 hari), sehingga total benda uji berjumlah 30 buah. Sifat beton segar diperiksa melalui pengujian slump mengacu pada SNI 1972-2008 menggunakan kerucut Abrams. Pengujian sifat mekanis beton keras dilakukan pada umur 14 dan 28 hari menggunakan Universal Testing Machine (UTM) kapasitas 150 ton mengacu pada SNI 03-1974-1990.

Kuat tekan beton dihitung menggunakan Persamaan (1): $f'_c = P / A$ (1) dengan f'_c adalah kuat tekan beton (MPa atau N/mm²), P adalah beban aksial maksimum hingga hancur (N), dan A adalah luas penampang benda uji (mm²). Nilai kuat tekan dalam MPa selanjutnya dikonversi ke mutu Karakteristik K (kg/cm²) dengan memperhitungkan faktor konversi benda uji kubus.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Material Penyusun Beton

Hasil pengujian laboratorium terhadap sifat fisik material penyusun beton menunjukkan bahwa berat jenis semen PCC adalah 3,05 gr/cm³ (Tabel 4.1), memenuhi standar SNI 15-2531-1991. Pengujian kehalusan abu boiler menunjukkan persentase lolos saringan No. 200 sebesar

85,50% (Tabel 4.10), mengonfirmasi kehalusan partikel yang sangat baik untuk berperan dalam efek pengisi mikro (micro-filler effect).

Pemeriksaan agregat menunjukkan berat volume agregat halus rata-rata 1,583 kg/liter (kondisi padat) dan 1,472 kg/liter (kondisi gembur), dengan specific gravity SSD 1,851 dan penyerapan air 14,15%. Agregat kasar memiliki berat volume padat 1,732 kg/liter dan gembur 1,639 kg/liter, specific gravity SSD 2,11, serta penyerapan air 2,64%. Analisis saringan menunjukkan modulus kehalusan (MHB) agregat halus sebesar 2,4 (Tabel 4.4), berada pada rentang gradasi ideal (2,3-3,1). Kadar lumpur agregat halus tercatat sebesar 2,38% (Tabel 4.7), berada di bawah batas maksimum 5% yang disyaratkan SNI. Pengujian zat organik pada agregat halus menunjukkan warna cairan jernih/kuning muda (Tabel 4.6), sehingga material aman dan memenuhi standar untuk digunakan sebagai bahan penyusun beton struktural.

3.2 Evaluasi Workability Beton Segar (Slump Test)

Workability atau kemudahan pengerjaan diukur melalui pengujian nilai slump pada adukan beton segar. Sesuai perancangan campuran (mix design), nilai slump rencana ditetapkan sebesar 10 ± 2 cm. Hasil pengujian nilai slump adukan beton segar untuk tiap variasi substitusi abu boiler disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2: Hasil pengujian nilai slump dan klasifikasi workability beton segar

Kode Sampel	Abu Boiler (%)	Semen PCC (%)	Slump Rencana (cm)	Slump Pengujian (cm)	Klasifikasi Workability
BN (Normal)	0%	100%	10 ± 2	10 - 12	Sedang (Medium)
BAB 5%	5%	95%	10 ± 2	9 - 10	Sedang (Medium)
BAB 10%	10%	90%	10 ± 2	8 - 9	Sedang (Medium)
BAB 15%	15%	85%	10 ± 2	6 - 7	Rendah (Low)
BAB 20%	20%	80%	10 ± 2	5 - 6	Rendah (Low)

Tabel 2 memperlihatkan kecenderungan penurunan nilai slump secara konsisten seiring bertambahnya persentase substitusi abu boiler. Beton normal memiliki nilai slump 10-12 cm. Pada substitusi 5% dan 10%, penurunan nilai slump relatif kecil (9-10 cm dan 8-9 cm) dan masih memenuhi standar kelecakan pengerjaan di lapangan. Namun, pada variasi 15% dan 20%, terjadi penurunan nilai slump yang signifikan hingga mencapai 6-7 cm dan 5-6 cm (klasifikasi workability rendah). Penurunan kemudahan pengerjaan ini disebabkan oleh tingginya kehalusan partikel abu boiler (85,50% lolos saringan No. 200) yang memiliki luas permukaan spesifik besar, serta bentuk partikel bersudut dan berpori yang menyerap sebagian air bebas adukan (water demand tinggi). Mengingat faktor air semen (FAS) dijaga konstan 0,53, kebutuhan air yang meningkat menyebabkan adukan beton segar menjadi lebih kental dan kaku.

3.3 Pengaruh Substitusi Abu Boiler Terhadap Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada umur 14 dan 28 hari menggunakan benda uji kubus $15 \times 15 \times 15$ cm. Rekapitulasi hasil pengujian kuat tekan rata-rata (K dan f'_c) serta persentase capaian terhadap target mutu rencana F_c 21 MPa (250 kg/cm^2) disajikan pada Tabel 3.

**Tabel 3: Rekapitulasi hasil pengujian kuat tekan rata-rata beton umur 14 dan 28 hari**

Variasi Campuran	Umur Uji (Hari)	Kuat Tekan Rata-rata K (kg/cm ²)	Kuat Tekan Rata-rata f'c (MPa)	Capaian Terhadap Target Fc 21 MPa (%)
Beton Normal (0%)	14	222,1	18,33	88,8%
Beton Normal (0%)	28	256,1	21,11	102,4%
Abu Boiler 5%	14	153,1	14,96	61,2%
Abu Boiler 5%	28	256,1	21,11	102,4%
Abu Boiler 10%	14	213,0	17,63	85,2%
Abu Boiler 10%	28	244,7	20,17	97,9%
Abu Boiler 15%	14	137,5	13,48	55,0%
Abu Boiler 15%	28	221,0	21,67	88,4%
Abu Boiler 20%	14	116,9	11,45	46,8%
Abu Boiler 20%	28	190,3	18,67	76,1%

Berdasarkan Tabel 3, analisis perkembangan kuat tekan beton menunjukkan karakteristik unik berdasarkan umur pengujian:

1. **Laju Perkembangan Umur Awal (14 Hari):** Pada umur 14 hari, nilai kuat tekan beton dengan campuran abu boiler mengalami penurunan dibandingkan beton normal (18,33 MPa). Beton variasi 5% mencatatkan kekuatan 14,96 MPa (153,1 kg/cm²), variasi 10% sebesar 17,63 MPa (213,0 kg/cm²), variasi 15% sebesar 13,48 MPa (137,5 kg/cm²), dan variasi 20% sebesar 11,45 MPa (116,9 kg/cm²). Penurunan kuat tekan di umur awal ini disebabkan oleh berlangsungnya reaksi hidrasi semen murni yang terulur akibat pengurangan porsi semen (dilution effect), sementara reaksi pozzolanik sekunder dari abu boiler belum berjalan optimal.
2. **Lonjakan Kuat Tekan Umur Lanjut (28 Hari):** Memasuki umur 28 hari, kontribusi reaksi pozzolanik abu boiler menjadi sangat nyata. Terjadi lonjakan persentase kenaikan kuat tekan yang signifikan dari umur 14 hari ke 28 hari pada seluruh variasi abu boiler. Pada variasi 5%, kuat tekan melonjak dari 61,2% menjadi 102,4% dari target rencana, mencapai 21,11 MPa (256,1 kg/cm²), setara dengan capaian beton normal (21,11 MPa / 256,1 kg/cm²). Reaksi pozzolanik antara silika reaktif (SiO₂) dalam abu boiler dengan kalsium hidroksida Ca(OH)₂ hasil hidrasi semen menghasilkan kalsium silikat hidrat (C-S-H) sekunder yang memadatkan matriks gel beton dan menutup pori-pori mikro (micro-filler effect).
3. **Kadar Optimum dan Ambang Batas Substitusi:** Variasi 5% merupakan persentase substitusi optimum yang mampu mempertahankan kekuatan struktural penuh setara beton normal sekaligus memenuhi target mutu Fc 21 MPa. Pada variasi 10%, kuat tekan 28 hari mencapai 20,17 MPa (244,7 kg/cm² atau 97,9% dari target), yang masih berada dalam batas toleransi mutu struktural. Namun, pada substitusi di atas 10% (variasi 15% dan 20%), kuat tekan mengalami penurunan berturut-turut menjadi 221,0 kg/cm² (88,4%) dan 190,3 kg/cm² (76,1%). Penurunan kekuatan pada kadar tinggi terjadi karena berkurangnya porsi semen utama secara berlebihan, sehingga jumlah Ca(OH)₂ yang dihasilkan dari hidrasi semen tidak mencukupi untuk bereaksi dengan seluruh abu boiler yang ditambahkan, meninggalkan sisa partikel abu pasif yang memperlemah ikatan pasta semen.



4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium dan pembahasan mengenai pengaruh substitusi abu boiler cangkang dan serat kelapa sawit PT. Perdana Inti Sawit Perkasa (PISP-1) terhadap kuat tekan dan workability beton Fc 21 MPa, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengaruh Terhadap Workability: Peningkatan persentase substitusi abu boiler menyebabkan penurunan nilai slump beton segar secara berprogresi. Nilai slump menurun dari 10-12 cm (beton normal) menjadi 9-10 cm (5%), 8-9 cm (10%), 6-7 cm (15%), dan 5-6 cm (20%). Penurunan ini disebabkan oleh kehalusan partikel abu boiler (85,50% lolos No. 200) serta bentuk partikel berpori yang meningkatkan penyerapan air adukan (water demand).
2. Karakteristik Perkembangan Kuat Tekan: Pada umur 14 hari, kuat tekan beton campuran abu boiler mengalami penurunan akibat laju reaksi pozzolanik yang lebih lambat dibanding hidrasi semen. Namun pada umur 28 hari, terjadi lonjakan kuat tekan yang signifikan akibat terbentuknya gel C-S-H sekunder hasil reaksi pozzolanik.
3. Persentase Substitusi Optimum: Substitusi semen dengan abu boiler sebesar 5% merupakan variasi terbaik (optimum). Pada kadar ini, beton mampu menghasilkan kuat tekan rata-rata umur 28 hari sebesar 21,11 MPa (256,1 kg/cm²), setara 102,4% dari target rencana dan sejajar dengan beton normal, dengan tetap mempertahankan kinerja workability sedang (slump 9-10 cm).
4. Batasan Penggunaan Struktural: Substitusi abu boiler hingga 10% masih memenuhi batas toleransi teknis (20,17 MPa; 97,9% target), sedangkan penggunaan di atas 10% (variasi 15% dan 20%) memicu penurunan mutu struktural secara nyata (88,4% dan 76,1% dari target), sehingga tidak disarankan untuk aplikasi konstruksi beton bertulang Fc 21 MPa tanpa bahan tambah pembantu.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Ibu Dr. Selpa Dewi, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing I, dan Bapak Dr. Eng. Ir. Deddy Kurniawan, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing II, atas bimbingan, arahan, dan masukan ilmiah yang sangat berharga selama penyusunan skripsi dan jurnal ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Ibu Helga Yermadona, S.Pd., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik UMSB, Bapak Ir. Zuheldi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil, seluruh staf Laboratorium Teknik Sipil UMSB, serta manajemen PT. Perdana Inti Sawit Perkasa (PISP-1) Rokan Hulu atas dukungan sarana dan penyediaan material penelitian.

6. REFERENSI

- Awal, P., Kasar, A., & Halus, A. (2021). Jurnal Konstruksi dan Infrastruktur Teknik Sipil dan Perencanaan, 11(2), 77-88.
- Awalludin, A., & Hussin, M. W. (2011). Utilization of Palm Oil Fuel Ash (POFA) as a partial cement replacement in concrete. Journal of Civil Engineering, 15(1), 12-20.
- Berli, A. U. (2019). Penentuan kuat tekan beton ringan mutu K-225 dengan substitusi cangkang sawit memakai semen Portland tipe 1. Menara Ilmu, 13(4), 1-8.
- Dewi, S., & Kurniawan, D. (2023). Pengaruh penambahan cangkang sawit dan variasi bahan tambah terhadap karakteristik dan kuat tekan beton. Ensiklopedia Research and Community Service Review, 2(3), 45-52.
- Dewi, S., Yermadona, H., & Kurniawan, D. (2026). Pengaruh variasi kadar serat baja terhadap workability dan karakteristik mekanik beton f'c 30 MPa. Rang Teknik Journal, 9(1), 15-24.
- Fernandes, Y. G., & Ishak, I. (2022). Pengaruh campuran material tambahan limbah terhadap kuat tekan beton. Rang Teknik Journal, 5(1), 102-109.



- Gunawan, H. C., Mungok, C. D., & Lestyowati, Y. (2018). Pemanfaatan abu boiler cangkang kelapa sawit sebagai bahan tambah pada campuran beton. *JeLAST: Jurnal PWK, Laut, Sipil, Tambang*, 5(2), 1-9.
- Hanafiah, H., Saloma, S., & Victor, V. (2018). Kuat tekan beton dengan memanfaatkan limbah abu boiler pabrik kelapa sawit. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 6(2), 45-52.
- Masril, M. (2019). Analisa kekuatan agregat kelas A material Kabupaten Solok. *Rang Teknik Journal*, 2(2), 287-292.
- Prasetyo, E., & Simanjuntak, R. (2020). Pengaruh penambahan abu boiler terhadap mutu beton K250. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 8(1), 33-40.
- Satriani, S., Permatasari, S., & Agustina, S. (2022). Studi pemanfaatan limbah abu kerak boiler terhadap kualitas bata beton. *TAPAK (Teknologi Aplikasi Konstruksi): Jurnal Program Studi Teknik Sipil*, 12(1), 94-101.
- Septiani, V., Suryan, V., & Amalia, D. (2024). Faktor-faktor yang mempengaruhi campuran beton: Rancangan beton, kekuatan beton, dan karakteristik beton. *Journal of Engineering and Transportation*, 1(4), 112-120.
- Sitorus, R. (2021). Analisis karakteristik sifat mekanik beton dengan substitusi abu boiler sebagai filler. *Jurnal Material dan Konstruksi*, 4(2), 55-62.
- SNI 03-1968-1990. (1990). Metode pengujian analisis saringan agregat halus dan kasar. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 03-1974-1990. (1990). Metode pengujian kuat tekan beton. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 03-2834-2000. (2000). Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 1972-2008. (2008). Cara uji slump beton. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 7656:2012. (2012). Tata cara pemilihan proporsi campuran untuk beton normal, beton berat dan beton massa. Badan Standardisasi Nasional.
- Tuan, N. A., dkk. (2014). The effect of palm oil mill boiler ash on strength and durability of concrete. *Construction and Building Materials*, 65, 210-217.
- Wesli, W., Akbar, S. J., & Burhanuddin, B. (2021). Studi korelasi faktor air semen (water cement ratio) dengan kuat tekan beton struktural. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, 1(1), 58-69.