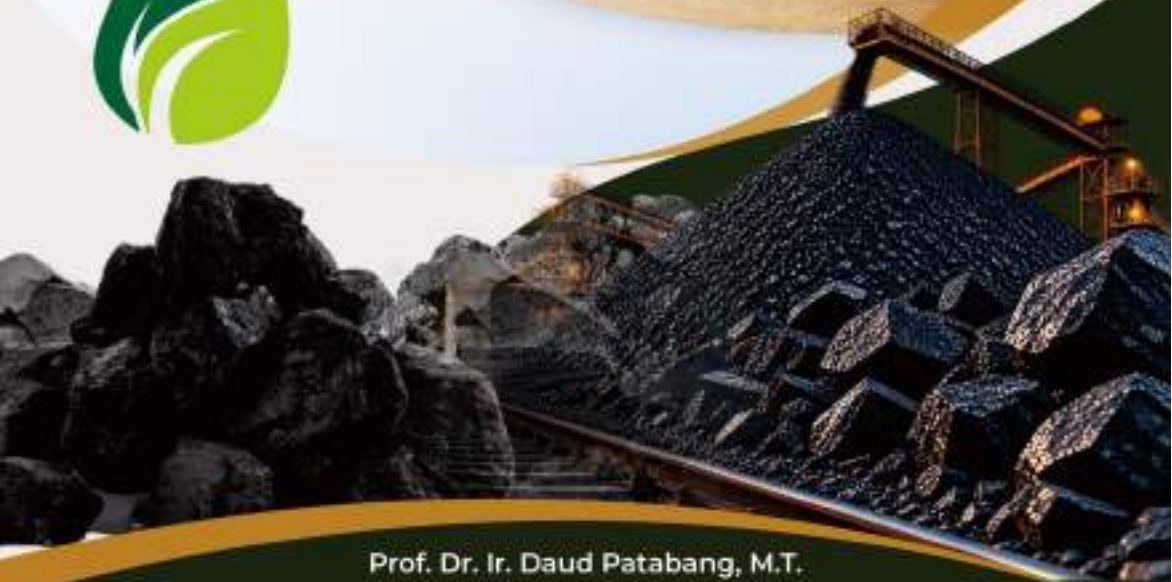




Co-Firing Biomassa Dengan Batubara

Peringkat Rendah
(LOW-RANK COAL, LRC)

Edisi
2



Prof. Dr. Ir. Daud Patabang, M.T.
Dr. Ir. Kristian Seleng, M.M.
Ir. Basri, S.T., M.T.
Ir. Muchsin, S.T., M.T.
Ir. Anjar Asmara, M.M.

Co-Firing Biomassa Dengan Batubara Peringkat Rendah (LOW- RANK COAL,LRC) Edisi 2

Penulis:

Prof. Dr. Ir. Daud Patabang, M.T.

Dr.Ir.Kristian Seleng,MM

Ir.Basri,ST,MT

Ir.Muchsin,ST.MT

Ir.Anjar Asmara,ST.MM



UU No. 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta

Fungsi dan Sifat Hak Cipta Pasal 4

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

Pembatasan Pelindungan Pasal 26

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan fonogram yang telah dilakukan pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

1. Setiap orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000,00 (seratus juta rupiah).
2. Setiap orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

**Co-Firing Biomassa Dengan Batubara Peringkat
Rendah
(LOW- RANK COAL,LRC)
Edisi 2**

**Prof. Dr. Ir. Daud Patabang, M.T.
Dr.Ir.Kristian Seleng,MM
Ir.Basri,ST,MT
Ir.Muchsin,ST.MT
Ir.Anjar Asmara,ST.MM** Editor:
Maria Mencyana Pati Saghu

**TATA LETAK:
Wahyuni Putri Adeningsi**

**DESAIN SAMPUL:
Muhammad Adhar**

**SUMBER:
www.tdjpublisher.com**

**ISBN:
978-634-279-188-2**

**CETAKAN PERTAMA:
September 2026**

**UKURAN:
iv + 134 Hal; 15.5 cm x 23 cm**

Hak Cipta dilindungi Undang-Undang.
Dilarang menggandakan atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku
ini dalam bentuk apa pun tanpa izin tertulis dari penerbit dan penulis.

**ANGGOTA IKAPI: 006/NTT/2022
TANGGUH DENARA JAYA PUBLISHER
Jl. Timor Raya No. 130 B, Kota Kupang, NTT
E-mail: tdj.denarapublisher@gmail.com**

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Kuasa atas kasih dan kemurahan-Nya sehingga penulisan buku berjudul *Co-Firing Biomassa dengan Batubara Peringkat Rendah (Low-Rank Coal/LRC) Edisi 2* ini dapat diselesaikan dengan baik.

Buku ini membahas efek penambahan limbah biomassa ke dalam batubara peringkat rendah (*Low-Rank Coal/LRC*) dalam rangka meningkatkan kinerja pembakaran batubara peringkat rendah. Pembahasan dalam buku ini merupakan rangkuman hasil temuan penulis yang disusun secara sistematis sebagai bentuk kontribusi terhadap pengembangan energi alternatif yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Buku ini terdiri atas empat bab utama. Bab pertama membahas *co-firing* LRC dengan arang cangkang kemiri (*Candlenut Shell Char/CNS*), bab kedua mengulas *co-firing* LRC dengan arang limbah serbuk gergaji kayu meranti, bab ke tiga menyajikan analisis mendalam mengenai *co-firing* LRC dengan arang limbah kulit kelapa muda (*Green Coconut Shell/GCS*), dan bab ke empat membahas Analisis termogravimetri pembakaran LRC dengan biomassa arang tongkol jagung. Keempat pembahasan tersebut diarahkan untuk memberikan gambaran mengenai potensi limbah biomassa sebagai bahan bakar campuran yang mampu meningkatkan efisiensi dan kualitas pembakaran batubara peringkat rendah.

Akhir kata, penulis berharap buku ini dapat memberikan manfaat bagi mahasiswa, peneliti, dunia industri, maupun masyarakat luas dalam upaya pemanfaatan limbah biomassa sebagai sumber energi baru dan terbarukan, khususnya untuk memperoleh bahan bakar dengan kinerja pembakaran yang lebih optimal

Palu, September 2026,

Tim penulis

Prof.Dr.Ir.Daud Patabang,MT

Dr.Ir.Kristian Seleng,MM

Ir.Basri,ST,MT

Ir.Muchsin,ST.MT

Ir.Anjar Asmara,ST,MM

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI	iii
BAB I CO-FIRING BATUBARA PERINGKAT RENDAH (LRC) DENGAN ARANG CANGKANG KEMIRI.....	5
1.1. Bahan baku.....	10
1.2. Preparasi sampel	11
1.3. Karakterisasi.....	11
1.4. co-firing LRC dengan CNS.....	17
BAB II CO-FIRING LRC DENGAN ARANG SERBUK GERGAJI KAYU MERANTI	63
2.1. Bahan baku.....	63
2.2. Preparasi.....	64
2.3. Karaktrisasi	65
2.4. Efisiensi Thermal Briket.....	70
2.5. Emisi Gas Hasil Pembakaran Briket.....	73
BAB III TERMOGRAVIMETRI PENAMBAHAN LIMBAH BIOMASSA ARANG KULIT KELAPA MUDA (GREEN COCONUT SHELL,GCS), TERHADAP KINERJA PEMBAKARAN BATUBARA PERINGKAT RENDAH (LOW-RANK COAL,LRC)	85
3.1. Bahan Baku	88
3.2. Preparasi sampel.....	90
3.3. Karakterisasi.....	90
3.4. TGA-DTA	91
3.5. ENERGI AKTIVASI	104
3.6. INDEKS PEMBAKARAN	105

BAB IV EFEK PENAMBAHAN LIMBAH BIOMASSA ARANG TONGKOL JAGUNG TERHADAP KINERJA PEMBAKARAN BATUBARA PERINGKAT RENDAH	112
4.1. Bahan Baku.....	113
4.2. Karakterisasi	115
4.3. Efisiensi Pembakaran Briket.....	116
4.4. Hasil Analisis TGA-DTA	118
4.5. Indeks Pembakaran	128
4.6. Energi aktivasi	130

BAB I

CO-FIRING BATUBARA PERINGKAT RENDAH (LRC) DENGAN ARANG CANGKANG KEMIRI

Batubara adalah salah satu bahan bakar fosil yang paling banyak digunakan sebagai bahan bakar pembangkit daya, karena ketersediaannya melimpah dan harganya relatif lebih murah jika dibandingkan dengan bahan bakar minyak. Batubara sebagai bahan bakar padat menurut standar *The American Society of Testing and Material (ASTM)*, dikategorikan ke dalam 4 jenis yaitu: batubara antrasit dengan nilai kalor 7.622,22 kcal/kg, batubara bituminous dengan nilai kalor 7.950 kcal/kg, batubara sub bituminous dengan nilai kalor 5.627,78 kcal/kg dan batubara lignit dengan nilai kalor 4.005,56 kcal/kg, (M.M.El-Wakil 1988). Menurut *General Version of the United Nations Economic Commission for Europe in-seam coal rank classification*, batubara diklasifikasikan menjadi 3 rangking masing-masing: Low- Rank Coal (LRC) yang terdiri atas batubara lignit dan subbituminous, Medium- Rank Coal (MRC) yaitu batubara bituminous dan High- Rank Coal (HRC) yaitu batubara anthracit, (Romero, Arce, and Avila 2018). Indonesia memiliki potensi sumber daya batubara mencapai 151 miliar ton. Dari jumlah tersebut sekitar 61% adalah batubara peringkat rendah (*Low-Rank Coal*) LRC(Renstra KSDEM RI(2015-2019) 2015). LRC memiliki nilai kalor antara 5.100 – 6.100 kcal/kg, kandungan moisture antara 30– 40%, dan memiliki suhu nyala yang rendah sekitar 1.050 K, (Khatami and Levendis 2016). Tingginya kandungan moisture berdampak terhadap rendahnya reaktivitas pembakaran, dan rendahnya suhu nyala mengakibatkan rendahnya efisiensi pembakaran. Batubara ini juga memiliki kandungan Sulfur(S), dan Nitrogen (N₂) yang tinggi, di samping

itu batubara secara umum memiliki kandungan karbon terpendam, sehingga jika dibakar menghasilkan emisi gas CO₂, CO, NO_x dan SO_x yang relatif tinggi. Hal ini berpotensi meningkatkan pemanasan global. Polutan NO_x dan SO_x dapat meningkatkan hujan asam, korosi terhadap material logam, berbahaya terhadap kesehatan manusia dan lingkungan hidup seperti tanaman, bahkan dapat menimbulkan *slaging* dan *fouling* pada pipa alat perpindahan kalor, (Kopczyński et al. 2017), (Khatami and Levendis 2016).

Untuk memperbaiki kualitas pembakaran LRC, maka diperlukan strategi, salah satunya adalah pembakaran campuran (*co-firing*) antara LRC dengan biomassa. Beberapa peneliti telah melakukan penelitian tentang pembakaran campuran LRC dengan biomassa. (Jayaraman, Versan, and Gokalp 2017) Jayaraman et.al (2017) Pembakaran campuran LRC dengan biomassa *poplar wood* dan *hazelnut shell* dengan menggunakan *Thermogravimetric and mass spectrometric (TG-MS) analysis* diperoleh peningkatan indeks performance pembakaran yaitu reaktivitas pembakaran meningkat dan menurunkan emisi gas SO₂ pada penambahan masing- masing biomassa tersebut.

Hutrindo et.al (2006) meneliti karakteristik pembakaran campuran LRC dengan gambut (*peat*) dengan simulasi pembakaran dalam tanur listrik, hasil penelitian tersebut diperoleh korelasi antara jumlah gambut yang dicampur dengan LRC berdampak terhadap peningkatan laju pembakaran. Peneliti yang sama juga melakukan penelitian lanjutan tentang partikel abu hasil pembakaran campuran antara LRC dengan gambut, hasilnya menunjukkan bahwa partikel abu dari produk pembakaran lebih halus. Hal ini menunjukkan bahwa dampak penambahan gambut ke dalam LRC meningkatkan reaktivitas pembakaran dan hal tersebut mengindikasikan terjadinya pembakaran yang relatif sempurna. (Hutrindo, Hardianto, and Suwono 2006) (Zhang et al. 2014). Penelitian tentang efek

penambahan biomassa jerami gandum dan kayu dicampur dengan batubara dalam proses pembakaran pada suhu 900 – 1.100 °C.

Hasil penelitian ini menunjukkan terjadinya penurunan emisi NO, CO, dan mengurangi karbon yang tidak terbakar *unburn-carbon* (UBC) (Riaza et al. 2013). Penelitian pembakaran biomassa residu zaitun (*olive residu*) yang dicampur dengan batubara berbagai peringkat dengan menggunakan atmosfer oxy-fuel pada suhu pembakaran 400 – 800 °C, menghasilkan dampak signifikan terhadap penurunan emisi NO (Ghenai and Janajreh 2010) dalam Analisis komputasional dinamika fluida (*The analysis Computational Fluid Dynamics, CFD*) tentang efek hasil pembakaran batu bara-biomassa jerami gandum (*wheat straw*), didapatkan hasil penurunan emisi NO_x dan CO₂ yang signifikan dimana penurunan emisi ini sangat tergantung pada proporsi biomassa dalam campuran dengan batu bara.

Dari hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa pembakaran campuran batubara dengan berbagai jenis biomassa dapat memperbaiki kualitas pembakaran batubara. Kualitas pembakaran tersebut terdiri atas peningkatan reaktivitas pembakaran, efisiensi pembakaran dan penurunan emisi gas hasil pembakaran. Hal ini dimungkinkan karena penambahan biomassa ke dalam batubara mengubah komposisi unsur-unsur yang terdapat di dalam campuran bahan bakar tersebut sehingga mempengaruhi reaksi pembakaran dan pada akhirnya dapat memperbaiki kualitas pembakaran.

Biomassa adalah bahan-bahan organik yang berasal dari tumbuhan atau hewan, baik yang terbentuk dari hasil produksinya, sisa metabolismenya, ataupun limbah yang dihasilkannya. Biomassa dapat diperoleh dari berbagai bidang industri, budidaya, baik pertanian, perkebunan, kehutanan, peternakan, maupun perikanan. Pembakaran campuran biomassa dengan batubara pada pembangkit listrik tenaga batubara telah

dianggap sebagai salah satu strategi yang paling menarik untuk mengurangi emisi CO₂ dalam rangka mengurangi gas efek rumah

kaca yang mengakibatkan pemanasan global. Bahan bakar biomassa menempati urutan keempat sebagai sumber daya energi di seluruh dunia, dan menyediakan sekitar 14% dari kebutuhan energi dunia, Demirbas, A (2005) (Demirbas 2005). Potensi sumber daya energi yang berasal dari limbah biomassa di Indonesia berdasarkan data Kementerian ESDM RI (2015) adalah 32.000 MW, dengan kapasitas terpasang 1.740,4 MW atau sekitar 5,4%(Renstra KSDM RI (2015-2019) 2015).

Perbandingan potensi termal antara LRC dengan berbagai jenis biomassa diperlihatkan pada tabel 1 di bawah ini:

Tabel 1. Perbandingan sifat termal antara LRC dengan beberapa jenis Biomassa

No	Bahan bakar	VM(%)	M(%)	A(%)	FC(%)	HHV (kcal/kg)	Referensi
1	LRC	35,15	16,08	19,04	29,74	5178	Hutrindo et.all (2006)
2	Gambut (<i>peat</i>)	63,64	9,09	<0,05	27,27	4028	Jayaraman et.all (2017)
3	<i>Popplar wood</i>	74	1	10	24,9	4464	
4	<i>Hazelnut shell</i>	69,5	1,5	10,02	28,9	4870	Tambunan et.all (2014)
5	<i>CNS(original)</i> <i>CNS</i>	48,75	9,54	6,99	34,92	5245	
6	<i>Karbonasi</i>	8,73	5,35	9,56	76,31	7810	Riaza et.all (2013)
7	<i>Olive residu</i>	71,9	-	7,6	20,5	4753	
8	<i>Corn stalk</i>	32,2	-	6,3	61,4	4327	Toptas t.all(2015)
9	<i>Palm shell</i>	73,65	4,3	2,63	19,42	4865	Mahidin et.all (2006)
10	<i>Wheat straw</i>	79,33	10,09	6,5	17,38	4320	Wang et.all(2014)

Berdasarkan data pada Tabel 1 di atas, terlihat bahwa salah satu limbah biomassa yang memiliki potensi termal yang besar, namun belum optimal dimanfaatkan sebagai bahan bakar yang dicampur dengan LRC, yaitu cangkang kemiri (*Candlenuts Shell*, CNS). CNS diperoleh dari limbah buah kemiri yang telah diambil daging buahnya. Kemiri (*Aulerius Molucca*) adalah tanaman perkebunan yang tumbuh pada daerah tropis seperti Indonesia. Data BPS (2015) menyebutkan produksi kemiri nasional 100.700 ton. Produksi kemiri tersebut dapat menghasilkan limbah cangkang kemiri sebanyak 65.700 ton (BPS Indonesia 2015). Jumlah CNS ini sangat potensial untuk dapat mensubstitusi sebagian penggunaan LRC sekaligus memperbaiki kualitas pembakaran LRC. Penelitian pemanfaatan cangkang kemiri sebagai sumber energi baru telah dilakukan oleh Tambunan et.al (2014) melalui pembakaran campuran CNS dengan CNS karbonasi. Penelitian ini dilakukan dengan membakar sampel di dalam tungku listrik pada suhu dinding tungku 400 °C dan kecepatan udara yang dialirkan ke dalam tungku 0,4 m/s, diperoleh hasil komposisi campuran optimal sebesar (75:25) % dengan menghasilkan energi maksimum sebesar 46,08 watt (Tambunan, Syamsiro, and Saptoadi n.d.). Tambunan et.al (2017) mencampur CNS dengan CNS yang telah dikarbonasi untuk menentukan komposisi campuran ideal yang menghasilkan emisi CO minimum, dari pembakaran sampel tersebut diperoleh komposisi ideal adalah 75%: 25% menghasilkan emisi CO yang minimum. Di samping itu pemanfaatan CNS juga dipakai sebagai arang aktif, CNS dapat dipakai sebagai pengganti *course agregat* untuk campuran beton dalam rangka meningkatkan sifat mekanis beton, Bahtiar et.al (2018), dan CNS sebagai absorben pada pabrik minyak kelapa sawit (*Crude Palm Oil*, CPO), Nuryanto (2018).

Berdasarkan uraian di atas dan dalam upaya untuk memperbaiki kualitas pembakaran LRC, yaitu peningkatan

reaktivitas pembakaran, efisiensi pembakaran, dan penurunan emisi gas hasil pembakaran, serta pemanfaatan cangkang kemiri yang memiliki potensi termal dan potensi kuantitas limbah yang besar, maka dilakukan penelitian tentang pembakaran campuran antara LRC dengan CNS untuk melihat karakteristik pembakaran dari pencampuran kedua bahan tersebut.

1.1. Bahan baku

Sampel batubara diperoleh dari tambang batubara di Sangatta Kalimantan timur, cangkang kemiri diperoleh dari perkebunan rakyat di Daerah Tinambung Sulawesi selatan. Gambar ke dua bahan tersebut diperlihatkan pada Gambar 1, dan 2 di bawah ini



Gambar 1 : LRC

Gambar 2: Buah kemiri dan cangkang kemiri



1.2. Preparasi sampel

- a. Persiapan sampel LRC dan CNS dengan melakukan pembersihan masing-masing sampel secara terpisah dari kotoran yang menempel.
- b. CNS di pretreatment dengan cara *dry torrifaction* pada suhu 250-350 °C selama 30 menit di dalam furnace listrik, Liu et.all (2002) dan Ullah,H et.all (2017) (Ullah et al. 2017).
- c. Penggilingan masing-masing sampel dengan ukuran partikel 40-60 mesh (Neminda et al. 2017).

1.3. Karakterisasi

Karakterisasi sampel ditujukan untuk mendapatkan karakteristik termokimia dari masing-masing sampel.

Karakteristik termokimia dilakukan melalui 2 cara berdasarkan standar ASTM sebagai berikut :

A. *Proximate Analysis*

B. *Ultimate Analysis*

Proximate analysis dilakukan untuk mendapatkan karakteristik termal yang terdiri atas :kandungan Nilai Kalor Atas (*Higher Heating Value*,HHV), kandungan Volatile Matters (VM), kandungan Moisture inherent (M), kandungan Ash (A), dan kandungan *Fixed Carbon* (FC).

Ultimate analysis dilakukan untuk mendapatkan karakteristik kimia tyang terdiri atas: kandungan Carbon (C), kandungan Hidrogen (H₂) , Kandungan Nitrogen (N₂),kandungan Sulphur (S), dan kandungan Oksigen (O₂).

Karakteristik termal diperoleh dengan uraian sebagai berikut:

1. Nilai Kalor

Pengukuran nilai kalor atas menggunakan bom kalorimeter PARR 6200 menurut ASTM D5865-12.

Prosedur pengukuran nilai kalor:

- Sampel ditimbang 1 g dan dimasukkan ke dalam cawan,
- Ke dua kutub bom kalorimeter dihubungkan dengan 10 cm kawat pembakar nikel krom,
- Bom kalorimeter diisi dengan oksigen, pada tekanan 30 atmosfer,
- Bom kalorimeter tersebut dimasukkan ke dalam vessel yang berisi 2 kg air, selanjutnya vessel dimasukkan ke dalam perangkat bom kalorimeter,
- Aliran listrik pemanas dan alat pendingin dijalankan , skala dari "initial balance" di atur sampai lampu dan amperemeter dari pemanas berjalan secara otomatis (suhu vessel dan water jacket sama)
- Pengukuran secara otomatis dilakukan untuk mengukur suhu awal, kenaikan suhu dan nilai kalor ekivalen dari hasil penembakan dalam bom kalorimeter.

Perhitungan:

Nilai kalor sampel (HHV) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$HHV = \frac{\Delta T \times EEV - (e_1 + e_2)e_s}{m}$$

Dimana :

ΔT adalah kenaikan suhu pembakaran di dalam bom kalorimeter ($^{\circ}\text{C}$)

EEV adalah energi ekivalen saat terjadi pembakaran ($\text{cal}/^{\circ}\text{C}$)

e_1 adalah koreksi panas karena pembentukan asam (cal)

e_2 adalah koreksi panas pembakaran dari kawat pembakar (cal)

e_s adalah koreksi sulfur yang ada dalam bahan bakar

(cal/g)

m adalah masa sampel (g)

Berikut gambar Bom Kalorimeter Parr 6200



Gambar 3 : Bom Kalorimeter Parr 6200

a. Pengukuran *Volatile Matters* (VM)

Pengukuran VM mengikuti standar ASTM D 3175.

Prosedur pengukuran:

- Sampel ditimbang sebanyak 1 g dan dimasukkan ke dalam cawan porselin, kemudian ditutup.
- Selanjutnya sampel tersebut dimasukkan ke dalam furnace dan dipanasi pada suhu 815 °C selama 7 menit
- Sampel tersebut dikeluarkan dan didinginkan dalam desikator kemudian ditimbang kembali.

Perhitungan:

$$\left[\frac{(A - D)}{C} \right] \times 100 \% - F (\%)$$

Volatile matters (%) =

Dimana :

A adalah berat sampel dan cawan (g)

C = A-B

B adalah berat cawan (g)

D adalah berat cawan dan residu (g)

F adalah moisture dalam analisis sampel (%)

b. Pengukuran Moisture (M)

Kandungan Moisture diukur berdasarkan standar ASTM D 3173

Prosedur pengukuran:

- Sampel 1 g di masukkan ke dalam cawan yang telah diketahui beratnya
 - Sampel dipanaskan dalam *muffle furnace* pada suhu 105 °C, selama 1 jam.
 - Selanjutnya sampel dikeluarkan dari dalam *muffle furnace*, dan diletakkan di dalam lempengan logam kemudian tutup
 - Sampel didinginkan selama 10 menit kemudian dimasukkan ke dalam desikator
 - Setelah dingin pada suhu kamar kemudian ditimbang
- Perhitungan Moisture:

$$M_{ad} = \frac{(M_2 - M_3)}{(M_2 - M_1)} \times 100 \%$$

(3)

Di mana:

M_1 adalah massa cawan (g),

M_2 adalah massa cawan + sampel sebelum dipanaskan (g),

M_3 massa cawan + sampel sesudah dipanaskan (g).

c. Pengukuran Ash (A)

Kandungan *ash* diukur berdasarkan standar ASTM D3174

Prosedur pengukuran:

- Sampel 1 g dimasukkan ke dalam cawan yang telah diketahui beratnya

- Sampel dipanaskan di dalam muffle furnace dimulai dari suhu rendah, kemudian dinaikkan dari 250 °C sampai 500 °C selama 30 menit, selanjutnya dari 500 °C sampai 815 °C selama 60 menit.
 - Sampel dikeluarkan dari dalam furnace, diletakkan di dalam lempengan logam kemudian tutup.
 - Sampel didinginkan selama 10 menit kemudian masukkan ke dalam desikator
 - Setelah dingin pada suhu kamar kemudian ditimbang
 - Pemanasan diulangi sampai diperoleh berat tetap.
- Perhitungan:

$$Ash (A) = \left[\frac{(M_1 - M_2)}{(M_3 - M_4)} \right] \times 100\% \quad (4)$$

Dimana:

M_1 adalah massa cawan sebelum dipanaskan (g)

M_2 adalah massa cawan + sampel sebelum dipanaskan (g),

M_3 adalah massa cawan + sampel sesudah dipanaskan (g),

M_4 adalah massa cawan sesudah dipanaskan (g).

d. Perhitungan *Fixed carbon* (FC)

Fixed carbon dihitung dari 100 % dikurangi dengan kadar air lembab (*moisture*) dikurangi kadar abu, dikurangi kadar zat terbang (*volatile matters*):

$$FC = 100 \% - (M + A + VM)\% \quad (5)$$

e. Analisis Ultimasi (*Ultimate Analysis*)

f. Pengukuran Karbon (C) dan Hidrogen (H₂)

Pengukuran karbon dan Hidrogen menggunakan metode Lieblg, berdasarkan standar ASTM D3176

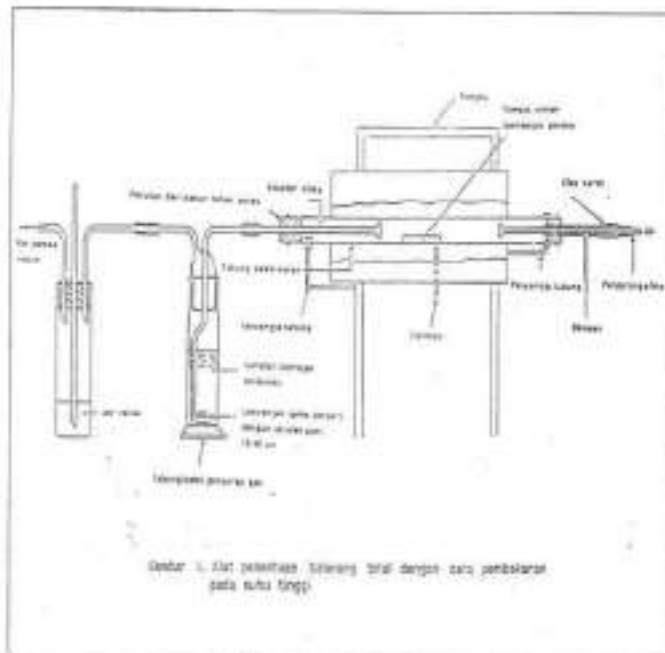
g. Pengukuran Nitrogen (N₂)

Pengukuran nitrogen mengikuti metode Kjeldahl berdasarkan standar ASTM D3179.

h. Pengukuran Sulfur (S)

Pengukuran sulfur mengikuti metode Eschka berdasarkan standar ASTM D3177.

Perangkat untuk mengukur kandungan sulfur diperlihatkan seperti pada gambar di bawah ini :



Gambar 3 : Perangkat pengukuran Sulfur total.

Pengukuran kandungan Carbon, Hidrogen, dan Nitrogen dapat secara langsung dilakukan dengan menggunakan mesin Leco CHN 28 seperti di bawah ini:



Gambar 4. LECO CHN 28

i. Perhitungan Kandungan Oksigen (O₂)

Penentuan kandungan Oksigen didasarkan hasil selisih 100 % dikurangi dengan jumlah kandungan karbon , Hidrogen. Nitrogen, Sulfur, Ash, Moisture.

$$O_2 = [100\% - (C + H + N + S + A + M)] \% \quad (6)$$

1.4. co-firing LRC dengan CNS

Ekperimen co-firing LRC dengan CNS dilakukan dengan menambahkan CNS ke dalam LRC masing-masing 10%, 30%, 50%, 70%, dan 90% basis massa.

Pengujian ini meliputi :

Proximate Analysis

Ultimate Analysis

Pembakaran secara langsung di dalam tungku pembakaran

Thermogravimetry Analysis (TGA)-Differential Thermal Analysis (TGA)

Pengujian emisi hasil pembakaran

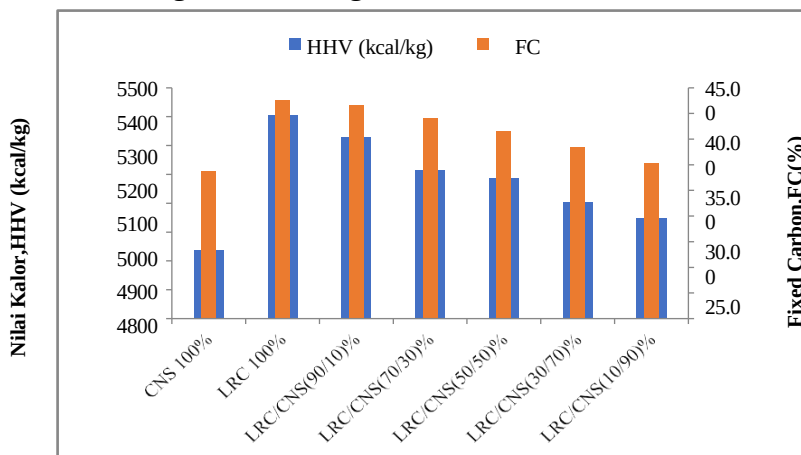
A. Proximate Analysis

Hasil proximate analysis diperlihatkan pada tabel 1 di bawah ini :

Tabel 1. Hasil Analisis Proksimasi

NO	Sampel	VM % adb	M %adb	A %adb	FC %adb	HHV (kcal/kg)
1	CNS	63,00	6,72	0,47	28,69	4936
2	LRC	39,80	15,15	2,38	42,67	5406
3	LRC/CNS:(90/10)%	42,25	14,10	1,95	41,70	5329
4	LRC/CNS:(70/30)%	47,20	12,15	1,55	39,10	5216
5	LRC/CNS:(50/50)%	51,51	10,56	1,34	36,59	5187
6	LRC/CNS:(30/70)%	56,99	8,51	1,08	33,42	5104
7	LRC/CNS:(10/90)%	62,03	6,93	0,53	30,31	5049

Berdasarkan hasil pada tabel 1 di atas maka dibuat grafik unruk menganalisis sebagai berikut:

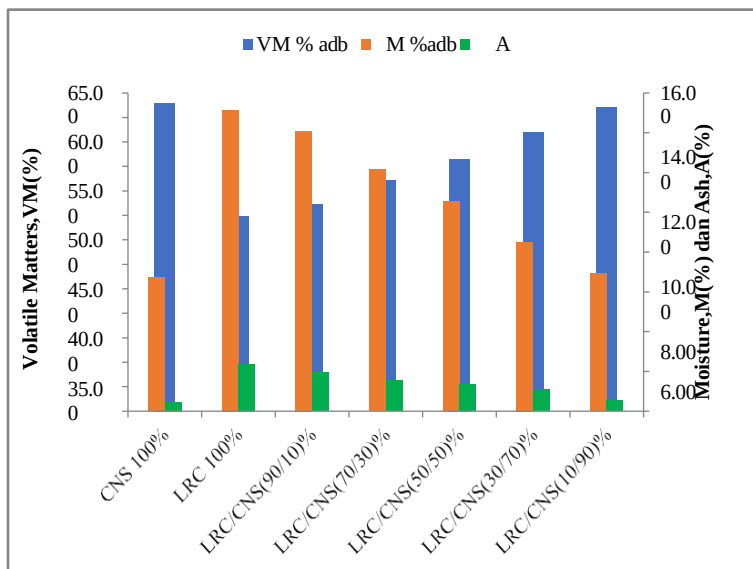


Gambar 5. Grafik Nilai Kalor Atas (HHV) dan *Fixed Carbon* (FC)

Hubungan antara HHV dan FC terhadap penambahan CNS ke dalam LRC diperlihatkan pada gambar 15. Penambahan CNS ke dalam LRC mengakibatkan HHV dan FC semakin

menurun, hal ini disebabkan karena kandungan HHV dan FC di dalam LRC lebih besar daripada di dalam CNS. Dampak dari menurunnya FC berimplikasi terhadap semakin singkatnya waktu pembakaran arang (*char*) di dalam sampel, namun pada sisi yang lain pada pembakaran sampel terjadi peningkatan kecepatan pembakaran akibat penambahan CNS ke dalam LRC, seperti pada pembakaran LRC dengan *hazelnut shell*, (Jayaraman, Versan, and Gokalp 2017) yaitu ketika presentase biomassa *hazelnut shell* ditingkatkan jumlahnya dalam campuran dengan LRC maka terjadi laju penurunan massa yang meningkat, indikator ini menunjukkan terjadi peningkatan kecepatan pembakaran.

Gambar 6. Grafik Volatile Matters (VM), Ash (A), dan Moisture (M) di dalam sampel.

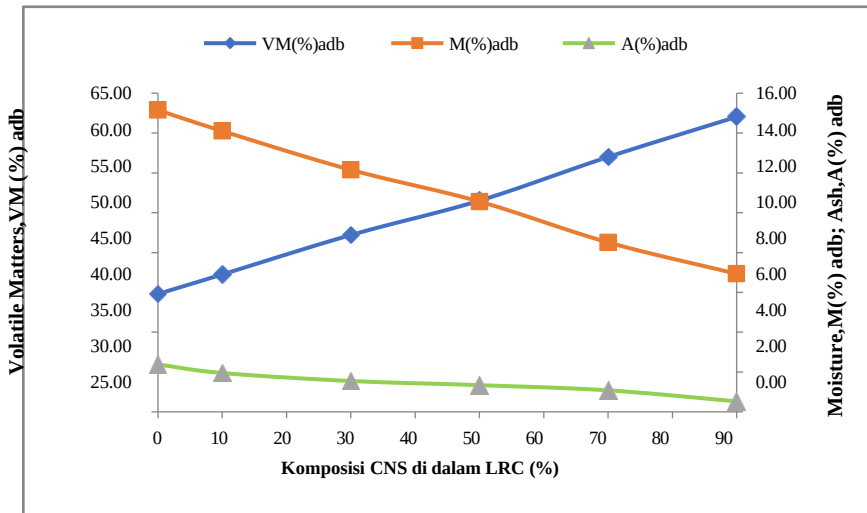


Hubungan antara VM, M, dan A terhadap penambahan CNS ke dalam LRC diperlihatkan pada gambar 16. Penambahan CNS ke dalam LRC terhadap kandungan VM, M, dan A mengakibatkan terjadinya peningkatan rata-rata VM sebesar 8,47 % dan pengurangan rata-rata M sebesar 14,36%

dan pengurangan rata-rata A sebesar 24,49%.

Perubahan komposisi kandungan VM, M, dan A seperti hasil analisis proksimasi tersebut di atas berdampak terhadap peningkatan laju pembakaran. Hal tersebut akan terlihat pada eksperimen pembakaran sampel.

Pengaruh penambahan CNS ke dalam LRC terhadap kandungan VM,M, dan A diperlihatkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik Pengaruh Penambahan CNS ke dalam LRC Terhadap Kandungan Volatile Matters(VM),Moisture(M),dan Ash (A).

Pengaruh penambahan CNS ke dalam LRC mengakibatkan terjadinya peningkatan VM dan penurunan M, hal ini akan berimplikasi terhadap peningkatan kecepatan pembakaran. Peningkatan VM dan berkurangnya M di dalam bahan bakar menjadi pemicu peningkatan penurunan massa sampel yang berakibat meningkatnya reaktivitas pembakaran, namun akibat rendahnya FC berimplikasi terhadap singkatnya waktu pembakaran arang (*char*). Demikian halnya penurunan kandungan A di dalam sampel berimplikasi terhadap semakin berkurangnya karbon yang tidak terbakar, walaupun dalam

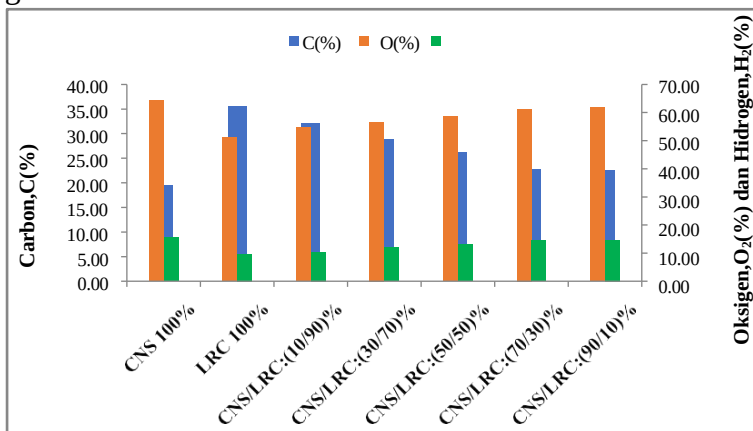
penelitian ini karbon yang tidak terbakar tidak diamati. Dampak penurunan A di dalam campuran bahan bakar dapat meningkatkan laju pembakaran atau reaktivitas pembakaran, karena difusi oksigen di dalam campuran bahan bakar menjadi lebih baik, seperti pada penambahan peat ke dalam LRC yang dilakukan oleh (Hutrinido, Hardianto, and Suwono 2006), di mana terjadi peningkatan VM, penurunan M, dan A mengakibatkan peningkatan reaktivitas pembakaran.

B. Ultimate Analysis

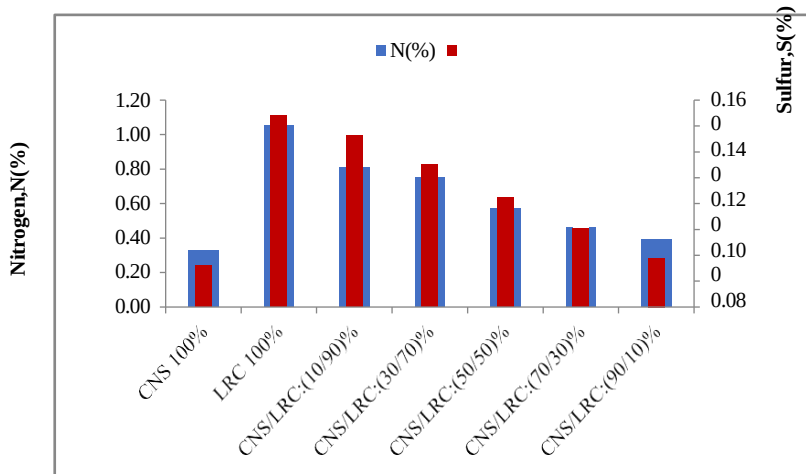
Data hasil Ultimate Analysis diperlihatkan pada tabel 2 di bawah ini:

NO	Sampel	C %	N %	S %	H %	O %
1	CNS	19,47	0,33	0,032	15,49	57,498
2	LRC	35,53	1,05	0,148	9,72	36,022
3	LRC/CNS:(90/10)%	32,11	0,81	0,133	10,36	40,537
4	LRC/CNS:(70/30)%	28,98	0,75	0,110	11,97	44,490
5	LRC/CNS:(50/50)%	26,31	0,57	0,085	13,11	48,025
6	LRC/CNS:(30/70)%	22,79	0,46	0,061	14,43	52,669
7	LRC/CNS:(10/90)%	22,56	0,39	0,038	14,68	54,872

Berdasarkan tabel 2 di atas maka dilakukan analisis sebagai berikut:

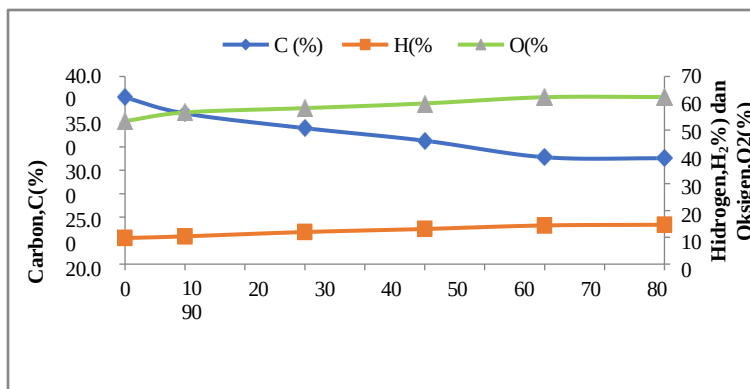


Gambar 8. Grafik Kandungan Karbon (C),Oksigen(O_2), dan Hidrogen (H_2) di dalam sampel



Gambar 9. Grafik Kandungan Nitrogen(N),dan Sulfur(S) di dalam Sampel.

Pengaruh penambahan CNS ke dalam LRC terhadap kandungan Carbon (C), Nitrogen (N), dan Oksigen (O), diperlihatkan pada gambar 20 di bawah ini:



Gambar 10. Pengaruh Penambahan CNS ke dalam LRC terhadap Kandungan Karbon(C),Hidrogen (H_2), dan

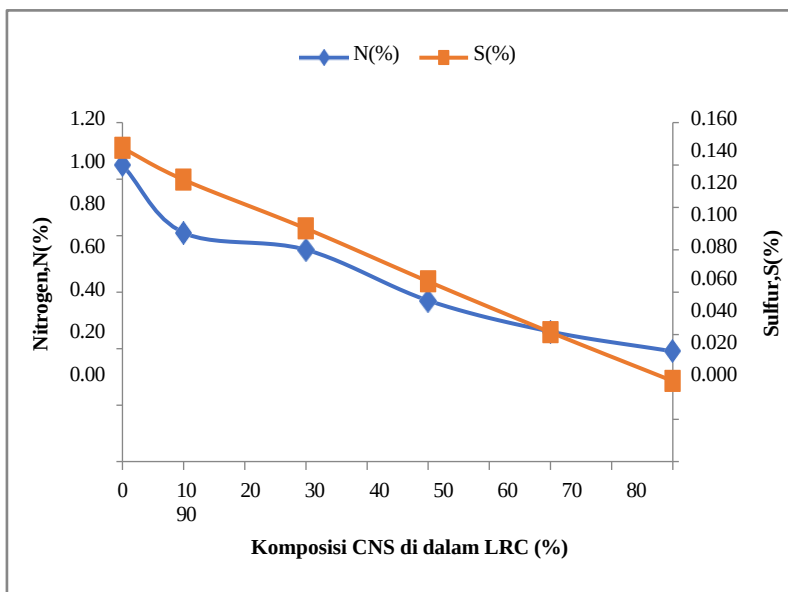
Oksigen(O_2) .

Penambahan CNS ke dalam LRC berakibat terhadap pengurangan Carbon di dalam sampel, hal ini diakibatkan oleh karena kandungan carbon di dalam CNS lebih sedikit dari pada carbon di dalam LRC.

Dampak dari rendahnya carbon dalam campuran LRC-CNS adalah singkatnya waktu pembakaran arang. Semakin besar penambahan CNS ke dalam LRC mengakibatkan semakin singkatnya FC terbakar. Namun sebaliknya reaktivitas pembakaran akan semakin meningkat.

Penambahan CNS ke dalam LRC berakibat meningkatnya kandungan hidrogen dan oksigen di dalam campuran bahan bakar. Implikasi meningkatnya hidrogen dan oksigen dalam campuran LRC-CNS akan meningkatkan reaktivitas pembakaran, karena tersedianya hidrogen dan oksigen yang cukup dalam proses pembakaran, seperti hasil penelitian (Zuwala and Lasek 2017) tentang pembakaran campuran LRC dengan biomassa microalga, dimana semakin meningkat campuran biomassa mikroalga ke dalam LRC berimplikasi terhadap meningkatnya reaktivitas pembakaran, oleh karena tingginya kandungan oksigen dan hidrogen di dalam biomassa mikroalga.

Pengaruh penambahan CNS ke dalam LRC terhadap kandungan Nitrogen (N) dan Sulfur (S), diperlihatkan pada gambar 21 di bawah ini:



Gambar 11. Grafik Pengaruh Penambahan CNS ke dalam LRC terhadap Kandungan Nitrogen(N), dan Sulfur(S).

Penambahan CNS ke dalam LRC menurunkan kandungan Nitrogen rata-rata 43,23 %, dan sulfur rata-rata 14,86 % dalam campuran bahan bakar tersebut. Implikasi dari penurunan kandungan Nitrogen adalah akan terjadi penurunan emisi NO_x ketika sampel tersebut dibakar, demikian halnya dengan berkurangnya kandungan sulfur dalam campuran bahan bakar akan berimplikasi terhadap menurunnya emisi SO_x saat bahan bakar tersebut dibakar, sebagaimana hasil penelitian (Mitchell et al. 2016) yang mencampur biomass kayu bakar yang memiliki kandungan nitrogen yang lebih rendah daripada batubara sehingga mampu mereduksi emisi NO_x , dan penelitian (Rokni et al. 2018) tentang pembakaran campuran sekam padi dengan batubara yang mampu mereduksi emisi

SO_x.

C. Eksperimen pembakaran dalam furnace

Hasil eksperimen Co-firing sampel LRC dengan CNS yang dilakukan pada furnace pembakaran, skema furnace yang dirancang diperlihatkan pada Gambar 12 di bawah ini :



D. Gambar 12: Furnace pembakaran sampel LRC + CNS

Prosedur eksperimen pembakaran sampel sebagai berikut:

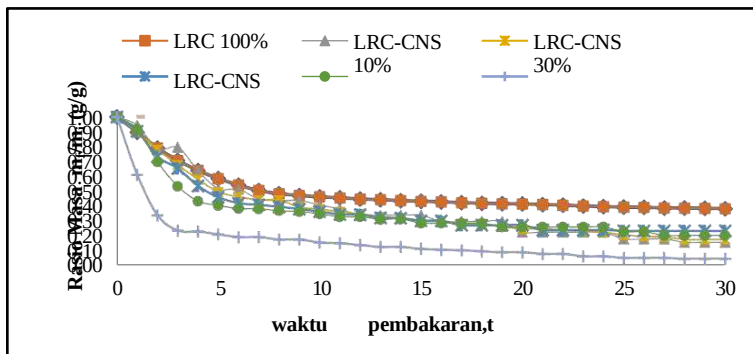
- Melakukan pembakaran setiap sampel dengan massa 5 gram pada tungku listrik dengan suhu pembakaran masing- masing: 500 °C, 625 °C, 750 °C, dan 875 °C, (Collard and Blin 2014) dan(Skodras et al. 2007).
- Pada setiap suhu pembakaran seperti pada point f diatas, sampel di masukkan ke dalam cawan sampel sehingga mengalami pemanasan, dan bersamaan dengan itu oksigen sebagai oksider dialirkan sesuai dengan kebutuhan sampel.
- Pengukuran data perubahan massa sampel dengan timbangan digital dan suhu nyala setiap sampel dengan

termostat, dan kedua panel alat ukur tersebut direkam dengan perangkat webcam.

Hasil dan pembahasan data pembakaran sampel sebagai berikut:

E. Laju pengurangan massa pada berbagai suhu pembakaran

- a) Korelasi antara rasio pengurangan massa sampel terhadap waktu pembakaran pada suhu pembakaran 500 °C

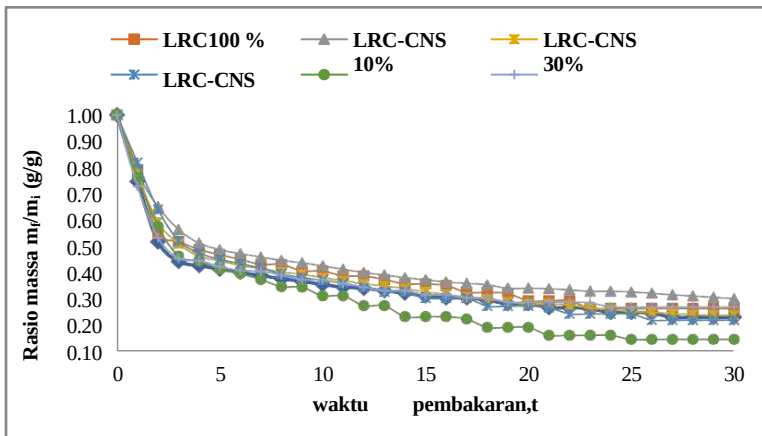


Gambar 13. Grafik Hubungan Antara Rasio Pengurangan Massa Sampel Dengan Waktu Pembakaran Pada Suhu 500 °C.

Hubungan antara rasio pengurangan massa dengan waktu pembakaran pada suhu pembakaran sampel 500 °C, diperlihatkan pada gambar 13. Pembakaran sampel memperlihatkan tren pengurangan rasio massa pada menit awal hingga menit ke empat mengalami laju pengurangan massa yang lebih cepat. Zona tersebut merupakan daerah penguapan (*demoisturisasi*) yaitu penguapan M yang terkandung di dalam sampel dan pelepasan VM yang mengakibatkan terjadinya pembakaran sampel. Selanjutnya laju pengurangan massa semakin melambat, dimana zona tersebut adalah zona pembakaran arang (*Fixed Carbon*).

Pada zona pembakaran arang terlihat semakin banyak kandungan FC di dalam sampel, berimplikasi terhadap semakin meningkatnya durasi waktu pembakaran FC. Penambahan CNS ke dalam LRC berimplikasi pada menurunnya kandungan FC di dalam campuran bahan bakar. Semakin meningkat jumlah CNS yang ditambahkan ke dalam LRC akan berimplikasi pada semakin singkatnya waktu pembakaran FC. Hal ini disebabkan karena kandungan karbon di dalam CNS sedikit lebih kecil dibandingkan di dalam LRC. Hal tersebut mengindikasikan bahwa penambahan CNS ke dalam LRC meningkatkan reaktivitas pembakaran. Perilaku tren laju pengurangan rasio massa sampel yang sama juga terjadi pada pembakaran campuran gambut (*peat*) dengan LRC yang dilakukan oleh (Hutrin et al. 2006) tentang penambahan gambut sebesar 20% ke dalam LRC dalam proses pembakarannya mengakibatkan peningkatan reaktivitas pembakaran.

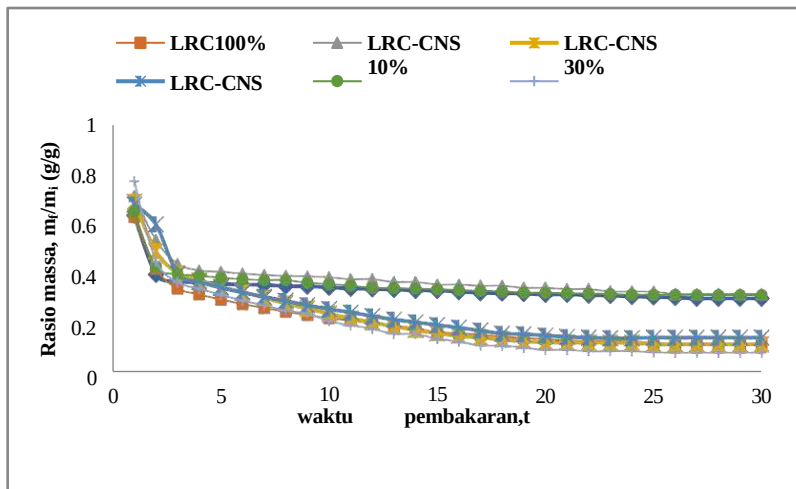
- b) Korelasi antara rasio pengurangan massa sampel terhadap waktu pembakaran pada berbagai komposisi campuran LRC-CNS pada suhu pembakaran 625 °C



Gambar 14. Grafik Hubungan Antara Rasio Massa Sampel Dengan Waktu Pembakaran Pada Suhu 625°C.

Hubungan antara rasio massa sampel dengan waktu pembakaran pada suhu 625 oC diperlihatkan pada gambar 23. Pembakaran sampel pada suhu pembakaran 625 oC memiliki kemiripan kurva pada suhu pembakaran 500 oC . Namun perbedaannya terletak pada peningkatan laju pengurangan massa yang dimulai pada menit awal hingga menit ke tiga. Hal ini disebabkan karena semakin meningkat suhu pembakaran mengakibatkan kecepatan pembakaran sampel semakin bertambah. Zona demoisturisasi dan devolatisasi lebih singkat waktunya jika dibandingkan dengan pembakaran sampel pada suhu 500 oC. Zona pembakaran arang memiliki kesamaan dengan pembakaran sampel pada suhu 500 oC yaitu semakin melambat, dimana semakin besar kandungan FC di dalam sampel semakin meningkat durasi waktu pembakaran FC.

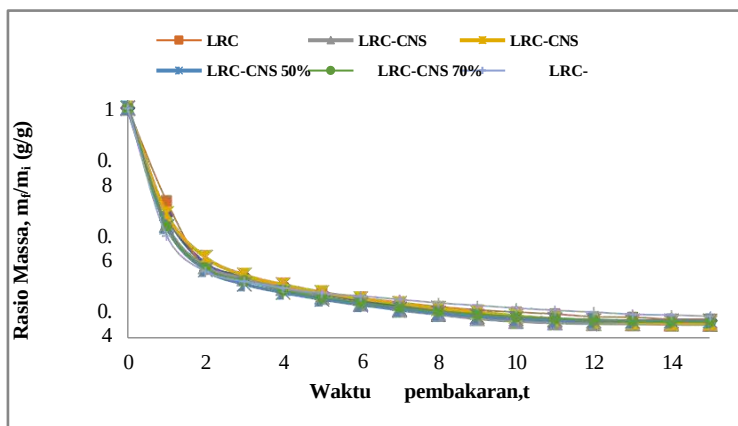
- c) Korelasi antara rasio pengurangan massa sampel terhadap waktu pembakaran pada berbagai komposisi campuran LRC-CNS pada suhu pembakaran 750 °C



Gambar 15. Grafik Hubungan Antara Rasio Massa Sampel Dengan Waktu Pembakaran, Pada Suhu 750 °C

Hubungan antara rasio massa sampel dengan waktu pembakaran pada suhu pembakaran sampel 750 °C seperti diperlihatkan pada gambar 24 di atas. Tren kurva pembakaran pada suhu 750 °C, juga memiliki kemiripan dengan kurva pembakaran sampel pada suhu 500 °C dan 625 °C. Rasio pengurangan massa sampel mengalami pengurangan yang sangat cepat, dimana pada zona demoisturisasi dan devolatisasi durasi waktunya semakin singkat yaitu sekitar 2 - 3 menit. selanjutnya pembakaran FC sampai massa sampel habis terbakar.

- d) Korelasi antara rasio pengurangan massa sampel terhadap waktu pembakaran pada berbagai komposisi campuran LRC-CNS pada suhu pembakaran 875 °C



Gambar 16. Grafik hubungan antara rasio massa sampel dengan waktu pembakaran pada suhu 875 °C

Hubungan antara rasio massa sampel dengan waktu pembakaran pada suhu 875 °C diperlihatkan pada gambar 25 di atas. Zona demoisturisasi dan devolatisasi dimulai pada menit awal hingga sekitar menit ke dua. Dan selanjutnya zona pembakaran FC. Fenomena penambahan CNS ke dalam LRC memperlihatkan tren peningkatan reaktivitas

pembakaran yang tidak terlalu berbeda pada LRC dan penambahan CNS pada berbagai komposisi campuran.

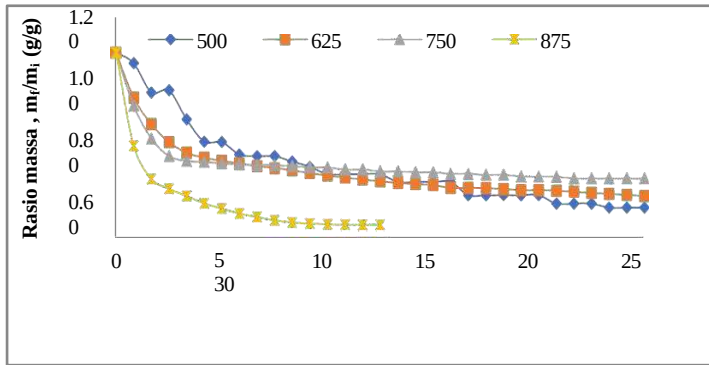
Berdasarkan hasil pembakaran campuran CNS dengan LRC seperti yang diperlihatkan pada gambar 22-25. Secara umum pembakaran sampel dibagi kedalam dua zona, yaitu zona demoisturisasi dan devolatisasi terjadi pada awal pembakaran dan berlanjut pada zona pembakaran arang yang terjadi sesudahnya. Zona demoisturisasi dan devolatifisasi uap air lebih singkat waktunya yaitu sekitar 2 sampai 4 menit, dibandingkan dengan zona pembakaran arang yang lebih panjang waktunya, tergantung pada kandungan Fixed Carbon dari campuran bahan bakar. Tahapan pembakaran awal adalah tahapan pengeringan yaitu penguapan uap air yang terkandung di dalam bahan bakar, setelah itu dilanjutkan dengan tahapan devolatisasi VM. Menurut Darmawan,et.al.(2018), Indikasi berkurangnya VM ditandai dengan berkurangnya rasio massa dengan cepat, setelah selesai devolatisasi dilanjutkan dengan pembakaran arang yang ditandai dengan pengurangan rasio massa sampel yang lebih lambat sampai seluruh arang habis terbakar. Pada zona demoisturisasi dan devolatisasi waktu pembakaran sampel semakin singkat, disertai dengan berkurangnya rasio massa sampel yang cepat. Hal ini disebabkan karena semakin meningkat suhu pembakaran semakin cepat sampel terbakar, dan juga karena jumlah M dan VM di dalam sampel yang cukup besar jumlahnya yaitu (46,52- 78.85)%. Durasi waktu pembakaran arang bergantung pada jumlah FC di dalam campuran LRC-CNS. Semakin besar FC dalam campuran bahan bakar tersebut, maka durasi waktu pembakaran arang semakin panjang, demikian sebaliknya jika kandungan FC di dalam campuran LRC-CNS kecil maka durasi waktu pembakaran semakin singkat.

Secara umum, penambahan CNS ke dalam LRC menunjukkan penurunan rasio massa sampel yang

meningkat, semakin bertambah CNS dicampurkan ke dalam LRC, semakin meningkat pula laju pembakaran. Hal ini menunjukkan terjadinya peningkatan reaktivitas pembakaran akibat penambahan CNS ke dalam LRC. Fenomena ini dapat dilihat dengan meningkatnya rasio penurunan massa sampel. Sebagaimana hasil penelitian pembakaran campuran *peat* dengan LRC dengan komposisi (20:80)% meningkatkan reaktivitas pembakaran. Penelitian pembakaran dengan mencampur *hazelnut shell* dengan LRC pada komposisi campuran (25:75)% meningkatkan reaktivitas pembakaran, Jayaraman et.al (2017). Kedua penelitian tersebut menunjukkan hasil semakin bertambah jumlah biomassa yang dicampurkan ke dalam LRC semakin meningkatkan reaktivitas pembakaran. Peningkatan reaktivitas pembakaran diakibatkan oleh kandungan VM, O₂, dan H₂ di dalam CNS lebih tinggi daripada di dalam LRC, dan kandungan M dan A di dalam CNS lebih rendah daripada di dalam LRC, seperti hasil dari analisis proksimasi dan ultimasi pada Tabel 1, dan Tabel 2. Dampak berkurangnya FC di dalam campuran LRC-CNS berimplikasi terhadap singkatnya waktu pembakaran arang (FC), semakin bertambah jumlah CNS ke dalam LRC semakin singkat waktu pembakaran FC. Namun sebaliknya Hurt, R. H et. all (1998) menjelaskan bahwa berkurangnya reaktivitas pembakaran batubara akibat tingginya kandungan karbon di dalam batu bara. Tingginya kandungan FC dan C di dalam LRC berimplikasi terhadap durasi waktu pembakaran yang lebih lama jika dibandingkan dengan adanya penambahan biomassa CNS. Untuk melihat dampak peningkatan suhu pembakaran terhadap rasio perubahan massa sampel maka dibuat kurva hubungan antara rasio massa sampel dengan waktu pembakaran pada berbagai komposisi campuran LRC-CNS.

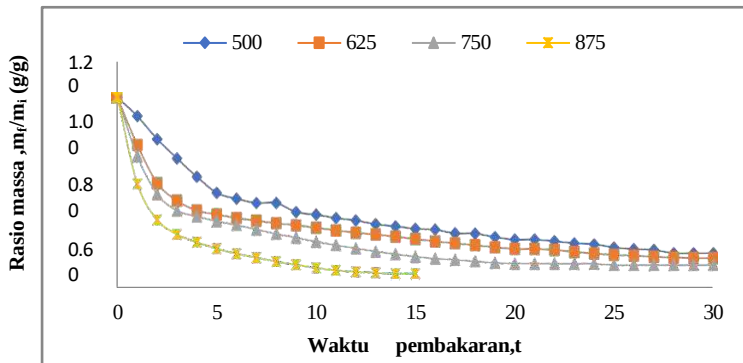
F. Pengaruh suhu pembakaran pada berbagai komposisi campuran sampel

a. Penambahan 10% CNS ke dalam 90% LRC.



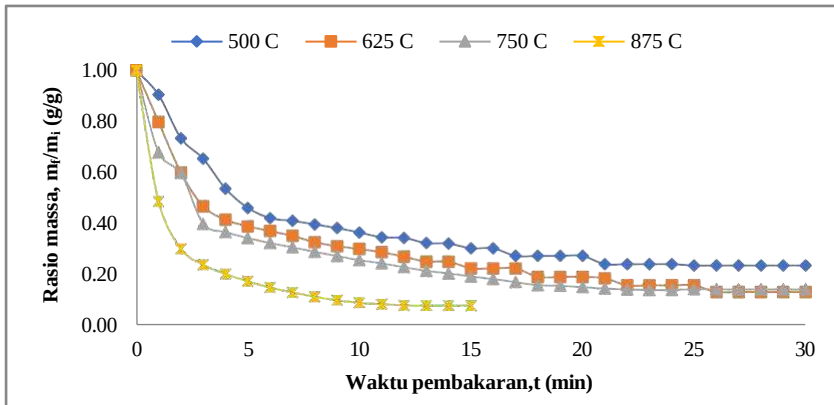
Gambar 17. Grafik Hubungan Antara Rasio Massa Sampel Dengan Waktu Pembakaran Pada Komposisi (CNS 10%: LRC90%)

b. Penambahan 30% CNS ke dalam 70% LRC.



Gambar 18. Grafik Hubungan Antara Rasio Massa Sampel Dengan Waktu Pembakaran Pada Komposisi (CNS 30 %: LRC 70%).

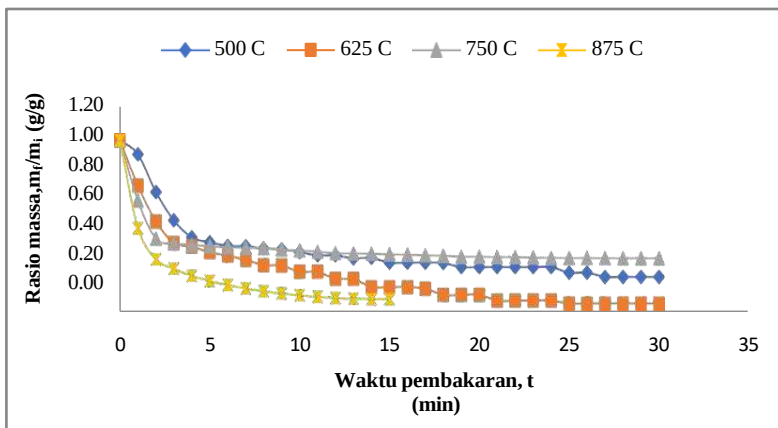
c. Penambahan 50% CNS ke dalam 50% LRC.



Gambar 19. Grafik Hubungan Antara Rasio Massa Sampel Dengan Waktu Pembakaran Pada Komposisi (CNS 50%: 50% LRC)

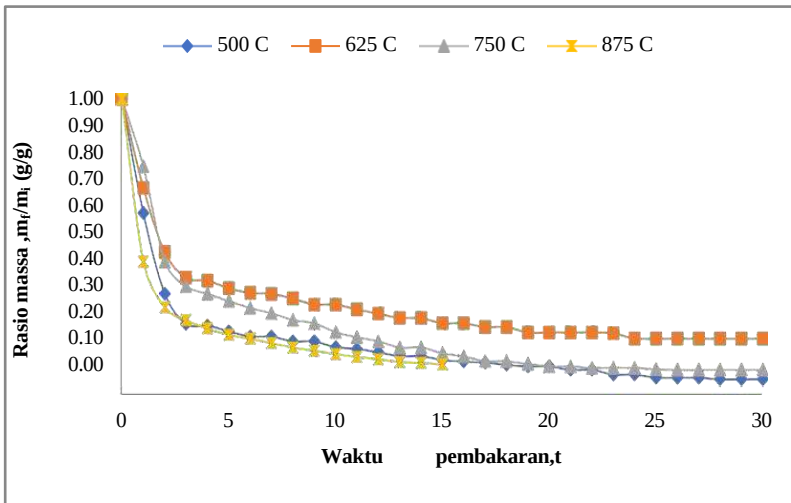
d. Penambahan 70% CNS ke dalam 30% LRC.

Pengaruh suhu pembakaran pada penambahan 70% CNS ke dalam 30% LRC.



Gambar 20. Grafik Hubungan Antara Rasio Massa Sampel Dengan Waktu Pembakaran Pada Komposisi (CNS 70%: LRC30%)

e. Penambahan 90% CNS ke dalam 10% LRC.



Gambar 21. Grafik Hubungan Antara Rasio Massa Sampel Dengan Waktu Pembakaran Pada Komposisi (CNS 90%: LRC10%)

Data hasil pembakaran pada berbagai suhu pembakaran, dan persentase penambahan CNS ke dalam LRC diperlihatkan pada gambar 26-30. Korelasi antara rasio massa sampel dengan waktu pembakaran menunjukkan semakin meningkat suhu pembakaran, semakin meningkat pula kecepatan menurunnya rasio massa bahan bakar, hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan suhu pembakaran berakibat terhadap peningkatan reaktivitas pembakaran. Semakin meningkat suhu pembakaran misalnya pada suhu pembakaran 875°C semakin singkat waktu sampel terbakar, hal tersebut diakibatkan karena semakin tinggi suhu pembakaran semakin besar kalor yang dilepaskan, sebagaimana hasil perhitungan produk pembakaran pada lampiran 5. Hasil ini didukung oleh Li et.al (2016) menyatakan bahwa semakin tinggi suhu pembakaran maka waktu pembakaran bahan bakar semakin singkat.

G. Analisis TGA-DTA

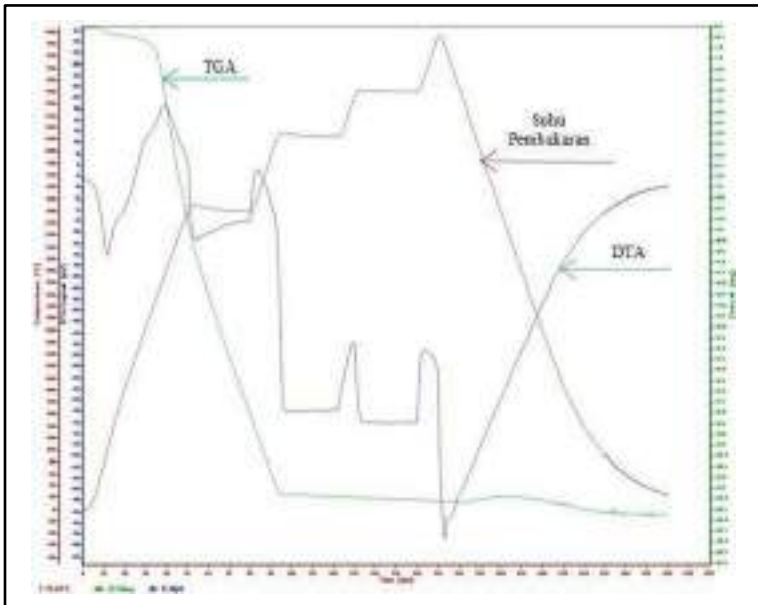
Analisis TGA-DTA menggunakan Lynseis type STA PT 1600 seperti diperlihatkan pada Gambar 22 di bawah ini:



Gambar 22: DTA-TGA Lynseis type STA PT 1600

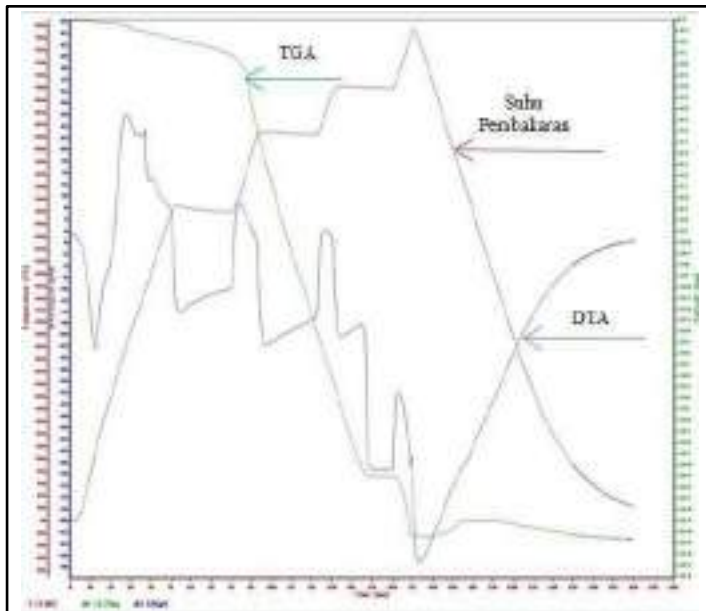
Sampel yang digunakan adalah 22 mg. Oksidator menggunakan udara bebas. Penurunan massa sampel menggunakan TGA, dan pengukuran perubahan energi menggunakan DTA.

Hasil pengujian TGA-DTA sebagai berikut:



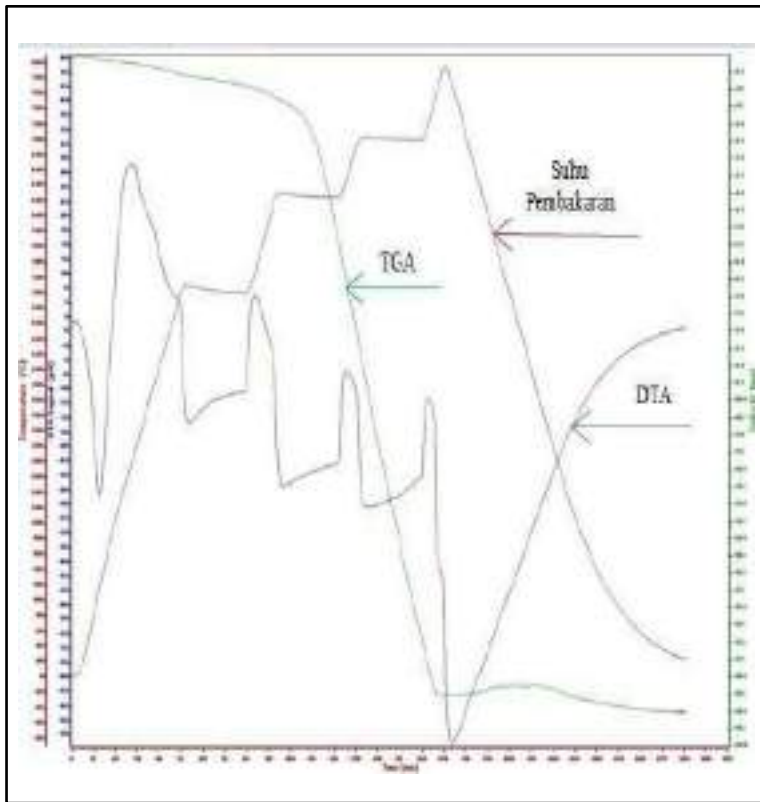
Gambar 23. Grafik Hasil Pengujian DTA-TGA sampel LRC 100%

Pengujian dekomposisi dan karakterisasi termal sampel LRC 100% dengan menggunakan DTA-TGA diperlihatkan pada gambar 23. Hasil TGA massa sampel mengalami reduksi massa $\Delta m = -20,8$ mg, dari massa awal sampel 21,8 mg. Dan hasil DTA diperoleh aktivasi energi $dU = 0,38$ μV .



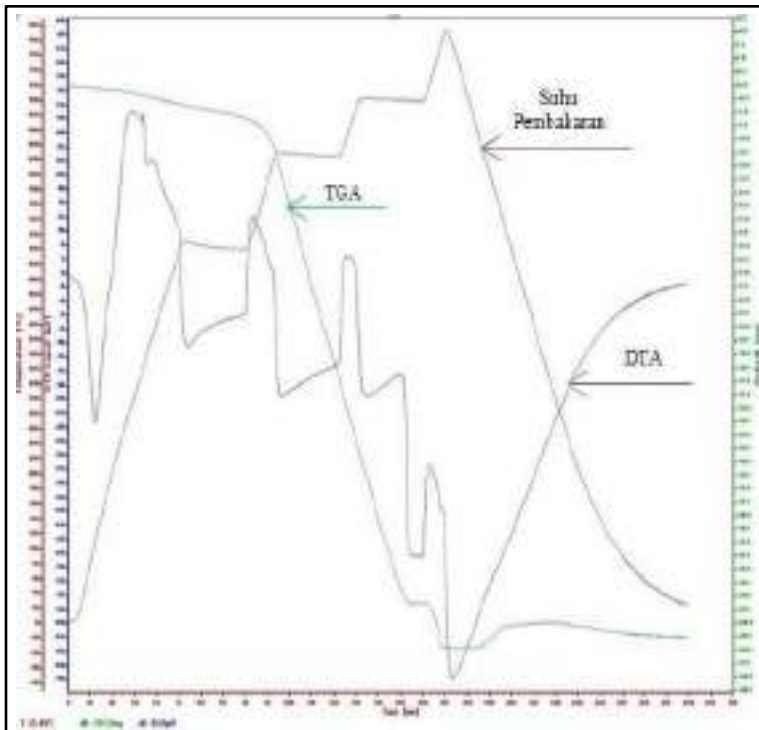
Gambar 24. Grafik Hasil Pengujian DTA-TGA sampel CNS 100%

Hasil dekomposisi dan karakterisasi termal sampel CNS 100% dengan menggunakan DTA-TGA diperlihatkan pada gambar 24. Hasil pengukuran dengan TGA diperoleh perubahan massa $dM = -22,29$ mg. Dan hasil pengukuran dengan DTA diperoleh perubahan energi $dU = 0,66$ μ V.



Gambar 25. Grafik Hasil Pengujian DTA-TGA sampel
CNS10%:LRC 90%

Hasil dekomposisi dan karakterisasi termal sampel pada komposisi CNS 10%: LRC 90% diperlihatkan pada gambar 25. Hasil pengujian TGA diperoleh pengurangan massa $dm = -18,97 \text{ mg}$. Hasil pengujian DTA diperoleh perubahan energi $dU = 0,66 \mu\text{V}$.



Gambar 26 Grafik Hasil Pengujian DTA-TGA Sampel CNS 50%:LRC50%

Hasil dekomposisi dan karakterisasi termal sampel dengan komposisi CNS 50%: LRC 50% diperlihatkan pada gambar 26 di atas. Hasil pengujian TGA diperoleh pengurangan massa - 20,53 mg. Hasil pengujian DTA diperoleh perubahan energi $dU = 0,65 \mu V$.

Hasil TGA dari pada gambar 31-34, di atas memperlihatkan 3 zona, sesuai dengan tahapan pada proses pembakaran yaitu zona demoisturisasi yaitu penguapan uap air (*moisture*), zona devolatisasi yaitu pecahnya unsur padatan di dalam bahan bakar dimana *volatile matters* mulai keluar dari bahan bakar dan bahan bakar mulai terbakar, dan zona pembakaran arang (*Fixed Carbon*), Neminda et.all (2017).

Pada zona demoisturisasi uap air dalam sampel dilepaskan, dan zona ini ditandai dengan mulai berkurangnya massa sampel secara perlahan, setelah uap air seluruhnya diuapkan, maka dilanjutkan dengan zona devolatisasi, dimana VM sampel mulai keluar dari sampel, dan kejadian ini ditandai dengan berkurangnya massa sampel secara cepat, dan selanjutnya sampel mulai terbakar. Semakin tinggi VM di dalam sampel, maka nyala sampel akan lebih stabil, karena salahsatu fungsi VM adalah menjaga kestabilan nyala bahan bakar, selanjutnya zona pembakaran arang (*Fixed Carbon*). Dalam zona ini semakin tinggi kandungan FC di dalam bahan bakar maka durasi pembakaran arang menjadi lebih lama, demikian sebaliknya semakin kecil kandungan FC di dalam sampel, maka durasi waktu pembakaran arang semakin singkat.

Pengujian dekomposisi dan karakterisasi termal sampel LRC 100 % diperlihatkan pada gambar 31. Hasil pengujian tersebut menunjukkan durasi waktu penguapan M sekitar 34 menit, pelepasan VM durasi waktunya 60 menit dan pembakaran arang (*Fixed Carbon*) sampai pada suhu 800 °C durasinya 76 menit. Pengujian dekomposisi dan karakterisasi termal sampel CNS 100% diperlihatkan pada gambar 32. Hasil pengujian sampel tersebut menunjukkan penguapan M durasi waktunya 74 menit, pelepasan VM 90 menit dan pembakaran arang sampai pada suhu 800 °C durasinya 24 menit. Pengujian dekomposisi dan karakterisasi termal sampel CNS 10%: LRC 90% diperlihatkan pada gambar 33. Hasil pengujian sampel tersebut penguapan M di dalam sampel durasi waktunya 94 menit, pelepasan VM durasi waktunya sekitar 72 menit dan pembakaran arang sampai suhu 800 °C sebesar 23 menit. Pengujian dekomposisi dan karakterisasi termal sampel CNS 50%:LRC 50% diperlihatkan pada gambar 34. Dari hasil pengujian tersebut menunjukkan penguapan M durasi waktunya 86 menit, pelepasan VM durasi waktunya sekitar 66 menit dan pembakaran arang sampai suhu 800 °C durasi

waktunya 14 menit. Semakin besar jumlah penambahan CNS ke dalam LRC mengakibatkan waktu pembakaran arang semakin singkat, hal ini disebabkan karena kandungan *Fixed Carbon* di dalam CNS lebih kecil daripada di dalam LRC, di samping itu karena kandungan oksigen dan hidrogen di dalam CNS lebih besar daripada di dalam LRC. Durasi waktu pembakaran VM semakin bertambah oleh karena kandungan VM di dalam CNS lebih besar daripada di dalam LRC. Faktor tersebut mengakibatkan peningkatan Reaktivitas pembakaran, seperti hasil penelitian (Jayaraman et al. 2017) tentang pembakaran campuran *hazelnut shell* dengan LRC meningkatkan reaktivitas pembakaran oleh karena tingginya VM di dalam *hazelnut shell* daripada di dalam LRC.

Hasil pengujian DTA menunjukkan laju perubahan aktivasi energi yang berbeda tiap sampel. Dari grafik DTA terlihat kondisi endotermis dan eksotermis berlangsung secara bergantian, dan nilai perubahan energi pada sampel LRC 100% sebesar 0,38 μV , sedangkan CNS 100% nilai perubahan energi sebesar 0,66 μV , hal ini menunjukkan bahwa nilai aktivasi perubahan energi dari CNS lebih besar daripada LRC. Fenomena tersebut terlihat pada grafik DTA antara sampel LRC 100% dengan CNS 100%. Pada pembakaran sampel LRC 100% terdapat empat kali reaksi eksotermis, sedangkan pada pembakaran CNS 100% terdapat lima kali reaksi ekstormis, Hal tersebut berimplikasi terhadap peningkatan perubahan energi sebagai akibat penambahan CNS ke dalam LRC. Kondisi ini akan berdampak terhadap peningkatan efisiensi pembakaran, karena dengan meningkatnya perubahan energi di dalam sampel akan meningkatkan suhu nyala sampel. Peningkatan aktivasi energi melalui penambahan CNS ke dalam LRC juga diperlihatkan dari hasil perhitungan reaksi pembakaran, yaitu entalpi pembentukan dan produk pembakaran meningkat paralel dengan meningkatnya proporsi CNS yang ditambahkan ke dalam LRC. Peningkatan aktivasi

energi sebagai dampak penambahan CNS ke dalam LRC berimplikasi terhadap peningkatan reaktivitas pembakaran seperti hasil penelitian (Rodilla, Contreras, and Bahillo 2018), pada pembakaran campuran biomassa *Cynara Cardiculus* sejenis bunga matahari dengan batubara subbituminous dengan menggunakan TGA, dimana dampak penambahan biomassa *cynara cardiaculus* meningkatkan reaktivitas pembakaran sampel.

H. Reaktivitas Pembakaran

Reaktivitas pembakaran merupakan indeks pembakaran yang memperlihatkan kualitas pembakaran. Semakin meningkat indeks reaktivitas pembakaran semakin meningkat kualitas pembakaran tersebut.

Besaran nilai reaktivitas pembakaran dapat dihitung berdasarkan rata-rata pengurangan rasio massa maksimum dengan berat awal massa, dan mengikuti formula 12 di bawah ini menurut (Jayaraman et al. 2017).

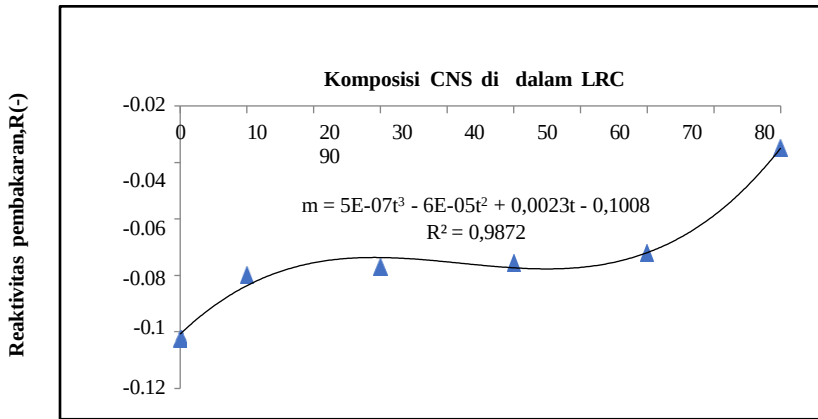
$$R = \left(\frac{-1}{W_0} \right) (dW/dt) \quad (7)$$

Dimana:

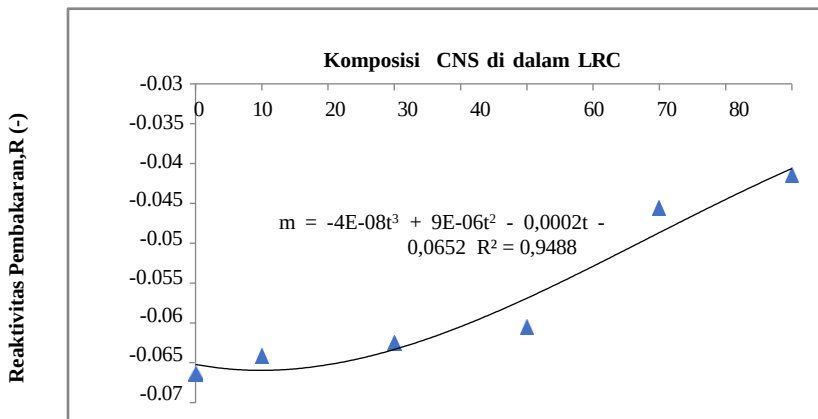
(dW/dt) adalah rata-rata pengurangan massa maksimum

W_0 adalah massa awal sampel (g) Tanda negatif menunjukkan terjadi pengurangan massa sampel selama pembakaran berlangsung.

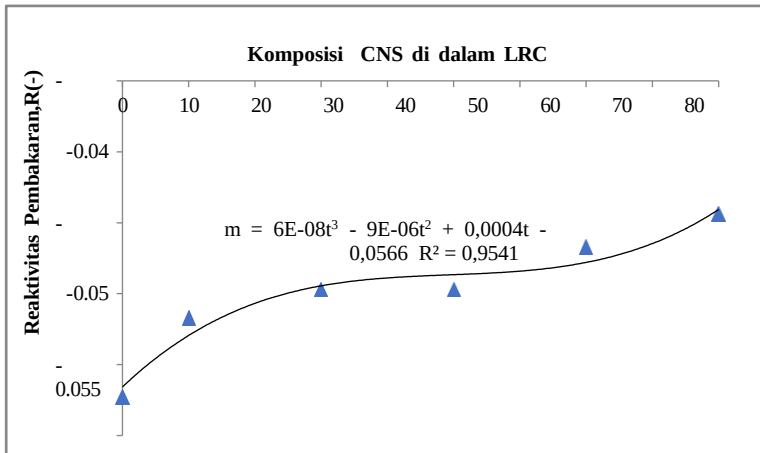
Hasil dari perhitungan nilai reaktivitas pembakaran sampel diperlihatkan pada Gambar 27-30 di bawah ini:



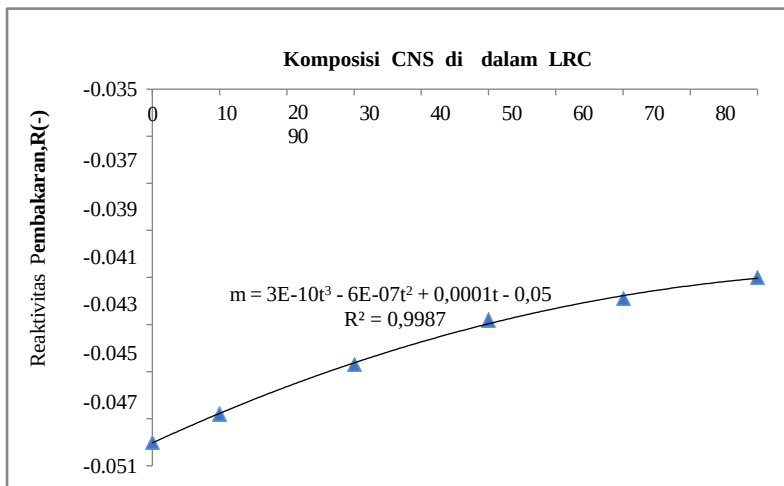
Gambar 27. Grafik Reaktivitas Pembakaran Sampel Pada Suhu 500 °C.



Gambar 28. Grafik Reaktivitas Pembakaran Sampel Pada Suhu 625 °C



Gambar 29. Grafik Reaktivitas Pembakaran Pada Suhu 750 °C.



Gambar 30. Grafik Reaktivitas Pembakaran Pada Suhu 875 °C.

Hasil perhitungan reaktivitas pembakaran dipresentasikan pada gambar 25-30. Dari grafik tersebut memperlihatkan semakin meningkat jumlah CNS yang ditambahkan kedalam

LRC mengakibatkan bertambahnya angka reaktivitas pembakaran.

Peningkatan reaktivitas pembakaran mengikuti persamaan polinomial pangkat tiga. Hal itu dapat ditunjukkan berdasarkan persamaan korelasi antara penambahan CNS ke dalam LRC terhadap angka reaktivitas pembakaran, pada berbagai suhu pembakaran masing-masing 500 °C, 625 °C, 750 °C, dan 875°C, sebagai berikut:

Suhu pembakaran 500 °C diperoleh persamaan garis reaktivitas pembakaran:

$$m = 5.10^{-7}t^3 - 6. t^2 + 0,0023 t - 0,1008 \quad (8)$$

Koefisien korelasi $R^2 = 0,9872$

$$\text{Laju penurunan massa } \frac{dm}{dt} = -7.10^{-3}t^3 - 6t + 0,0023 \quad (9)$$

Suhu pembakaran 625 °C diperoleh persamaan garis reaktivitas pembakaran:

$$m = -4.10^{-8}t^3 - 6.10^{-5}t^2 + 0,0023t - 0,1008 \quad (10)$$

Koefisien korelasi $R^2 = 0,9488$

$$\text{Laju penurunan massa } \frac{dm}{dt} = -12.10^{-8}t^2 - 12.10^{-5}t + 0,0023 \quad (11)$$

Suhu pembakaran 750 °C diperoleh persamaan garis reaktivitas pembakaran:

$$m = 6.10^{-8}t^3 - 9.10^{-6}t^2 + 0,0004 t - 0,0566 \quad (12)$$

Koefisien korelasi $R^2 = 0,9541$

$$\text{Laju penurunan massa } \frac{dm}{dt} = -18.10^{-8}t^2 - 9.10^{-6}t + 0,0004 \quad (13)$$

Suhu pembakaran 875 °C diperoleh persamaan garis

reaktivitas pembakaran:

$$m = 3.10^{-10}t^3 - 6.10^{-7}t^2 + 0,0001 t - 0,05 \quad (14)$$

Koefisien korelasi $R^2 = 0,9987$

$$\text{Laju penurunan massa : } \frac{dm}{dt} = 9.10^{-10}t^2 - 12.10^{-7}t + 0,0001(15)$$

Berdasarkan karakteristik persamaan garis grafik dari setiap suhu pembakaran, nampak bahwa semakin bertambah suhu pembakaran semakin meningkat reaktivitas pembakaran.

Peningkatan nilai reaktivitas pembakaran menunjukkan bahwa bertambahnya jumlah CNS dalam campuran dengan LRC mengakibatkan terjadinya peningkatan terhadap reaktivitas pembakaran secara signifikan. Paralel dengan bertambahnya suhu pembakaran, juga berimplikasi terhadap peningkatan reaktivitas pembakaran. Penelitian yang sama tentang pembakaran campuran biomassa *olive residu* dengan batubara mengakibatkan peningkatan reaktivitas pembakaran,(Riaza et al. 2013), hasil penelitian pembakaran biomassa *pine wood* dan *torrified pine wood* dengan batubara menghasilkan peningkatan reaktivitas pembakaran, semakin bertambah persentasi ke dua biomassa tersebut yang dicampurkan ke dalam batubara berimplikasi terhadap semakin meningkatnya reaktivitas pembakaran,(Yousaf et al. 2017) . Dari kemiripan hasil penelitian ini menggambarkan bahwa limbah biomassa CNS berkontribusi meningkatkan kualitas pembakaran campuran LRC- CNS yaitu reaktivitas pembakaran. Jumlah penambahan CNS yang optimum ke dalam LRC adalah 10%. Pada jumlah campuran CNS 10% memberikan angka reaktivitas pembakaran yang tertinggi pada semua suhu pembakaran sampel. Peningkatan reaktivitas pembakaran ini disebabkan karena pada penambahan 10% CNS mengakibatkan peningkatan terbesar dari VM yaitu

sebesar 32,9 %, dan penurunan maksimum M, dan A masing-masing sebesar 36,96 % dan 18,07% (hasil analisis proksimasi, Lampiran 1, halaman108). Penambahan CNS ke dalam LRC dalam jumlah lebih besar dari 10% memberikan pengaruh peningkatan reaktivitas, namun tidak signifikan seperti pada penambahan CNS sebesar 10%.

I. Efisiensi Pembakaran

Efisiensi pembakaran dihitung berdasarkan rasio suhu nyala aktual dengan suhu nyala adiabatik dari sampel ;

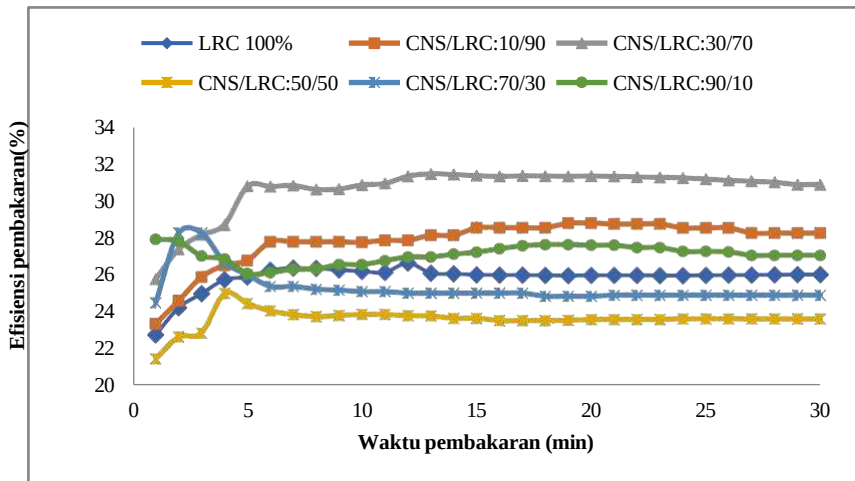
$$n_c = \frac{T_{act}}{T_{adb}} \times 100\%$$

(16Di mana

T_{act} adalah suhu nyala aktual dari sampel (°C),

T_{adb} adalah suhu nyala adiabatik dari sampel (°C).

- Hasil perhitungan efisiensi pembakaran pada suhu pembakaran 500 °C

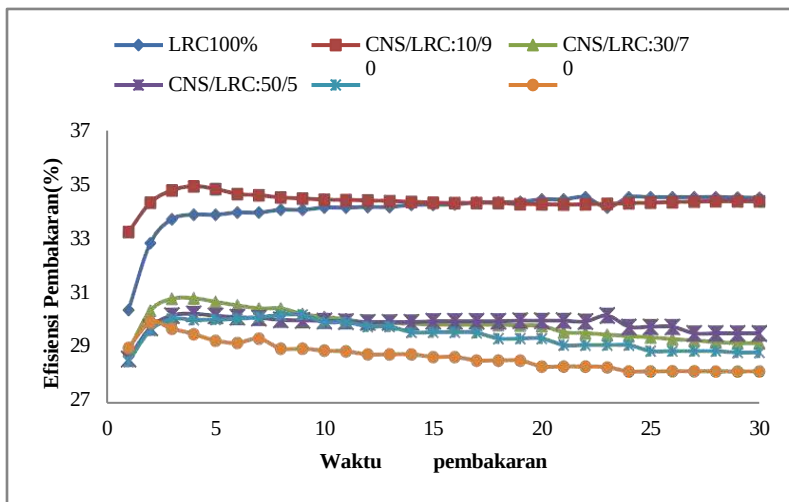


Gambar 31. Grafik Efisiensi Pembakaran Pada Suhu 500 °C

Hasil perhitungan efisiensi pembakaran sampel pada suhu pembakaran 500 °C diperlihatkan pada gambar 39 di atas. Pada suhu pembakaran 500 °C efisiensi pembakaran rata-rata bervariasi dari 23,82% sampai dengan 30,913%, efisiensi tertinggi diperoleh pada penambahan CNS ke dalam LRC sebesar 30%. Peningkatan efisiensi pembakaran terjadi pada penambahan 10%,30% dan 90% CNS ke dalam LRC.

Peningkatan efisiensi pembakaran sebagai akibat penambahan CNS ke dalam LRC diakibatkan oleh peningkatan kalor pembakaran, yang berimplikasi terhadap peningkatan suhu aktual hasil pembakaran, sebagaimana diperlihatkan pada hasil perhitungan produk pembakaran dari reaksi pembakaran antara sampel dengan oksigen seperti pada lampiran 2.

- b. Hasil perhitungan efisiensi pembakaran dari sampel pada suhu pembakaran 625 °C.

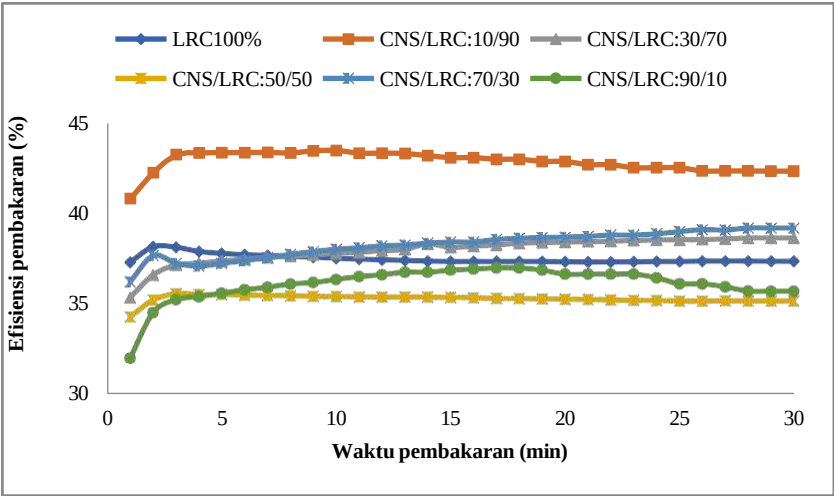


Gambar 32. Grafik Efisiensi Pembakaran Pada Suhu 625 °C

Hasil perhitungan efisiensi pembakaran pada suhu pembakaran 625 °C diperlihatkan pada gambar 40 di atas. Pada

suhu pembakaran 625 °C, efisiensi pembakaran rata-rata 29,50 sampai 34,398 %, dan efisiensi pembakaran tertinggi diperoleh pada penambahan CNS sebesar 10% ke dalam LRC

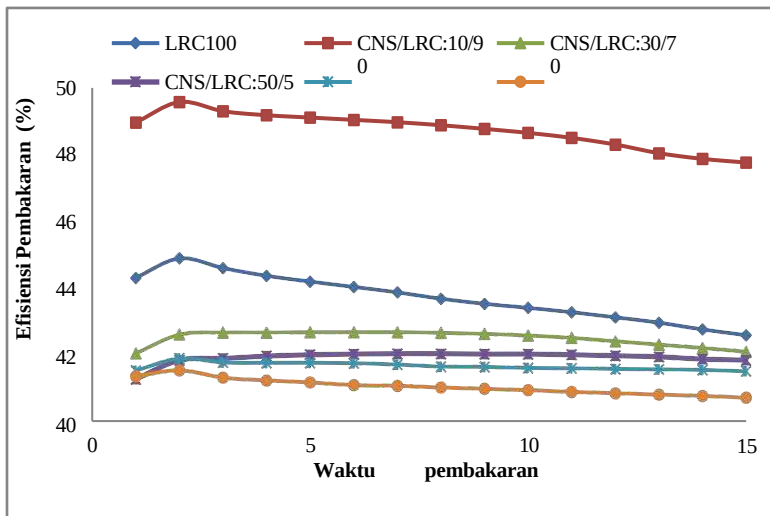
c. Hasil perhitungan efisiensi pembakaran pada suhu pembakaran 750 °C.



Gambar 33. Grafik Efisiensi Pembakaran Pada Suhu 750 °C

Hasil perhitungan efisiensi pembakaran pada suhu pembakaran 750 °C diperlihatkan pada gambar 41 di atas. Pada suhu pembakaran 750 °C, efisiensi pembakaran rata-rata 35,28 sampai 42,79%. Efisiensi pembakaran tertinggi diperoleh pada penambahan CNS sebesar 10% ke dalam LRC. Peningkatan efisiensi pembakaran diperoleh pada penambahan CNS masing- masing 10%,30% dan 70% ke dalam LRC.

d. Hasil perhitungan efisiensi pembakaran pada suhu pembakaran 875 °C.



Gambar 34. Grafik Efisiensi Pembakaran Pada Suhu 875 °C.

Hasil perhitungan efisiensi pembakaran pada suhu pembakaran 875 °C diperlihatkan pada gambar 42 di atas. Pada suhu pembakaran 875 °C efisiensi pembakaran rata-rata berkisar dari 41,06 sampai dengan 49,58%. Efisiensi pembakaran tertinggi diperoleh pada penambahan 10% CNS ke dalam LRC.

Secara umum hasil perhitungan efisiensi pembakaran pada penambahan 10% CNS ke dalam LRC menghasilkan peningkatan efisiensi pembakaran yang bervariasi dalam kisaran 0,92 - 14,42%. Peningkatan efisiensi pembakaran maksimum sebesar 14,42% yang diperoleh pada suhu pembakaran 750 °C.

Perhitungan efisiensi pembakaran di atas berdasarkan pada rasio suhu nyala aktual dengan suhu nyala adiabatik. Dalam hal ini suhu nyala aktual sangat dipengaruhi oleh kalor produk

pembakaran . Kalor produk pembakaran mengalami peningkatan dengan bertambahnya jumlah CNS ke dalam LRC seperti yang diperlihatkan dari hasil reaksi pembakaran stoikiometrik antara CNS dengan LRC, (lampiran 3). Dengan meningkatnya kalor pembentukan mengakibatkan peningkatan suhu nyala bahan bakar, hal ini berimplikasi terhadap peningkatan efisiensi pembakaran. Hasil perhitungan reaksi pembakaran antara sampel dengan oksigen pada berbagai suhu pembakaran, menunjukkan semakin meningkat suhu pembakaran, maka kalor produk pembakaran semakin bertambah, hal ini berimplikasi terhadap peningkatan suhu nyala sampel dan pada akhirnya meningkatkan efisiensi pembakaran.

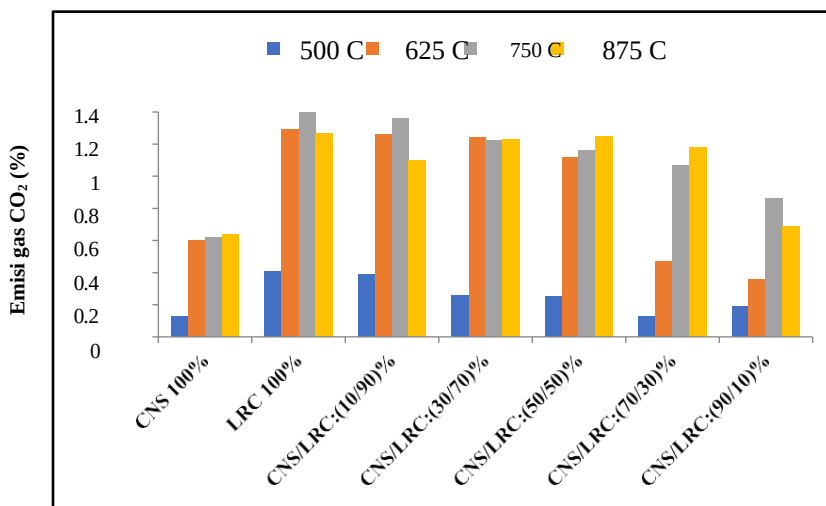
Hasil pengujian sampel dengan menggunakan DTA, terlihat bahwa penambahan CNS ke dalam LRC meningkatkan perubahan energi, hal ini akan berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi pembakaran, oleh karena peningkatan energi akan meningkatkan suhu nyala sampel.

Namun di dalam eksperimen pembakaran ini tidak dilakukan variasi terhadap penambahan oksigen pembakaran, sehingga pengaruh penambahan oksigen pembakaran tidak memperlihatkan hasil efisiensi pembakaran yang maksimum, seperti halnya hasil penelitian pencampuran cangkang sawit dengan batu bara, dimana dilakukan variasi penggunaan udara pembakaran, dan pada rasio udara bahan bakar 5,2 dicapai efisiensi pembakaran tertinggi 86 %, (Mahidin, Khairil 2006). Gambaran hasil perhitungan efisiensi pembakaran berdasarkan rasio suhu nyala aktual dengan suhu nyala adiabatik dan dengan verifikasi berdasarkan kalor produk pembakaran dari reaksi pembakaran sampel dengan oksigen, maka dapat disimpulkan bahwa penambahan CNS ke dalam LRC berimplikasi terhadap peningkatan efisiensi pembakaran.

J. Emisi Gas Hasil Pembakaran

Hasil pengukuran emisi gas dari pembakaran yang terdiri dari CO₂, CO, NO_x, dan SO_x diperlihatkan pada Gambar 43-46.

a) Emisi Gas CO₂

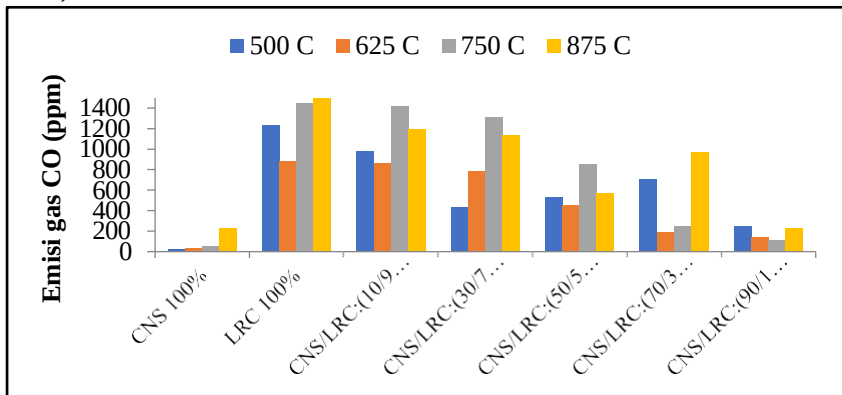


Gambar 35. Grafik Emisi Gas CO₂

Hasil pengukuran emisi gas CO₂ dari pembakaran sampel diperlihatkan pada gambar 35 di atas. Peningkatan suhu pembakaran berkontribusi pada peningkatan emisi gas CO₂. Penambahan CNS ke dalam LRC mengurangi emisi gas CO₂. Pada suhu pembakaran 500 °C, menambahkan 10% CNS ke dalam LRC dapat mengurangi emisi CO₂ sebesar 5%, dan menambahkan 90% CNS sebesar 39,02%. Peningkatan penambahan CNS berimplikasi pada pengurangan emisi CO₂ yang semakin besar. Pengurangan maksimum dalam emisi CO₂ diperoleh pada penambahan CNS 90% dengan suhu pembakaran 625 °C yaitu 72,09%. Pengurangan emisi CO₂ disebabkan karena kandungan C di dalam CNS lebih kecil daripada di dalam LRC, sehingga pada saat karbon dibakar

dengan oksigen mengakibatkan emisi gas CO₂ berkurang, Spliethoff et.all (1998). Pengurangan emisi gas CO₂ ini juga diperlihatkan pada hasil perhitungan emisi gas hasil pembakaran dengan oksigen yang menggunakan metode basis molar, (Babcock & Wilcox 1992) pada lampiran 6. CNS sama dengan biomassa lainnya yaitu bahan bakar dengan CO₂ netral. Hal ini akan berimplikasi terhadap pengurangan efek gas rumah kaca yang akan menurunkan pemanasan global. Oleh karena pembakaran biomassa tidak meningkatkan CO₂ di atmosfer, karena jumlah CO₂ yang dihasilkan sama dengan jumlah CO₂ yang diserap oleh tanaman, kedua proses ini berlangsung dalam kurun waktu yang relatif singkat, (Hughes 2000).

b) Emisi Gas CO



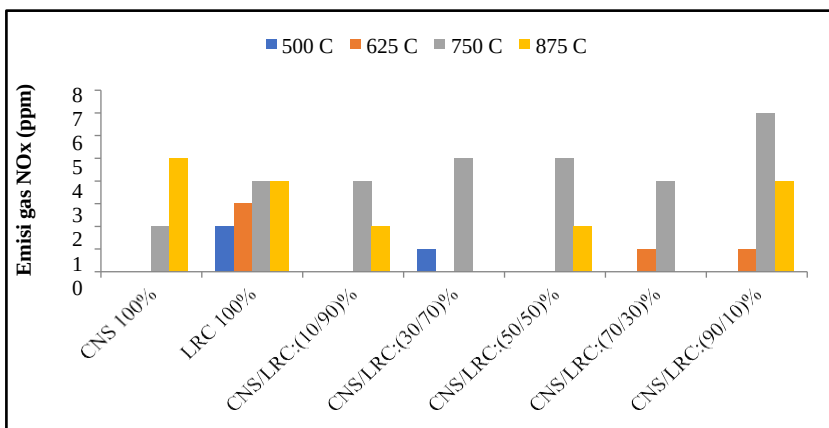
Gambar 36. Grafik Emisi Gas CO

Hasil pengukuran emisi gas CO dari pembakaran sampel diperlihatkan pada gambar 36 di atas. Penambahan CNS ke dalam LRC mengurangi emisi gas CO. Pada suhu pembakaran 500 °C, penambahan 10% CNS ke LRC dapat mengurangi emisi CO 21 ppm, dan menambahkan 90% CNS mengurangi emisi CO sebesar 80,19 ppm. Pengurangan maksimum dalam emisi CO diperoleh pada penambahan CNS 90% dengan suhu pembakaran 750 °C yaitu 91,81 ppm. Penurunan emisi CO

sebagai akibat penambahan CNS ke dalam LRC dimungkinkan oleh karena kandungan karbon di dalam CNS lebih kecil daripada di dalam LRC, seperti hasil reaksi pembakaran antara carbon dengan oksigen akan menghasilkan CO yang semakin kecil (lampiran 6).

Menurut Spliethoff et.all (1998) pembakaran campuran biomassa dengan batubara berimplikasi terhadap penurunan emisi gas CO, karena serbuk biomassa lebih halus daripada serbuk batu bara, hal ini menyebabkan pembakaran mendekati sempurna sehingga produk CO semakin berkurang. Lagipula kandungan VM dan O₂ di dalam CNS yang lebih tinggi daripada di dalam LRC berkontribusi terhadap penurunan emisi CO, (Wang et al. 2014) (Nakayama et al. 1992), hal ini dimungkinkan karena ke dua unsur ini berkontribusi terhadap terjadinya pembakaran yang mendekati sempurna. Di samping itu berdasarkan hasil analisis proksimasi diperoleh kandungan A di dalam CNS jauh lebih kecil di dalam LRC, hal ini berkontribusi terhadap penurunan emisi CO yang signifikan.

K. Emisi Gas Nitrogen Dioksida (NO_x)



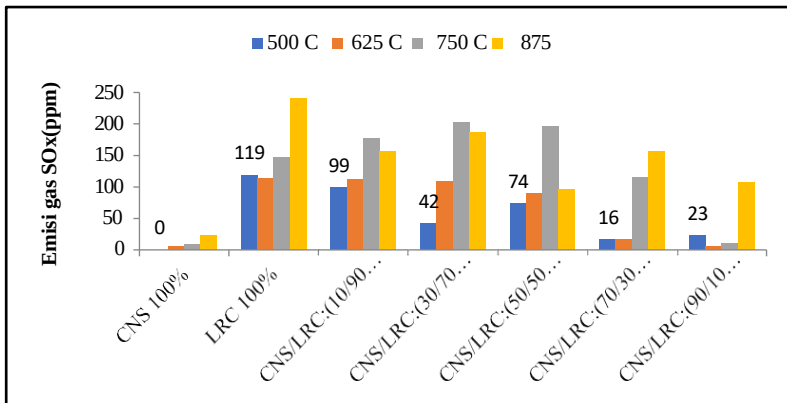
Gambar 37. Grafik Emisi Gas NO_x

Hasil pengukuran emisi gas NO_x dari pembakaran sampel diperlihatkan pada gambar 37 di atas. Emisi NO_x semakin berkurang dengan bertambahnya CNS di dalam LRC, penurunan NO_x pada suhu 500°C rata-rata 30 ppm, pada suhu 625°C rata-rata 46,67 ppm, namun pada suhu 750°C dan suhu 875°C dan pada penambahan CNS di atas 50% terjadi peningkatan emisi NO_x , hal ini disebabkan oleh karena meningkatnya indeks NO_x . Sebagaimana yang dinyatakan oleh (Nikolopoulos et al. 2015). Hasil penelitian yang sama oleh (Liu et al. 2002) pada penambahan biomassa serpihan kayu maupun sekam padi ke dalam batubara pada suhu pembakaran yang lebih tinggi dari 800°C berakibat pada peningkatan emisi NO_x .

Peningkatan index NO_x pada suhu tinggi sebagai implikasi meningkatnya entalpi pembakaran di dalam produk pembakaran, seperti yang terlihat pada tabel 12 hasil produk pembakaran .

Penurunan emisi NO_x disebabkan oleh kandungan nitrogen dalam CNS lebih kecil dari pada LRC berdasarkan analisis ultimasi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Emisi NO_x berkorelasi secara linier dengan kandungan Nitrogen dalam bahan bakar, artinya jika Nitrogen di dalam bahan bakar berkurang maka emisi NO_x akan berkurang. Seperti hasil penelitian sebelumnya, bahwa emisi NO_x akan berkurang jika kandungan Nitrogen dalam bahan bakar rendah, (Ndibe 2015) (Ndibe et al. 2015) dan (Vassilev, Vassileva, and Vassilev 2015). Penurunan emisi NO_x juga disebabkan karena kandungan VM di dalam CNS cukup tinggi, sehingga akan mengkonsumsi sebagian besar oksigen untuk membatasi terbentuknya NO_x , Mahidin, et.all (2006). Penurunan NO_x akan mengurangi hujan asam, pembentukan kabut asap, dan kerusakan tanaman.

L. Emisi gas Sulfur Dioksida (SO_x)



Gambar 38 Grafik Emisi gas SO_x

Hasil pengukuran Emisi gas SO_x dari pembakaran sampel diperlihatkan pada gambar 38 di atas. Emisi gas SO_x mengalami pengurangan sebagai akibat penambahan CNS ke dalam LRC. Pada suhu pembakaran 500 °C, penambahan 10% CNS ke dalam LRC dapat mengurangi emisi SO_x 16,80 ppm, dan dengan menambahkan 90% CNS ke dalam LRC menurunkan SO_x sebesar 80,67 ppm. Pengurangan maksimum emisi SO_x diperoleh pada penambahan CNS 90% dengan suhu pembakaran 625 °C yaitu 95,57 ppm.

Beberapa penelitian sebelumnya juga menunjukkan pengurangan emisi gas SO_x dengan menambahkan biomassa ke dalam LRC. Contoh, studi tentang pembakaran biomassa torrefied, pelet kayu putih dengan batubara bituminous dan lignit menunjukkan penurunan emisi gas SO₂ (Yousaf et al. 2017) (Wang et al. 2014), (Bhuiyan et al. 2016), (Yousaf et al. 2017) dan (Mitchell et al. 2016), juga hasil penelitian pembakaran campuran antara batubara dengan jerami jagung dan sekam padi menunjukkan penurunan emisi gas hasil pembakaran CO₂, NO_x dan SO_x, (Rokni et al. 2018)

Pengurangan emisi gas SO_x terjadi oleh karena kandungan

sulfur dalam CNS lebih rendah dibandingkan dengan yang ada di LRC berdasarkan hasil analisis ultimasi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Fakta ini akan mempengaruhi penurunan *slagging* dan *fouling* pada alat penukar kalor.

Secara umum, dapat disimpulkan bahwa penambahan CNS ke dalam LRC memiliki dampak yang signifikan pada pengurangan emisi gas CO₂, CO, NO_x, dan SO_x. Penurunan emisi gas hasil pembakaran tersebut diperoleh nilai maksimum pada penambahan CNS sebesar 10%.

Untuk mengecek hasil pengukuran emisi gas hasil pembakaran, maka dilakukan perhitungan emisi gas hasil pembakaran melalui metode perhitungan pembakaran basis molar, Babcock & Wilcox (1992). Perhitungan emisi gas hasil pembakaran ini didasarkan atas hasil analisis ultimasi, seperti tercantum pada tabel 14-20 (lampiran 6). Perhitungan ini digunakan untuk menghitung emisi CO₂, SO₂ atau SO_x, dan NO₂ atau NO_x.

Dari hasil perhitungan emisi gas hasil pembakaran berdasarkan basis molar, terlihat bahwa emisi gas hasil pembakaran sampel dengan oksigen, maka emisi CO₂, SO_x dan NO_x mengikuti unsur utama masing-masing kandungan C, S dan N. Penambahan CNS ke dalam LRC mengakibatkan penurunan kandungan C, S, dan, N, hal tersebut berimplikasi terhadap penurunan emisi gas CO₂, CO, SO_x dan NO_x.

Referensi :

- Adekunle, J., J. Ibrahim, and E. Kucha. 2015. "Proximate and Ultimate Analyses of Biocoal Briquettes of Nigerian's Ogboyaga and Okaba Sub-Bituminous Coal." *British Journal of Applied Science & Technology* 7(1):114–23. doi: 10.9734/BJAST/2015/15154.
- Babcock & Wilcox. 1992. *Steam*.
- Bhuiyan, Arafat A., Aaron S. Blicblau, A. K. M. Sadrul Islam, and Jamal Naser. 2016. "A Review on Thermo-Chemical Characteristics of Coal/Biomass Co-Firing in Industrial Furnace." *Journal of the Energy Institute*. doi: 10.1016/j.joei.2016.10.006.
- BPS.Indonesia. 2015. Badan Pusat Statistik Indonesia,BPS Indonesia.
- Combustion Characteristics of LRC Mixed with Peat." 1– 8.
- Demirbas, Ayhan. 2005. "Potential Applications of Renewable Energy Sources , Biomass Combustion Problems in Boiler Power Systems and Combustion Related Environmental Issues." 31:171–92. doi: 10.1016/j.pecs.2005.02.002.
- Deposits Characteristics during Cofiring of High Shares of Torrefied Biomass in a 500 KW Pulverized Coal Furnace." *FUEL* 156:177–89. doi: 10.1016/j.fuel.2015.04.017.
- Effects of Co-Firing Biomass with Coal." *Energy Conversion and Management* 51(8):1694–1701. doi: 10.1016/j.enconman.2009.11.045.
- Ghenai, Chaouki, and Isam Janajreh. 2010. "CFD Analysis of the
- Hughes, Evan. 2000. "Biomass Cofiring: Economics, Policy and Opportunities." *Biomass and Bioenergy* 19(6):457–65. doi: 10.1016/S0961-9534(00)00057-X.
- Hutrindo, E., T. Hardianto, and A. Suwono. 2006. "Study on Co-

- Combustion Characteristics of LRC Mixed with Peat.” 1–8.
- Jayaraman, Kandasamy, Mustafa Versan, and Iskender Gokalp. 2017. “Thermogravimetric and Mass Spectrometric (TG-MS) Analysis and Kinetics of Coal-Biomass Blends.” *Renewable Energy* 101:293–300. doi: 10.1016/j.renene.2016.08.072.
- Khatami, Reza, and Yiannis A. Levendis. 2016. “An Overview of Coal Rank Influence on Ignition and Combustion Phenomena at the Particle Level.” *Combustion and Flame* 164:22–34. doi: 10.1016/j.combustflame.2015.10.031.
- Kopczyński, Marcin, Janusz A. Lasek, Andrzej Iluk, and Jarosław Zuwała. 2017. “The Co-Combustion of Hard Coal with Raw and Torrefied Biomasses (Willow (*Salix Viminalis*), Olive Oil Residue and Waste Wood from Furniture Manufacturing).” *Energy* 140:1316–25. doi: 10.1016/j.energy.2017.04.036.
- Liu, D. C., T. Mi, B. X. Shen, B. Feng, and Franz Winter. 2002. “Reducing N₂O Emission by Co-Combustion of Coal and Biomass.” *Energy & Fuels* 16(2):525–26. doi: 10.1021/ef010108f.
- M. M.El-Wakil. 1988. *POWERPLANT TECHNOLOGY*. 2nd
- Mahidin, Khairil, Adisalamun. 2006. “Co-Combustion of Low-Rank Coal and Palm Shell in Fluidized Bed Boiler (Study on Generated Steam Characteristics).” *Proceeding of the International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion 2006, Jakarta Indonesia December 10-14*,
- Mitchell, E. J. S., A. R. Lea-langton, J. M. Jones, A. Williams, P. Layden, and R. Johnson. 2016. “The Impact of Fuel Properties on the Emissions from the Combustion of Biomass and Other Solid Fuels in a Fluidized Bed Domestic

- Stove.” *Fuel Processing Technology* 142:115–23. doi: 10.1016/j.fuproc.2015.09.031.
- Nakayama, S., Y. Noguchi, T. Kiga, S. Miyamae, U. Maeda, M. Kawai, T. Tanaka, K. Koyata, and H. Makino. 1992. “Pulverized Coal Combustion in O₂/CO₂ Mixtures on a Power Plant for CO₂ Recovery.” *Energy Conversion and Management* 33(5–8):379–86. doi: 10.1016/0196-8904(92)90034-T.
- Ndibe, Collins. 2015. “ScienceDirect Combustion , Cofiring and Emissions Characteristics of Torrefied Biomass in a Drop Tube Reactor.” 9. doi: 10.1016/j.biombioe.2015.05.010.
- Nikolopoulos, Nikolaos, Ioannis Violidakis, Emmanouil Karampinis, Michalis Agraniotis, Christian Bergins, Panagiotis Grammelis, and Emmanouil Kakaras. 2015. “Report on Comparison among Current Industrial Scale Lignite Drying Technologies (A Critical Review of Current Technologies).” *Fuel* 155:86–114. doi: 10.1016/j.fuel.2015.03.065.
- printi. edited by Anne Murphy and J.W.Maisel. McGraw- Hill Book Company.
- Renstra KSDEM RI(2015-2019). 2015. “Renstra Kementrian Sumber Daya Energi Dan Mineral Republik Indonesia.(2015-2019) in Bahasa.”
- Riaza, J., L. Álvarez, M. V Gil, C. Pevida, J. J. Pis, and F. Rubiera. 2013. “Ignition and NO Emissions of Coal and Biomass Blends under Different Oxy-Fuel Atmospheres.” 37:1405–12. doi: 10.1016/j.egypro.2013.06.016.
- Rodilla, I., M. L. Contreras, and A. Bahillo. 2018. “Thermogravimetric and Mass Spectrometric (TG-MS) Analysis of Sub-Bituminous Coal-Energy Crops Blends in N₂, Air and CO₂/O₂atmospheres.” *Fuel* 215(May

2017):506–14. doi: 10.1016/j.fuel.2017.09.102.

- Rokni, Emad, Xiaohan Ren, Aidin Panahi, and Yiannis A. Levendis. 2018. “Emissions of SO₂, NO_x, CO₂, and HCl from Co-Firing of Coals with Raw and Torrefied Biomass Fuels.” *Fuel* 211(September 2017):363–74. doi: 10.1016/j.fuel.2017.09.049.
- Romero, Carlos M., Gretta L. A. F. Arce, and Ivonete Avila. 2018. “Comparative Study on Combustion and Oxy-Fuel Combustion Environments Using Mixtures of Coal with Sugarcane Bagasse and Biomass Sorghum Bagasse by the Thermogravimetric Analysis A.” doi: 10.1016/j.joei.2018.02.008.
- Tambunan, B. H., M. Syamsiro, and H. Saptoadi. n.d. “CO Emissions From Burning Briquettes Of Candelnuts Shell Mixed With Charcoal.” 3–7.
- Vassilev, Stanislav V., Christina G. Vassileva, and Vassil S. Vassilev. 2015. “Advantages and Disadvantages of Composition and Properties of Biomass in Comparison with Coal: An Overview.” *Fuel* 158(May):330–50. doi: 10.1016/j.fuel.2015.05.050.
- Wang, Xuebin, Zhongfa Hu, Shuanghui Deng, Yingying Xiong, and Houzhang Tan. 2014. “Effect of Biomass / Coal Co-Firing and Air Staging on NO_x Emission and Combustion Efficiency in a Drop Tube Furnace.” 61:2331–34. doi: 10.1016/j.egypro.2014.11.1196.
- Yousaf, Balal, Guijian Liu, Qumber Abbas, Ruwei Wang, Muhammad Ubaid, Habib Ullah, Ruijia Liu, and Chuncai Zhou. 2017. “Systematic Investigation on Combustion Characteristics and Emission- Reduction Mechanism of Potentially Toxic Elements in Biomass- and Biochar- Coal

Co-Combustion Systems.” *Applied Energy* (May):0–1. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.10.059.

Zhang, Ke, Loretta Johnson, Richard Nelson, Wenqiao Yuan, Zhijian Pei, Xiuzhi S. Sun, and Donghai Wang. 2014. “Thermal Properties of Big Bluestem as Affected by Ecotype and Planting Location along the Precipitation Gradient of the Great Plains.” 164–71.

Zuwała, Jarosław, and Janusz Lasek. 2017. 6. *Co-Combustion of Low-Rank Coals with Biomass*. Elsevier Ltd.

BAB II

CO-FIRING LRC DENGAN ARANG SERBUK GERGAJI KAYU MERANTI

Penelitian ini merupakan pengkajian limbah biomassa yang memiliki potensi yang cukup melimpah dan belum pernah dilakukan pencampuran dengan LRC yaitu limbah serbuk gergaji kayu meranti (*Sawdust Meranti Wood*, SMW). Studi awal tentang pembuatan briket arang serbuk gergaji kayu meranti telah dilakukan sebelumnya dan memperlihatkan potensi energi yang signifikan masing-masing HHV 5731,10 kcal/kg. Ash 3,97%, Moisture 1,72 %, Fixed Carbon 65,9%. Efisiensi pembakaran 70,76%. Emisi gas hasil pembakaran CO 0,33% dan CO₂ 1,36% (Patabang, 2013). Dari data potensi termal dan emisi gas hasil pembakaran briket arang serbuk gergaji kayu meranti, menunjukkan peluang untuk memperbaiki kualitas pembakaran LRC. Melalui co-firing LRC dengan arang serbuk gergaji kayu meranti (SMW).

2.1. Bahan baku

1. Sampel batubara dari tambang batubara Sangatta Kalimantan Timur
2. Sampel serbuk gergaji kayu meranti dari industri penggergajian kayu di kota Palu Kedua sampel tersebut diperlihatkan pada gambar 47 dan 48 di bawah ini:



Gambar 47. LRC



Gambar 48. Serbuk gergaji kayu meranti (SMW)

2.2. Preparasi

1. Persiapan kedua macam sampel dengan melakukan pembersihan sampel secara terpisah
2. SMW di pretreatment dengan cara dry torrifaction pada suhu 250-350 °C selama 30 menit di dalam furnace listrik(Ullah et al., 2017).
3. SMW dikarbonasi pada cerobong karbonasi.
4. Pulverized masing-masing sampel dengan ukuran partikel 40-60 mesh (Neminda et al., 2017).
5. Pencampuran sampel LRC-SMW pada mesin pencampur selama 30 menit dengan variasi penambahan SMW ke dalam LRC masing-masing 10%,30% dan 50%.
6. Melakukan analisis proksimasi dan ultimasi pada masing-masing campuran sampel (Adekunle et al., 2015).
7. Setiap sampel dilakukan pembriketan dengan penambahan bahan pengikat tepung tapioka 7% dan air panas 10%, kemudian dicetak pada mesin cetak briket dengan tekanan 2,2 Mpa.
8. Setiap sampel dibakar pada kompor briket melalui

pengujian pendidihan air, untuk mendapatkan efisiensi pembakaran briket (Obi O. F.*et al.*, 2017).

9. Setiap sampel yang dibakar pada kompor briket diukur emisi gas hasil pembakaran yang terdiri atas emisi CO₂,CO,NO_x, dan SO_xHasil dan Pembahasan

2.3. Karakterisasi

Pelaksanaan penelitian ini diawali dengan karakterisasi sampel, yaitu dilakukan analisis proksimasi, analisis ultimasi, untuk mendapatkan karakteristik termokimia sampel.

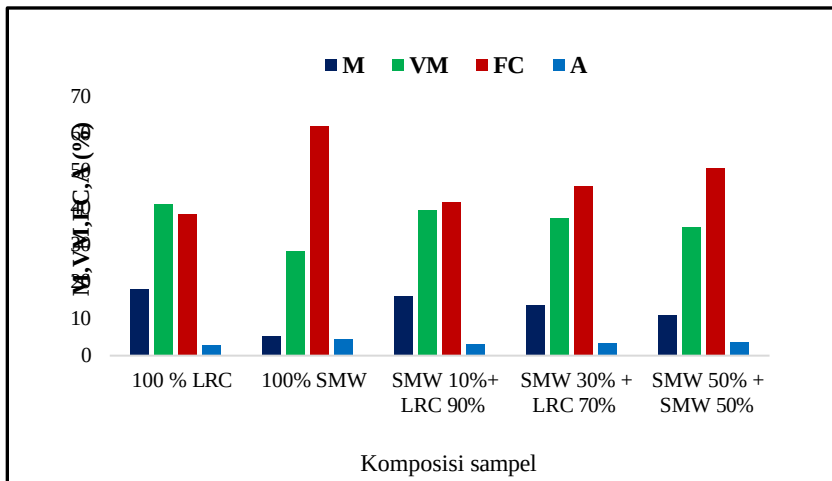
Proximate Analysis

Analisis Proksimasi dilakukan untuk mendapatkan karakteristik termal, yang terdiri atas kandungan Volatile Matters (VM), kandungan Moisture (M), kandungan Ash (A), kandungan Fixed Carbon (FC, dan kandungan nilai kalor atas (HHV).

Tabel 2. Analisis Proksimasi

Proximate Analysis % adb	LRC 100%	SMW 100%	LRC90 % %+SMW10 %	LRC70%+ SMW30%	LRC50% +SMW 50%	ASTM Standard
Volatile Matters (VM)	40.9	28.3	39.26	36.9 7	34.81	D3173
Moisture (M)	17.89	5.26	16.15	13.72	10.97	D3174
Ash (A)	2.94	4.56	3.12	3.45	3.78	D3175
Fixed Carbon (FC)		61.88		45.86		by difference
HHV (kcal/kg)	5,184	6,038	5,217	5,413	5,660	D5865-12

Hasil analisis proksimasi sampel dipresentasikan dalam grafik hubungan antara VM, M, A, dan FC terhadap komposisi campuran sampel seperti pada grafik 1 di bawah ini:

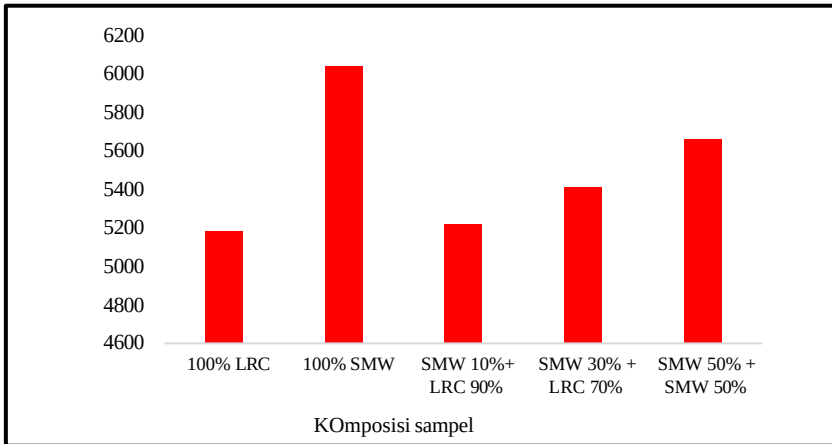


Grafik 1. Hubungan antara VM, M, A, FC terhadap komposisi sampel

Penambahan SMW ke dalam LRC berimplikasi terhadap penurunan jumlah kadar M di dalam sampel, disebabkan karena kandungan M di dalam SMW lebih rendah daripada di dalam LRC. Dan sebaliknya kandungan FC di dalam SMW lebih besar daripada di dalam LRC, hal ini berimplikasi terhadap peningkatan FC di dalam campuran LRC-SMW. Dampak dari menurunnya kandungan M dan meningkatnya kandungan FC mengakibatkan kualitas pembakaran campuran LRC-SMW, sehingga berimplikasi terhadap peningkatan efisiensi pembakaran. Hal ini relevan dengan penelitian yang dilakukan dengan menambahkan cangkang kemiri (CNS) ke dalam LRC (Patabang, Arif, & Aziz, 2019). Juga relevan hasil penelitian yang mencampur serbuk gergaji kayu dan limbah hayati dari sereal yang dicampur dengan batubara keras yang dilakukan pembangkit listrik Skawina di Polandia (Zuwala & Sciazko, 2010), dan hasil penelitian campuran batubara keras dengan limbah biomassa mentah dan torrefied (*willow salix viminalis*), residu minyak zaitun dan limbah kayu furnitur (Kopczyński et al., 2017).

Grafik hubungan antara Nilai kalor dengan

komposisi setiap sampel dipresentasikan pada grafik 2 di bawah ini:



Grafik 2. Hubungan antara Nilai Kalor Atas (HHV) dengan komposisi sampel

Berdasarkan grafik 2 di atas memperlihatkan pengaruh penambahan SMW ke dalam LRC secara signifikan meningkatkan HHV sampel, karena kandungan HHV di dalam SMW lebih besar daripada di dalam LRC. Hal ini berimplikasi terhadap peningkatan kandungan energi di dalam campuran LRC-SMW, dan ini memperlihatkan bahwa potensi energi yang terkandung di dalam SMW cukup untuk dijadikan bahan bakar pendamping LRC atau dapat menyubstitusi penggunaan LRC, sehingga dapat disimpulkan bahwa SMW dapat dijadikan sebagai salah satu sumber bahan bakar alternatif terbarukan dan dapat diperbaharui.

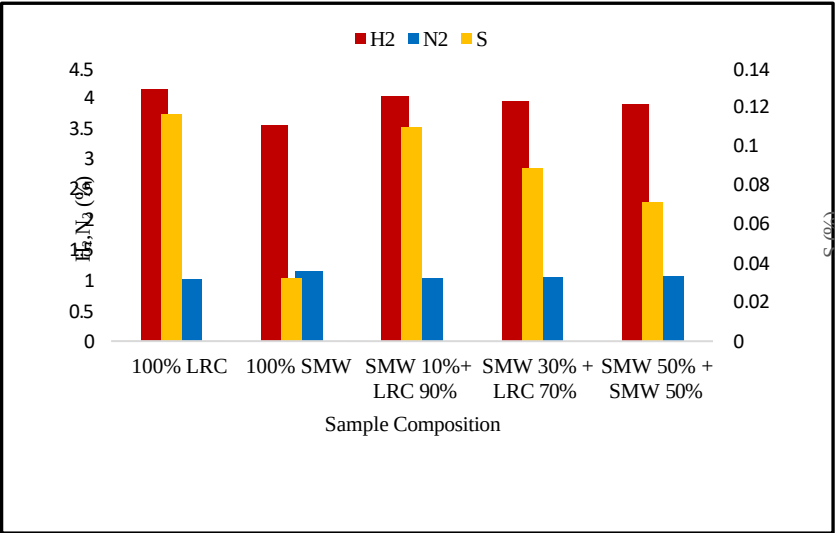
Ultimate Analysis

Analisis ultimasi yang dilakukan pada setiap sampel dan campuran berdasarkan komposisi diperlihatkan pada tabel 3 di bawah ini:

Tabel.3 Analisis Ultimasi

Ultimate Analysis (%) adb	LRC 100%	SMW 100%	LRC90% +SWM10 %	LRC 70% + SM W 30%	LRC 50% + SM W 50%	ASTM Standard
Carbon (C)	55.96	68.47	57.05	59.74	62.7 1	D5373- 02
Hydrogen (H2)	4.14	3.55	4.02	3.93	3.88	D5373- 02
Nytrogen (N2)	1.01	1.14	1.03	1.05 0.08	1.07	D5373- 02
Sulphur (S)	0.116	0.032	0.676	8	0.07	D 3177
Oxygen (O2)	35.95	22.28	34.78	31.8 3	28.5 6	by difference

Dari hasil analisis ultimasi diperoleh kandungan komposisi kimia dari setiap sampel yang terdiri atas kandungan Karbon (C), Nitrogen (N2), Hidrogen (H2), dan Sulfur (S).

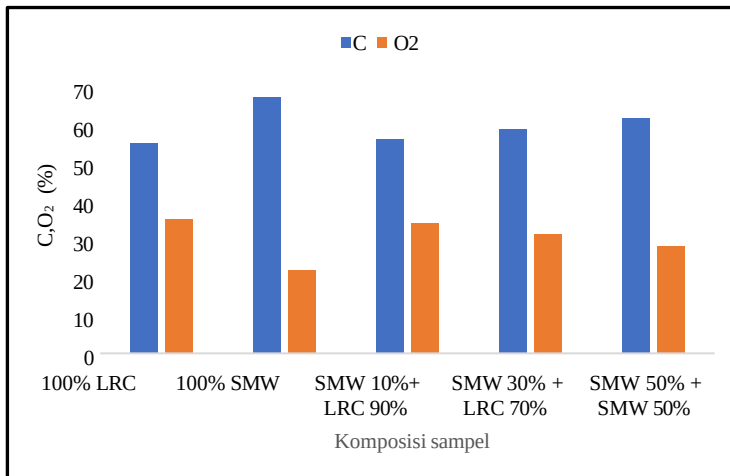


Grafik 3. Hubungan antara kandungan H2,N2, dan S dari setiap komposisi sampel

Dari grafik 3 di atas terlihat bahwa pengaruh penambahan SMW ke dalam LRC mereduksi kandungan S di dalam LRC, sehingga jika dibakar maka akan menghasilkan penurunan emisi Sox, yang dapat menurunkan efek hujan asam, yang berbahaya bagi Kesehatan lingkungan, dan juga menurunkan korosivitas pipa-pipa perpindahan kalor pada boiler jika digunakan sebagai bahan bakar pembangkit tenaga uap. Hasil penelitian ini relevan dengan hasil penelitian efisiensi lingkungan dari pembangkit yang menggunakan batubara sebagai bahan bakar, dengan menambahkan biomassa maka dapat mereduksi kandungan emisi Sox, sehingga pembakaran campuran batubara dengan biomassa menghasilkan emisi gas hasil pembakaran yang tidak merusak lingkungan (Song et al., 2015) dan hasil penelitian penambahan biomassa sekam padi serbuk gergaji pinus yang dicampur dengan batubara (P. Wang et al., 2018). Namun penambahan SMW ke dalam LRC sedikit meningkatkan kandungan N_2 , sehingga hal ini berpotensi meningkatkan emisi gas hasil pembakaran NO_x , lebih khusus jika dibakar pada suhu tinggi sebagaimana hasil penelitian tentang efek suhu pembakaran terhadap emisi NO_x pada suhu tinggi dari Turbin Gas yang menggunakan gas alam (Marchionna, 1974), juga relevan dengan penambahan biomassa gandum dan kayu ke dalam batubara melalui pengujian air staging di dalam drop tube furnace (X. Wang et al., 2014).

Kandungan H_2 yang relative tinggi di dalam SMW berpotensi meningkatkan reaktivitas pembakaran campuran LRC-SMW, sebagaimana hasil penelitian penambahan CNS ke dalam LRC (Patabang, Arif, Jalaluddin, et al., 2019).

Kandungan C dan O₂ di dalam komposisi sampel dipresentasikan pada grafik 4 di bawah ini,



Grafik 4. Kandungan C dan O₂ terhadap komposisi sampel

Kandungan C di dalam SMW lebih tinggi daripada di dalam LRC, hal ini berpotensi meningkatkan kandungan energi di dalam campuran LRC-SMW. Hal ini berimplikasi terhadap peningkatan kualitas pembakaran. Namun tingginya kandungan C di dalam SMW dapat meningkatkan kandungan emisi hasil pembakaran campuran LRC-SMW, sejumlah referensi melaporkan bahwa kandungan C di dalam biomassa merupakan karbon netral sehingga emisi gas CO₂ merupakan emisi gas CO₂ netral, yang akan segera diserap sepenuhnya oleh atmosfer saat berada di udara, sehingga tidak meningkatkan pemanasan global, hal ini sejalan dengan hasil penelitian tentang dampak lingkungan pembakaran hidro karbon yang terkandung di dalam batubara (Dameng et al., 2011), dan emisi gas hasil pembakaran biomassa dalam mitigasi gas rumah kaca (Agbor et al., 2014).

2.4. Efisiensi Thermal Briket

Untuk menentukan efisiensi termal pembakaran briket maka dilakukan pengujian pendidihan air berdasarkan metode yang dilakukan berdasarkan rekomendasi dari *Regional Wood*

Energy Development (Regional Wood Energy Development, 1993).

Metode *ini* dilakukan dengan memanaskan air di dalam wadah tertutup di atas kompor briket, dengan menggunakan briket sebagai bahan bakar, seperti diperlihatkan pada gambar di bawah ini:



Gambar 49. Metode pendidihan air

Keterangan:

1. Wadah pendidihan air
2. Kawat termokopel suhu air
3. Kompor briket
4. Kawat termokopel suhu nyala briket

Efisiensi termal pembakaran briket pada kompor briket, digunakan formula sebagai berikut:

$$\eta_{th} = \frac{[M \times C_{pl} (T_b - T_a) + M_1 \times C_{pv} (T_b - T_a) + M_2 \times H_L]}{(LHV \times m \times t)} \times 100\% \quad (17)$$

Dimana:

M massa air yang dididihkan (1 kg)

C_{pl} Kapasistas panas dari air (kg kcal⁻¹°C⁻¹)

T_b Suhu akhir dari air saat mendidih (°C)

T_a Suhu awal dari air (°C)

M_1 massa awal dari briket (kg)

C_{pv} kapasitas panas dari wadah aluminium(kg kcal⁻¹°C⁻¹)

M_2 massa akhir dari briket (kg)

H_L kalor laten air (kcal kg⁻¹)

LHV Nilai pembakaran bawah briket (kcal kg⁻¹)

m flowrate briket (kg min⁻¹)

t durasi waktu pendidihan air (min)

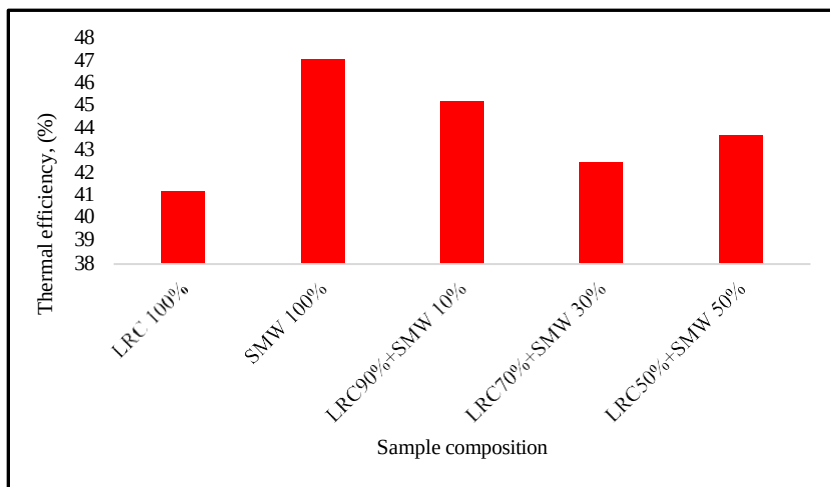
Hasil perhitungan efisiensi pembakaran briket dengan metode pendidihan air dapat dilihat pada tabel 4 di bawah ini:

Tabel 4. Hasil perhitungan efisiensi termal

No	Sampel	Durasi Pembakaran t (menit)	Konsumsi briekt m(kg/min)	Efisiensi Termal (%)
1	LRC 100%	16	0,00385	41,25
2	SMW 100%	10	0,0034	47,13
3	LRC90%+SMW 10%	12	0,00356	45,23
4	LRC 70% + SMW30%	14	0,0057	42,54
5	LRC 50% + SMW 50%	15	0,0072	43,74

Hasil efisiensi termal pada tabel 4 di atas dipresentasikan

pada grafik 5 di bawah ini:



Grafik 5. Efisiensi termal

Hasil perhitungan efisiensi termal pembakaran briket LRC-SMW memperlihatkan pengaruh penambahan SMW ke dalam LRC, terjadi peningkatan efisiensi termal, hal ini diprediksi akibat tingginya kandungan C, FC, dan HHV di dalam SMW dibandingkan di dalam LRC, dan rendahnya kandungan M di dalam SMW. Hasil penelitian ini paralel dengan hasil penelitian penambahan CNS ke dalam LRC dan beberapa penelitian yang menambahkan biomassa ke dalam batubara (Patabang, Arif, & Aziz, 2019) (Patabang, Arif, Jalaluddin, et al., 2019) (Obi et al., 2020) (Bhuiyan et al., 2016), bahkan jumlah penambahan optimal SMW ke dalam LRC adalah 10%, pada penambahan ini diperoleh efisiensi termal sebesar 45,23 %.

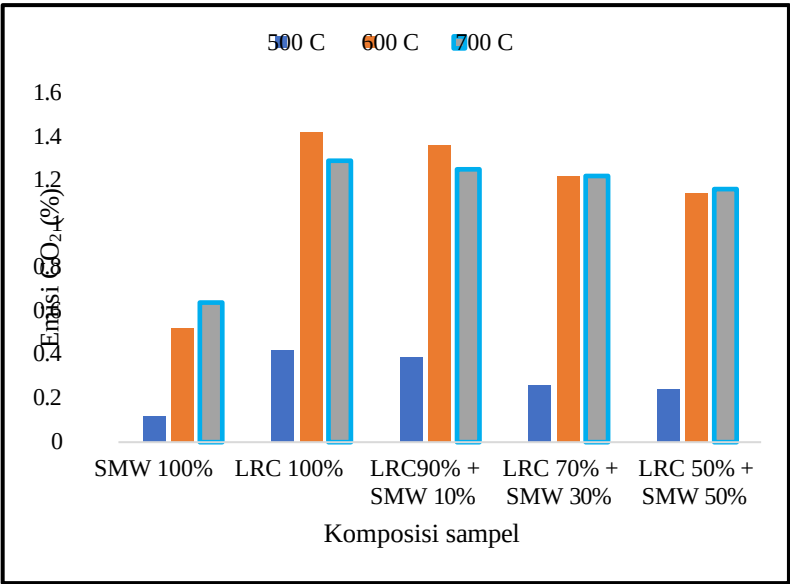
2.5. Emisi Gas Hasil Pembakaran Briket

Sampel LRC - SMW dan komposisi campuran dengan penambahan 10% SMW, 30% SMW dan 50% SMW ke dalam LRC, dilakukan pembakaran dan pengukuran emisi gas hasil pembakaran CO₂, CO, SO_x dan NO_x pada suhu pembakaran 500

0C, 600 0C, dan 700 0C, dengan menggunakan Thermoline MRU Air Fair VARIO plus. Berikut hasil pengujian emisi gas hasil pembakaran briket sebagai berikut:

a. Emisi CO₂

Emisi gas CO₂ diperlihatkan pada grafik 6 di bawah ini:



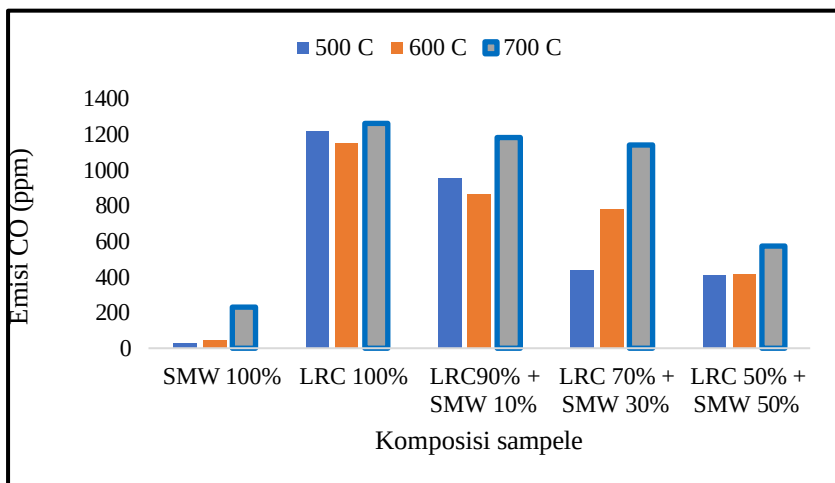
Grafik 6: Emisi gas CO₂ hasil pembakaran sampel

Berdasarkan hasil pengujian emisi gas CO₂ pada grafik 6 di atas memperlihatkan efek penambahan SMW ke dalam LRC, semakin meningkat penambahan SMW ke dalam LRC menurunkan emisi CO₂. Hasil ini relevan dengan hasil penelitian penambahan CNS ke dalam LRC, dan beberapa biomassa yang berkontribusi penurunan emisi gas CO₂ (Patabang, Arif, & Aziz, 2019) (Roni et al., 2017). Pengaruh suhu pembakaran menunjukkan semakin meningkat suhu pembakaran semakin meningkat emisi kandungan emisi CO₂, namun dengan penambahan SMW ke dalam LRC berimplikasi terhadap penurunan emisi CO₂. Sekalipun hasil analisis

ultimasi kandungan karbon di dalam SMW sedikit lebih tinggi daripada karbon yang terkandung di dalam LRC, namun emisi gas hasil pembakaran tetap memperlihatkan penurunan emisi CO₂. Hasil CO₂ akibat pembakaran biomassa yang diampur dengan batubara menghasilkan CO₂ netral, yang berarti bahwa berapapun emisi CO₂ dihasilkan dari pemkaran biomassa akan diserap sepenuhnya oleh atmosfer, sehingga dampak emisi CO₂ tidak akan meningkatkan pemanasan global (Hughes, 2000). Jumlah penambahan SMW ke dalam LRC yang menghasilkan emisi CO₂ terkecil diperoleh pada penambahan 30% dan 50 % pada suhu pembakaran 500 °C.

b. Emisi gas CO

Hasil pembakaran sampel pada pengukuran emisi kandungan CO dipresentasikan pada grafik 7 di bawah ini:



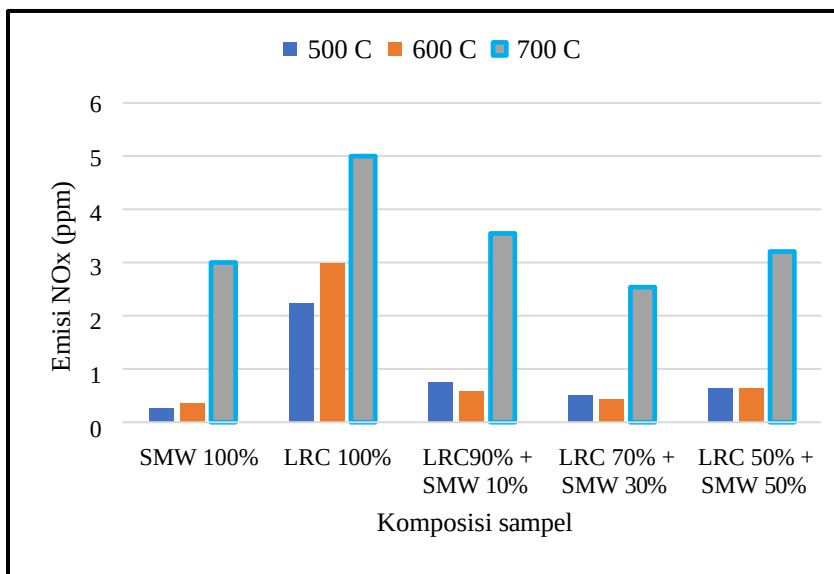
Grafik 7. Emisi gas CO dari pembakaran sampel

Berdasarkan grafik hasil pengukuran emisi gas CO yang dipresentasikan pada grafik 7 di atas, terlihat sangat jelas dampak penambahan SMW ke dalam LRC dimana semakin bertambahnya SMW yang ditambahkan ke dalam LRC menghasilkan penurunan CO yang signifikan. Hasil ini dapat

disimpulkan bahwa dampak penambahan SMW ke dalam LRC meningkatkan kualitas pembakaran, yaitu pembakaran semakin mendekati sempurna (Yu et al., 2016) (Nakayama et al., 1992). Pengaruh suhu pembakaran menunjukkan semakin meningkat suhu pembakaran emisi gas CO semakin meningkat namun akibat penambahan SMW ke dalam LRC tetap menunjukkan tren penurunan emisi CO (P. Wang et al., 2018). Jumlah penambahan SMW ke dalam LRC yang menghasilkan emisi gas CO diperoleh pada penambahan 30% pada suhu pembakaran 500 °C.

c. Emisi gas NOx

Hasil pengukuran emisi gas NOx dari pembakaran sampel SMW=LRC dipresentasikan pada grafik 8 di bawah ini:



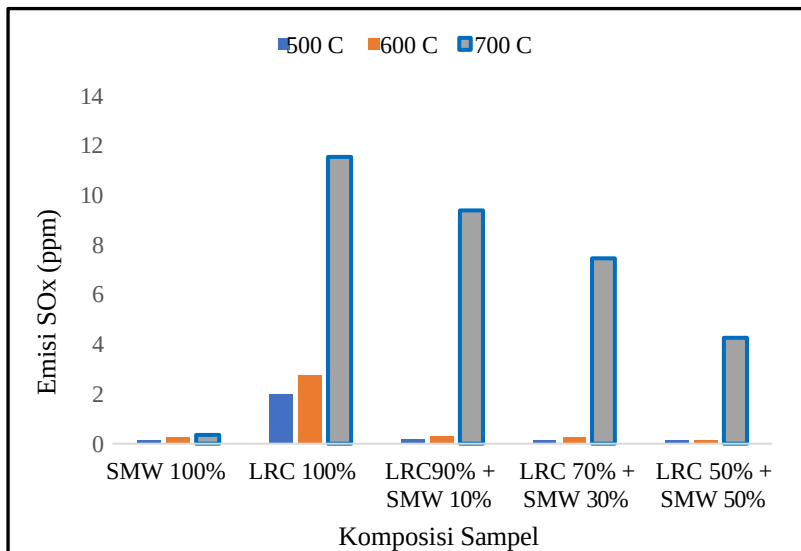
Grafik 8. Emisi gas NOx dari hasil pembakaran sampel

Berdasarkan hasil pengukuran emisi gas NOx yang dipresentasikan pada grafik 8 di atas diperlihatkan bahwa dampak penambahan SMW ke dalam LRC mereduksi emisi

gas NO_x. Hal ini diprediksi olehkatrena berdasarkan hasil analisis ultimasi Nampak kandungan Nitrogen di dalam SMW lebih sedikit dibandingkan dengan kandungan nitrogen di dalam LRC (Ndibe et al., 2015) (Vassilev et al., 2015). Penurunan emisi NO_x secara signifikan diperoleh pada penambahan 30% SMW ke dalam LRC. Berbeda dengan penambahan CNS ke dalam LRC diperoleh penambahan optimal sebesar 10% (Patabang, Arif, & Aziz, 2019). Emisi gas NO_x sangat dipengaruhi oleh suhu pembakaran, semakin meningkat suhu pembakaran berimplikasi terhadap meningkatnya emisi NO_x hal ini diprediksi oleh indeks NO_x yang semakin meningkat dengan meningkatnya suhu pembakaran (Nikolopoulos et al., 2015) (Liu et al., 2002). Penurunan emisi NO_x juga disebabkan karena kandungan VM di dalam SMW cukup tinggi, sehingga akan mengkonsumsi sebagian besar oksigen untuk membatasi terbentuknya NO_x(Mahidin, Khairil, 2006). Penurunan NO_x akan mengurangi hujan asam, pembentukan kabut asap, dan kerusakan tanaman.

d. Emisi Sox

Emisi gas SO_x hasil pemkaran sampel SMW – LRC dan campurannya dipresentasikan pada grafik 9 di bawah ini:



Grafik 9. Emisi gas SO_x dari pembakaran sampel SMW-LRC

Berdasarkan hasil pengukuran emisi gas hasil pembakaran SO_x yang dipresentasikan pada grafik 9 di atas terlihat efek penambahan SMW ke dalam LRC mereduksi emisi gas SO_x, hal tersebut diprediksi akibat rendahnya kandungan sulfur di dalam SMW dibandingkan di dalam LRC. Hasil pengukuran ini relevan dengan beberapa hasil penelitian yang menambahkan biomassa ke dalam batubara (Rokni et al., 2018) (Bhuiyan et al., 2016) (Yousaf et al., 2017) (Mitchell et al., 2016). Persentase penambahan SMW ke dalam LRC yang menghasilkan reduksi emisi SO_x adalah pada penambahan 30% dan 50 %. Pengaruh suhu pembakaran terhadap emisi SO_x menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu pembakaran maka emisi SO_x juga semakin meningkat, hal tersebut diprediksi akibat tingginya kandungan oksigen di dalam SMW, hal ini mengakibatkan meningkatnya reaktivitas pembakaran (Patabang, Arif, Jalaluddin, et al., 2019). Reduksi sulfur akibat penambahan SMW ke dalam LRC berimplikasi terhadap penurunan *slagging* dan *fouling* pada alat penukar

kalor dari boiler yang menggunakan campuran SMW dengan batubara. Penurunan kandungan SO_x juga berdampak terhadap pengurangan hujan asam yang dapat berimplikasi terhadap kerusakan lingkungan hidup (Yousaf et al., 2017).

Berdasarkan hasil penelitian penambahan SMW ke dalam LRC dapat disimpulkan beberapa hal.

1. Terjadi peningkatan energi di dalam LRC, diakibatkan oleh tingginya kandungan HHV di dalam SMW. Hal tersebut berimplikasi terhadap peningkatan reaktivitas pembakaran.
2. Hasil analisis ultimasi menunjukkan penurunan kandungan Sulfur, Nitrogen, sehingga berimplikasi terhadap penurunan emisi gas hasil pembakaran CO₂, CO, NO_x dan Sox
3. Jumlah penambahan optimal SMW ke dalam LRC adalah 10 %, karena pada penambahan 10% SMW berimplikasi terhadap peningkatan efisiensi pembakaran.
4. Penurunan emisi gas hasil pembakaran semakin meningkat dengan meningkatnya penambahan SMW ke dalam LRC.
5. Ditemukan SMW memiliki potensi yang strategis untuk dapat mensubstitusi sebagian dan memperbaiki kualitas pembakaran LRC.

Berdasarkan hasil penelitian karakteristik termal penambahan SMW ke dalam LRC maka direkomendasikan penambahan SMW ke dalam LRC adalah sebesar 10%, baik dalam penggunaan skala rumah tangga maupun dalam penggunaan dalam skala yang lebih besar seperti pada pembangkit tenaga dalam industri daya.

Referensi

- Adekunle, J., Ibrahim, J., & Kucha, E. (2015). Proximate and Ultimate Analyses of Biocoal Briquettes of Nigerian's Ogboyaga and Okaba Sub-bituminous Coal. *British Journal of Applied Science & Technology*, 7(1), 114–123. <https://doi.org/10.9734/BJAST/2015/15154>
- Agbor, E., Zhang, X., & Kumar, A. (2014). A review of biomass co-firing in North America. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 930–943. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.195>
- Bhuiyan, A. A., Blicblau, A. S., Islam, A. K. M. S., & Naser, J. (2016). A review on thermo-chemical characteristics of coal/biomass co-firing in industrial furnace. *Journal of the Energy Institute*. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.10.006>
- Dameng, L., Zhihua, L., & Yunyong, L. (2011). Distribution and Occurrence of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal Combustion and Coking and its Impact on the Environment. *Energy Procedia*, 5, 734–741. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.03.129>
- Hughes, E. (2000). Biomass cofiring: Economics, policy and opportunities. *Biomass and Bioenergy*, 19(6), 457–465. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00057-X](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00057-X)
- Kopczyński, M., Lasek, J. A., Iluk, A., & Zuwała, J. (2017). The co-combustion of hard coal with raw and torrefied biomasses (willow (*Salix viminalis*), olive oil residue and waste wood from furniture manufacturing). *Energy*, 140, 1316–1325. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.036>
- Liu, D. C., Mi, T., Shen, B. X., Feng, B., & Winter, F. (2002). Reducing N₂O Emission by Co-Combustion of Coal and Biomass. *Energy & Fuels*, 16(2), 525–526.

<https://doi.org/10.1021/ef010108f>

- Mahidin, Khairil, A. (2006). Co-combustion of Low-rank Coal and Palm Shell in Fluidized Bed Boiler (Study on Generated Steam Characteristics). *Proceeding of the International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion 2006, Jakarta Indonesia December 10-14, 2006*, 161-1-161–169.
- Marchionna, N. R. (1974). *N A S A TECHNICAL MEMORANDUM NASA TM X-2931 EFFECT OF INCREASED FUEL TEMPERATURE ON EMISSIONS OF OXIDES OF NITROGEN FROM A GAS TURBINE COMBUSTOR BURNING ASTM JET-A FUEL* by Nicholas R . Marckionna E-7634 National Aeronautics and Space Administration. January.
- Mitchell, E. J. S., Lea-langton, A. R., Jones, J. M., Williams, A., Layden, P., & Johnson, R. (2016). The impact of fuel properties on the emissions from the combustion of biomass and other solid fuels in a fi xed bed domestic stove. *Fuel Processing Technology*, 142, 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.09.031>
- Nakayama, S., Noguchi, Y., Kiga, T., Miyamae, S., Maeda, U., Kawai, M., Tanaka, T., Koyata, K., & Makino, H. (1992). Pulverized coal combustion in O₂/CO₂ mixtures on a power plant for CO₂ recovery. *Energy Conversion and Management*, 33(5–8), 379–386. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(92\)90034-T](https://doi.org/10.1016/0196-8904(92)90034-T)
- Ndibe, C., Grathwohl, S., Paneru, M., Maier, J., & Scheffknecht,(2015). Emissions reduction and deposits characteristics during cofiring of high shares of torrefied biomass in a 500 kW pulverized coal furnace. *FUEL*, 156, 177–189. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.017>

- Neminda, B., Gan, S., Eastwick, C., & Kiat, H. (2017). Biomass as an energy source in coal co- fi ring and its feasibility enhancement via pre-treatment techniques. *Fuel Processing Technology*, 159, 287–305. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.01.029>
- Nikolopoulos, N., Violidakis, I., Karampinis, E., Agraniotis, M., Bergins, C., Grammelis, P., & Kakaras, E. (2015). Report on comparison among current industrial scale lignite drying technologies (A critical review of current technologies). *Fuel*, 155, 86–114. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.03.065>
- Obi, O. F., Ezema, J. C., & Okonkwo, W. I. (2020). Energy performance of biomass cookstoves using fuel briquettes. *Biofuels*, 11(4), 467–478. <https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1374769>
- Patabang, D. (2013). Karakteristik Termal Briket Arang Serbuk Gergaji Kayu Meranti. *Jurnal Mekanikal*, 4(2), 410–415.
- Patabang, D., Arif, E., & Aziz, N. (2019). *Developments (JMERD) THE EFFECT OF ADDING CANDLENUT SHELL INTO THE LOW-RANK COAL ON*. 42(2), 30–35.
- Patabang, D., Arif, E., Jalaluddin, & Azis, N. (2019). Combustion reactivity of low rank coal by the mixture of candlenuts shell. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 619(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/619/1/012014>
- Regional Wood Energy Development. (1993). *Improved Solid Biomass Burning Cookstoves: a Development Manual*. 44,125. <http://www.rwedp.org>
- Rokni, E., Ren, X., Panahi, A., & Levendis, Y. A. (2018). Emissions of SO₂, NO_x, CO₂, and HCl from Co-firing of coals with raw and torrefied biomass fuels.

- Fuel*, 211(September 2017), 363–374.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.09.049>
- Roni, M. S., Chowdhury, S., Mamun, S., Marufuzzaman, M., Lein, W., & Johnson, S. (2017). Biomass co-firing technology with policies, challenges, and opportunities: A global review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78(May), 1089–1101.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.023>
- Song, C., Li, M., He, Y., & Tao, W. (2015). *Study on Energy and Environmental Efficiency for Coal-fired Power units : A non-parameter Approach*. 75, 2772–2778.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.533>
- Ullah, H., Liu, G., Yousaf, B., Ubaid, M., & Abbas, Q. (2017). Bioresource Technology Combustion characteristics and retention-emission of selenium during co- firing of torrefied biomass and its blends with high ash coal. *Bioresource Technology*, 245(July), 73–80.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.144>
- Vassilev, S. V., Vassileva, C. G., & Vassilev, V. S. (2015). Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: An overview. *Fuel*, 158(May), 330–350.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.05.050>
- Wang, P., Wang, G., Zhang, J., Lee, J. Y., Li, Y., & Wang, C. (2018). Co-combustion characteristics and kinetic study of anthracite coal and palm kernel shell char. *Applied Thermal Engineering*, 143(April), 736–745.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.009>
- Wang, X., Hu, Z., Deng, S., Xiong, Y., & Tan, H. (2014). *Effect of biomass / coal co-firing and air staging on NOx emission and combustion efficiency in a drop tube furnace*. 61, 2331–

2334. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.1196>

Yousaf, B., Liu, G., Abbas, Q., Wang, R., Ubaid, M., Ullah, H.,

Liu, R., & Zhou, C. (2017). Systematic investigation on combustion characteristics and emission- reduction mechanism of potentially toxic elements in biomass- and biochar- coal co-combustion systems. *Applied Energy*, May, 0–1.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.059>

Yu, D., Chen, M., Wei, Y., Niu, S., & Xue, F. (2016). An assessment on co-combustion characteristics of Chinese lignite and eucalyptus bark with TG-MS technique. *Powder Technology*,

294, 463–471. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.03.016>

Zuwala, J., & Sciazko, M. (2010). Full-scale co-firing trial tests of sawdust and bio-waste in pulverized coal-fired 230t/h steam boiler. *Biomass and Bioenergy*, 34(8), 1165–1174.

<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.03.003>

BAB III

TERMOGRAVIMETRI PENAMBAHAN LIMBAH BIOMASSA ARANG KULIT KELAPA MUDA (GREEN COCONUT SHELL,GCS), TERHADAP KINERJA PEMBAKARAN BATUBARA PERINGKAT RENDAH (LOW-RANK COAL,LRC)

Kebutuhan energi bahan bakar dunia, saat ini sebahagian besar masih bersumber dari bahan bakar Fosil yang terdiri atas: Minyak Bumi, Gas, dan Batubara. Ketiga bahan bakar tersebut sangat terbatas, dan harganya selalu fluktuatif dan sangat tergantung terhadap Geopolitik dunia. Di samping itu, berkembang pesat juga penggunaan sumber daya alam dengan memanfaatkan energi baru dan terbarukan seperti tenaga surya, tenaga air, tenaga angin, energi biomassa, dll.

Hingga saat ini, tahun 2026, pada umumnya pembangkit uap tenaga listrik masih berbahan bakar batu bara. Potensi sumber daya alam Batubara Indonesia sebanyak 31,9 Miliard ton(RI, 2025) Dari jumlah tersebut, terdapat 84% batubara peringkat rendah (Low-Rank Coal, LRC). LRC memiliki kekurangan antara lain kandungan Moisture yang tinggi sekitar 30-40%, sehingga suhu nyalanya rendah sekitar 1,050K (Khatami & Levendis, 2016). LRC memiliki sejumlah kelemahan yang menjadi tantangan dalam pemanfaatannya sebagai bahan bakar utama. Kadar air yang tinggi menyebabkan energi yang dihasilkan selama proses pembakaran sebagian besar digunakan untuk menguapkan air, sehingga menurunkan efisiensi termal Selain itu, nilai kalor yang rendah mengharuskan penggunaan jumlah

batubara yang lebih banyak untuk menghasilkan energi yang sama dibandingkan dengan batubara peringkat tinggi. LRC juga memiliki kandungan Sulfur(S), dan Nitrogen (N₂) yang tinggi, di samping itu batubara secara umum memiliki kandungan karbon terpendam, sehingga jika dibakar menghasilkan emisi gas CO₂, CO, NO_x dan SO_x yang relatif tinggi. Hal ini berpotensi meningkatkan pemanasan global. Polutan NO_x dan SO_x dapat meningkatkan hujan asam, korosi terhadap material logam, berbahaya terhadap kesehatan manusia dan lingkungan hidup seperti tanaman, bahkan dapat menimbulkan *slaging* dan *fouling* pada pipa alat perpindahan kalor(Kopczyński et al., 2017).

Untuk memperbaiki kualitas pembakaran LRC, diperlukan strategi, salah satunya pembakaran campuran (co-firing) antara LRC dan biomassa. Beberapa peneliti telah melakukan penelitian tentang pembakaran campuran LRC dengan biomassa, Pembakaran bersama LRC dengan menambahkan gambut (*peat*) meningkatkan kualitas pembakaran, Dimana semakin besar penambahan peat ke dalam LRC meningkatkan reaktivitas pembakaran (Hutrindo et al., 2006), penambahan limbah biomassa arang cangkang kemiri ke dalam LRC meningkatkan kualitas pembakaran LRC yaitu meningkatnya reaktivitas pembakaran, efisiensi pembakaran dan penurunan emisi gas hasil pembakaran (Patabang, Arif, Jalaluddin, et al., 2019)(Patabang, Arif, & Aziz, 2019), selanjutnya efek penambahan limbah biomassa arang serbuk kayu meranti terhadap kinerja pembakaran LRC berkontribusi positif dalam meningkatkan efisiensi pembakaran(Patabang et al., 2023a); Pembakaran campuran LRC dengan biomassa *poplar wood* dan *hazelnut shell* dengan menggunakan *Thermogravimetric and mass spectrometric (TG-MS) analysis* diperoleh peningkatan indeks performance pembakaran yaitu reaktivitas pembakaran meningkat dan menurunkan emisi gas SO₂ pada penambahan masing- masing biomassa tersebut(Jayaraman et al., 2017), Analisis termogravimetry terhadap penambahan limbah biomassa cangkang kakao ke dalam LRC menunjukkan peningkatan

kualitas pembakaran(Patabang et al., 2024)(Patabang et al., 2023b).

Gambaran hasil penambahan biomassa ke dalam LRC menunjukkan peningkatan kinerja pembakaran. Biomassa merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan di Indonesia. Limbah biomassa, khususnya yang berasal dari sektor pertanian dan perkebunan, tersedia dalam jumlah yang melimpah dan sering kali belum dimanfaatkan secara optimal. Salah satu jenis limbah biomassa yang potensial adalah kulit kelapa muda. Indonesia, sebagai negara tropis dengan produksi kelapa yang tinggi, menghasilkan limbah kulit kelapa dalam jumlah besar setiap tahunnya. Limbah ini umumnya hanya dibuang atau dibakar secara terbuka, yang justru menimbulkan permasalahan lingkungan. Padahal, kulit kelapa muda memiliki kandungan lignoselulosa yang cukup tinggi, sehingga berpotensi untuk dikonversi menjadi bahan bakar padat dalam bentuk arang. Biomassa merupakan sumber energi terbarukan yang berasal dari material organik seperti limbah pertanian, kehutanan, dan perkebunan. Biomassa lignoselulosa memiliki komponen utama berupa selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang mudah terdekomposisi secara termal.

Menurut penelitian terbaru, biomassa memiliki beberapa keunggulan dibandingkan batubara, yaitu memiliki kandungan sulfur dan nitrogen yang rendah, memiliki sifat reaktivitas pembakaran yang tinggi, dan emisi gas rumah kaca yang rendah.

Namun, biomassa mentah memiliki kelemahan seperti kadar air tinggi dan densitas energi rendah. Oleh karena itu, dilakukan proses **karbonisasi (pirolisis)** untuk meningkatkan kualitasnya menjadi arang biomassa (*biochar/charcoal*).

Kajian dalam tulisan ini memberikan ulasan tentang analisis termogravimetri co-firing LRC dengan biochar cangkang kelapa

muda.

Penelitian ini ditujukan untuk mendapatkan efek penambahan arang GCS terhadap kinerja pembakaran LRC yang meliputi :

1. Karakteristik termokimia
2. Analisis TGA-DTA
3. Perhitungan Aktivasi Energi dan Indeks pembakaran

KARAKTERISTIK TERMOKIMIA

Karakteristik termokimia dari bahan bakar padat terdiri atas ;

1. Karakteristik Termal
2. Karakteristik kimia

Karakteristik termal terdiri atas : kandungan Volatile Matter (VM), kandungan Moisture (M), kandungan Ash, Fixed Carbon (FC), dan kandungan Nilai Kalor atas (*Higher Heating Value*, HHV). Karakteristik termal ini diperoleh melalui *Proximate Analysis*.

Karakteristik kimia terdiri atas kandungan Carbon (C), kandungan Sulfur (S), kandungan Nitrogen (N₂), kandungan hydrogen (H₂). Karakteristik kimia ini diperoleh melalui *Ultimate Analysis*. Kedua analisis ini diperoleh berdasarkan rekomendasi standar ASTM.

3.1. Bahan Baku

Bahan baku dalam pengujian pembakaran LRC dan GCS Adalah

1. Batubara peringkat rendah (LRC),

LRC diambil dari tambang Batubara di Sangatta, Kalimantan Timur, seperti diperlihatkan pada gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1 : Batubara peringkat rendah (LRC)

2. Cangkang kelapa muda (*Green Choconut Shell*,GCS)
GCS dikumpulkan dari limbah penjualan air kelapa muda di dalam kota Palu, seperti diperlihatkan di bawah ini :



Gambar 2: Cangkang kelapa muda (GCS)

3.2. Preparasi sampel

1. LRC dan GCS masing-masing dibersihkan secara terpisah dari kotoran yang menempel
2. LRC dihancurkan di dalam mesin penghancur selanjutnya disaring dengan saringan ukuran 40 mesh menurut rekomendasi (Jayaraman et al., 2017).
3. GCS dikarbonasi dalam tungku karbonasi selama 8 Jam (Ullah et al., 2017)
4. Setelah GCS menjadi arang maka didiamkan selama 12 jam untuk pendinginan.
5. Selanjutnya arang GCS dihancurkan di dalam mesin penghancur dan disaring dengan saringan 40 mesh (Jayaraman et al., 2017)
6. Selanjutnya, arang GCS ditambahkan ke dalam LRC dengan persentase masing-masing 10%, 15%, dan 20% basis massa.
7. Masing-masing sampel dilakukan *Proximate Analysis* dan *Ultimate Analysis* dengan standar ASTM (Adekunle et al., 2015)
8. Pengujian TGA-DTA dilaksanakan dengan menggunakan mesin Exstar DTA-TGA 7300.7300.

3.3. Karakterisasi

1. Karakteristik Termal, Karakteristik termal melalui *Proximate Analysis*, dan *Ultimate Analysis* diperlihatkan dalam Tabel 1, dan table 2.

Tabel 1: Analisis proksimasi sampel

Proximate analysis	Materials				
% (adb)	LRC	LRC	LRC	LRC	ASTM
	100%	90% + GCS	85% GCS	80% GCS	
		10%	15%	20%	Standard
VM	40,09	39,28	39,48	39,1	D3173
M	8,09	8,42	8,49	8,73	D3174
A	16,7	16,27	15,41	15,07	D3147
FC	35,12	36,03	25,49	37,1	by-difference
HHV (kcal/kg)	5.539	5505	5490	5472	D5865-12

Tabel.2 Analisis Ultimasi

Ultimate Analysis	Sampel				
%(adb)	LRC	LRC	LRC	LRC	ASTM
	100%	90% GCS	85% GCS	80% GCS	
		10%	15%	20%	Standard
C	55,6	55,6	56,7	56,3	D5373-02
H2	5,75	5,62	5,37	5,29	D5373-02
N2	1,34	1,34	1,34	1,34	D5373-02
S	0,42	0,358	0,387	0,377	D3177
O2	36,89	37,082	3	36,693	by-difference

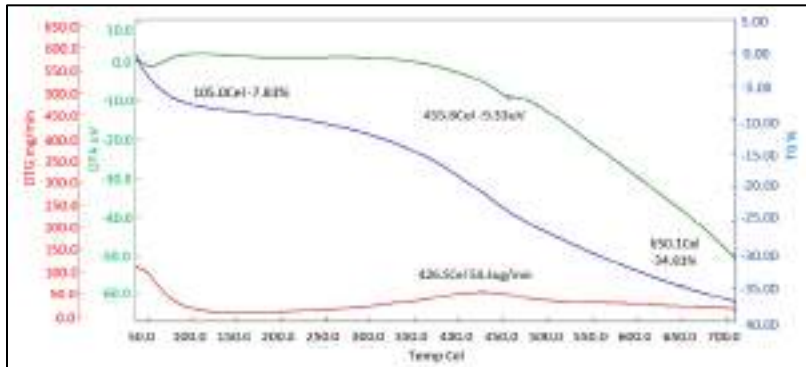
3.4. TGA-DTA

Termogravimetri dan analisis termal diferensial dilakukan untuk mengetahui laju perubahan massa dan potensi energi selama pembakaran. Sampel diuji dengan massa 4–6 mg. Sampel tersebut diletakkan di dalam cawan alumina. Oksider menggunakan udara atmosfer 4 l/min. Rentang pemanasan

sampel 30 – 700 °C. Laju pemanasan 10 °C/min. Mesin pengujian TGA-DTA adalah Exstar DTA-TGA 7300.

Hasil TGA -DTA Sampel LRC 100%

Grafik DTA-TGA diperlihatkan pada Gambar 4 di bawah ini :



Gambar 4. Hasil TGA-DTA LRC 100%

Kurva TGA-DTA

Garis kurva biru (TG) merepresentasikan Termal Gravimetry yaitu Perubahan massa terhadap temperatur

Garis kurva hijau (DTG) merepresentasikan Differential Thermal Analysis yaitu Laju kehilangan massa (%/menit)

Garis kurva merah /Heat flow (DTA) merepresentasikan efek termal selama pemanasan

Hasil TGA-DTA untuk bahan sampel LRC 100% berdasarkan Kurva Gambar 4. Dan hasil data Excel yang terekam sebagai berikut:

Tahap I: Penguapan Kelembaban (30–150 °C)

- Terjadi sedikit penurunan massa pada kurva TG.
- Penurunan relatif landai.
- Tidak tampak puncak signifikan pada DTG.

Pembahasan :

Berdasarkan data penguapan kelembaban di atas maka dapat

disimpulkan kondisi tersebut terjadi :

- (a) Pelepasan *moisture* (air permukaan dan sebagian air inherent di dalam sampel).
- (b) Kehilangan massa relatif kecil sebagai akibat kadar air sampel rendah–sedang.
- (c) Tidak terjadi reaksi kimia utama (bersifat fisik).

Tahap II: Devolatilisasi dan Awal Oksidasi ($\pm 300\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$)

- (a) Awal penurunan ketajaman pada TG sekitar $300\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- (b) Terlihat puncak DTG pertama sekitar $300.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 4.7\text{ \%/menit}$).
- (c) Puncak utama DTG terjadi sekitar $445\text{--}460\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- (d) Heat flow menunjukkan reaksi eksotermik, atau sampel melepaskan kalor di rentang ini.

Berdasarkan data tersebut, maka disimpulkan bahwa

- a) Ini merupakan fase **devolatilisasi utama**.
- b) Pelepasan volatile matter intensif.
- c) Terjadi oksidasi komponen organik aktif.
- d) Temperatur ini dapat diidentifikasi sebagai:

Temperatur Ignition (Ti)

Temperatur ignition atau penyalaan bahan bakar berada pada $\pm 320\text{--}350\text{ }^{\circ}\text{C}$, yaitu saat kurva TG mulai menurun tajam dan DTG meningkat secara signifikan. Hal ini bermakna bahwa bahan bakar tersebut semakin reaktif karena suhu penyalanya relatif rendah.

Tahap III: Pembakaran Char ($500\text{--}650\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Pembakaran char atau arang (*Fixed Carbon*) diindikasikan dengan menurunnya suhu hingga $\pm 650\text{ }^{\circ}\text{C}$, terlihat pada kurva yang semakin menurun hingga puncak penurunannya pada DTG $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Laju penurunan massa semakin kecil saat suhu mendekati

650 °C, di mana pada suhu tersebut mendekati akhir rekasi pembakaran. Dalam tahapan ini terjadi fase Char oxidation atau pembakaran arang, reaksi berlangsung lebih lambat jika dibandingkan dengan tahap devolatilisasi karena struktur Fixed carbon terbakar secara bertahap.

Burnout Temperature (Tb)

Diperkirakan pada $\pm 630\text{--}660$ °C, yang diindikasikan saat kurva TG mulai stabil sampai DTG mendekati nol.

Semakin rendah Tb menunjukkan semakin baik karakteristik pembakaran.

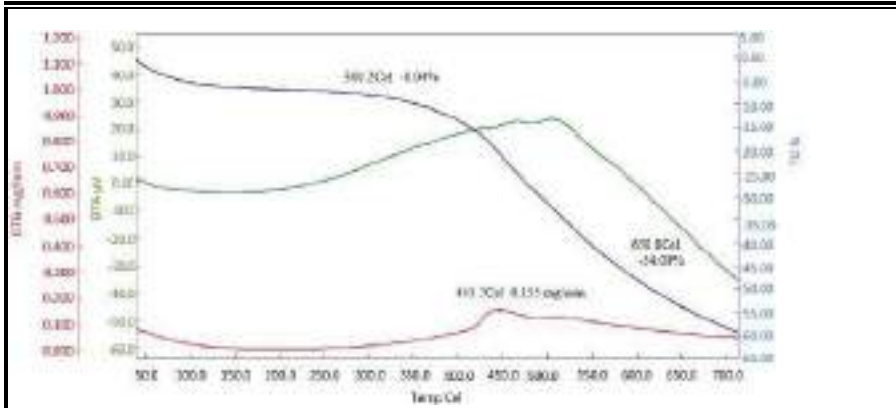
Rangkuman data pembakaran

Parameter	Estimasi Nilai
Ignition Temperature (Ti)	$\pm 320\text{--}350$ °C
Peak Devolatilization	± 445 °C
Burnout Temperature (Tb)	± 650 °C
Rentang pembakaran utama	$300\text{--}650$ °C
Interpretasi Reaktivitas (a) Rentang pembakaran cukup lebar → pembakaran berlangsung bertahap. (b) Puncak DTG yang jelas → kandungan volatile signifikan. (c) Burnout di bawah 700 °C → menunjukkan pembakaran relatif baik.	
Implikasi Termokimia 1. Sampel memiliki volatile matter aktif pada 300–500 °C . 2. Struktur karbon terbakar stabil hingga 650 °C. (a) Cocok untuk aplikasi: Co-firing PLTU	

- (b) Briket biomassa–batubara
- (c) Gasifikasi tahap awal

Analisis TGA-DTA sampel LRC 90% + GCS 10%

Hasil sample LRC 90% + GCS 10% diperlihatkan pada Gambar 5 di bawah ini



Gambar 5: TGA-DTA sampel LRC 90% + GCS 10% basis massa

Berdasarkan hasil pengujian TGA-DTA sampel LRC90% + GCS 10% diuraikan sebagai berikut:

Tahap I: Penguapan Moisture (30–150 °C)

Indikator kurva TG menurun sedikit dan agak landai.

Tidak terdapat puncak signifikan pada kurva DTG

Heat flow menunjukkan reaksi endothermik ringan atau penyerapan kalor dalam kondisi ringan.

Interpretasi dari tahap penguapan moisture menunjukkan karakteristik sebagai berikut:

- (a) Pelepasan moisture permukaan dan sedikit moisture inherent
- (b) Indikator terjadi penurunan massa yang relative kecil
- (c) Indikator stabilitas kalor baik pada suhu rendah.

Tahap II: Devolatilisasi Utama ($\pm 280\text{--}450\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Terjadi penurunan massa yang signifikan pada suhu sekitar $290\text{--}310\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pada suhu $310\text{ }^{\circ}\text{C}$, **puncak DTG pertama mulai tampak, dan pada suhu $430\text{--}460\text{ }^{\circ}\text{C}$ nampak** puncak DTG utama.

Kurva heat flow menunjukkan reaksi eksotermik (pelepasan kalor) yang dominan.

Kondisi Devolatilisasi utama ini mengindikasikan terjadinya hal sebagai berikut :

Volatile Matter dilepaskan secara intensif.

Terjadi oksidasi(pembakaran) komponen organik yang aktif
Faktor penyebabnya ialah penambahan GCS ke dalam LRC meningkatkan kandungan VM Karena kandungan VM di dalam GCS cukup tinggi, sebagai implikasi dari kandungan hemisellulosa dan selulosa yang terdekomposisi. Faktor ini yang mengakibatkan devolatilisasi fraksi LRC.

Ignition Temperature (T_i), ($310\text{--}330\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Ignition temperature ditandai dengan tren kurva DTG meningkat tajam .

Tahap III: Pembakaran Fixed Carbon / Char ($450\text{--}650\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Pada temperatur ini Kurva TG terus menurun hingga $\pm 650\text{--}670\text{ }^{\circ}\text{C}$.

DTG menunjukkan penurunan bertahap setelah puncak utama. Mendekati $670\text{ }^{\circ}\text{C}$, laju kehilangan massa mendekati nol.

Interpretasi:

- (a) Oksidasi char berlangsung lebih lambat.
- (b) Struktur karbon tetap (fixed carbon) terbakar bertahap.
- (c) Menunjukkan kandungan karbon tetap yang cukup signifikan

Burnout Temperature (T_b)

Diperkirakan pada $650\text{--}670\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Parameter Karakteristik Pembakaran

Parameter	Estimasi
Moisture release	<150 °C
Ignition Temperature (Ti)	310–330 °C
Peak Temperature (Tmax)	430–460 °C
Burnout Temperature (Tb)	650–670 °C
Rentang pembakaran aktif	300–650 °C

Evaluasi Reaktivitas Pembakaran

1. Rentang pembakaran cukup lebar → reaksi berlangsung secara bertahap.
2. Puncak DTG jelas → reaktivitas volatil tinggi.
3. Burnout <700 °C → pembakaran relatif efisien.
4. Jika dibandingkan dengan karakter umum:
 - o Biomassa → Ti lebih rendah (~250–300 °C)
 - o LRC → Ti 300–350 °C
 - o Char → >400 °C

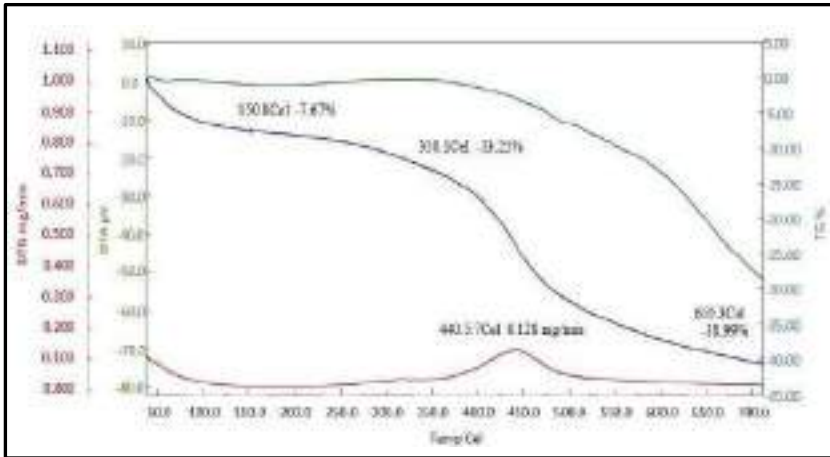
Karakter ini menunjukkan **reaktivitas sedang–tinggi**, khas LRC atau blending biomassa.

Implikasi Termokimia

- (a) Stabil pada suhu rendah.
- (b) Devolatilisasi dominan pada 300–500 °C.
- (c) Oksidasi karbon tetap hingga 650 °C.
- (d) Cocok untuk:
 - o Co-firing PLTU
 - o Briket batubara–biomassa
 - o Fluidized bed combustion

Analisa Sampel LRC 85% + GCS 15 %

Sampel LRC 85% + GCS 15% diperlihatkan pada Gambar kurva 6 di bawah ini:



Gambar 6 : TGA-DTA sampel LRC 85% + GCS 15% basis massa

Berdasarkan Kurva TGA-DTA sampel LRC 85% + GCS 15% di atas, maka dapat diuraikan hasil seperti di atas sebagai berikut :

Kurva TGA–DTA–DTG pada gambar menunjukkan karakteristik degradasi termal sampel biomassa/batubara campuran terhadap kenaikan temperatur dari sekitar 50–700 °C. Analisis dilakukan berdasarkan tiga parameter utama, yaitu perubahan massa (TG), laju kehilangan massa (DTG), dan perubahan energi termal (DTA).

1. Analisis Kurva TG (Thermogravimetric)

Kurva TG (garis biru) menunjukkan persentase kehilangan massa sampel selama pemanasan. Berdasarkan grafik, proses degradasi termal berlangsung dalam beberapa tahapan utama:

a. Tahap I : Penguapan Air dan Zat Volatil Ringan (50–150°C)

Pada temperatur sekitar 150,8 °C terjadi kehilangan massa sebesar **7,67%**. Tahap ini umumnya berkaitan dengan:

- penguapan kadar air bebas,
- pelepasan moisture terikat,

- serta senyawa volatil ringan.

Fenomena ini menunjukkan bahwa sampel masih memiliki kandungan air dan komponen mudah menguap yang relatif cukup tinggi.

b. Tahap II : Devolatilisasi Awal (150–350°C)

Pada temperatur sekitar 350,1°C, kehilangan massa meningkat menjadi **13,25%**. Tahapan ini mengindikasikan:

- mulai terdegradasinya hemiselulosa dan sebagian selulosa (jika biomassa),
- pelepasan volatile matter,
- serta awal dekomposisi struktur organik.

Pada campuran biomassa–batubara, daerah ini biasanya menunjukkan interaksi antara komponen lignoselulosa biomassa dan fraksi volatile batubara peringkat rendah.

c. Tahap III : Degradasi Utama dan Pembakaran Karbon (350–650°C)

Penurunan massa paling signifikan terjadi pada rentang 350–650°C dengan total kehilangan massa mencapai **38,99%** pada 650,3°C.

Tahap ini merupakan fase utama yang mencerminkan:

- dekomposisi lignin,
- pembakaran fixed carbon,
- oksidasi char,
- serta reaksi termal intensif dari material karbon.

Penurunan massa yang cukup besar menunjukkan bahwa sampel memiliki kandungan bahan organik dan karbon aktif yang cukup dominan.

2. Analisis Kurva DTG (Derivative Thermogravimetry)

Kurva DTG (garis merah) menunjukkan laju kehilangan massa terhadap temperatur.

Puncak maksimum DTG terjadi pada:

- **440,5°C**
 - dengan laju degradasi maksimum sekitar **0,128 mg/min**
- Puncak ini menunjukkan temperatur dimana proses dekomposisi termal berlangsung paling cepat. Temperatur maksimum DTG biasanya dikaitkan dengan:
- pembakaran utama volatile matter,
 - oksidasi char,
 - dan degradasi karbon kompleks.

Nilai DTG yang relatif moderat mengindikasikan bahwa proses pembakaran berlangsung secara bertahap dan stabil, bukan sangat eksplosif.

3. Analisis Kurva DTA (Differential Thermal Analysis)

Kurva DTA (garis hijau) menunjukkan perubahan energi panas selama proses pemanasan.

Terlihat bahwa:

- pada temperatur rendah, perubahan energi relatif kecil,
- kemudian mulai terjadi penurunan tajam setelah sekitar 400°C.

Fenomena ini mengindikasikan terjadinya reaksi termal eksotermik akibat:

- pembakaran volatile matter,
- oksidasi karbon,
- dan pembentukan abu/residu mineral.

Penurunan kurva DTA yang semakin tajam pada temperatur tinggi menunjukkan bahwa reaksi oksidasi berlangsung semakin intensif.

4. Interpretasi Karakteristik Termal Sampel

Berdasarkan keseluruhan kurva TGA–DTA–DTG, dapat disimpulkan bahwa sampel memiliki karakteristik berikut:

1. **Stabilitas termal awal cukup baik** hingga sekitar 300°C.
2. **Degradasi utama terjadi pada 350–650°C**, menunjukkan dominasi material karbon dan senyawa

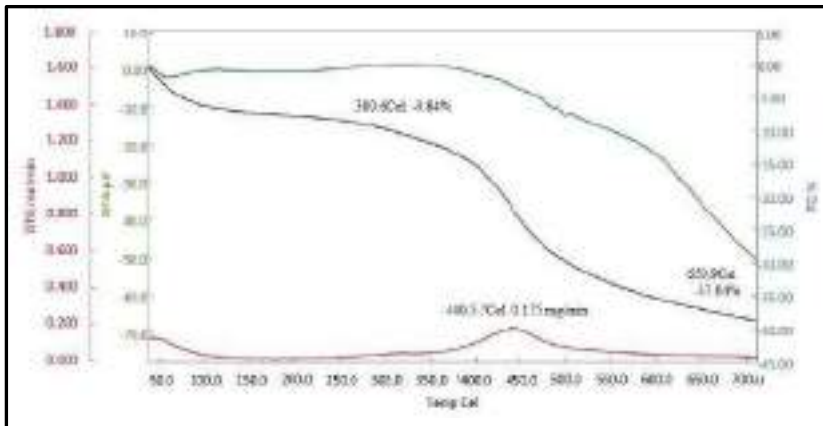
organik kompleks.

3. Puncak DTG pada sekitar 440°C menunjukkan temperatur optimum dekomposisi/pembakaran utama.
4. Kehilangan massa total sekitar 39% mengindikasikan:
 - o kandungan volatile matter dan fixed carbon yang cukup tinggi,
 - o serta masih adanya residu abu/mineral setelah pembakaran.
5. Pola degradasi bertahap menunjukkan bahwa sampel berpotensi memiliki karakter pembakaran yang relatif stabil dan cocok untuk aplikasi bahan bakar padat atau co-firing.

Analisis TGA–DTA menunjukkan bahwa sampel mengalami tiga tahap utama degradasi termal, yaitu penguapan moisture, devolatilisasi, dan pembakaran karbon utama. Kehilangan massa terbesar terjadi pada temperatur tinggi dengan puncak laju degradasi pada 440,5°C. Karakteristik ini menunjukkan bahwa sampel memiliki stabilitas termal yang baik pada temperatur rendah dan reaktivitas pembakaran yang meningkat pada temperatur menengah hingga tinggi. Dengan demikian, material ini berpotensi digunakan sebagai bahan bakar alternatif atau campuran batubara karena menunjukkan perilaku termal yang stabil dan pembakaran yang progresif.

Analisa TGA-DTA Sampel LRC 80% + GCS 20%

Hasil analisis DTA-TGA sampel LRC 80%+GCS 20% ini dipresentasikan pada gambar 7 di bawah ini:



Gambar 7 : TGA-DTA sampel LRC 80% + GCS 20% basis massa

Analisis TGA-DTA sampel LRC 80% + GCS 20% diuraikan sebagai berikut :

Tahap I: Penguapan Moisture (30–150 °C)

Pada tahap ini diindikasikan dalam kurva sebagai berikut

- Terjadi penurunan massa kecil dan gradual.
- Tidak terlihat puncak signifikan pada DTG.
- Heat flow menunjukkan reaksi endotermik ringan.

Interpretasi:

- Penguapan air bebas dan sebagian air terikat.
- Kehilangan massa relatif kecil hal ini disebabkan oleh kadar air tidak dominan.
- Stabilitas termal baik pada suhu rendah.

Tahap II: Devolatilisasi Utama (±280–450 °C)

Tahap ini diindikasikan oleh ciri kurva sebagai berikut:

- Kurva TG mulai menurun tajam sekitar 290–310 °C.
- Puncak DTG pertama muncul sekitar 300 °C.
- Puncak DTG utama berada pada kisaran 430–460 °C.
- Heat flow menunjukkan reaksi eksotermik yang kuat atau reaksi pelepasan kalor yang signifikan.

Interpretasi:

- Pelepasan volatile matter secara intensif.
- Reaksi oksidasi komponen organik aktif berlangsung cepat.
- Pengaruh penambahan GCS sampel biomassa dimana kandungan hemiselulosa dan selulosa terdegradasi.
- LRC menunjukkan devolatilisasi fraksi ringan dan oksidasi awal.

Ignition Temperature (Ti)

Diperkirakan pada **310–330 °C**.

Tahap III: Oksidasi Fixed Carbon / Char (450–670 °C)

Oksidasi atau pembakaran Fixed Carbon diindikasikan oleh :

- Penurunan massa berlanjut hingga $\pm 650\text{--}680\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- DTG menunjukkan penurunan laju reaksi setelah puncak utama.
- Mendekati $670\text{ }^{\circ}\text{C}$, kurva TG mulai stabil.

Interpretasi:

- Oksidasi karbon tetap berlangsung lebih lambat.
- Kandungan fixed carbon cukup signifikan.
- Struktur karbon terbakar bertahap hingga burnout.

Burnout Temperature (Tb)

Diperkirakan pada **650–680 °C**.

Rangkuman Parameter Karakteristik Pembakaran

Parameter	Estimasi suhu
Moisture release	<150 °C
Ignition Temperature (Ti)	310–330 °C
Peak Temperature (Tmax)	430–460 °C
Burnout Temperature (Tb)	650–680 °C
Rentang pembakaran aktif	300–650 °C

Evaluasi Reaktivitas pembakaran sampel

- Rentang pembakaran yang cukup lebar diindikasikan oleh reaksi yang berlangsung secara bertahap.
- Puncak DTG tajam akibat kandungan volatile cukup tinggi.
- Burnout $< 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\rightarrow$ pembakaran relatif efisien.
- Karakteristik menunjukkan reaktivitas sedang–tinggi.

Jika dibandingkan secara umum:

- Biomassa murni yang diindikasikan oleh burn ignition T_i lebih rendah ($\sim 250\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- LRC terjadi pada suhu ignition T_i $300\text{--}350\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Pembakaran biochar pada suhu $> 400\text{ }^{\circ}\text{C}$

Karakter ini lebih mendekati **LRC atau blending LRC–biomassa**.

Implikasi Termokimia

- Stabil pada suhu rendah.
- Devolatilisasi dominan pada $300\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Oksidasi karbon tetap hingga $\pm 670\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Cocok untuk:
 - o Co-firing PLTU
 - o Briket batubara–biomassa
 - o Fluidized bed combustion

3.5. ENERGI AKTIVASI

Untuk menghitung energi aktivasi digunakan beberapa cara sebagai berikut :

Metode yang paling umum dipakai:

- 1. Kissinger**
- 2. Ozawa–Flynn–Wall (OFW)**
- 3. Coats–Redfern**

Berdasarkan data kurva pada gambar 4 dan hasil rekaman data excel dan laju pemanasan $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{menit}$, dengan menggunakan

metode **Coats–Redfern**; maka dilakukan pengambilan data sebagai berikut:

1. Heating rate: 10 °C/menit
2. Temperatur puncak DTG $T_p=441.8^{\circ}\text{C}= 441,8 + 273,15 = 714,95 \text{ K}$

Maka energi aktivasi

$$E_a \approx RT_p^2 \left(\frac{d \ln \beta / 2}{d(1/T_p)} \right)$$

Oleh karena laju pemanasan β hanya 1 data hanya dapat memakai estimasi tipikal material berdasarkan posisi puncak DTG. Berdasarkan hasil analisis TGA-DTA, degradasi utama terjadi sekitar 400–500 °C, dan 1 puncak yang dominan yaitu 441.8 °C.

Maka estimasi Energi Aktivasi $E_a \approx 140 - 190 \text{ kJ/mol}$
Atau rata-rata $E_a = 165 \text{ kJ/mol}$

Dengan cara yang sama dengan perhitungan energi aktivasi maka hasil untuk seluruh sampel ditabulasi pada Tabel 3 di bawah ini :

Tabel 3. Energi Aktivasi E_a

No	Sampel	Energi Aktivasi (E_a) (kJ/mol)
1	LRC 100%	157,5
2	LRC 90% + GCS 10%	145
3	LRC 85% + GCS 15%	135
4	LRC 20% + GCS 20%	122,5

3.6. INDEKS PEMBAKARAN

Indeks pembakaran sering disebut kinerja pembakaran, di mana nilai ini berkisar antara 0 sampai 1. Angka mendekati 1 berarti memiliki indeks pembakaran yang baik.

Untuk menghitung **indeks pembakaran** dari kurva TGA–DTG, diperlukan beberapa parameter utama yang biasanya diambil langsung dari data numerik hasil TGA, yaitu:

- Temperatur penyalaan (**Ignition Temperature, T_i**)
- Temperatur burnout (**Burnout Temperature, T_b**)
- Laju kehilangan massa maksimum (**DTG_{max}**)
- Laju kehilangan massa rata-rata (**DTG_{mean}**)
- Massa awal dan massa akhir sampel

Rumus yang umum digunakan:

1. Indeks Karakteristik Pembakaran Menyeluruh

$$S = \frac{DT_{max} \cdot DT_{avg}}{T_i^2 \cdot T_b}$$

Berdasarkan data excel dan kurva gambar 4 di atas maka diperoleh data sebagai berikut :

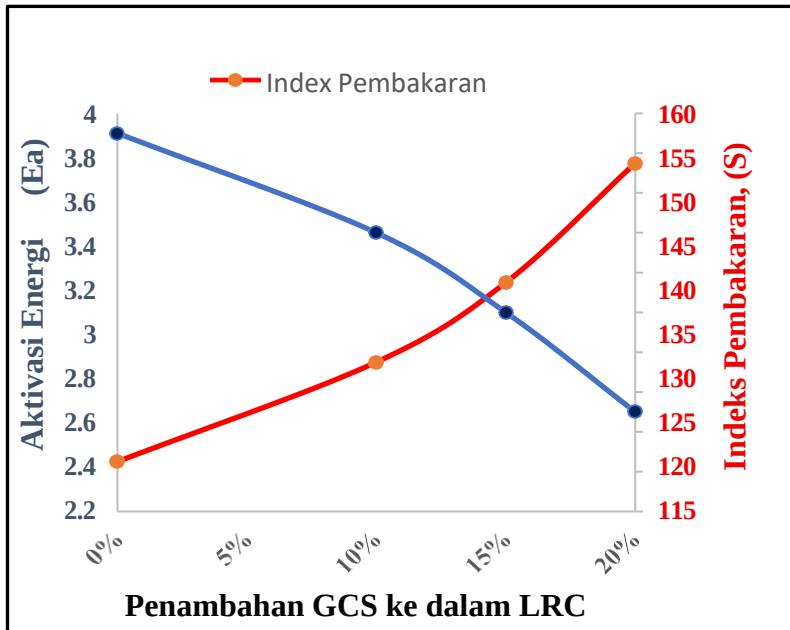
Ignition Temperature (T_i °C)	330-350
Peak Temperature (T_{max} °C)	460-480
Burnout Temperature (T_b °C)	680-720
DTG max (%/min)	3.8-4.2

Sehingga diperoleh Indeks Pembakaran $S \approx (2,0 - 2,5 \times 10^{-7})$ Dengan cara yang sama maka hasil selengkapnya ditabelkan pada Tabel Indeks Pembakaran di bawah ini:

Tabel 4. Indeks pembakaran (S)

No	Sampel	Indeks Pembakaran S ($\times 10^{-7}$)
1	LRC 100%	2.0-2.5
2	LRC 90% + GCS 10%	2.6-2.9
3	LRC 85% + GCS 15%	3.0-3.3
4	LRC 80% + GCS 20%	3.5-4.0

Dengan menggabung Tabel 3 dan table 4 di atas maka dibuat kurva hubungan antara sampel terhadap Aktivasi Energi dan Indeks Pembakaran seperti pada Kurva Gambar 8 di bawah ini :



Gambar 8. Kurva persentase penambahan GCS ke dalam LRC terhadap Energi aktivasi E_a dan Indeks Pembakaran S

Berdasarkan kurva pada Gambar 8 di atas diuraikan sebagai berikut Efek penambahan GCS ke dalam LRC tercermin pada semakin meningkatnya persentase penambahan GCS ke dalam LRC yang menurunkan aktivasi energi, namun sebaliknya, peningkatan penambahan GCS ke dalam LRC meningkatkan indeks pembakaran.

Penurunan energi aktivasi (E_a) menunjukkan bahwa lebih sedikit energi yang dibutuhkan untuk memicu reaksi oksidasi. Dari perspektif kinetik, ini berarti bahwa dekomposisi volatil dan tahap awal oksidasi terjadi lebih mudah pada suhu yang lebih rendah. Perilaku ini juga mencerminkan efek sinergis termal, di mana volatil yang dilepaskan dari biomassa mendorong oksidasi partikel batubara dengan meningkatkan difusi oksigen, meningkatkan suhu mikro lokal, dan menghasilkan porositas

tambahan di dalam struktur LRC. Peningkatan nilai S menunjukkan laju pembakaran yang lebih tinggi, proses penyalaan yang lebih cepat, dan pembakaran yang lebih efisien. Indeks pembakaran adalah parameter komprehensif yang menggabungkan: Peningkatan nilai S menunjukkan bahwa sistem pembakaran lebih responsif terhadap pemanasan eksternal.

Melihat pertimbangan antara aktivasi energi dan indeks pembakaran memberikan Kesimpulan optimasi penambahan GCS ke dalam LRC Adalah antara 12 sampai 15%.

Hasil kajian di atas menunjukkan bahwa penambahan arang tempurung kelapa hijau (GCS) sebagai komponen campuran dalam batubara berperingkat rendah (LRC) menawarkan potensi yang cukup besar untuk meningkatkan kinerja pembakaran, menurunkan energi aktivasi sistem, mendorong strategi pembakaran bersama berbasis biomassa, dan mengurangi ketergantungan pada penggunaan batubara saja. Dari sudut pandang praktis, proporsi campuran 12-15% disarankan sebagai kisaran yang paling sesuai untuk implementasi skala industri.

REFERENSI:

- Adekunle, J., Ibrahim, J., & Kucha, E. (2015). Proximate and Ultimate Analyses of Biocoal Briquettes of Nigerian's Ogboyaga and Okaba Sub-bituminous Coal. *British Journal of Applied Science & Technology*, 7(1), 114–123. <https://doi.org/10.9734/bjast/2015/15154>
- Bampenrat, A., Sukkathanyawat, H., & Seangwattana, T. (2021). *Coal / biomass co-combustion investigation by thermogravimetric analysis. 01002*.
- Bhuiyan, A. A., Blicblau, A. S., Islam, A. K. M. S., & Naser, J. (2018). A review on thermo-chemical characteristics of coal/biomass co-firing in industrial furnace. *Journal of the Energy Institute*, 91(1), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.10.006>
- Hutrindo, E., Hardianto, T., & Suwono, A. (2006). *Characterization of The Ash Residues from The Co-combustion of Coal Mixed with Various Biomass / Peat. Table 1*, 1–7.
- Jayaraman, K., Kok, M. V., & Gokalp, I. (2017). Thermogravimetric and mass spectrometric (TG-MS) analysis and kinetics of coal-biomass blends. *Renewable Energy*, 101, 293–300. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.072>
- Khatami, R., & Levendis, Y. A. (2016). An overview of coal rank influence on ignition and combustion phenomena at the particle level. In *Combustion and Flame* (Vol. 164, pp. 22–34). <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2015.10.031>
- Kopczyński, M., Lasek, J. A., Iluk, A., & Zuwała, J. (2017). The co-combustion of hard coal with raw and torrefied biomasses (willow (*Salix viminalis*), olive oil residue and waste wood from furniture manufacturing). *Energy*, 140,

- 1316–1325. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.036>
- Patabang, D., Arif, E., & Aziz, N. (2019). *Developments (JMERD) the effect of adding candlenut shell into the low-rank coal on.* 42(2), 30–35. <https://ideas.repec.org/a/zib/zjmerd/v42y2019i1p116-121.html>
- Patabang, D., Arif, E., Jalaluddin, & Azis, N. (2019). Combustion reactivity of low rank coal by the mixture of candlenuts shell. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 619(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/619/1/012014>
- Patabang, D., Basri, Siang, J. T., & Seleng, K. (2024). Effect of cocoa pods husk blending on combustion characteristics of the low-rank coal analyzed in TGA. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 44(6), 605–613. <https://doi.org/10.1080/19392699.2023.2212597>
- Patabang, D., Sam, A., & Basri. (2023a). Thermochemical Characteristics of Briquettes of the Low-Rank Coal Mixed with Charcoal Sawdust of Meranti Wood. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1157(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1157/1/012039>
- Patabang, D., Sam, A., & Basri, B. (2023b). Characteristics of co-combustion of low-rank coal mixed with cocoa POD husk. *AIP Conference Proceedings*, 2719. <https://doi.org/10.1063/5.0133429>
- RI, T. M. of E. and M. R. (ESDM). (2025). *RI Coal Reserves Reach 31*.
- Rodilla, I., Contreras, M. L., & Bahillo, A. (2018). Thermogravimetric and mass spectrometric (TG-MS) analysis of sub-bituminous coal-energy crops blends in N₂, air and CO₂/O₂ atmospheres. *Fuel*, 215(May 2017), 506–

514. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.09.102>

Ullah, H., Liu, G., Yousaf, B., Ali, M. U., Abbas, Q., & Zhou, C. (2017). Combustion characteristics and retention-emission of selenium during co-firing of torrefied biomass and its blends with high ash coal. *Bioresource Technology*, 245(July),73–80.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.144>

Yuan, Y., He, Y., Tan, J., Wang, Y., Kumar, S., & Wang, Z. (2021). *Co-Combustion Characteristics of Typical Biomass and Coal Blends by Thermogravimetric Analysis*. 9(October),1–11.

<https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.753622>

BAB IV

EFEK PENAMBAHAN LIMBAH BIOMASSA ARANG TONGKOL JAGUNG TERHADAP KINERJA PEMBAKARAN BATUBARA PERINGKAT RENDAH

Cadangan Batubara Indonesia menurut Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) tahun 2024 mencapai 31,9 miliar ton (RI, 2025). Dari Cadangan ini terdapat sekitar 84% Batubara peringkat rendah (*Low-Rank Coal, LRC*) (Arinaldo & Adiatma, 2019). LRC memiliki nilai kalor antara 5.100 -6.100 kcal/kg, kandungan, moisture antara 30- 40%, dan memiliki suhu nyala yang rendah sekitar 1.050 K (Khatami & Levendis, 2016). Tingginya kandungan moisture berdampak terhadap rendahnya reaktivitas pembakaran, dan rendahnya suhu nyala yang berimplikasi berimplikasi pada rendahnya efisiensi pembakaran. Batubara ini juga memiliki kandungan sulphur (S), dan Nitrogen (N₂) yang relative tinggi, disamping itu batubara secara umum memiliki kandungan karbon terpendam, sehingga jika dibakar menghasilkan emisi gas CO₂, CO, NO_x dan SO_x yang relatif tinggi. Hal ini berpotensi meningkatkan pemanasan global. Polutan NO_x dan SO_x dapat meningkatkan hujan asam, korosi terhadap material logam, berbahaya terhadap kesehatan manusia dan lingkungan hidup seperti tanaman, bahkan dapat menimbulkan *slaging* dan *fouling* pada pipa alat perpindahan kalor di dalam boiler (Kopczyński et al., 2017) Salah satu strategi untuk memperbaiki kinerja pembakaran batubara adalah dengan *co-firing* dengan biomassa. Metode *co-firing* memiliki fungsi ganda yaitu dapat memperbaiki kinerja pembakaran batubara, dan dapat memanfaatkan limbah biomassa yang cukup potensial dalam rangka efisiensi pemanfaatan energi fosil seperti batubara. Potensi biomassa di Indonesia berdasarkan data Kementrian ESDM adalah 56,97 GW (Ministry of Energy and Mineral Resources of the Republic of Indonesia - Media Center - News Archive - Promising Biomass

Potential, Indonesia Predicts to Produce 56, n.d.). Beberapa hasil penelitian yang memanfaatkan biomassa untuk memperbaiki kinerja pembakaran batubara antara lain :Pengaruh penambahan *Candlenut Shell* (CNS) ke dalam Batubara peringkat rensah (*Low Rank Coal*,LRC) memperlihatkan peningkatan kinerja pembakaran LRC yaitu meningkatkan efisiensi termal, meningkatkan reaktivitas pembakaran dan menurunkan emisi gas hasil pembakaran CO₂,CO,NO_x, dan SO_x dengan jumlah penambahan optimal 10% (Patabang, Arif, & Aziz, 2019)(Patabang, Arif, Jalaluddin, et al., 2019)(Patabang et al., 2021); penambahan Limbah arang kulit daging buah kakao (*Cocoa pods husk*, CPH) ke dalam LRC, dengan metode TGA juga meningkatkan kinerja pembakaran diperoleh hasil optimal pada penambahan 10% CPH(Patabang et al., 2024); Co-firing antara berbagai biomassa pellet kayu, cangkang sawit, cangkang walnut dan berbagai biomassa yang telah di torifaksi yang dicampur dengan LRC dan disimulasikan dalam simulator pembakaran boiler 500 Mve diperoleh peningkatan efisiensi boiler. Berdasarkan hasil review jurnal di atas disimpulkan bahwa efek penambahan biomassa ke dalam batubara melalui pembakaran bersama menunjukkan peningkatan kinerja pembakaran. Salahsatu limbah biomassa yang memiliki potensi untuk di *co-firing* dengan LRC adalah arang tongkol jagung. Menurut data Kementerian Pertanian, pada kegiatan pertanian jagung akan menghasilkan limbah tongkol jagung 20,87% dan 19,13%, yang terdiri dari batang, daun, dan kelobot. Produksi jagung rata-rata sebanyak 12.193.101 ton per tahun. Produksi tersebut akan menghasilkan limbah tongkol jagung sekitar 8.128.734 ton per tahun(Limbah et al., 2024). Dari hasil review jurnal, belum ditemukan efek penambahan limbah biomassa arang tongkol jagung (Corn cob Biochar,CCB) yang dibakar bersama dengan batubara, sehingga penelitian ini diusulkan untuk mengkaji efek penambahan CCB ke dalam batubara melalui analisis termogravimetri.

4.1. Bahan Baku

Bahan baku LRC dan tongkol jagung seperti diperlihatkan pada gambar 1, dan 2 di bawah ini :



Gambar 1 : LRC



Gambar 2: Tongkol jagung

1.1. Prosedur Penelitian

- 1) LRC dan Tongkol Jagung secara terpisah dibersihkan dari kotoran yang menempel
- 2) Tongkol jagung dipretreatmen melalui dry torrifaction pada suhu 250-350 °C di dalam furnace listrik selama 30 menit (Ullah et al., 2017)
- 3) Tongkol jagung dikarbonasi di dalam drum karbonasi(Kim et al., 2017)
- 4) LRC dan arang tongkol jagung (CCB) di hancurkan di dalam mesin penghancur secara terpisah dan disaring dengan ukuran saringan 40 mesh(Verma et al., 2017)(Xue et al., 2018)
- 5) Pencampuran LRC-CCB dengan menambahkan 10%,20%,30% CCB ke dalam LRC dan diaduk di dalam mesin pencampur selama 30 menit untuk mendapatkan campuran homogen
- 6) Analisis Proksimasi dan Ultimasi berdasarkan stnadard ASTM(Noushabadi et al., 2021)(Adekunle et al., 2015)
- 7) Analisis TGA-DTA (Bampenrat et al., 2021)(Chen et al., 2019)

4.2. Karakterisasi

Karakterisasi sampel LRC dan CCB dilakukan untuk mengetahui

1. propertis termal melalui analisis proksimat yang terdiri atas : Kandungan VM, kandungan M, Kandungan FC, dan kandungan HHV, 2 Propertis kimia dari sampel melalaui analisis ultimasi yang meliputi : kandungan C, kandungan S, kandungan H₂, dan kandungan O₂.

Hasil karakterisasi termal dipresentasikan pada Tabel 1, dan karakterisasi kimia pada table 2 sebagai berikut:

Tabel 1 : Hasil Proximate Analysis

No	Kode sampel	Parameter Analisis				
		VM	M	A	FC	HHV
		%	%	%	%	
		adb	adb	adb	adb	kcal/kg
						4900,0
1	LRC 100%	34,43	16,58	6,59	42,40	2
	LRC 90% + CCB					5027,1
2	10%	36,25	15,50	6,79	41,46	2
	LRC 80% + CCB					5134,7
3	20%	36,94	14,52	6,93	41,61	7
	LRC 70% + CCB					5269,3
4	30%	39,08	12,86	7,25	40,81	9
	LRC 60% + CCB					5389,8
5	40%	39,89	11,89	7,38	40,84	9

Tabel 2 Ultimate Analysis

No	Kode sampel	Parameter Analisis				
		C	S	N ₂	O ₂	H ₂
		%	%	%	%	%
		adb	adb	adb	adb	adb
1	LRC 100%	52,55	0,64	0,92	40,39	5,5
	LRC 90% + CCB					
2	10%	53,76	00,57	0,95	39,90	5,35
3	LRC 80% + CCB	55,32	00,51	0,98	38,50	5,16

	20%					
	LRC 70% + CCB					
4	30%	56,91	00.47	1,02	37,12	4,92
	LRC 60% + CCB					
5	40%	58,51	00.43	1,05	35,90	4,51

4.3. Efisiensi Pembakaran Briket

Metode yang digunakan untuk pengujian efisiensi termal keseluruhan untuk pembakaran briket pada kompor briket mengacu kepada salahsatu metode yang disarankan FAO/RWEDP, 1993a,1993b yaitu **metode pengujian pendidihan air**.

Metode ini dilakukan dengan memanaskan sejumlah air sampai mendidih pada kompor dengan menggunakan briket sebagai bahan bakar. Volume air yang diuapkan sesudah pembakaran dan sejumlah bahan bakar briket yang digunakan dihitung, sehingga efisiensi termal dapat dihitung sebagai berikut :

$$\eta_{th} = \frac{[M \times C_{pl} \times (T_b - T_a) + M_1 \times C_{pv} (T_b - T_a) + M_2 \times H_L]}{LHV \times \dot{m} \times t}$$

Dimana :

η_{th} adalah efisiensi termal pembakaran briket pada kompor briket (%)

M adalah massa air mula-mula (kg)

M_1 adalah massa panci (kg)

M_2 adalah massa uap air (kg)

C_{pl} adalah kalor spesifik air (kJ/kg °C)

C_{pv} adalah kalor spesifik panci (kJ/kg °C)

H_L adalah kalor laten dari uap (kJ/kg)

LHV adalah nilai kalor bawah briket (kJ/kg)

$\dot{m}$ adalah massa briket yang terpakai selama pendidihan air

(kg/menit)

T_a adalah temperatur ambien dari air ($^{\circ}\text{C}$)

T_b adalah temperatur uap air ($^{\circ}\text{C}$)

t adalah durasi waktu pendidihan air (menit)

Nilai kalor bawah: $LHV = HHV - 1030(H_2 \times 8.94) \quad \text{Btu/lb}$

Dimana :

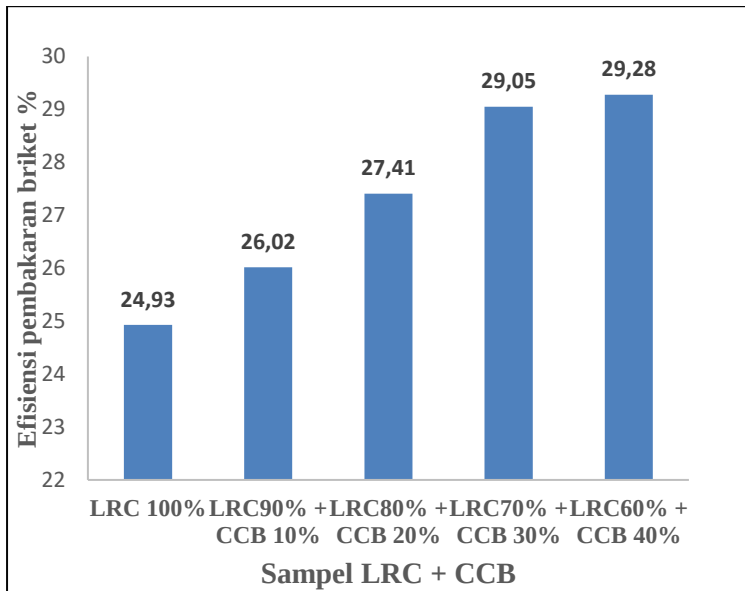
HHV adalah nilai kalor atas (Btu/lb)

H_2 adalah persentase massa hidrogen (%)

Tabel 3. Efisiensi Termal pembakaran briket

Sampel briket	Efisiensi Thermal Briket (%)
LRC 100%	24,93
LRC90% + CCB 10%	26,02
LRC80% + CCB 20%	27,41
LRC70% + CCB 30%	29,05
LRC60% + CCB 40%	29,28

Berdasarkan hasil pengujian efisiensi termal pembakaran briket maka dibuat kurva
Pada gambar 3 di bawah ini;



Gambar 3 : Efisiensi termal pembakaran briket.

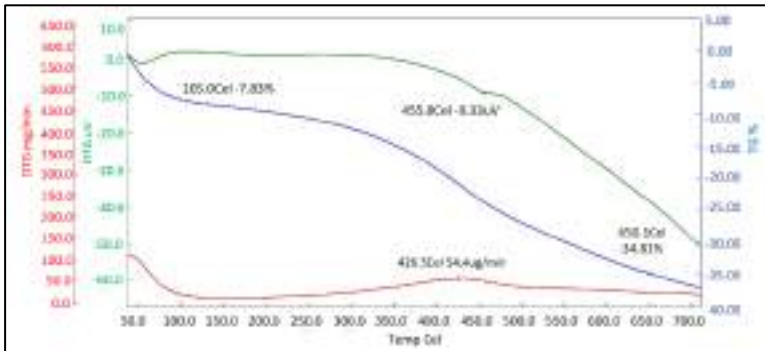
Efek penambahan CCB ke dalam LRC meningkatkan efisiensi termal briket, semakin bertambah penambahan CCB berimplikasi terhadap peningkatan efisiensi thermal pembakaran secara signifikan. Faktor yang menyebabkan peningkatan efisiensi thermal ini Adalah tingginya kandungan VM, dan HHV di dalam CCB, bahkan kenungan M di dalam CCB yang sangat kecil dibandingkan dengan kandungan M di dalam LRC.

4.4. Hasil Analisis TGA-DTA

Termogravimetri, analisis termal diferensial, dan analisis termal dilakukan untuk melihat perilaku termal dan massa dari sampel sehingga karakteristik pembakaran sampel terlihat dengan baik, dan melalui analisis ini akan diperoleh indeks pembakaran yang merupakan indikator baik-tidaknya suatu bahan bakar dari sisi termal dan dapat diperoleh nilai energi aktivasi setelah sampel dipanaskan dalam rentang suhu 30–700 °C, dengan laju pemanasan 10 °C/menit.

Hasil TGA-DTA sampel dipresentasikan sebagai berikut;

LRC 100%



Gambar : 3 TGA-DTA- Sampel LRC 100%

Berdasarkan hasil uji TGA-DTA dapat dilihat 3 jenis kurva yaitu :

- **Kurva TG (Biru):** Menunjukkan persentase perubahan massa sampel (%).
- **Kurva DTA (Hijau):** Menunjukkan perbedaan suhu antara sampel dan referensi (uV), yang mengindikasikan reaksi endotermik atau eksotermik.
- **Kurva DTG (Merah):** Menunjukkan laju penurunan massa (mg/min), mempermudah identifikasi suhu di mana degradasi terjadi paling cepat.

Tahapan Degradasi Massa

Analisis menunjukkan bahwa material mengalami dua tahap utama penurunan massa:

- a) **Tahap Pertama (Suhu Ruang – 150 °C):**
 - o Terjadi penurunan massa sebesar **15,14%** yang tercatat pada suhu **150,1 °C**.
 - o Laju penurunan massa tercepat (puncak **DTG**) terjadi pada suhu **55,9 °C** (0,313 mg/min).
 - o Pada kurva **DTA**, terdapat puncak endotermik yang signifikan pada **61,8 °C** (-29,16 uV).

- o **Analisis:** Tahap ini biasanya dikaitkan dengan penguapan air yang teradsorpsi secara fisik pada permukaan material atau hilangnya pelarut organik ringan yang terperangkap dalam struktur.
- b) **Tahap Kedua (150 °C – 700 °C):**
- o Penurunan massa terus berlanjut hingga mencapai total kehilangan massa sebesar **44,42%** pada suhu **650,8 °C**.
 - o Puncak laju degradasi kedua pada kurva **DTG** terlihat pada suhu **426,3 °C** (0,117 mg/min).
 - o Terdapat pula aktivitas termal pada kurva **DTA** di sekitar suhu **463,5 °C** (-19,58 uV) yang bersifat endotermik.
 - o **Analisis:** Tahap ini menunjukkan dekomposisi termal atau degradasi struktur utama material, seperti pemutusan ikatan kimia atau oksidasi komponen organik dalam sampel.

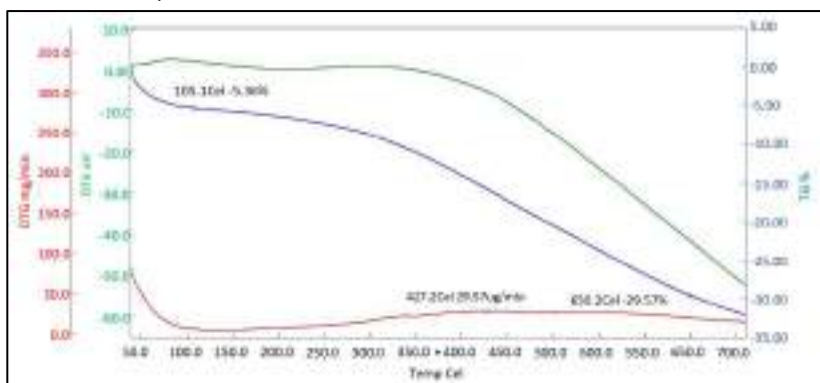
Berdasarkan rekaman data tersebut di atas maka sampel LRC 100% memiliki :

- **Stabilitas Termal:** Material ini relatif tidak stabil pada suhu rendah karena sudah kehilangan sekitar 15% massanya sebelum mencapai 150 °C.
- **Total Massa Tersisa:** Pada akhir pengujian (sekitar 700 °C), massa yang tersisa adalah sekitar **55,58%** (100% - 44,42%) dari berat awal, yang kemungkinan merupakan residu anorganik atau abu. Ini sejalan dengan hasil proximate analysis dalam table 1 di atas .
- **Sifat Reaksi:** Kedua puncak utama pada kurva DTA menunjukkan sifat **endotermik**, yang berarti material memerlukan energi/panas untuk proses penguapan dan dekomposisi tersebut.

Dari rangkuman ini menunjukkan bahwa LRC jika Dibakar secara Tunggal ternyata reaksi pembakarannya didominasi oleh penyerapan energi untuk terbakar, dampak dari hal ini mengindikasikan rendahnya efisiensi pembakaran.

Hasil analisis TGA-DTA sampel LRC 90% + CCB 10%

Hasil analisis TGA-DTA dipresentasikan pada gambar 4 di bawah ini;



Gambar 4 : TGA-DTA Sampel LRC 90% + CCB 10%

Berdasarkan hasil TGA-DTA pada gambar 4 di atas maka dapat diuraikan hasil sebagai berikut:

Tahap degradasi massa sampel terdiri dari 2 tahap yaitu :

Tahap I (Dehidrasi/Penguapan):

- o Terjadi penurunan massa sebesar **10,79%** yang terpantau hingga suhu **150,7°C**.
- o Pada kurva DTA, terdapat puncak endotermik di suhu **56,7°C** (-5,09 uV), yang kemungkinan besar disebabkan oleh penguapan air yang terikat secara fisik atau hilangnya pelarut organik ringan.

Tahap II (Dekomposisi Termal Utama):

- o Penurunan massa yang sangat signifikan terjadi mulai dari suhu sekitar 350°C dan terus berlanjut hingga akhir pengujian.

- o Berdasarkan kurva DTG, laju degradasi maksimum terjadi pada suhu **418,0°C** dengan kecepatan penurunan massa sebesar **0,096 mg/min**. Ini menunjukkan suhu dekomposisi termal utama dari material tersebut.
- o Pada kurva DTA, terdapat titik perubahan di suhu **474,7°C** (-9,73 uV) yang menyertai proses degradasi ini.

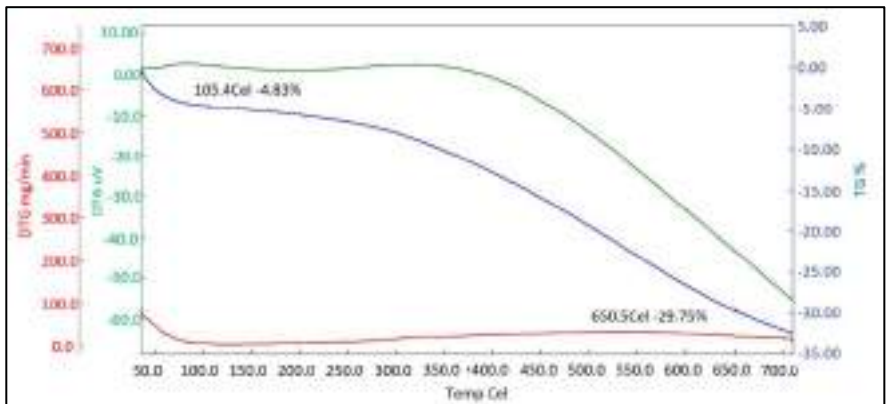
Selanjutnya total degradasi massa, dan tersisanya residu digambarkan sebagai berikut

- Pada suhu **650,7°C**, total kehilangan massa material mencapai **40,00%**.
- Hal ini berarti sekitar **60,00%** dari massa awal sampel tetap menyisakan residu (arang atau material anorganik) pada suhu tersebut.

Berdasarkan ke dua tahap degradasi massa di atas maka dapat disimpulkan bahwa penambahan CCB sebanyak 10 % ke dalam LRC berdampak terhadap stabilitas termal yang cukup baik hingga suhu 350°C setelah melewati fase penguapan air awal. **Dekomposisi struktural utama terjadi secara intensif pada suhu sekitar 418,0°C**, dengan total degradasi sebesar 40% pada suhu di atas 650°C. Kondisi ini berpotensi meningkatkan efisiensi termal yang meningkat.

Sampel LRC 80% + CCB 20%

Hasil TGA-DTA sampel LRC 80% + CCB 20% diperlihatkan pada gambar 5 di bawah ini :



Gambar 5 : TGA-DTA Sampel LRC 80% + CCB 20%

Berdasarkan data TGA-DTA pada gambar 5 di atas diperoleh data sebagai berikut

Tahapan degradasi massa terjadi dalam dua tahap utama masing-masing :

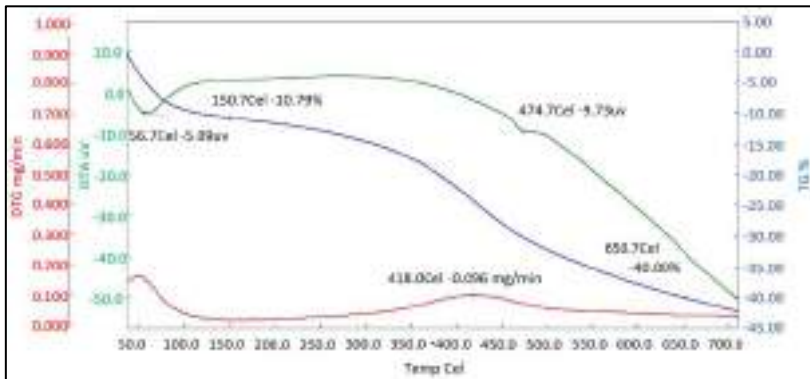
- **Tahap I (Pelepasan Volatil/Kelembapan):** Terjadi di awal pemanasan hingga suhu **105,1 °C** dengan kehilangan massa sebesar **5,36%**. Hal ini umumnya merupakan penguapan air atau kandungan volatil ringan yang terperangkap dalam material.
- **Tahap II (Dekomposisi Utama):** Penurunan massa berlanjut secara bertahap seiring kenaikan suhu.
 - o Laju dekomposisi tercepat (puncak DTG) tercatat pada suhu **427,2 °C** dengan laju sebesar **27,6 ug/min**.
 - o Pada suhu **650,2 °C**, total kehilangan massa sampel mencapai **29,57%**. Ini menunjukkan bahwa sampel memiliki residu sekitar 70,43% pada suhu tersebut, yang mengindikasikan stabilitas termal yang cukup baik atau adanya kandungan anorganik yang tinggi.

Analisis Termal (DTA)

Kurva hijau memberikan gambaran mengenai energi yang menyertai perubahan massa:

- Pada suhu rendah (di bawah 150°C), kurva DTA menunjukkan fluktuasi kecil yang bertepatan dengan penguapan air.
- Mulai suhu 350 °C, kurva DTA mengalami penurunan yang tajam hingga mencapai nilai di bawah -50 uV pada suhu 700°C. Tren menurun yang signifikan ini biasanya diasosiasikan dengan proses endotermik yang kuat selama dekomposisi termal atau pemutusan ikatan kimia material tersebut.

Sampel LRC 70% + CCB 30%



Gambar 6.TGA-DTA sampel LRC 70% + CCB 30 %

1. Tahap Penguapan Awal (Dehidrasi)

- **Suhu:** Sekitar 105.1 °C.
- **Analisis TG:** Terjadi kehilangan massa sebesar 5.36%.
- **Interpretasi:** Penurunan awal ini biasanya disebabkan oleh pelepasan kandungan air (kelembapan) yang teradsorpsi atau penguapan senyawa volatil ringan dalam sampel.

2. Dekomposisi Termal Utama

- **Rentang Suhu:** 300 °C hingga di atas 700 °C.
- **Puncak DTG:** Laju degradasi maksimum teramati pada suhu 427.2 °C dengan nilai 27.6 ug/min. Puncak ini menunjukkan

suhu di mana terjadi dekomposisi paling cepat dari komponen utama material tersebut.

- **Analisis TG:** Hingga suhu **650.2 °C**, sampel telah kehilangan massa total sebesar **29.57%**. Kurva TG terus menurun hingga mencapai suhu 700 °C, yang mengindikasikan bahwa proses dekomposisi belum selesai sepenuhnya pada rentang suhu tersebut.

3. Analisis Profil DTA (Perubahan Entalpi)

- **Kurva DTA (hijau):** Menunjukkan fluktuasi awal yang relatif stabil sebelum suhu 350 °C. Setelah suhu tersebut, kurva DTA menunjukkan tren penurunan yang tajam ke arah negatif.
- **Interpretasi:** Penurunan kurva DTA ini mengindikasikan adanya **reaksi endotermik** yang kuat, yang selaras dengan proses pemutusan ikatan kimia atau dekomposisi termal material saat kehilangan massa terjadi secara signifikan.

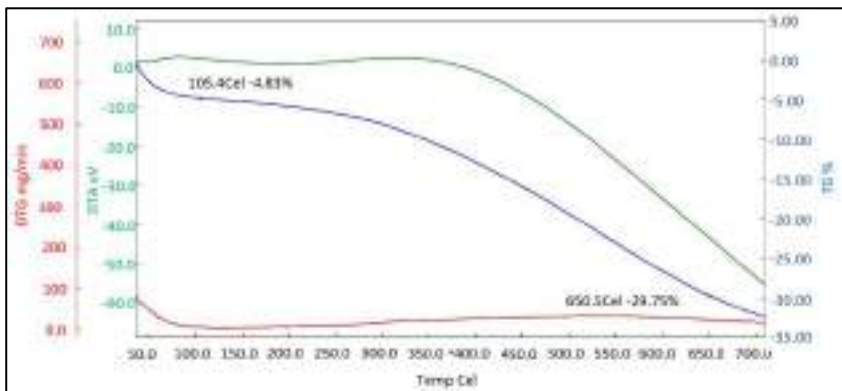
Rangkuman data berdasarkan Gambar 6 di atas 125actor Secara keseluruhan, Sampel tersebut kehilangan sekitar **30% dari massa asalnya** selama pemanasan hingga 700 °C. Proses degradasi ini terdiri dari dua tahap utama: **dehidrasi** pada suhu rendah (~105 °C) dan **dekomposisi 125actor125ral** yang puncaknya berada pada kisaran suhu **427 °C**. Profil ini menunjukkan bahwa material memiliki stabilitas termal yang moderat sebelum mengalami degradasi berkelanjutan di atas 300 °C.

Berdasarkan grafik pada sumber, massa sampel terus menurun di atas suhu 650°C disebabkan oleh beberapa 125actor teknis dalam analisis termal:

- **Dekomposisi Belum Selesai:** Kurva TG (biru) pada suhu 650.2°C menunjukkan kehilangan massa sebesar 29.57%, namun garisnya tidak mendatar (tidak membentuk *plateau*). Hal ini mengindikasikan bahwa proses **dekomposisi termal** dari komponen material tersebut belum mencapai titik akhir dan masih berlangsung hingga suhu 700°C atau lebih.

- **Pemutusan Ikatan yang Lebih Stabil:** Penurunan tajam pada kurva DTA (hijau) di area suhu tinggi tersebut menunjukkan adanya reaksi (kemungkinan besar endotermik) yang berkelanjutan. Ini menandakan adanya bagian dari struktur sampel yang memiliki stabilitas termal tinggi—seperti residu karbon yang kompleks atau senyawa anorganik tertentu—yang baru mulai pecah atau terurai pada energi panas yang sangat tinggi.
- **Laju Degradasi yang Konsisten:** Kurva DTG (merah) di atas 650°C tetap berada di bawah nilai nol dan cenderung menunjukkan tren penurunan. Hal ini membuktikan bahwa masih ada **laju kehilangan massa** yang aktif, meskipun puncak degradasi utamanya sudah terlewati pada suhu 427.2°C.

Sampel LRC 60% + CCB 40%



Gambar 7.TGA-DTA LRC 60% + CCB 40%

1. Analisis TGA (Thermogravimetric Analysis)

Kurva TGA menunjukkan penurunan berat sampel seiring dengan kenaikan suhu. Terjadi dua tahapan utama penurunan berat:

- **Tahap Pertama (Suhu Kamar - $\pm 150^{\circ}\text{C}$):** Terdapat penurunan berat sebesar **4,83%** pada suhu **105,4°C**. Hal ini umumnya dikaitkan dengan penguapan air yang terserap secara fisik (*adsorbed water*) atau kelembapan pada permukaan sampel.

- **Tahap Kedua (Sekitar 300°C - 700°C):** Terjadi penurunan berat yang berkelanjutan dan lebih signifikan. Pada suhu **650,5°C**, total kehilangan berat kumulatif mencapai **29,75%**. Penurunan berat yang lebar ini menunjukkan adanya dekomposisi termal material secara bertahap atau pelepasan gugus fungsi organik/anorganik yang terikat lebih kuat.

2. Analisis DTA (Differential Thermal Analysis)

Kurva DTA (garis hijau) memberikan informasi mengenai perubahan entalpi (endotermik atau eksotermik):

- **Area Endotermik Awal:** Pada awal pemanasan hingga sekitar 150°C, kurva cenderung menunjukkan sedikit fluktuasi yang selaras dengan hilangnya kadar air (proses endotermik).
- **Transisi Suhu Tinggi:** Mulai dari suhu di atas 400°C, kurva DTA menunjukkan kemiringan menurun yang tajam, menandakan terjadinya **proses endotermik besar**. Hal ini berkorelasi dengan hilangnya berat yang signifikan pada kurva TGA, yang menunjukkan bahwa dekomposisi material pada fase ini memerlukan energi panas yang besar.

3. Analisis DTG (Derivative Thermogravimetry)

Kurva DTG (garis merah) menunjukkan laju perubahan berat terhadap suhu:

- Puncak kecil terlihat di sekitar 100°C, mengonfirmasi laju penguapan air.
- Setelah suhu 350°C, kurva DTG menunjukkan profil yang relatif landai namun tetap berada di bawah garis dasar (baseline), yang mengindikasikan bahwa dekomposisi terjadi secara perlahan namun pasti dalam rentang suhu yang luas, bukan sebagai satu kejadian tunggal yang mendadak.

Sampel IRC 60% + CCB 40% menunjukkan stabilitas termal hingga suhu sekitar 300°C setelah kehilangan kadar air awalnya. **Total degradasi massa hingga suhu 700°C adalah sekitar 31-32%**, dengan sisa material (residu) sekitar 68%. Proses dekomposisi utama bersifat endotermik dan berlangsung paling intensif pada rentang suhu 450°C

hingga 700°C.

Berdasarkan grafik hasil analisis pada sumber, penyebab pasti dari dekomposisi tersebut tidak disebutkan secara eksplisit karena identitas kimia dari **Sampel E** tidak dicantumkan dalam dokumen. Namun, berdasarkan karakteristik kurva **TGA (biru)** dan **DTA (hijau)** pada suhu di atas 400°C, kita dapat mengidentifikasi fenomena berikut:

- **Penyerap Energi (Endotermik):** Kurva DTA menunjukkan penurunan tajam setelah suhu 400°C, yang menandakan proses **endotermik kuat**. Ini berarti material memerlukan asupan panas yang besar untuk memutus ikatan kimia dalam strukturnya.
- **Kehilangan Massa Signifikan:** Hal ini terjadi bersamaan dengan penurunan berat pada kurva TGA, yang mencapai akumulasi kehilangan massa sebesar **29,75% pada suhu 650,5°C**.
- **Laju Dekomposisi:** Kurva DTG (merah) menunjukkan bahwa meskipun kehilangan massa terjadi terus-menerus, tidak ada satu puncak dekomposisi yang sangat tajam, melainkan proses degradasi yang berlangsung luas dalam rentang suhu tersebut.

Informasi di luar sumber: Secara umum dalam ilmu material, profil endotermik besar dan lebar pada rentang suhu 400°C – 700°C seperti yang terlihat pada Sampel E sering dikaitkan dengan:

1. **Dehidroksilasi:** Pelepasan gugus hidroksil (-OH) yang terikat secara struktural dalam kisi kristal (umum terjadi pada mineral lempung atau hidroksida logam).
2. **Dekomposisi Karbonat:** Penguraian senyawa karbonat tertentu menjadi oksida dan gas CO₂.
3. **Degradasi Termal Polimer/Organik Stabil:** Pemutusan rantai utama atau gugus fungsi pada senyawa organik yang memiliki stabilitas termal tinggi.

4.5. Indeks Pembakaran

Indeks pembakaran merupakan parameter baik tidaknya kuliatas pembakaran dari suatu bahan bakar, Indeks pembakaran ditentukan

melalui persamaan :

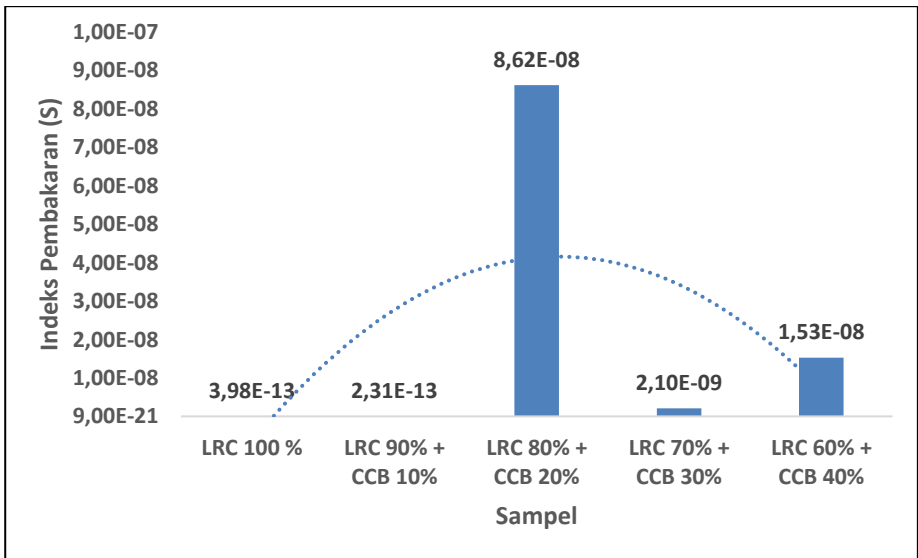
$$S = \frac{(DTG)_{max}(DTG)_{mean}}{T_i^2 \times T_{bo}}$$

Dimana :

- S* adalah indeks pembakaran
- (DTG)_{max}* adalah laju kehilangan massa maksimum (mg/min)
- (DTG)_{mean}* adalah laju kehilangan massa rata-rata (mg/min)
- T_i* adalah temperature ignition °C
- T_{bo}* adalah temperature burn out °C

Tabel 3. Indeks Pembakaran

Sampel	DTG _{max} (mg/min)	DTG _{min} (mg/min)	T _i °C	T _{bo} °C	S
		0,00023			3,98E-13
LRC 100 %	0,117	4	335	650,8	
LRC 90% + CCB		0.00019			2,31E-13
10%	0,096	2	350	650,7	
LRC 80% + CCB			31	650,	8,62E-08
20%	54,4	0,0998	5	1	
LRC 70% + CCB					2,10E-09
30%	27,6	0,0506	320	650,2	
LRC 60% + CCB					1,53E-08
40%	25	0,0459	340	650,5	



Gambar 10. Indeks Pembakaran

Berdasarkan data indeks pembakaran pada gambar 10 di atas terlihat bahwa efek penambahan CCB ke dalam LRC

4.6. Energi aktivasi

Secara sederhana, proses pembakaran dapat digambarkan sebagai berikut :

Bahan bakar → pemanasan → devolatilisasi → oksidasi volatile matter → oksidasi fixed carbon → burnout

Pada setiap tahap tersebut terjadi reaksi kimia yang memerlukan energi.

Jika energi aktivasi rendah, molekul bahan bakar **lebih mudah mencapai kondisi reaktif**, sehingga reaksi dapat berlangsung lebih cepat pada temperatur tertentu.

Berdasarkan hasil analisis TGA-DTA maka ke lima sampel maka untuk menentukan energi aktivasi dari setiap sampel digunakan peninjauan pada kurva DTA yang bergaris hijau, hasilnya sebagai berikut:

Sampel LRC 100 % $E_a = -19,58 \mu V$

Sampel LRC 90% + CCB 10% ; $E_a = -9,73 \mu V$

Sampel LRC 80% + CCB 20% ; $E_a = -9,33 \mu V$

Sampel LRC 70% + CCB 30% ; E_a tidak tampak

Sampel LRC 60% + CCB 40% : E_a tidak tampak

Dari ke 5 sampel di atas terlihat penambahan CCB ke dalam LRC sebanyak 20 % memiliki Aktivasi Energi yang relative tinggi jika dibandingkan dengan sampel lainnya.

kondisi ini didukung oleh rendahnya ignition temperature dan tingginya burnt out temperature dari sampel sebagai implikasi tingginya VM dalam sampel dan rendahnya kandungan A dalam sampel.

REFERENSI

- Adekunle, J., Ibrahim, J., & Kucha, E. (2015). Proximate and Ultimate Analyses of Biocoal Briquettes of Nigerian's Ogboyaga and Okaba Sub-bituminous Coal. *British Journal of Applied Science & Technology*, 7(1), 114–123. <https://doi.org/10.9734/bjast/2015/15154>
- Arinaldo, D., & Adiatma, J. C. (2019). Indonesia ' s Coal Dynamics : *Institute for Essential Services Reform*, 1–12. <https://iesr.or.id/download/spm-indonesias-coal-dynamics-pdf>
- Bampenrat, A., Sukkathanyawat, H., & Seangwattana, T. (2021). *Coal / biomass co-combustion investigation by thermogravimetric analysis. 01002*.
- Chen, C., Qin, S., Chen, F., Lu, Z., & Cheng, Z. (2019). Co-combustion characteristics study of bagasse, coal and their blends by thermogravimetric analysis. *Journal of the Energy Institute*, 92(2), 364–369. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.12.008>
- Guo, F., He, Y., Hassanpour, A., Gardy, J., Zhong, Z., He, Y., Hassanpour, A., Gardy, J., & Zhong, Z. (2020). *Journal Pre-proof*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117147>
- Khatami, R., & Levendis, Y. A. (2016). An overview of coal rank influence on ignition and combustion phenomena at the particle level. In *Combustion and Flame* (Vol. 164, pp. 22–34). <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2015.10.031>
- Kim, D., Park, S., & Park, K. Y. (2017). Upgrading the fuel properties of sludge and low rank coal mixed fuel through hydrothermal carbonization. *Energy*, 141, 598–602. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.113>
- Kopczyński, M., Lasek, J. A., Iluk, A., & Zuwała, J. (2017). The co-combustion of hard coal with raw and torrefied biomasses (willow (*Salix viminalis*), olive oil residue and waste wood from furniture manufacturing). *Energy*, 140, 1316–1325. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.036>
- Limbah, P., Jagung, T., Sumber, S., Lingkungan, T., & Unibos, A. (2024). *J e b e. 1*, 19–25.
- Liu, N., Huang, H., Huang, X., Li, R., Feng, J., & Wu, Y. (2024). *Co-pyrolysis Behavior of Coal and Biomass : Synergistic Effect and*

- Kinetic Analysis*. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c03053>
- Ministry of Energy and Mineral Resources of the Republic of Indonesia - Media Center - News Archive - Promising Biomass Potential, Indonesia Predicts to Produce 56*. (n.d.).
- Noushabadi, A. S., Dashti, A., Ahmadijokani, F., Hu, J., & Mohammadi, A. H. (2021). Estimation of higher heating values (HHVs) of biomass fuels based on ultimate analysis using machine learning techniques and improved equation. *Renewable Energy*, 179, 550–562. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.003>
- Patabang, D. (2012). Karakteristik Termal Briket Arang Sekam Padi Dengan Variasi Bahan Perekat. *Jurnal Mekanikal*, 3(2), 286–293. <http://download.garuda.kemdikbud.go.id/article.php?article=1327370&val=762&title=KARAKTERISTIK TERMAL BRIKET ARANG SEKAM PADI DENGAN VARIASI BAHAN PEREKAT>
- Patabang, D., Arif, E., & Aziz, N. (2019). *Developments (JMERD) the effect of adding candlenut shell into the low-rank coal on*. 42(2), 30–35. <https://ideas.repec.org/a/zib/zjmerd/v42y2019i1p116-121.html>
- Patabang, D., Arif, E., Jalaluddin, & Azis, N. (2019). Combustion reactivity of low rank coal by the mixture of candlenuts shell. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 619(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/619/1/012014>
- Patabang, D., Basri, Siang, J. T., & Seleng, K. (2024). Effect of cocoa pods husk blending on combustion characteristics of the low-rank coal analyzed in TGA. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 44(6), 605–613. <https://doi.org/10.1080/19392699.2023.2212597>
- Patabang, D., Sam, A., & Basri. (2023a). Thermochemical Characteristics of Briquettes of the Low-Rank Coal Mixed with Charcoal Sawdust of Meranti Wood. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1157(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1157/1/012039>
- Patabang, D., Sam, A., & Basri, B. (2023b). Characteristics of co-combustion of low-rank coal mixed with cocoa POD husk. *AIP Conference Proceedings*, 2719. <https://doi.org/10.1063/5.0133429>

- Patabang, D., Siang, J. T., & Basri. (2021). Co-combustion characteristics of low-rank coal mixed with candlenut shell by using Thermogravimetry analysis - differential thermal analysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1034(1), 012046. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1034/1/012046>
- RI, T. M. of E. and M. R. (ESDM). (2025). *RI Coal Reserves Reach 31*.
- Ullah, H., Liu, G., Yousaf, B., Ali, M. U., Abbas, Q., & Zhou, C. (2017). Combustion characteristics and retention-emission of selenium during co-firing of torrefied biomass and its blends with high ash coal. *Bioresource Technology*, 245(July), 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.144>
- Verma, M., Loha, C., Sinha, A. N., & Chatterjee, P. K. (2017). Drying of biomass for utilising in co-firing with coal and its impact on environment – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71(December 2016), 732–741. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.101>
- Wang, Y., Yan, B., Wang, Y., Zhang, J., Chen, X., & Bastiaans, R. J. M. (2021). *A Comparison of Combustion Properties in Biomass – Coal Blends Using Characteristic and Kinetic Analyses*.
- Xue, J., Chellappa, T., Ceylan, S., & Goldfarb, J. L. (2018). Enhancing biomass + coal Co-firing scenarios via biomass torrefaction and carbonization: Case study of avocado pit biomass and Illinois No. 6 coal. *Renewable Energy*, 122, 152–162. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.066>
- Yin, Y., Tu, J., Wang, S., Liu, S., Wang, T., Qi, C., Deng, C., Wei, J., Peng, Z., Shakir, M., & Liu, L. (2025). Environmental Effects Unlocking the synergy : Thermochemical behavior and kinetics in the co-combustion of coal gangue and wheat straw Unlocking the synergy : Thermochemical behavior and kinetics in. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 47(1), 8758–8768. <https://doi.org/10.1080/15567036.2025.2486404>