

Flexural Performance of Concrete with Modified Eucalyptus Bark Waste as Partial Replacement of Fine Aggregate

Azzan Farizi¹, Anis Aulia Ulfa² , Fatmawati³

^{1,2,3} Politeknik Negeri Balikpapan

 anis.aulia@poltekba.ac.id

Received 04-12-2025; 29-12-2025, 04-12-2025

Abstract

The utilization of eucalyptus bark waste as an alternative material in concrete represents an effort to reduce by-products from the forestry industry. However, the organic nature of this material may influence the mechanical performance of concrete. This study investigates the effect of alkali-treated eucalyptus bark waste used as a partial replacement for fine aggregate on the flexural strength of concrete. Prior to mixing, the bark waste was modified through alkaline treatment using a 1% NaOH solution for approximately 24 hours to improve its compatibility with the cement matrix. Replacement levels of 0%, 1%, 2.5%, and 5% by weight of fine aggregate were examined. Concrete beam specimens were tested for flexural strength at 28 days. The results indicate that increasing the proportion of eucalyptus bark waste leads to a reduction in flexural strength. The control mixture (0%) satisfies the flexural strength requirement of K250 concrete based on SNI T-15-1991-03, whereas mixtures containing eucalyptus bark waste fail to meet the minimum criterion. These findings suggest that alkali-treated eucalyptus bark waste is not suitable as a fine aggregate substitute in structural concrete.

Keywords: *flexural strength, modified eucalyptus bark waste, concrete*

Kinerja Lentur Beton dengan Pemanfaatan Limbah Kulit Kayu Ekaliptus yang Dimodifikasi sebagai Substitusi Parsial Agregat Halus

Abstrak

Pemanfaatan limbah kulit kayu Ekaliptus sebagai bahan alternatif dalam beton merupakan salah satu upaya untuk mengurangi limbah industri kehutanan. Namun, karakteristik material organik berpotensi memengaruhi kinerja mekanik beton. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penggunaan limbah kulit kayu Ekaliptus yang telah dimodifikasi sebagai substitusi parsial agregat halus terhadap kuat lentur beton. Limbah kulit kayu dimodifikasi melalui perlakuan alkali menggunakan larutan NaOH 1% selama ± 24 jam sebelum dicampurkan ke dalam beton. Variasi substitusi yang digunakan adalah 0%, 1%, 2,5%, dan 5% dari berat agregat halus. Benda uji berupa balok beton yang diuji kuat lenturnya pada umur 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan persentase limbah kulit kayu Ekaliptus menyebabkan penurunan kuat lentur beton. Variasi 0% memenuhi nilai pendekatan kuat lentur beton mutu K250 berdasarkan SNI T-15-1991-03, sedangkan variasi 1%, 2,5%, dan 5% tidak memenuhi kriteria tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa limbah kulit kayu Ekaliptus, meskipun telah dimodifikasi, belum mampu menggantikan fungsi agregat halus alami pada beton struktural.

Kata Kunci: kuat lentur, limbah kulit kayu eukaliptus termodifikasi, beton

1. Pendahuluan

Beton merupakan material konstruksi utama yang banyak digunakan pada bangunan gedung, jalan, dan jembatan karena memiliki kuat tekan yang tinggi, ketahanan terhadap api, serta durabilitas yang baik. Beton tersusun atas semen, air, agregat halus, dan agregat kasar, di mana kualitas agregat berperan penting dalam menentukan kinerja mekanik dan ketahanan jangka panjang beton (Neville, 2011). Meskipun demikian, beton memiliki kelemahan terhadap gaya tarik dan lentur akibat sifat getas dan daktilitas yang rendah, sehingga dalam aplikasinya umumnya dikombinasikan dengan tulangan baja (Fatriady et al., 2022).

Upaya peningkatan kinerja beton sekaligus pengurangan dampak lingkungan dapat dilakukan melalui modifikasi material penyusunnya, baik dengan penggunaan bahan tambah maupun dengan substitusi parsial material konvensional. Salah satu pendekatan yang semakin berkembang adalah pemanfaatan limbah industri dan limbah biomassa sebagai bahan substitusi atau pengisi (*filler*) dalam beton, yang sejalan dengan konsep konstruksi berkelanjutan dan ekonomi sirkular (Torgal & Jalali, 2011).

Pemanfaatan limbah tidak hanya bertujuan meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya alam, tetapi juga berpotensi memberikan nilai tambah terhadap sifat mekanik beton apabila digunakan dengan proporsi dan perlakuan yang tepat. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan material non-konvensional, baik berbasis mineral maupun biomassa, dapat mempengaruhi sifat mekanik beton secara signifikan, tergantung pada karakteristik material dan metode pengolahannya (Ulfa et al., 2024).

Beberapa studi terdahulu menunjukkan bahwa material berbasis kayu atau limbah organik dapat meningkatkan atau menurunkan kinerja beton, tergantung pada jenis material, ukuran partikel, serta metode modifikasi yang diterapkan. Risal dalam penelitiannya melaporkan bahwa penggunaan serbuk kayu jati sebagai substitusi parsial agregat halus pada persentase tertentu mampu meningkatkan kuat lentur beton secara signifikan dibandingkan beton normal (Risal et al., 2022).

Limbah kulit kayu Ekaliptus yang dihasilkan oleh perusahaan hutan tanaman industri (HTI), seperti PT ITCHI Hutani Manunggal di Kalimantan Timur, merupakan limbah biomassa dengan ketersediaan yang melimpah. Limbah ini dihasilkan dari siklus panen Ekaliptus sekitar ± 5 tahun, sementara proses degradasi alamnya berlangsung relatif lambat, yaitu sekitar 2–4 tahun. Secara kimia, kulit kayu Ekaliptus mengandung selulosa dan hemiselulosa dalam jumlah signifikan, masing-masing sekitar 49% dan 24%, yang berpotensi berkontribusi terhadap mekanisme ikatan dan pengendalian pergerakan air dalam matriks komposit semen (Susmiati, 2018).

Di sisi lain, penelitian lain juga menunjukkan bahwa penggunaan limbah biomassa tanpa pengolahan yang memadai cenderung menurunkan kekuatan beton akibat meningkatnya porositas dan lemahnya ikatan antar fase material (Mahrilar & Zainal, 2025). Oleh karena itu, diperlukan perlakuan awal berupa modifikasi atau mineralisasi material sebelum digunakan dalam campuran beton. Perlakuan alkali menggunakan larutan natrium hidroksida (NaOH) dilaporkan mampu mengurangi kandungan lignin dan zat ekstraktif, meningkatkan kekasaran permukaan partikel, serta memperbaiki ikatan antar muka antara material lignoselulosa dan pasta semen (Lilargem Rocha et al., 2022; Wang et al., 2021).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh pemanfaatan limbah kulit kayu Ekaliptus yang telah dimodifikasi melalui perlakuan alkali sebagai substitusi parsial agregat halus terhadap kuat lentur beton. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan material beton ramah

lingkungan serta memberikan evaluasi ilmiah mengenai kelayakan limbah kulit kayu Ekaliptus sebagai material alternatif dalam beton struktural maupun non-struktural.

2. Metode

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan pengujian kuat lentur beton. Limbah kulit kayu Ekaliptus dimanfaatkan sebagai substitusi parsial agregat halus pada beberapa variasi persentase. Beton yang dihasilkan dirancang menggunakan *mix design* mutu K-250 dan diuji pada umur 28 hari untuk mengevaluasi pengaruh variasi limbah terhadap kuat lentur beton.

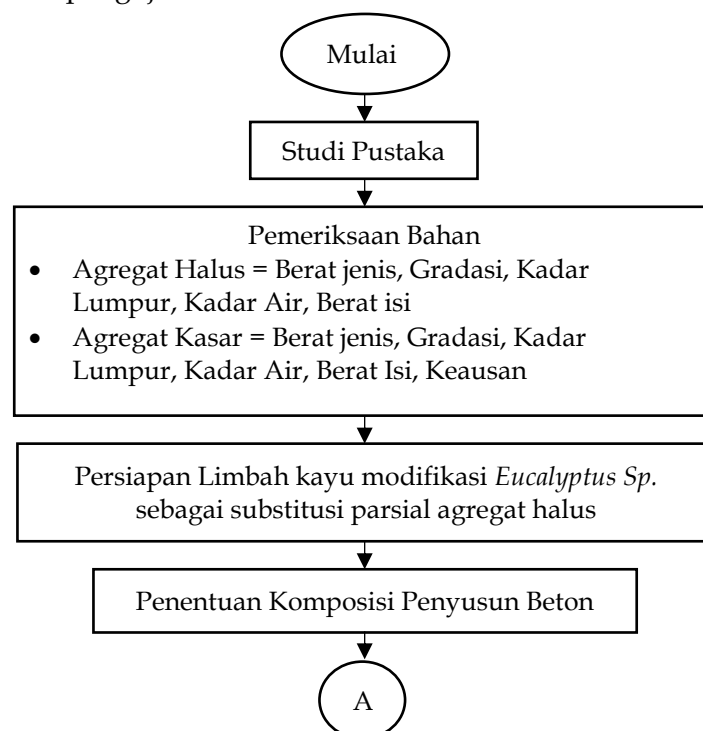
Limbah kulit kayu Ekaliptus yang digunakan dalam penelitian ini merupakan material yang telah dimodifikasi melalui perlakuan alkali menggunakan larutan NaOH sebelum dicampurkan ke dalam beton.

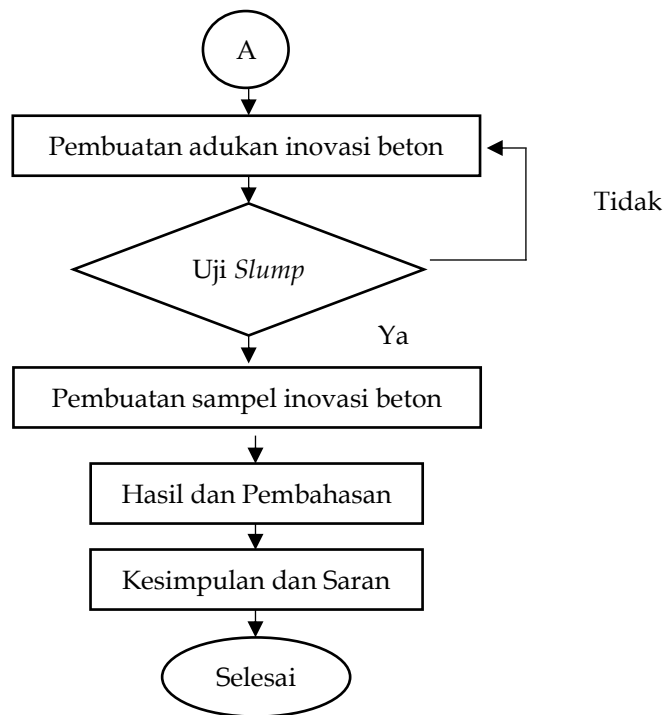
2.1 Alat dan Bahan Penelitian

Alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu : ayakan, mesin penggetar ayakan, oven, piknometer, timbangan digital, cetok, cawan, cetakan beton, meteran, kain lap, tongkat baja, talam, kerucut *abram's* dan mesin uji lentur beton. Sedangkan bahan yang digunakan yaitu semen, pasir Samboja, batu split dan serat kulit kayu Ekaliptus.

2.2 Alur Penelitian

Sebelum proses pencampuran beton, seluruh material penyusun, yaitu agregat halus, agregat kasar, dan limbah kulit kayu Ekaliptus, diuji untuk mengetahui karakteristik dan kelayakannya sesuai dengan standar yang berlaku. Setelah material dinyatakan memenuhi persyaratan, seluruh bahan ditimbang berdasarkan perencanaan *mix design* K-250. Selanjutnya dilakukan pengujian slump untuk memastikan *workability* campuran beton. Campuran beton kemudian dicetak ke dalam cetakan balok berukuran 10 cm × 10 cm × 50 cm. Pemadatan dilakukan setiap sepertiga tinggi cetakan dengan penumbukan sebanyak 25 kali. Setelah beton mengeras, cetakan dilepas dan benda uji direndam dalam air selama 28 hari sebelum dilakukan pengujian kuat lentur.





Gambar 1. Alur Penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Karakteristik dan Kelayakan Material

Pengujian material dilakukan untuk mengetahui karakteristik fisik serta kelayakan agregat dan limbah kulit Kayu Ekaliptus sebagai bahan penyusun beton.

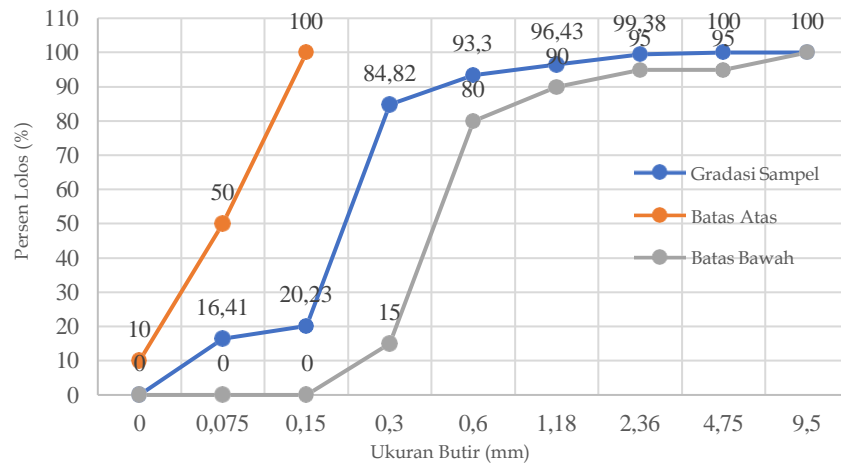
3.1.1 Agrerat Halus

Pengujian gradasi agregat halus dilakukan untuk mengetahui distribusi ukuran butir pasir. Hasil pengujian gradasi agregat halus yang disajikan pada Tabel 1 dan Gambar 1 menunjukkan bahwa agregat halus berada pada Zona 4 dengan nilai modulus kehalusan sebesar 1,843. Berdasarkan ketentuan ASTM C33-37, nilai tersebut berada di luar rentang yang disyaratkan, sehingga agregat halus yang digunakan tidak memenuhi persyaratan gradasi menurut standar ASTM.

Tabel 1. Hasil Gradasi Pasir Samboja

Ayakan		Berat Tertinggal		Berat Lolos		Kumulatif
Kode	Ukuran (mm)	Berat (gram)	Persentase (%)	Berat (gram)	Persentase (%)	Persentase (%)
3/8	9,5	0	0	484,4	100	0
4	4,75	0	0	484,4	100	0
8	2,36	3,02	0,62	481,38	99,38	0,62
16	1,18	14,28	2,95	467,1	96,43	3,57
30	0,60	15,14	3,13	451,96	93,30	6,70
50	0,30	41,08	8,48	410,88	84,82	15,18

Ayakan		Berat Tertinggal		Berat Lolos		Kumulatif
Kode	Ukuran (mm)	Berat (gram)	Persentase (%)	Berat (gram)	Persentase (%)	Persentase (%)
100	0,15	312,89	64,59	97,99	20,23	79,77
200	0,075	18,50	3,82	79,49	16,41	83,59
Pan	0,00	79,49	16,41	0	0,00	
Total		484,4	100,00			189,43



Gambar 2. Grafik Gradasi Zona 4
Sumber: SNI 03 – 2834 – 2000

Hasil pengujian berat jenis agregat halus yang ditunjukkan pada Tabel 2 menghasilkan nilai berat jenis sebesar 2,525, berat jenis kondisi SSD sebesar 2,587, dan berat jenis semu sebesar 2,691, dengan nilai penyerapan air sebesar 2,4%. Mengacu pada SNI 03-1970-2008 yang menetapkan batas maksimum penyerapan agregat halus sebesar 3%, agregat halus yang digunakan dinyatakan layak sebagai bahan penyusun beton.

Tabel 2. Hasil Pemeriksaan Berat Jenis Agregat Halus

Simbol	Keterangan	Nilai (gram)
SSD	Berat sampel SSD	498,25
BK	Berat sampel kering oven	486,38
B	Berat Piknometer + Air	698,87
BT	Berat Piknometer + Air + SSD	1004,55

Berdasarkan hasil pengujian berat isi agregat halus yang disajikan pada Tabel 3, diperoleh berat isi gembur sebesar 1,33 kg/m³ dan berat isi padat sebesar 1,43 kg/m³. Nilai tersebut berada dalam rentang yang disyaratkan oleh SNI 03-1973-2008, yaitu 0,4-1,9 kg/m³.

Tabel 3. Hasil Pemeriksaan Berat Isi Agregat Halus

No	Keterangan	Cara Gembur	Cara Padat
W1	Berat wadah (kg)	6,395	6,395
W2	Berat wadah + sampel	19,265	20,240
W3	Berat benda uji (kg)	12,870	13,845

W4	Volume wadah (m ³)	9,670	9,670
W5	Berat Isi (kg/m ³)	1,33	1,43

Hasil pengujian kadar air agregat halus Pasir Samboja yang ditampilkan pada Tabel 4 menunjukkan nilai kadar air rata-rata sebesar 3,32%. Berdasarkan SNI 03-6821-2002, kadar air agregat halus maksimum yang diizinkan adalah 5%, sehingga agregat halus Pasir Samboja memenuhi persyaratan.

Tabel 4. Hasil Pemeriksaan Kadar Air

No	Keterangan	Nomor Sampel	
		1	2
W1	Berat cawan (gram)	417,9	416,5
W2	Berat cawan + sampel (gram)	917,9	916,5
W3	Berat sampel basah (gram)	500	500
W4	Berat cawan + sampel kering (gram)	902,4	898,9
W5	Berat cawan kering oven (gram)	484,5	482,4
W6	Kadar air (%)	3,12	3,52
Rata-rata kadar air		3,32	

Selain itu, hasil pengujian kadar lumpur agregat halus yang disajikan pada Tabel 5 menunjukkan nilai sebesar 4,41%. Mengacu pada SNI S-04-1989-F yang membatasi kadar lumpur agregat halus maksimum sebesar 5%, agregat halus Pasir Samboja dinyatakan layak digunakan.

Tabel 4.5 Hasil Pemeriksaan Kadar Lumpur

No	Keterangan	Sampel	Satuan
W1	Berat cawan	417,9	gram
W2	Berat sampel sebelum dicuci + cawan	917,9	gram
W3	Berat sampel sebelum dicuci	500	gram
W4	Berat sampel sesudah dicuci + cawan + oven	897,32	gram
W5	Berat sampel sesudah dicuci + oven	479,59	gram
W6	Kadar lumpur	4,41	%

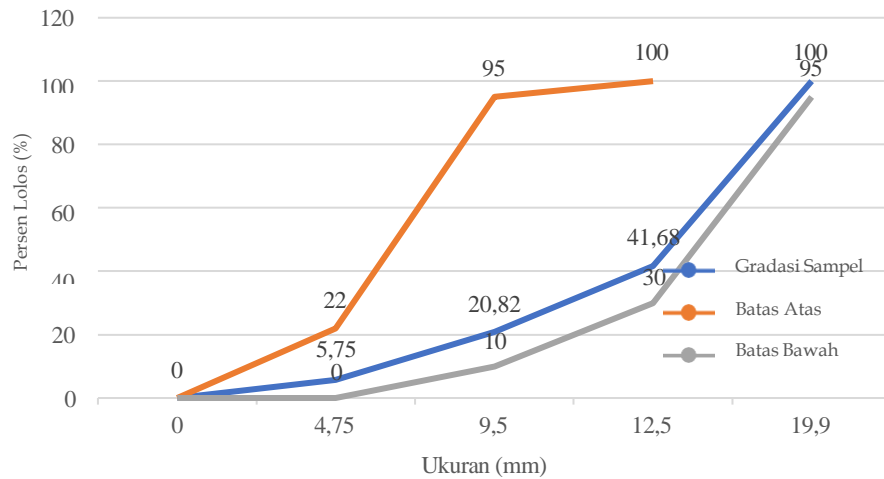
3.1.2 Agrerat Kasar

Hasil pengujian gradasi agregat kasar yang ditampilkan pada Tabel 6 dan Gambar 3 menunjukkan bahwa agregat kasar memiliki ukuran maksimum nominal 40 mm dengan nilai modulus kehalusan sebesar 5,3. Berdasarkan ketentuan ASTM C33-37, gradasi agregat kasar yang diperoleh tidak memenuhi persyaratan standar.

Tabel 6. Hasil Pemeriksaan Gradasi Agregat Kasar

Ayakan		Berat Tertinggal		Berat Lolos		Kumulatif
Kode	Ukuran (mm)	Berat (gram)	Persentase (%)	Berat (gram)	Persentase (%)	Persentase (%)
3/4	19,9	0	0	1004,6	100	0

1/2	12,5	585,89	58,32	418,7	41,68	58,32
3/8	9,5	209,53	20,86	209,17	20,82	79,18
4	4,75	153,19	15,25	55,98	5,57	94,43
8	2,36	38,30	3,81	17,68	1,76	98,24
16	1,18	17,68	1,76	0	0	100
Pan	0,00	0	0	0	0	100
Total		1004,6	100			530,17



Gambar 3 Gradasi Agregat Kasar

Hasil pengujian berat jenis agregat kasar yang disajikan pada Tabel 7 menunjukkan nilai berat jenis sebesar 2,603, berat jenis kondisi SSD sebesar 2,614, dan berat jenis semu sebesar 2,632, dengan nilai penyerapan air sebesar 0,42%. Berdasarkan SK SNI 15-1990-03 yang menetapkan batas maksimum penyerapan agregat kasar sebesar 1,63%, agregat kasar yang digunakan dinyatakan layak sebagai bahan penyusun beton.

Tabel 7. Hasil Pemeriksaan Berat Jenis Agregat Kasar

No	Pengujian	Nilai(gram)
SSD	Berat sampel SSD	1504,25
BK	Berat sampel kering oven	1497,89
BT	Berat rendaman air	928,78

Berdasarkan hasil pengujian berat isi agregat kasar yang ditunjukkan pada Tabel 8, diperoleh berat isi gembur sebesar 1,43 kg/m³ dan berat isi padat sebesar 1,716 kg/m³. Nilai tersebut memenuhi ketentuan SNI 03-1973-2008 yang mensyaratkan berat isi agregat kasar berada pada rentang 1,2-2,8 kg/m³.

Tabel 8. Hasil Pemeriksaan Berat Isi Agregat Halus

No	Keterangan	Cara Gembur	Cara padat
W1	Berat wadah (gram)	6395	6395

W2	Berat wadah + sampel (gram)	20345	22990
W3	Berat benda uji (gram)	13950	16595
W4	Volume wadah (m ³)	9670	9670
W5	Berat Isi (kg/m ³)	1,44	1,716

Hasil pengujian kadar air agregat kasar Kerikil Palu yang disajikan pada **Tabel 9** menunjukkan nilai kadar air sebesar 0,303%. Nilai ini masih berada di bawah batas maksimum yang ditetapkan oleh SNI 03-6821-2002, yaitu 1%

Tabel 9. Hasil Pemeriksaan Kadar Air

No	Keterangan	Nomor Sampel	
		1	2
W1	Berat cawan (gram)	416,52	416,48
W2	Berat cawan + sampel (gram)	916,52	916,48
W3	Berat sampel basah (gram)	500	500
W4	Berat cawan + sampel kering (gram)	915,4	914,89
W5	Berat cawan kering oven (gram)	498,88	498,09
W6	Kadar air (%)	0,224	0,382
Rata-rata kadar air		0,303	

Selanjutnya, hasil pengujian kadar lumpur agregat kasar yang ditampilkan pada Tabel 10 menunjukkan nilai sebesar 0,6%. Mengacu pada SNI S-04-1989-F dengan batas maksimum kadar lumpur agregat kasar sebesar 1,06%, agregat kasar Kerikil Palu dinyatakan layak digunakan.

Tabel 10. Hasil Pemeriksaan Kadar Lumpur

No	Keterangan	Sampel
W1	Berat cawan (gram)	417,25
W2	Berat sampel sebelum dicuci + cawan	917,25
W3	Berat sampel sebelum dicuci (gram)	500
W4	Berat sampel sesudah dicuci + cawan +	914,26
W5	Berat sampel sesudah dicuci + oven (gram)	497,01
W6	Kadar lumpur (%)	0,6

3.1.3 Limbah Kulit Kayu Ekaliptus

Dalam penelitian ini, limbah kulit kayu Ekaliptus dimodifikasi terlebih dahulu melalui perendaman selama ± 24 jam dalam larutan natrium hidroksida (NaOH) dengan konsentrasi 1% dari volume air perendaman. Konsentrasi larutan ditentukan berdasarkan perbandingan massa NaOH terhadap volume air, yaitu sebesar 1%. Pada penelitian ini digunakan air perendaman sebanyak 7.000 ml, sehingga jumlah NaOH yang ditambahkan adalah 70 gram.

Perlakuan alkali menggunakan NaOH bertujuan untuk mengurangi kandungan zat organik dan ekstraktif pada kulit kayu, meningkatkan kekasaran permukaan partikel, serta menurunkan daya serap air berlebih. Dengan demikian, diharapkan interaksi antar muka (*interfacial transition zone/ITZ*) antara limbah kulit kayu Ekaliptus dan pasta semen dapat menjadi lebih baik sebelum material digunakan dalam campuran beton.

Setelah proses modifikasi, dilakukan pengujian kadar air limbah kulit kayu Ekaliptus untuk menilai kelayakannya sebagai substitusi parsial agregat halus. Hasil pengujian kadar air disajikan pada Tabel 11..

Tabel 11. Hasil Pemeriksaan Kadar Air

No	Keterangan	Nomor Sampel	
		1	2
W1	Berat cawan (gram)	416,79	417,02
W2	Berat cawan + sampel (gram)	916,79	917,02
W3	Berat sampel basah (gram)	500	500
W4	Berat cawan + sampel kering (gram)	906,86	906,57
W5	Berat cawan kering oven (gram)	490,07	489,55
W6	Kadar air (%)	1,99	2,09
Rata-rata kadar air		2,04	

Hasil pengujian kadar air limbah kulit kayu Ekaliptus yang disajikan pada Tabel 11 menunjukkan nilai kadar air sebesar 3,32%. Karena limbah kulit kayu Ekaliptus berperan sebagai substitusi parsial agregat halus, maka batas kadar air mengacu pada standar agregat halus. Berdasarkan SNI 03-6821-2002 yang menetapkan kadar air maksimum agregat halus sebesar 5%, limbah kulit kayu Ekaliptus dinyatakan layak digunakan sebagai bahan penyusun beton.

3.2. Komposisi Bahan Penyusun Sampel Beton

Tabel 12 menunjukkan komposisi bahan penyusun sampel beton dengan pemanfaatan limbah kulit kayu Ekaliptus sebagai substitusi parsial agregat halus pada variasi 1%, 2,5%, dan 5%.

Tabel 12. Komposisi agregat halus dan limbah kulit kayu Ekaliptus berdasarkan variasi 1%, 2,5%, 5%

Bahan Penyusun Beton		
Variasi (%)	Agregat Halus (gram)	Limbah kulit kayu Ekaliptus (gram)
0	3460	0
1	3425,4	34,6
2,5	3373,5	86,5
5	3287	173

3.3. Pengujian Uji Slump

Hasil pengujian nilai slump beton dengan variasi penambahan limbah kulit Kayu Ekaliptus sebagai substitusi parsial agregat halus sebesar 1%, 2,5%, dan 5% disajikan pada Tabel 13.

Tabel 13. Uji Slump pada variasi limbah kulit kayu Ekaliptus

Variasi Limbah kulit kayu Ekaliptus	Uji Slump (cm)
-------------------------------------	----------------

(%)	
0	9
1	10,5
2,5	11
5	12

Peningkatan nilai slump seiring dengan bertambahnya persentase limbah kulit Kayu Ekaliptus menunjukkan menurunnya kekentalan adukan beton dan berkurangnya kohesi antar material penyusun. Secara mikrostruktural, kondisi ini mengindikasikan bahwa partikel limbah kulit Kayu Ekaliptus tidak mampu berperan seperti agregat halus mineral dalam membentuk susunan butir yang rapat.

Zona transisi antar muka (*interfacial transition zone/ITZ*) memiliki porositas yang lebih tinggi dan kepadatan mikrostruktur yang lebih rendah dibandingkan dengan pasta semen massa (Scrivener et al., 2004). Artikel lain menunjukkan bahwa serat alami dari limbah organik memiliki permukaan tidak seragam dan karakteristik penyerapan air yang berbeda dibandingkan agregat mineral, yang berdampak pada ikatan antar fase dan kepadatan mikrostruktur (Savastano Jr et al., 2005). Perubahan karakteristik mikrostruktur ini diperkirakan akan memengaruhi kinerja mekanik beton, khususnya pada mekanisme perambatan retak akibat beban lentur.

3.4. Pengujian Kuat Lentur

Penelitian ini menggunakan mutu beton rencana K250, yang memiliki nilai kuat tekan rencana (f'_c) sebesar 20,41 MPa. Nilai kuat tekan rencana ini digunakan sebagai dasar evaluasi kuat lentur beton berdasarkan ketentuan SNI T-15-1991-03.

Penggunaan nilai kuat tekan rencana dilakukan karena penelitian ini berfokus pada evaluasi kinerja lentur beton akibat pemanfaatan limbah kulit kayu Ekaliptus sebagai substitusi parsial agregat halus.

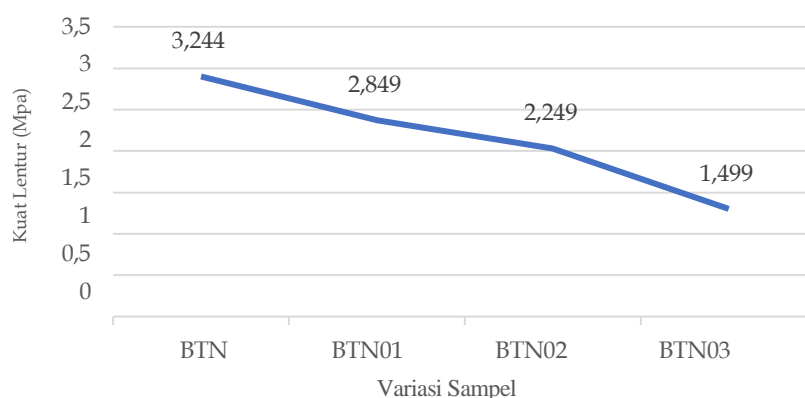
Pengujian kuat lentur beton dilakukan menggunakan *Hydraulic Concrete Beam Testing Machine* dengan metode pembebanan dua titik pada sepertiga bentang ($1/3 L$). Pengujian dilakukan hingga benda uji mengalami keruntuhan, dan nilai kuat lentur dihitung berdasarkan beban maksimum yang tercatat.

Hasil pengujian kuat lentur beton dengan variasi 0%, 1%, 2,5%, dan 5% limbah kulit kayu Ekaliptus sebagai substitusi parsial agregat halus disajikan pada Tabel 14, sedangkan perbandingan nilai kuat lentur ditampilkan pada Gambar 4. Nilai rata-rata kuat lentur beton berturut-turut sebesar 3,224 MPa untuk BTN (0%), 2,849 MPa untuk BTN01 (1%), 2,249 MPa untuk BTN02 (2,5%), dan 1,499 MPa untuk BTN03 (5%). Hasil tersebut menunjukkan adanya penurunan kuat lentur beton seiring dengan meningkatnya persentase penggunaan limbah kulit kayu Ekaliptus.

Tabel 14. Data Uji Kuat Lentur Semua Sampel Beton

Variasi (%)	Kode Benda Uji	Panjang sampel beton (cm)	Lebar sampel beton (cm)	Tinggi sampel beton (cm)	Volume sampel beton (m ³)	Beban Maksimum (KN)	Berat benda uji (Kg)	Kuat Lentur (MPa)
0	BTNa	50	10	10	0,005	7,5	12,385	3,310
	BTNb	50	10	10	0,005	7	11,425	3,149
	BTNc	50	10	10	0,005	7,5	11,670	3,149
	Rata-rata							3,224
	BTN01a	50	10	10	0,005	6	11,265	2,699

Variasi (%)	Kode Benda Uji	Panjang sampel beton (cm)	Lebar sampel beton (cm)	Tinggi sampel beton (cm)	Volume sampel beton (m ³)	Beban Maksimum (KN)	Berat benda uji (Kg)	Kuat Lentur (MPa)
1	BTN01b	50	10	10	0,005	6,5	11,300	2,924
	BTN01c	50	10	10	0,005	6,5	11,315	2,924
	Rata-rata							2,849
2,5	BTN02a	50	10	10	0,005	5	11,190	2,249
	BTN02b	50	10	10	0,005	5	11,080	2,249
	BTN02c	50	10	10	0,005	5	11,100	2,249
	Rata-rata							2,249
5	BTN03a	50	10	10	0,005	3,5	10,940	1,574
	BTN03b	50	10	10	0,005	3,5	10,520	1,574
	BTN03c	50	10	10	0,005	3	9,885	1,349
	Rata-rata							1,499



Gambar 4. Grafik Nilai Uji Lentur

Berdasarkan SNI T-15-1991-03, kuat lentur beton (f_s) dapat diperkirakan menggunakan rumus pendekatan sebagai berikut:

$$f_s = 0,7 \sqrt{f_c}$$

Dengan menggunakan nilai kuat tekan rencana beton K250 sebesar $f_c = 20,41$ MPa, diperoleh nilai kuat lentur pendekatan sebagai berikut:

$$f_s = 0,7 \sqrt{20,41} = 3,162 \text{ MPa}$$

Nilai kuat lentur pendekatan ini digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi hasil uji kuat lentur beton pada penelitian ini. Berdasarkan perbandingan tersebut, beton normal (BTN 0%) memiliki nilai kuat lentur yang masih berada pada kisaran nilai pendekatan, sehingga memenuhi persyaratan kuat lentur beton spesifikasi K250.

Sebaliknya, beton dengan variasi limbah kulit kayu Ekaliptus sebesar 1%, 2,5%, dan 5% menunjukkan nilai kuat lentur di bawah nilai pendekatan SNI, sehingga tidak memenuhi batas minimum kuat lentur beton mutu K250.

3.5. Pembahasan Penelitian

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan limbah kulit kayu Ekaliptus sebagai substitusi parsial agregat halus memberikan pengaruh yang konsisten terhadap penurunan kuat lentur beton. Beton tanpa substitusi (variasi 0%) menghasilkan kuat lentur

sebesar 3,244 MPa, sedangkan pada variasi 1%, 2,5%, dan 5% terjadi penurunan bertahap menjadi 2,849 MPa, 2,249 MPa, dan 1,499 MPa. Pola penurunan ini menunjukkan bahwa peningkatan persentase limbah kulit kayu Ekaliptus berbanding terbalik dengan kemampuan beton dalam menahan tegangan lentur.

Secara teoritis, kuat lentur beton sangat dipengaruhi oleh kualitas ikatan antara pasta semen dan agregat, khususnya pada zona transisi antar muka (*interfacial transition zone/ITZ*). Agregat halus alami seperti pasir memiliki permukaan mineral yang relatif keras dan stabil, sehingga mampu membentuk ikatan mekanis dan kimia yang baik dengan pasta semen. Sebaliknya, limbah kulit kayu Ekaliptus bersifat organik, berpori, dan memiliki permukaan tidak seragam, sehingga berpotensi menghasilkan ITZ yang lebih lemah. Kondisi ini menyebabkan transfer tegangan dari pasta semen ke agregat tidak berlangsung secara optimal ketika beton mengalami pembebanan lentur.

Selain itu, hasil uji slump yang menunjukkan peningkatan nilai slump seiring bertambahnya persentase limbah kulit kayu Ekaliptus mengindikasikan adanya perubahan karakteristik segar beton. Peningkatan kelecakan ini dapat dikaitkan dengan daya serap air limbah kulit kayu serta bentuk partikel yang tidak saling mengunci seperti pasir. Pada skala mikrostruktur, kondisi tersebut berpotensi meningkatkan rongga mikro (*micro-voids*) di dalam matriks beton setelah pengerasan, yang selanjutnya berdampak pada penurunan kepadatan dan kekuatan beton, khususnya terhadap beban lentur yang sensitif terhadap keberadaan cacat mikro.

Berdasarkan ketentuan SNI T-15-1991-03, kuat lentur beton dapat diperkirakan melalui rumus pendekatan yang bergantung pada kuat tekan beton rencana. Untuk beton spesifikasi K250, diperoleh nilai kuat lentur minimum sebesar 3,162 MPa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hanya beton pada variasi 0% yang memenuhi nilai pendekatan tersebut. Beton dengan penambahan limbah kulit kayu Ekaliptus sebesar 1%, 2,5%, dan 5% tidak memenuhi batas minimum, sehingga tidak direkomendasikan untuk aplikasi beton struktural yang memerlukan ketahanan lentur.

Tidak ditemukannya variasi optimum yang mampu meningkatkan kuat lentur. Hal ini menunjukkan bahwa, dalam kondisi penelitian ini, limbah kulit kayu Ekaliptus tidak berperan sebagai material penguat, melainkan lebih berfungsi sebagai inklusi yang melemahkan struktur internal beton. Meskipun limbah kulit kayu Ekaliptus telah dimodifikasi melalui perlakuan alkali untuk meningkatkan kompatibilitas dengan pasta semen, hasil pengujian menunjukkan peningkatan kuat lentur beton tidak tercapai.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa pemanfaatan limbah kulit kayu Ekaliptus dengan modifikasi melalui perlakuan alkali sebagai substitusi parsial agregat halus belum efektif untuk meningkatkan kuat lentur beton, dan penggunaannya perlu dibatasi pada aplikasi non-struktural atau dikaji lebih lanjut dengan metode modifikasi material yang lebih intensif.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai Pengaruh Nilai Kuat Lentur Beton dengan Pemanfaatan Limbah kulit kayu Ekaliptus sebagai Substitusi Parsial Agregat Halus, dapat disimpulkan bahwa:

1. Penggunaan limbah kulit kayu Ekaliptus sebagai substitusi parsial agregat halus pada variasi 0%, 1%, 2,5%, dan 5% menghasilkan nilai kuat lentur beton rata-rata berturut-turut sebesar 3,244 MPa, 2,849 MPa, 2,249 MPa, dan 1,499 MPa. Hasil tersebut

menunjukkan kecenderungan penurunan kuat lentur seiring dengan meningkatnya persentase substitusi limbah kulit kayu Ekaliptus.

2. Pemanfaatan limbah kulit kayu Ekaliptus sebagai pengganti sebagian agregat halus menyebabkan penurunan kemampuan beton dalam menahan beban lentur. Dengan demikian, dalam kondisi dan perlakuan material yang digunakan pada penelitian ini, limbah kulit kayu Ekaliptus belum dapat menggantikan peran pasir alami sebagai agregat halus pada beton struktural yang memerlukan ketahanan lentur.

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya dapat diajukan sebagai berikut:

1. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengkaji perlakuan awal (pretreatment) limbah kulit kayu Ekaliptus yang lebih intensif, seperti mineralisasi atau pelapisan partikel, guna meningkatkan kualitas ikatan antara limbah kulit kayu dan pasta semen.
2. Penggunaan limbah kulit kayu Ekaliptus dapat diarahkan pada aplikasi beton non-struktural, seperti beton ringan, beton isolasi, atau elemen arsitektural, dengan fokus pada parameter selain kuat lentur, misalnya berat jenis, sifat termal, atau akustik.
3. Penelitian selanjutnya juga disarankan untuk mengombinasikan limbah kulit kayu Ekaliptus dengan bahan tambahan lain, seperti bahan pozzolan atau filler mineral, guna memperbaiki mikrostruktur beton dan mengurangi dampak negatif terhadap kekuatan mekanik.

Ucapan Terimakasih

Apresiasi disampaikan kepada Bapak/Ibu Dosen Pembimbing, Politeknik Negeri Balikpapan, PT. ITCHI Hutani Manunggal, serta rekan-rekan mahasiswa, staf laboratorium, dan pihak-pihak terkait atas dukungan terhadap pelaksanaan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Fatriady, M. R., Rachman, M. R., Jamal, M., Muliawan, I. W., Mustika, W., & Mabui, D. S. S. (2022). *Teknologi Bangunan dan Material*. Tohar Media.
- Lilargem Rocha, D., Tambara Júnior, L. U. D., Marvila, M. T., Pereira, E. C., Souza, D., & de Azevedo, A. R. G. (2022). A review of the use of natural fibers in cement composites: concepts, applications and Brazilian history. *Polymers*, 14(10), 2043.
- Mahrilar, E., & Zainal, S. H. (2025). Potensi Abu Sekam Padi (Agrotech RHA-KD) Sebagai Pengganti Sebahagian Simen. *Nusantara Civil Engineering Journal*, 3(1), 13–20.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (Vol. 4). Longman London.
- Risal, M., Jasman, J., & Hamka, H. (2022). Pengaruh substitusi agregat halus dengan serbuk kayu terhadap kuat tekan dan kuat lentur beton. *Jurnal Karajata Engineering*, 2(2), 31–37.
- Savastano Jr, H., Warden, P. G., & Coutts, R. S. P. (2005). Microstructure and mechanical properties of waste fibre–cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 27(5), 583–592.
- Scrivener, K. L., Crumbie, A. K., & Laugesen, P. (2004). The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete. *Interface Science*, 12(4), 411–421.
- Susmiati, Y. (2018). Prospek Produksi Bioetanol dari Limbah Pertanian dan Sampah Organik. *Industria: Jurnal Teknologi Dan Manajemen Agroindustri*, 7(2), 67–80.
- Torgal, F. P., & Jalali, S. (2011). *Eco-efficient construction and building materials*. Springer Science & Business Media.
- Ulfa, A., Amalia, M., Dhana, I., Agustina, E., Ramadhan, M., & Abdillah, K. (2024). Pengaruh Puntiran Serat Kaleng pada Kuat Tekan Beton. *JST (Jurnal Sains Terapan)*, 10(1), 6–12.

Wang, H., Liu, X., Wang, S., Zhou, S., Zang, T., Dai, L., & Ai, S. (2021). Hydrophobic kenaf straw core for biomass-based cement mortar with excellent mechanical properties. *Materials Chemistry and Physics*, 267, 124594.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution Non-Commercial 4.0 International License
