



REKAYASA

Jurnal Ilmiah Fakultas Teknik Universitas Lampung



Pengaruh Abu Ketel Sebagai Bahan Pengganti Sebagian Semen Dalam Campuran Beton Normal Terhadap Kuat Tekan

Habib Ilham Abdullah^{a*}, Laksmi Irianti^b, Masdar Helmi^b, Ratna Widyawati^b

^a Mahasiswa Program Studi S1 Teknik Sipil, Universitas Lampung, Jl. Soemantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung, 35145, Indonesia

^b Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung, Jl. Soemantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung, 35145, Indonesia

HIGHLIGHTS

- Analisis pengaruh penggantian sebagian semen dengan abu ketel terhadap waktu pengikatan semen.
- Analisis pengaruh penggantian sebagian semen dengan abu ketel terhadap kuat tekan beton.

INFO ARTIKEL

Tersedia online

Kata kunci:

Beton normal,
abu ketel,
pengikatan semen,
kuat tekan.

ABSTRAK

Limbah abu ketel yang dihasilkan dari proses pengolahan kelapa sawit sering kali tidak dimanfaatkan dan berpotensi mencemari lingkungan sekitarnya. Abu ketel berasal dari pembakaran tempurung kelapa sawit pada suhu antara 700°C hingga 800°C. Oleh karena itu, penting untuk memanfaatkan limbah abu ketel ini, khususnya sebagai campuran dalam beton. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan abu ketel terhadap waktu pengikatan semen dan kekuatan tekan beton melalui eksperimen di laboratorium. Variabel yang diteliti mencakup persentase penggantian abu ketel terhadap sebagian semen (0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%). Sampel uji berupa pasta beton dan beton kubus dengan dimensi 15x15x15 cm pada umur 28 hari. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa penggunaan abu ketel dapat mempercepat proses pengikatan semen dan menghasilkan *slump* yang lebih rendah. Semakin tinggi persentase abu ketel, semakin rendah *slump*-nya. Kadar optimal substitusi abu ketel pada beton kubus 28 hari adalah 5%, dengan kekuatan tekan 29,47 Mpa. Selain itu, penggunaan abu ketel pada persentase lainnya (5%, 10%, dan 15%) cenderung dapat mempertahankan atau bahkan meningkatkan kekuatan tekan beton pada umur 28 hari, dengan persentase 5% menunjukkan hasil yang optimal. Dengan demikian, penggunaan abu ketel dalam beton memberikan dampak positif pada kekuatan tekan beton serta membantu dalam pemanfaatan limbah industri.

Diterbitkan oleh Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung

* Penulis koresponden.

Alamat E-mail: habib.ilham.abdullah@gmail.com

Peer review dibawah tanggung-jawab Jurusan Teknik Sipil
Universitas Lampung.

1. Pendahuluan

Beton adalah bahan bangunan yang terdiri dari campuran agregat kasar, agregat halus, semen, air, dan bahan tambahan lainnya [1]. Beton yang banyak dipakai pada saat ini yaitu beton normal. Beton normal ialah beton yang mempunyai berat isi 2200–2500 kg/m³ dengan menggunakan agregat alam yang dipecah atau tanpa dipecah. Untuk mendapatkan beton normal yang berkualitas, diperlukan perancangan dan pengendalian yang cermat terhadap komposisi material yang mencakup unsur semen (*cementitious*), agregat kasar dan halus, air, serta bahan tambahan atau pengganti yang sesuai [2].

Luas perkebunan kelapa sawit di Provinsi Lampung pada tahun 2020 mencapai 196,312 hektar, menempatkannya pada peringkat ke-13 secara nasional. Produksi kelapa sawit yang tinggi di daerah ini juga diikuti dengan limbah cangkang kelapa sawit yang mencapai 60% dari produksi minyak, sesuai dengan penelitian oleh Vitri & Herman, 2019 [3]. Penggunaan abu ketel belum maksimal, seringkali hanya dibuang tanpa pemanfaatan yang tepat [4]. Abu ketel merupakan produk yang dihasilkan dari proses pembakaran cangkang kelapa sawit pada suhu antara 700°C hingga 800°C di dalam dapur pembakaran [5]. Serbuk cangkang kelapa sawit juga merupakan material dengan muatan silika (SiO₂) secara tersembunyi yang digunakan untuk meningkatkan mutu beton apabila dicampur dengan semen dan air [6].

Penggunaan limbah industri seperti abu tempurung kelapa sawit sebagai komponen tambahan dalam campuran beton dapat dilakukan untuk perkembangan teknologi beton [7]. Mencampur abu ketel dalam beton normal merupakan metode yang efektif untuk menjaga dan meningkatkan kekuatan tekan beton [8]. Penelitian ini dilakukan sebagai bagian dari usaha untuk mengembangkan teknologi beton sembari menggunakan limbah industri dan mengurangi penggunaan semen. Pemanfaatan limbah industri abu ketel diharapkan sebagai bahan pengganti semen dan dapat mengurangi pencemaran lingkungan karena berkurangnya emisi gas rumah kaca karbon dioksida (CO₂) akibat dari proses pembuatan semen [9]. Terdapat penelitian sebelumnya yang telah mengkaji penggunaan abu ketel sebagai pengganti sebagian semen. Penelitian yang dilakukan oleh Irianti dkk., 1998 [10] menyatakan bahwa kekuatan beton dengan pemanfaatan abu ketel mengalami peningkatan dibandingkan dengan campuran beton tanpa abu ketel.

Penelitian ini akan memanfaatkan abu ketel sebagai pengganti sebagian semen dengan tujuan untuk menciptakan beton normal yang tetap memiliki kekuatan optimal, sekaligus mengurangi penggunaan semen.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung. Prosesnya mencakup analisis literatur, persiapan peralatan dan bahan, serta verifikasi karakteristik bahan sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI). Setelah memenuhi persyaratan SNI, akan dilakukan perhitungan komposisi material untuk pembuatan benda uji pasta. Uji konsistensi akan dilakukan, dan jika memenuhi persyaratan, dilanjutkan dengan pengujian waktu pengikatan semen. Selanjutnya, akan dilakukan *mix design* dan *trial mix*. Jika nilai *slump* sesuai dengan target, akan dilanjutkan dengan pembuatan benda uji, termasuk beton

kubus. Uji pasta akan mencakup waktu pengikatan semen, sementara beton kubus akan dirawat (*curing*) hingga mencapai umur 28 hari sebelum diuji kekuatan tekan menggunakan *Compression Testing Machine* (CTM). Data hasil penelitian akan dianalisis untuk mengevaluasi dampak substitusi sebagian semen terhadap waktu pengikatan semen dan kekuatan tekan beton kubus.

Dalam melakukan penelitian ini, perlu dilakukan terlebih dahulu persiapan seluruh peralatan yang akan digunakan. Peralatan yang digunakan sebagai berikut:

- Oven dengan suhu 110°C
- Satu set saringan agregat
- Timbangan ketelitian 0,1 gram dan kapasitas 30 kg
- Piknometer
- Gelas ukur 1000 cc
- Cetakan kerucut pasir
- Bejana silinder 5 kg dan 10 kg
- Concrete mixer*
- Satu set alat *slump test*
- Meteran
- Cetakan benda uji kubus (15 cm x 15 cm x 15 cm)
- Bak perendam
- Compression testing machine* (CTM)
- Peralatan *vicat*

Setelah dilakukannya persiapan peralatan yang akan digunakan, akan dilanjutkan dengan persiapan bahan yang akan digunakan dalam penelitian ini. Bahan yang digunakan sebagai berikut:

- Semen PCC (merek Tiga Roda)
- Agregat halus Gunung Sugih, Lampung Tengah
- Agregat kasar Tanjung, Lampung Selatan, dengan ukuran maksimum 19 mm
- Abu ketel dari PT. Perkebunan Nusantara (PTPN 7)
- Air

Selanjutnya dilakukan pengujian material. Pengujian material dilaksanakan untuk memperoleh informasi awal mengenai karakteristik material yang akan digunakan dalam pembuatan campuran beton. Hasil pengujian material dapat ditemukan dalam Tabel 1.

Tabel 1 Hasil pengujian material penyusun beton

Jenis pengujian	Material yang dipakai	Nilai hasil pengujian	Standar SNI
Berat jenis	Agregat halus	2,55	2,0 – 2,7
	Agregat Kasar	2,63	2,5 – 2,7
	Semen	2,9091	≤ 2,9
Penyerapan air	Agregat Halus	1,21%	1 – 3 %
	Agregat Kasar	1,28%	1 – 3 %
Modulus kehalusan	Agregat halus	2,763	2,3 – 3,1
	Agregat Kasar	7,549	6 – 8
Berat volume	Agregat halus	1417,8 kg/m ³	-
	Agregat Kasar	1622,6 kg/m ³	-

Berdasarkan informasi yang tercantum dalam Tabel 1, dapat disimpulkan bahwa bahan yang digunakan dalam pembuatan beton telah memenuhi standar SNI, sehingga dapat digunakan sebagai komponen dalam penelitian.

Setelah pengujian material dilakukan dan telah memenuhi SNI, dilanjutkan dengan pembuatan benda uji pasta. Benda uji pasta berbentuk campuran semen yang digantikan sebagian oleh abu ketel untuk dapat dilakukannya pengujian waktu pengikatan semen dari masing-masing variasi campuran semen yang digantikan oleh abu ketel dengan alat *vicat*. Pengujian ini bertujuan untuk menentukan durasi yang diperlukan semen untuk mencapai kekakuan setelah proses bereaksi dengan air dan pembentukan pasta semen [11]. Metode pengujian pengikatan awal menggunakan standar SNI 15-2049, 2004 [12]. Pengujian waktu pengikatan semen menggunakan dua buah benda uji untuk masing-masing variasinya, sehingga terdapat 10 benda uji untuk lima variasi benda uji pasta. Komposisi kebutuhan material dalam pengujian waktu pengikatan semen dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Komposisi kebutuhan material dalam sebuah benda uji pasta untuk pengujian waktu pengikatan semen

Kode benda uji pasta	% Semen (S)	% Abu ketel (AK)	Berat semen (gram)	Berat abu ketel (gram)
ptc 0	100%	0%	400	0
pak 1	95%	5%	380	20
pak 2	90%	10%	360	40
pak 3	85%	15%	340	60
pak 4	80%	20%	320	80

Keterangan Tabel 2:

- ptc = pasta tanpa campuran. Kode “ptc” adalah kode untuk benda uji pasta tanpa substitusi sebagian semen dengan abu ketel.
- pak = pasta abu ketel. Kode “pak” adalah kode untuk benda uji pasta dengan substitusi sebagian semen menggunakan abu ketel.

Pembuatan benda uji beton kubus diawali dengan perencanaan disain campuran (*mix design*) dengan teliti, hal ini karena kualitas beton yang dihasilkan dipengaruhi oleh desain campuran dan proses pengecoran yang digunakan [13]. Perhitungan campuran beton normal (*mix design*) dalam penelitian ini menggunakan metode SNI 7656, 2012 [14]. Benda uji beton yang akan dibuat berupa beton kubus 15x15x15 cm untuk pengujian kuat tekan. Terdapat lima variasi benda uji yang akan diuji pada umur 28 hari. Benda uji beton yang digunakan berjumlah tiga untuk masing-masing variasi, sehingga terdapat 15 benda uji beton kubus untuk lima variasi. Komposisi Kebutuhan Material Per m³ untuk benda uji beton kubus dapat dilihat dalam Tabel 3.

Tabel 3 Komposisi kebutuhan material per m³ beton kubus mutu normal

Kode benda uji beton	Kebutuhan material (kg)				
	Ag. kasar	Ag. halus	Air	Semen	Abu ketel
BTC 0	1025,3	609,1	203	429,9	0
BAK 1	1025,3	609,1	203	408,4	21,5
BAK 2	1025,3	609,1	203	386,9	42,9
BAK 3	1025,3	609,1	203	365,4	64,5
BAK 4	1025,3	609,1	203	343,9	85,9

Keterangan Tabel 3:

- BTC = beton tanpa campuran. Kode “BTC” adalah kode untuk benda uji beton kubus tanpa substitusi sebagian semen dengan abu ketel.
- BAK = beton abu ketel. Kode “BAK” adalah kode untuk benda uji beton kubus dengan substitusi sebagian semen menggunakan abu ketel.

Sebelum beton segar dimasukkan ke dalam cetakan untuk pencetakan, diperlukan pengujian *workability* dengan *slump test*. Berdasarkan Putra, 2022 [15] terdapat langkah-langkah pelaksanaan pengujian *slump* adalah sebagai berikut:

- Kerucut *Abrams* perlu dibersihkan baik bagian dalam maupun bagian luar dengan air.
- Kemudian, letakkan kerucut *Abrams* di atas pelat baja berukuran 900 mm x 900 mm.
- Pastikan bahwa kerucut *Abrams* dipegang dengan kuat pada kakinya agar tidak terjadi pergeseran saat adukan beton dimasukkan.
- Adukan beton segar dimasukkan ke dalam kerucut *Abrams* hingga mencapai tinggi 1/3 dari kerucut *Abrams* dan kemudian ditumbuk dengan tongkat penumbuk sebanyak 25 kali.
- Lakukan proses yang sama setiap kali tinggi adukan bertambah 1/3 dari tinggi kerucut *Abrams*.
- Ratakan permukaan adonan beton di bagian atas kerucut *Abrams* menggunakan sendok semen.
- Selanjutnya, perlahan-lahan angkat kerucut *Abrams* secara tegak lurus ke atas.
- Ukur penurunan adonan beton dari tinggi awal dengan mengurangi tinggi awal kerucut *Abrams* dengan tinggi adonan saat ini. Hasil pengurangan ini disebut nilai *slump*.

Setelah dilakukannya pembuatan benda uji beton kubus dilanjutkan dengan perawatan beton (*curing*). Proses ini dilakukan untuk menjamin proses hidrasi dapat terlaksana dengan baik sehingga proses pengerasan dapat terjadi dengan sempurna dan tidak terjadi keretakan saat beton sudah mengering. Perawatan beton kubus ini dilakukan dengan perendaman beton selama waktu yang diperlukan untuk beton dengan umur 28 hari

Sampel beton yang telah selesai menjalani proses *curing*, kemudian akan dilakukan pengujian kuat tekan dengan menggunakan benda uji berbentuk kubus. Kuat tekan beton mengacu pada kemampuan beton untuk menahan tekanan tertentu (yang diterapkan oleh mesin pengujian) per satuan area hingga mencapai titik kegagalan [16]. Pengujian kuat tekan dalam penelitian ini menggunakan mesin uji tekan (*compression testing machine/CTM*) yang memiliki kapasitas maksimal sebesar

3.000 kN dan kecepatan pembebanan berkisar antara 0,14 hingga 0,34 MPa per detik.

3. Hasil dan Pembahasan

Sebelum melaksanakan pengujian waktu pengikatan, langkah pertama adalah melakukan pengujian konsistensi normal semen. Tujuan dari pengujian konsistensi normal adalah untuk menentukan jumlah atau persentase air yang dibutuhkan dalam pengujian waktu pengikatan. Konsistensi normal dianggap tercapai ketika jarum penetrasi mencapai 10 ± 1 mm. Hasil uji konsistensi dapat dilihat dalam Tabel 4.

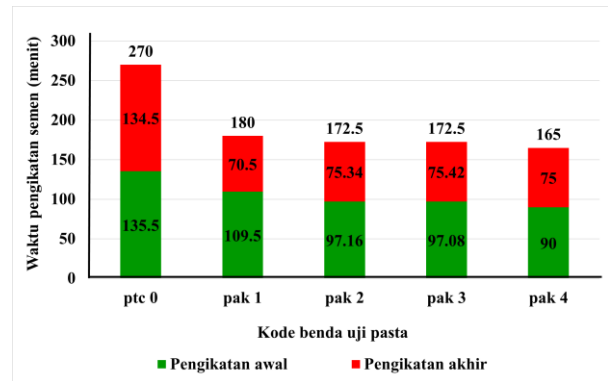
Tabel 4 Hasil pengujian konsistensi normal

No	Kode benda uji pasta	Konsistensi (%)	Penurunan jarum <i>vicat</i> 10 ± 1
1	ptc 0	25	10
2	pak 1	27,5	10
3	pak 2	27,5	10
4	pak 3	27,5	11
5	pak 4	27,5	11

Setelah mendapatkan hasil pengujian konsistensi normal, selanjutnya dapat dilakukan pengujian waktu pengikatan semen. Konsistensi normal dianggap tercapai ketika jarum penetrasi mencapai 10 ± 1 mm. Hasil pengujian waktu pengikatan semen terdiri dari waktu pengikatan awal dan akhir semen. Standar *setting time* untuk semen PCC adalah SNI 15-2049-2004 yang menyatakan bahwa waktu pengikatan awal minimum adalah 45 menit dan waktu pengikatan akhir adalah maksimum 375 menit [17]. Data tersebut didapatkan dari rata-rata hasil pengujian waktu ikat semen dua buah benda uji yang di uji dengan alat *vicat*. Hasil pengujian waktu pengikatan semen ditampilkan dalam Tabel 5 dan Gambar 1.

Tabel 5 Waktu pengikatan awal dan akhir semen

Kode benda uji pasta	Persentase campuran	Waktu pengikatan awal semen (menit)	Waktu pengikatan akhir semen (menit)
ptc 0	Semen 100% + Abu Ketel 0%	135,5	270
pak 1	Semen 95% + Abu Ketel 5%	109,5	180
pak 2	Semen 90% + Abu Ketel 10%	97,1591	172,5
pak 3	Semen 85% + Abu Ketel 15%	97,0833	172,5
pak 4	Semen 80% + Abu Ketel 20%	90	165



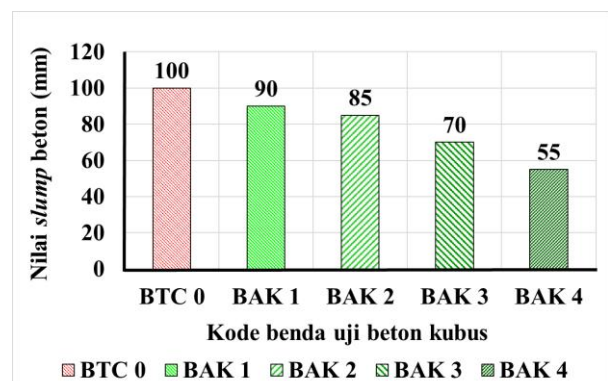
Gambar 1 Waktu pengikatan awal dan akhir semen.

Pada Tabel 5 dan Gambar 1 di atas menunjukkan bahwa substitusi sebagian semen dengan abu ketel dapat mempercepat waktu pengikatan semen baik itu waktu pengikatan awal semen maupun waktu pengikatan akhir semen. Karakteristik waktu pengikatan semen yang ditunjukkan dari data penelitian dipengaruhi oleh karakter material abu ketel yang dapat menyerap air, dimana menurut Irianti dkk., 1998 material abu ketel mengandung kadar Silikon Dioksida (SiO_2) sebanyak 31,4510% dan mempunyai permukaan yang tidak bulat dan menyerap air cukup tinggi.

Kelecekan adukan beton (*workability*), yang tercermin dalam nilai *slump*, adalah sifat adukan beton yang menentukan kemudahan dalam proses pencampuran, pengangkutan, pencetakan, pemadatan, dan penyelesaian beton [18]. Dalam konteks penelitian ini, nilai *slump* yang direncanakan untuk adonan beton normal tanpa bahan pengganti sebagian semen adalah 100 mm. Hasil nilai *slump* dapat dilihat dalam Tabel 6 dan Gambar 2.

Tabel 6 Nilai *slump* adukan beton dengan kadar abu ketel umur 28 hari

Kode benda uji beton	Persentase campuran	Nilai <i>slump</i> (mm)
BTC 0	Semen 100% + Abu Ketel 0%	100
BAK 1	Semen 95% + Abu Ketel 5%	90
BAK 2	Semen 90% + Abu Ketel 10%	85
BAK 3	Semen 85% + Abu Ketel 15%	70
BAK 4	Semen 80% + Abu Ketel 20%	55



Gambar 2 Hubungan nilai *slump* beton terhadap kadar abu ketel.

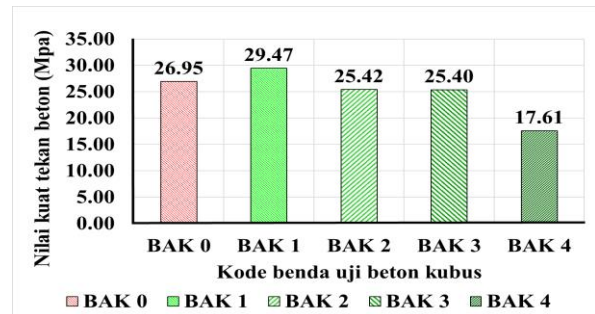
Berdasarkan Tabel 6 dan Gambar 2 di atas, terlihat bahwa beton yang mengandung abu ketel menunjukkan nilai *slump* yang lebih rendah jika dibandingkan dengan beton yang tidak mengandung abu ketel. Hasil nilai *slump* dalam penelitian ini sesuai dengan temuan yang telah diidentifikasi oleh Irianti dkk., 1998 yang menyatakan bahwa semakin besar kandungan abu ketel, maka nilai *slump* semakin kecil. Nilai *slump* yang semakin kecil menunjukkan adonan beton yang semakin kental. Hal ini terjadi akibat abu ketel mempunyai permukaan yang tidak bulat dan menyerap air cukup tinggi.

Benda uji beton kubus yang sudah dicetak akan dilakukan perawatan beton (*curing*) dengan cara direndam saat beton sudah mulai mengeras. Menurut Uno dkk., 2022 [19] *curing* atau perawatan beton dilakukan saat beton sudah mulai mengeras yang bertujuan untuk menjaga agar beton tidak cepat kehilangan air dan sebagai tindakan menjaga kelembaban/suhu beton sehingga beton dapat mencapai mutu beton yang diinginkan. Pelaksanaan perawatan beton dilakukan setelah beton mengalami atau memasuki fase *hardening* (untuk permukaan beton yang terbuka) atau setelah bekisting beton dilakukan bongkaran dengan durasi tertentu yang dimaksudkan untuk memastikan terjaganya kondisi yang diperlukan untuk proses reaksi senyawa kimia yang terkandung dalam campuran beton. Proses *curing* pada beton memainkan peran penting pada pengembangan kekuatan dan daya tahan beton. Proses *curing* ini meliputi pemeliharaan kelembaban dan kondisi suhu, baik dalam beton maupun di permukaan beton dalam periode waktu tertentu.

Beton yang sudah berumur 28 hari akan dilakukan pengujian kuat tekan beton dengan mesin uji tekan (*compression testing machine/CTM*). Kuat tekan beton mengacu pada kemampuan beton untuk menahan tekanan tertentu (yang diterapkan oleh mesin pengujian) per satuan area hingga mencapai titik kegagalan. Hasil pengujian kuat tekan beton mutu normal didapatkan dari pengujian kuat tekan rata-rata tiga buah benda uji beton kubus berukuran panjang 15 cm, lebar 15 cm, dan tinggi 15 cm pada setiap masing-masing variasi abu ketel pada umur 28 hari. Hasil pengujian kuat tekan beton pada umur 28 hari dapat dilihat pada Tabel 7 dan Gambar 3.

Tabel 7 Hasil pengujian kuat tekan beton dengan kadar abu ketel umur 28 hari

Kode benda uji beton	Persentase campuran	Kuat tekan (mpa)
BTC 0	Semen 100% + AK 0%	26,95
BAK 1	Semen 95% + AK 5%	29,47
BAK 2	Semen 90% + AK 10%	25,42
BAK 3	Semen 85% + AK 15%	25,40
BAK 4	Semen 80% + AK 20%	17,61



Gambar 3 Hubungan nilai kuat tekan beton umur 28 hari terhadap kadar abu ketel.

Berdasarkan Tabel 7 dan Gambar 3, pada umur beton 28 hari, terdapat peningkatan kuat tekan yang signifikan ketika melakukan substitusi sebagian semen dengan abu ketel pada variasi BAK 1 (semen 95% + abu ketel 5%), dengan nilai kuat tekan mencapai 29,47 MPa. Nilai tersebut lebih tinggi daripada beton tanpa substitusi sebagian semen dan beton dengan variasi abu ketel dengan persentase substitusi yang lebih besar. Data penelitian menunjukkan bahwa penggunaan berbagai proporsi abu ketel pada benda uji BAK 1, BAK 2, dan BAK 3 menghasilkan nilai kuat tekan yang hampir serupa dengan beton normal tanpa abu ketel. Ini menegaskan bahwa penggunaan abu ketel dalam persentase 5%, 10%, dan 15% sebagai pengganti sebagian semen dapat digunakan dalam pembuatan beton normal. Manfaatnya tidak hanya terletak pada pengurangan penggunaan semen tetapi juga dalam pemanfaatan limbah industri. Berdasarkan hasil penelitian, berbagai proporsi abu ketel dapat menggantikan sebagian semen dalam campuran beton. BAK 1, BAK 2, dan BAK 3 mampu mempertahankan atau bahkan meningkatkan kuat tekan beton pada umur 28 hari, dengan kekuatan optimal tercapai pada campuran dengan 5% abu ketel (BAK 1).

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, maka dapat diambil kesimpulan bahwa penggantian sebagian semen dengan abu ketel mempercepat waktu pengikatan semen dibandingkan tanpa substitusi. Hal ini disebabkan karena sifatnya yang menyerap air dan kandungan tinggi Silikon Dioksida (SiO_2) dapat mempercepat proses pengerasan semen.

Beton dengan kandungan abu ketel memiliki nilai *slump* lebih rendah dibandingkan dengan beton tanpa kandungan abu ketel. Semakin besar persentase kadar abu ketel dalam campuran beton, maka kelecakan beton (nilai *slump*) akan semakin rendah.

Kadar optimum penggunaan abu ketel sebagai substitusi sebagian semen pada beton kubus umur 28 hari adalah 5%, dengan kuat tekan mencapai 29,47 MPa. Pemanfaatan abu ketel sebagai bahan campuran pada beton memberikan dampak positif terhadap peningkatan kuat tekan beton, serta dapat memanfaatkan limbah industri secara ekonomis.

Abu ketel dalam beberapa variasi kadar dapat menggantikan sebagian semen dalam campuran beton. Variasi 5%, 10%, dan 15% dapat menghasilkan nilai kuat tekan yang cenderung mempertahankan bahkan meningkatkan kuat tekan beton pada umur 28 hari, dengan kuat tekan beton optimal tercapai pada campuran 5%.

Daftar Pustaka

- [1] Sumajouw, M. D. J., Dapas, S.O., & Windah, R. S.: Pengujian kuat tekan beton mutu tinggi. *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 4, 4, 2014, 215–218.
- [2] Sayfullah, S., M., Bahri Bahar, S., Mirna, M., & Susanto R., H. K.: Perbandingan Kuat Tekan Beton Normal dengan Beton Yang Menggunakan Bahan Tambah Karbon Sisa Pembakaran Kayu. *SCEJ (Shell Civil Engineering Journal)*, 7, 2, 2022, 70–80, <https://doi.org/10.35326/scej.v7i2.3020>.
- [3] Vitri, G., Herman, H.: Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit Sebagai Material Tambahan Beton. *Jurnal Teknik Sipil ITP*, 6, 2, 2019, 78–87, <https://doi.org/10.21063/JTS.2019.V602.06>.
- [4] Lumbanraja, P., Tampubolon, B., Pandiangan, S., Naibaho, B., & Tindaon, F.: Aplikasi Abu Boiler Dan Pupuk Kandang Sapi Terhadap Hasil Kacang Tanah (*Arachis Hypogaea* L.) Pada Tanah Ultisol Simalingkar. *Jurnal Agrium*, 20, 1, 2023, <https://doi.org/10.29103/agrium.v20i1.10646>.
- [5] Primandari, S. R. P., Rahmat, B.: Pengaruh konversi minyak sawit menjadi biodiesel dengan katalis abu limbah boiler. *Asian Journal of Control. Asian Journal of Control*, 14, 6, 2012, 1771–1771. <https://doi.org/10.1002/asjc.637>.
- [6] Christian, M., & Kushartomo, W.: Analisis Penggunaan Abu Cangkang Sawit Terhadap Sifat Mekanis Beton Normal. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 7, 1, 2024, 29–36, <https://doi.org/10.24912/jmts.v7i1.24906>.
- [7] Permatasari, S., Agustina, S.: Studi Pemanfaatan Limbah Abu Kerak Boiler Terhadap Kualitas Bata Beton. e-ISSN; 2548-6209 p-ISSN. 12, 1, 2022, 2089–2098, <http://u.lipi.go.id/1320332466>.
- [8] Gunawan, H. C., Mungok, C. D., & Lestyowati, Y.: Pemanfaatan Abu Boiler Cangkang Kelapa Sawit Sebagai Bahan Tambah Pada Campuran Beton. *JelAST: Jurnal PWK, Laut, Sipil, Tambang*, 5, 2, 2018, 1–9.
- [9] Yusrianti, Y., Noverma, N., & Hapsari, O. E.: Analisis Sifat Fisis Penyerapan Air Pada Paving Block Dengan Campuran Variasi Limbah Abu Ketel dan Limbah Botol Plastik. *Al-Ard: Jurnal Teknik Lingkungan*, 5, 1, 2019, 1–8, <https://doi.org/10.29080/alard.v5i1.747>.
- [10] Irianti, L., Freddi, & Virmaryah.: pengaruh kadar abu ketel terhadap perilaku beton mutu tinggi. Laporan Penelitian LPIU DUE Universitas Lampung, Lampung, 1998.
- [11] Arianto, R., Kurniawandy, A., & Ermiyati.: Kuat-tekan beton dan waktu ikat semen pozzolan. *Jurnal Universitas Riau*, 2013.
- [12] *Standar Nasional Indonesia: 15-2049-2004.*: A comparison of pain measures used with patients with fibromyalgia. Badan Standardisasi Nasional Indonesia, Jakarta, 2004.
- [13] Foulhuda, J., Nurtanto, D., & Krisnamurti, K.: Perbandingan Mix Design Sni 03-2834-2000 Dan Sni 7656:2012 Ditinjau Dari Proses Pengecoran Beton Normal. *Jurnal Riset Rekayasa Sipil*, 5, 2, 2022, 98, <https://doi.org/10.20961/jrrs.v5i2.48172>.
- [14] *Standar Nasional Indonesia: 7656:2012.*: Tata Cara Pemilihan Campuran untuk Beton Normal, Beton Berat dan Beton Massa. Badan Standardisasi Nasional Indonesia, Jakarta, 2012.
- [15] Putra, R. H.: Pengaruh kadar fly ash dan silica fume terhadap kuat tekan beton mutu tinggi. Skripsi. Bandar Lampung: Universitas Lampung, 2022.
- [16] *Standar Nasional Indonesia: 03-1974-1990.*: Metode Pengujian Kuat Tekan Beton. Badan Standardisasi Nasional Indonesia, Jakarta, 1990.
- [17] Nasution, M. H., Putri, N.N. B., & Candra, L.: Pengaruh Komposisi Gypsum Terhadap Setting Time Pada Proses Produksi Semen PCC. *CHEMICA: Jurnal Teknik Kimia*, 6, 1, 2019, 31, <https://doi.org/10.26555/chemica.v6i1.13804>.
- [18] Arman, A.: Kajian Kuat Tekan Beton Normal Menggunakan Standar Sni 7656-2012 Dan Astm C. *Rang Teknik Journal*, 1, 2, 2018, 136-06, <https://doi.org/10.31869/rtj.v1i2.760>.
- [19] Fathahilla Uno, A., David, C., Kandou, E., Rumbayan, R.: Kuat Tekan Beton Berdasarkan Metode Curing Time di Lapangan pada Rigid Pavement. *Jurnal Teknik Jalan Jembatan, Teknik Sipil, Politeknik Negeri Manado*, 1, 1, 2022, 1–10.