

KARAKTERISTIK LIMBAH BATANG SINGKONG SEBAGAI BIOMASSA CO-FIRING UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK

Dwi Irawan^{1*}, Sulis Dri Handono²

^{1,2}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Metro
Jl. Ki Hajar Dewantara 15 A Kota Metro, Lampung, Indonesia

*Corresponding author : irawan.ke10@gmail.com

Abstract

*This study evaluates the potential of wet cassava stems, dry cassava stems, and dry cassava stem powder as biomass fuels for co-firing in power plants. The analysis includes proximate testing, calorific value, and ultimate analysis to determine the quality and combustion efficiency of each material. Proximate test results show that dry cassava stems have lower Moisture Content and higher Ash Content compared to wet cassava stems, which can affect residue and slagging in power plant equipment. The high volatile matter content and significant increase in fixed carbon from wet to dry conditions indicate a greater extractable energy potential. The gross calorific value shows a significant increase from 2676.11 kcal/kg (AR) to 4929.44 kcal/kg (DAF) for wet cassava stems, and from 3910.64 kcal/kg (AR) to 5046.48 kcal/kg (DAF) for dry cassava stems. Dry cassava stem powder shows a very high calorific value, reaching 4272 kcal/kg (DB). The best ultimate analysis results for cassava stem powder are carbon (C) 48.44%, hydrogen (H) 6.61%, oxygen (O) 43%, sulfur (S) 0.15%, and nitrogen (N) 1.80%.
Keywords: cassava stem, proximate, calorific value, ultimate, co-firing biomass.*

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi potensi batang singkong basah, batang singkong kering, dan serbuk batang singkong kering sebagai bahan bakar biomassa untuk *co-firing* dalam pembangkit listrik. Analisis mencakup pengujian proksimat, nilai kalor, dan analisis ultimate untuk menentukan kualitas dan efisiensi pembakaran masing-masing bahan. Hasil pengujian proksimat menunjukkan bahwa batang singkong kering memiliki kadar air yang lebih rendah dan kandungan abu yang lebih tinggi dibandingkan batang singkong basah, yang dapat mempengaruhi residu dan slagging pada peralatan pembangkit listrik. Kandungan *volatile matter* yang tinggi dan peningkatan karbon tetap yang signifikan dari kondisi basah ke kering menunjukkan potensi energi yang dapat diekstraksi lebih besar. Nilai kalor (Gross Caloric Value) menunjukkan peningkatan signifikan dari 2676,11 kcal/kg (AR) hingga 4929,44 kcal/kg (DAF) untuk batang singkong basah, dan dari 3910,64 kcal/kg (AR) hingga 5046,48 kcal/kg (DAF) untuk batang singkong kering. Serbuk batang singkong kering menunjukkan nilai kalor yang sangat tinggi, mencapai 4272 kcal/kg (DB). Analisis ultimate terbaik pada serbuk batang singkong dengan nilai karbon (C) 48,44%, hidrogen (H) 6,61%, oksigen (O) 43%, belerang (S) 0,15% dan nitrogen (N) 1,80%.

Kata kunci: batang sinkong, proximate, nilai kalor, ultimate, biomasa co-firing.

1. Pendahuluan

Krisis energi semakin nyata seiring dengan pesatnya peningkatan industri yang masih sangat bergantung pada energi fosil. Kebutuhan energi yang melonjak di berbagai sektor, khususnya listrik, industri, dan transportasi, memperparah ketergantungan ini [1]. Di tengah upaya global untuk mengurangi emisi karbon dan mengatasi perubahan iklim, ketergantungan pada minyak bumi, gas, dan batubara tidak hanya mengancam kelestarian lingkungan, tetapi juga menimbulkan risiko ekonomi akibat fluktuasi harga dan ketidakstabilan

pasokan [2]. Urgensi untuk beralih ke sumber energi terbarukan dan meningkatkan efisiensi energi menjadi semakin mendesak dalam menghadapi krisis ini.

Untuk memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat, pembangkit listrik saat ini masih mengandalkan sumber daya fosil yang tak terbarukan. Dalam upaya mengurangi ketergantungan ini dan menurunkan emisi karbon, pembangkit listrik mulai menerapkan teknologi *co-firing* [3]. Teknologi ini memungkinkan penggunaan biomassa bersama dengan batubara dalam pembangkit listrik yang sudah ada. PT PLN telah melakukan

implementasi *Co-firing* pada 32 lokasi PLTU di seluruh Indonesia sejak tahun 2020 hingga 2022. Guna mencapai pemanfaatan energi terbarukan di tahun 2025 perlu adanya akselerasi pengembangan kapasitas pada energi terbarukan. Dengan penggunaan *co-firing*, PLN dapat mengurangi dampak lingkungan sekaligus memperpanjang umur operasi pembangkit yang ada [4], [5]. Sumber *co-firing* biomassa menjadi Solusi yang cukup tepat untuk pembangkit listrik.

Penggunaan biomassa sebagai bahan *co-firing* dalam pembangkit listrik menawarkan solusi berkelanjutan dengan memanfaatkan limbah pertanian dan kehutanan. Ini tidak hanya mengurangi emisi karbon, tetapi juga menyediakan peluang ekonomi baru bagi sektor pertanian, meningkatkan kesejahteraan masyarakat lokal, dan mendukung ketahanan energi nasional [6], [7]. Biomassa memiliki kelebihan seperti ketersediaan yang melimpah, pengurangan limbah, dan kontribusi terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca. Selain itu, penggunaan biomassa membantu menjaga keseimbangan karbon di atmosfer, karena CO₂ yang dilepaskan selama pembakaran diserap kembali oleh tanaman selama pertumbuhannya [8]. Berbagai jenis biomassa limbah pertanian dan Perkebunan dapat digunakan untuk *co-firing*, yaitu serbuk gergaji, sekam padi, limbah kelapa sawit dan batang singkong [9]

Singkong merupakan salah satu komoditas tanaman pangan jenis umbi-umbian yang banyak dibudidayakan di Indonesia. Produksi singkong terbesar adalah Nigeria yang memproduksi singkong, sebesar 57 juta ton, dan diikuti oleh Thailand dengan jumlah 30 juta ton, lalu diikuti Brazil dengan jumlah produksi 23 juta ton, dan Indonesia menghasilkan 23 juta ton [10]. Di Indonesia daerah penyuplai singkong terbanyak adalah Provinsi Lampung dengan luas lahan panen sebesar 342,100 ha dengan produksi singkong sebesar 8,45 ton/ha. Tanaman singkong terdiri dari buah, batang dan daun singkong. Pemanfaatan batang singkong di Indonesia

belum optimal karena selama ini hanya 10% dari tinggi batang singkong yang telah dimanfaatkan untuk ditanam kembali sedangkan 90% sisa menjadi limbah yang tidak dimanfaatkan [11]. Limbah batang singkong memiliki kandungan 56,82% lignoselulosa, 21,72% lignin dan 21,45% [12], [13]. Selain itu batang singkong memiliki kelebihan sebagai biomassa untuk *co-firing* karena mudah didapatkan, cepat tumbuh, dan memiliki kandungan energi yang cukup tinggi. Kandungan karbon yang tinggi dalam batang singkong menghasilkan pembakaran yang efisien dan panas yang cukup besar, sementara kadar abu dan sulfur yang rendah membantu mengurangi polusi dan perawatan peralatan pembangkit Listrik. Selain itu, pemanfaatan batang singkong sebagai biomassa dapat memberikan dampak positif bagi ekonomi pedesaan, menciptakan lapangan kerja, dan meningkatkan pendapatan petani. Potensi ini menjadikan batang singkong sebagai solusi yang efektif dan ramah lingkungan untuk kebutuhan energi nasional [14]. Pengolahan batang singkong untuk *co-firing* ada beberapa metode seperti, di buat serbuk kering, pellet, briket dan blok serbuk kayu (*Shavings sawdust block*). Pemilihan bentuk olahan akan tergantung pada kebutuhan spesifik pembangkit Listrik dan karakteristik teknis yang diinginkan. Penambahan perekat dalam pembuatan pelet, briket, dan blok serbuk kayu dari batang singkong sangat penting untuk memastikan kekuatan, densitas, dan efisiensi pembakaran yang optimal. Perekat alami seperti molase adalah pilihan yang baik karena selain efektif, mereka juga lebih ramah lingkungan. Molasses adalah produk sampingan dari pengolahan gula, memiliki 2 jenis yaitu Canemolasses yang memiliki 25-40% sukrosa, 12-25% gula, protein kasar 3% dan kadar abu 8-10%, semua kandungan tersebut terbentuk dari K, Ca, Cl, dan garam sulfat [15]. Molase memiliki nilai kalor sebesar 6106,23 kalori/gram dimana nilai tersebut cukup tinggi dan memenuhi standar SNI 01 - 6235 - 2000 sebesar 5000 kalori/gram, dengan penambahan molase

selain sebagai perekat juga akan meningkatkan nilai kalornya [16]. Dengan memilih perekat yang tepat dan menerapkan proses yang benar, produk biomassa yang dihasilkan akan memiliki kualitas tinggi dan dapat diandalkan sebagai sumber energi terbarukan dalam aplikasi *co-firing* [17].

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik batang singkong sebagai bahan bakar biomassa *co-firing* untuk pembangkit Listrik. Karakteristik dan kualitas batang singkong dipelajari dengan pengujian proximate dan ultimate. Pengujian ini memberikan informasi mendetail tentang komposisi bahan bakar yang mempengaruhi efisiensi pembakaran, emisi, dan performa keseluruhan sebagai pembangkit listrik. Pengujian tersebut akan memberikan informasi dalam menentukan nilai kalor dan efisiensi energi bahan bakar, mengidentifikasi potensi masalah operasional seperti penumpukan abu atau fouling, mengelola dan mengurangi emisi polutan, dan memastikan bahwa bahan bakar memenuhi standar dan spesifikasi teknik yang diperlukan untuk operasi yang aman dan efisien [18].

2. Metode Penelitian

2.1. Bahan

Bahan baku pada penelitian ini adalah Batang singkong hasil Kerjasama dengan PT Berkah Bara Rizki Bersama. Batang singkong diperoleh dengan memanfaatkan limbah dari para petani singkong dari daerah Lampung Timur Provinsi Lampung. Perekat menggunakan molase yang berasal sisa industry tebu di provinsi lampung.

2.2. Karakteristik bahan

Karakteristik batang singkong dianalisis dengan pengujian proximate dan ultimate. Pengujian proximate adalah metode analisis yang digunakan untuk menentukan komposisi dasar bahan bakar, termasuk biomassa, batubara, dan bahan bakar padat lainnya. Pengujian ini memberikan informasi penting tentang

karakteristik bahan bakar yang mempengaruhi efisiensi pembakaran dan performa keseluruhan. Pengujian proximate mencakup empat parameter utama: kadar air, kadar abu, zat volatil, dan Nilai kalor [19]. Pengujian ultimate adalah metode analisis kimia yang digunakan untuk menentukan komposisi dasar elemen-elemen dalam bahan bakar, termasuk karbon (C), *hidrogen* (H), *nitrogen* (N), *sulfur* (S), dan *oksigen* (O). Pengujian ini memberikan informasi penting mengenai potensi energi bahan bakar dan dampak lingkungan dari pembakarannya [20].

2.3. Pengolahan sampel bahan

Sampel bahan baku dipersiapkan dalam bentuk batang singkong basah, batang singkong kering, serbuk batang singkong basah dan serbuk batang singkong kering. Persiapan untuk pengujian sampel dengan beberapa metode yaitu, *As Accepted* (AR), *Air-Dried Basis* (ADB), *Dry Basis* (DB), dan *Dry Ash-Free Basis* (DAF). Setiap metode memiliki tujuan tertentu dalam memberikan wawasan tentang komposisi sampel bahan bakar. AR digunakan untuk menampilkan bahan bakar dalam keadaan sebenarnya, termasuk semua kelembapan dan kotoran. ADB bertugas untuk melaporkan kondisi asli bahan bakar pada saat diterima, sejalan dengan praktik operasional standar. DB melibatkan pengeringan sampel untuk menghilangkan semua kadar air, memastikan konsistensi dalam analisis. DAF, sebaliknya, mengukur komposisi bahan bakar setelah menghilangkan kadar air dan abu [21].

Untuk menyiapkan metode tersebut bahan batang singkong yang telah dikumpulkan digiling untuk dijadikan serbuk, setelah itu serbuk di jemur untuk mengurangi kandungan kadar air. Serbuk batang singkong yang telah kering dicampur dengan molase. Campuran sampel yang digunakan adalah 50 ml molase, 600 ml aquades dan 3 kg serbuk batang singkong. Setelah semua bahan dicampur hingga rata, dilakukan pengepresan menggunakan mesin press dengan kapasitas mesin 30 ton.

Setelah dipress terbentuklah blok serbuk kayu (Shavings sawdust block) dengan ukuran panjang 20 cm, lebar 15 cm, dan tinggi 40 cm. Penggunaan perekat molase dengan kandungan lignin dan selulosa yang banyak tidak membutuhkan suhu untuk

mengeluarkan kandungan tersebut. Aktivasi perekat menggunakan tekanan kompaksi tinggi mampu memproduksi biomassa yang mempunyai durabilitas tinggi [22]. Mekanisme pengolahan sampel disajikan pada gambar 1.



Gambar 1. Mekanisme pengolahan sampel bahan baku

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisis Proximate

Pengujian ini mengukur beberapa parameter penting yang mencakup kadar air, kadar abu, zat volatil, dan karbon tetap. Setiap parameter memberikan informasi penting tentang kualitas dan karakteristik bahan bakar.

A. Kadar Air (Moisture Content)

Pengujian kadar air menggunakan metode ASTM D3173-17a dan metode D-7582-15. Hasil pengujian nilai kadar air di sajikan pada gambar 2. Hasil menunjukkan pada batang singkong basah 12,92 %, batang singkong kering 11,43%, Serbuk batang singkong kering 9,64%, serbuk batang singkong kering dengan penambahan molase 11,99%. Kadar air serbuk batang singkong lebih rendah nilai kadar airnya karena perbedaan fisik dan area permukaan, karena dengan partikel kecil lebih cepat kering. Persentase kandungan air pada campuran biomassa dan molase lebih besar daripada bahan baku serbuk batang singkong kering dikarenakan molase

berbentuk cairan mengandung 20-30% air dan penggunaan metode press atau cetak tanpa suhu sehingga penguapan tidak terjadi [23]. Standar biomassa yang ideal untuk *co-firing* biasanya memerlukan kadar air yang rendah, biasanya di bawah 15%, untuk memastikan pembakaran yang efisien dan mengurangi emisi, dengan hasil 11,99% untuk *shavings sawdust block* masih memenuhi standar *co-firing* [24].

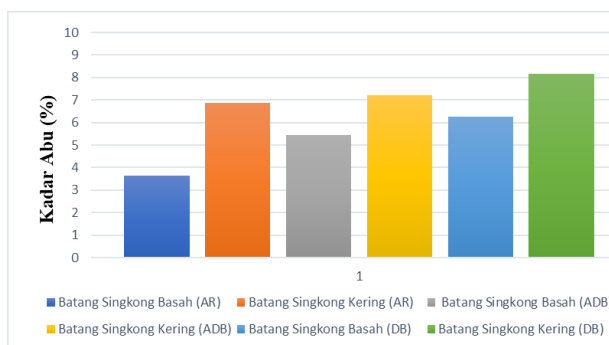


Gambar 2. Grafik Kadar Air

B. Kadar Abu (Ash Content)

Pengujian nilai kadar abu menggunakan metode ASTM D-7582-15 dan D-7582-15. Nilai kadar abu yang

dihasilkan pada sampel batang singkong basah sebesar (AR) 3,63%, (ADB) 5,46, dan (DB) 6,27%. Sampel nilai kadar abu batang singkong kering didapatkan sebesar (AR) 6,88%, (ADB) 7,22, DB 8,15%, semua hasil kami sajikan pada gambar 3. Kadar abu yang lebih tinggi dalam batang singkong kering disebabkan oleh peningkatan konsentrasi mineral setelah pengeringan, struktur fisik batang yang kaya serat dan selulosa, serta akumulasi mineral selama pertumbuhan tanaman. Faktor-faktor ini menyebabkan proporsi bahan anorganik yang lebih tinggi dalam massa kering batang singkong [25].



Gambar 3. Grafik Kadar Abu

Setelah memperoleh nilai kadar abu, langkah selanjutnya adalah melakukan analisis Ash Fusion Temperature (AFT) untuk menentukan potensi slagging dari abu tersebut. AFT adalah suhu di mana abu mulai melebur dan membentuk deposit cair atau semi-cair, yang dapat menyebabkan masalah operasional pada peralatan pembakaran seperti boiler. Analisis AFT melibatkan pemanasan sampel abu dalam kondisi laboratorium hingga mencapai titik deformasi awal (IDT), titik pelunakan (ST), titik hemispherical (HT), dan titik cair (FT). Nilai AFT yang diperoleh dari analisis ini memberikan informasi penting tentang suhu di mana abu dari bahan bakar mulai melebur [26]. Hasil AFT terhadap potensi slagging disajikan pada tabel 1, Nilai AFT Reduksi disajikan pada tabel 2 dan Nilai AFT Oksidasi disajikan pada tabel 3.

Data AFT oksidasi, AFT reduksi, dan kadar abu memberikan gambaran komprehensif tentang risiko slagging. Abu dengan kadar abu tinggi dan AFT rendah,

terutama dalam kondisi reduksi, memiliki potensi slagging yang lebih tinggi. Oleh karena itu, untuk mengelola risiko slagging, penting untuk memilih bahan bakar dengan kadar abu rendah dan AFT tinggi serta mengoptimalkan kondisi operasi boiler untuk menjaga suhu di bawah titik leleh abu. Dengan demikian, pemahaman mendalam tentang karakteristik AFT dan kadar abu membantu dalam merancang dan mengoperasikan sistem pembakaran yang efisien dan andal [26]. Data menunjukkan bahwa Sampel AFT memiliki titik leleh pada suhu 1360 °C dalam kondisi reduksi dan titik leleh pada suhu 1380 °C dalam kondisi oksidasi. Titik leleh atau lebur abu biomassa dapat dipengaruhi oleh komposisi abu dan suasana gas (sifat oksidasi dan reduksi). Perbandingan hasil AFT memasuki kriteria slagging index >1350 dengan potensi slagging medium. Hasil uji AFT menunjukkan bahwa sampel dapat digunakan pada industri PLTU.

Tabel 1. Nilai AFT Terhadap Potensi Slagging

Slagging Index	Potensi Slagging
>1350	Low
1230 – 1350	Medium
1150 - 1230	High
<1150	Severe

Tabel 2. AFT (Reduksi)

Temperature	Hasil	Satuan
Deformation	1290	°C
Spherical	1320	°C
Hemisphere	1330	°C
Flow	1360	°C

Tabel 3. AFT (Oksidasi)

Temperature	Hasil	Satuan
Deformation	1310	°C
Spherical	1340	°C
Hemisphere	1350	°C
Flow	1380	°C

Kandungan abu yang memiliki sifat asam seperti SiO₂ dan Alumina (Al₂O₃) maka akan menghasilkan titik leleh yang tinggi sedangkan kandungan abu yang memiliki sifat basa seperti oksidasi besi (Fe₂O₃), Kapur (CaO), Magnesia MgO), K₂O dan sebagainya menghasilkan titik leleh yang rendah [27]. Kandungan abu seperti sifat basa merupakan non

combustible material dimana kandungan ini dapat mengurangi nilai pembakaran. Berdasarkan hasil penelitian sampel serbuk batang singkong didapatkan kandungan parameter bersifat basa yang rendah sehingga nilai pembakaran dapat cukup tinggi.

Tabel 4. Analisis Kandungan Mineral dalam Abu

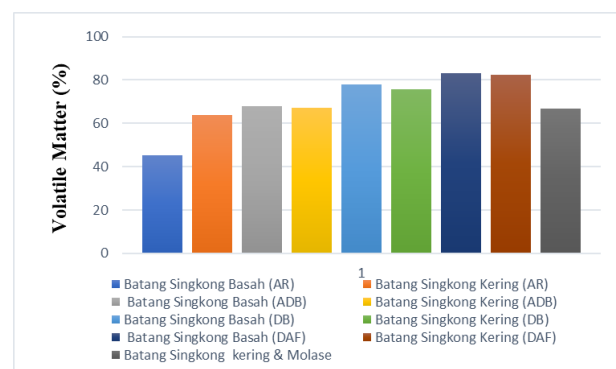
Parameter	Hasil	Satuan
SiO ₂	27.26	%
Al ₂ O ₃	13.91	%
Fe ₂ O ₃	3.55	%
CaO	22.87	%
MgO	6.75	%
TiO ₂	0.44	%
Na ₂ O	1.96	%
K ₂ O	7.83	%
Mn ₃ O	0.088	%
P ₂ O ₅	0.234	%
SO ₃	14.27	%

C. Kadar Zat Terbang (*Volatile Meter*)

Hasil pengujian kadar *volatile matter* menggunakan metode ASTM D-7582-15 yang disajikan pada gambar 4. Pada batang singkong basah didapatkan sebesar AR 45,16%, ADB 67,89%, DB 77,96% dan DAF 83,18%, sedangkan pada batang singkong kering didapatkan sebesar AR 63,89%, ADB 67,07%, DB 75,74% dan DAF 82,45%. Kadar *volatile matter* pada serbuk batang singkong dengan molase didapatkan sebesar 66,67%. Kandungan perekat dalam briket mempengaruhi nilai kalor, kadar abu dan *volatile matter* dalam briket, semakin tinggi kadar perekat yang diberikan pada briket maka akan semakin lambat pengurangan massa briket Dyang terjadi pada saat pembakaran. kadar *volatile matter* rendah antara 15 – 25% lebih disenangi dalam pemakaian karena asap yang dihasilkan sedikit.

Batang singkong kering menunjukkan keunggulan dalam hal kandungan air yang lebih rendah (AR), yang meningkatkan efisiensi pembakaran langsung. Namun, sedikit penurunan pada nilai ADB, DB, dan DAF menunjukkan bahwa proses pengeringan mungkin mempengaruhi komposisi bahan volatil. Batang singkong basah memerlukan lebih banyak energi untuk pengeringan sebelum

mencapai efisiensi yang sama dengan batang kering. *Volatile matter* yang tinggi pada DB dan DAF untuk kedua kondisi menunjukkan potensi energi yang signifikan, namun batang singkong kering lebih praktis untuk digunakan sebagai bahan bakar biomassa karena memerlukan lebih sedikit energi untuk persiapan pembakaran [28]. Analisis ini membantu menentukan kondisi optimal untuk penggunaan batang singkong dalam aplikasi *co-firing*, memastikan efisiensi dan efektivitas energi yang tinggi.

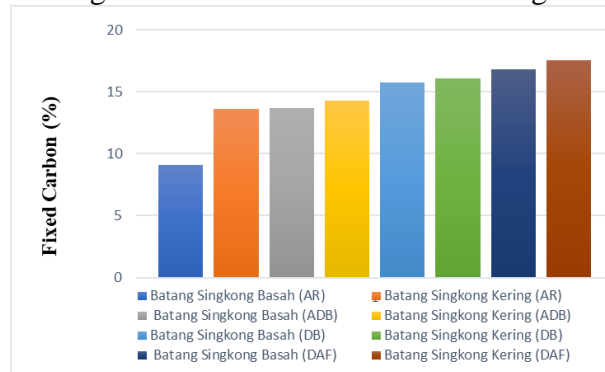


Gambar 4. Grafik kadar volatile matter

D. Fixed Carbon

Hasil pengujian parameter *fixed carbon* menggunakan metode ASTM D-7582-15 yang disajikan pada gambar 5. Sampel batang singkong basah didapatkan sebesar AR 9,12%, ADB 13,71%, DB 15,74%, dan DAF 16,80%, dan sampel batang singkong kering didapatkan nilai sebesar AR 13,60%, ADB 14,28%, DB 16,12%DB dan DAF 17,55%. *Fixed carbon* digunakan sebagai indeks hasil kokas dari biomassa pada waktu dikarbonisasikan, atau sebagai suatu ukuran material padat yang dapat dibakar di dalam peralatan pembakaran biomassa setelah fraksi zat mudah menguap dihilangkan. atang singkong kering memiliki keunggulan jelas dalam kandungan *fixed carbon* yang lebih tinggi di setiap basis analisis (AR, ADB, DB, dan DAF), menunjukkan efisiensi pembakaran yang lebih baik dan potensi energi yang lebih tinggi dibandingkan batang singkong basah. Oleh karena itu, batang singkong kering lebih cocok digunakan sebagai bahan bakar biomassa dalam aplikasi *co-firing* atau

pembakaran langsung, mengurangi kebutuhan energi untuk pengeringan dan meningkatkan keseluruhan efisiensi energi.



Gambar 5. Kadar Fixed Carbon

3.2. Nilai Kalori Kotor (*Gross Caloric Value*)

Hasil pengujian sampel untuk batang singkong basah dan kering, serbuk batang singkong basah dan kering didapatkan nilai HGI dengan metode ASTM D5865-19 kami sajikan pada tabel 5. Batang singkong kering menunjukkan nilai kalor lebih tinggi di setiap basis analisis dibandingkan dengan batang singkong basah, yang menunjukkan efisiensi energi yang lebih baik untuk pembakaran langsung. Serbuk batang singkong, baik basah maupun kering, menunjukkan nilai kalor tinggi, terutama pada basis kering, yang menunjukkan potensi energi yang tinggi. Penggunaan serbuk batang singkong dapat lebih menguntungkan karena lebih mudah dikeringkan dan memiliki nilai kalor yang tinggi, baik dalam kondisi basah maupun kering. Dengan nilai GCV yang lebih tinggi, terutama pada basis DB dan DAF, serbuk batang singkong kering dan basah lebih efisien sebagai bahan bakar biomassa dibandingkan batang singkong dalam bentuk aslinya [8]. Ini menunjukkan bahwa

pengolahan singkong menjadi serbuk dapat meningkatkan nilai energi dan efisiensi dalam aplikasi *co-firing* atau pembakaran langsung.

3.3. Analisis Ultimate

Data hasil pengujian ultimate menggunakan metode ASTM, hasil pengujian pada batang singkong basah disajikan pada tabel 6, pengujian batang singkong kering disajikan pada tabel 7 dan serbuk batang singkong kering di sajikan pada tabel 8.

Ketiga jenis bahan menunjukkan komposisi yang baik untuk *co-firing*. Kandungan karbon dan hidrogen yang tinggi mendukung efisiensi pembakaran dan potensi energi, sementara kandungan sulfur yang rendah mengurangi risiko korosi dan emisi SO_2 . Kandungan nitrogen yang rendah hingga sedang perlu dipantau untuk emisi NO_x . Oksigen yang tinggi dalam semua sampel menunjukkan bahwa bahan ini akan mudah terbakar dan memberikan kontribusi signifikan terhadap energi total dalam *co-firing*, membuatnya ideal untuk digunakan bersama batubara untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan pembangkit listrik [4]. Serbuk batang singkong kering memiliki kandungan oksigen 43 %, kandungan oksigen memiliki pengaruh lebih besar daripada nitrogen dikarenakan semua unsur yang terbakar dapat membentuk gas yang bereaksi dengan oksigen. Kandungan karbon didapatkan hasil sebesar 48,44%. Kandungan karbon dalam biomassa yang semakin tinggi maka biomassa tersebut dapat semakin baik dalam penggunaan bahan bakar.

Tabel 5. Gross Caloric Value pada Sampel Serbuk dan Batang Singkong

Parameter	Sampel	AR (Kcal/kg)	ADB (Kcal/kg)	DB (Kcal/kg)	DAF (Kcal/kg)
	Batang Singkong Basah	2676,11	4023,41	4620,36	4929,44
	Batang Singkong Kering	3910,64	4105,31	4635,1	5046,48
	Serbuk Batang Singkong Basah	3993	3107	4831	
HGI	Serbuk Batang Singkong Kering	3606	3860	4272	

Tabel 7. Hasil Analisis Ultimate Batang Singkong Basah

Parameter	AR (%)	ADB (%)	DB (%)	DAF (%)
Sulphur	0,07	0,10	0,11	0,12
Carbon	26,19	39,38	45,22	48,25
Hidrogen	3,08	6,07	5,31	5,67
Nitrogen	0,81	1,22	1,40	1,49
Oksigen	24,14	47,77	41,68	44,47

Tabel 8. Hasil Analisis Ultimate Batang Singkong Kering

Parameter	AR (%)	ADB (%)	DB (%)	DAF (%)
Sulphur	0,10	0,11	0,12	0,14
Carbon	39,30	41,26	46,58	50,72
Hidrogen	4,62	6,13	5,48	5,96
Nitrogen	1,10	1,16	1,31	1,43
Oksigen	32,36	44,12	38,35	41,76

Tabel 9. Hasil Analisis Ultimate Serbuk Batang Singkong Kering

Parameter	DAF (%)
Sulphur	0.15
Carbon	48.44
Hidrogen	6.61
Nitrogen	1.80
Oksigen	43.00

4. Kesimpulan

Dari pengujian proximate, nilai kalor, dan analisis ultimate, dapat disimpulkan bahwa batang singkong dan serbuknya, terutama dalam kondisi kering, menunjukkan kualitas bahan bakar yang sangat baik dengan potensi energi yang tinggi. Mereka cocok digunakan sebagai bahan *co-firing* bersama batubara untuk meningkatkan efisiensi pembakaran dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Penggunaan biomassa ini juga berkontribusi pada pengurangan emisi gas rumah kaca, menjadikannya solusi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan bagi kebutuhan energi di Indonesia.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terimakasih kepada PT Berkah Bara Rizki Bersama yang sudah membiayai penelitian ini dan Universitas Muhammadiyah Metro.

Referensi

[1] M. Wei, "Cassava stem wastes as potential feedstock for fuel ethanol

production: A basic parameter study," *Renew Energy*, vol. 83, pp. 970–978, 2015, doi: 10.1016/j.renene.2015.05.054.

[2] F. Sher, "Torrefied biomass fuels as a renewable alternative to coal in *co-firing* for power generation," *Energy*, vol. 209, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118444.

[3] M. Greenfield, M. I. Gómez-Jiménez, V. Ortiz, F. E. Vega, M. Kramer, and S. Parsa, "Beauveria Bassiana and Metarhizium Anisopliae Endophytically Colonize Cassava Roots Following Soil Drench Inoculation," *Biological Control*, vol. 95, pp. 40–48, 2016, doi: 10.1016/j.biocontrol.2016.01.002.

[4] Y. Xu, "Coal-biomass *co-firing* power generation technology: Current status, challenges and policy implications," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 9, 2020, doi: 10.3390/su12093692.

[5] J. Zuwała, "Life cycle approach for energy and environmental analysis of biomass and coal *co-firing* in CHP plant with backpressure turbine," *J Clean*

- Prod*, vol. 35, pp. 164–175, 2012, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.06.001.
- [6] E. Özgür, “Thermal analysis of *co-firing* of oil shale and biomass fuels,” *Oil Shale*, vol. 29, no. 2, pp. 190–201, 2012, doi: 10.3176/oil.2012.2.07.
- [7] Dwi Irawan, “PEMANFAATAN KOTORAN AYAM DENGAN CAMPURAN CANGKANG KARET SEBAGAI BAHAN BAKAR ALTERNATIF,” *TURBO (Jurnal Program Studi Teknik Mesin)*, vol. 2, no. 2, pp. 32–38, 2013.
- [8] M. Wanapat and S. Kang, “Cassava Chip (Manihot Esculenta Crantz) as an Energy Source for Ruminant Feeding,” *Animal Nutrition*, vol. 1, no. 4, pp. 266–270, 2015, doi: 10.1016/j.aninu.2015.12.001.
- [9] N. Skoglund, “Effects on ash chemistry when *co-firing* municipal sewage sludge and wheat straw in a fluidized bed: Influence on the ash chemistry by fuel mixing,” *Energy and Fuels*, vol. 27, no. 10, pp. 5725–5732, 2013, doi: 10.1021/ef401197q.
- [10] B. Teeken *et al.*, “Cassava Trait Preferences of Men and Women Farmers in Nigeria: Implications for Breeding,” *Econ Bot*, vol. 72, no. 3, pp. 263–277, 2018, doi: 10.1007/s12231-018-9421-7.
- [11] F. M. E. P. dan S. M. P. Laurentius Urip Widodo*, “PEMANFAATAN LIMBAH BATANG UBI KAYU DAN PLASTIK SEBAGAI BAHAN BAKU PEMBUATAN PAPAN PARTIKEL,” *Journal of Research and Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 145–154, 2020.
- [12] L. Lismeri, P. M. Zari, T. Novarani, and Y. Darni, “Sintesis Selulosa Asetat dari Limbah Batang Ubi Kayu,” *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan*, vol. 11, no. 2, pp. 82–91, Dec. 2016, doi: 10.23955/rkl.v11i2.5407.
- [13] K. Sumada *et al.*, “ISOLATION STUDY OF EFFICIENT α -CELLULOSE FROM WASTE PLANT STEM MANIHOT ESCULENTA CRANTZ KAJIAN PROSES ISOLASI α -SELULOSA DARI LIMBAH BATANG TANAMAN MANIHOT ESCULENTA CRANTZ YANG EFISIEN,” 2011.
- [14] M. Wei, “Multivariate modelling on biomass properties of cassava stems based on an experimental design,” *Anal Bioanal Chem*, vol. 407, no. 18, pp. 5443–5452, 2015, doi: 10.1007/s00216-015-8706-2.
- [15] D. Irawan and A. Darmanto, “Pengaruh campuran perekat dan waktu penekanan terhadap karakteristik briket cangkang biji karet,” 2023.
- [16] L. Hanandito and D. Dwi Anggoro, “PEMBUATAN BRIKET ARANG TEMPURUNG KELAPA DARI SISA BAHAN BAKAR PENGASAPAN IKAN KELURAHAN BANDARHARJO SEMARANG.”
- [17] D. An, J. Yang, and P. Zhang, “Transcriptome Profiling of Low Temperature-Treated Cassava Apical Shoots Showed Dynamic Responses of Tropical Plant to Cold Stress,” *BMC Genomics*, vol. 13, no. 1, 2012, doi: 10.1186/1471-2164-13-64.
- [18] B. Morrison, “Life cycle assessment of *co-firing* coal and wood pellets in the Southeastern United States,” *J Clean Prod*, vol. 150, pp. 188–196, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.026.
- [19] A. Panji Permana, “Kajian Coal Rank Berdasarkan Analisa Proximate (Studi Kasus Batubara di Kabupaten Sorong),” 2016.
- [20] R. A. P. Lomeda-De Mesa, A. N. Soriano, A. R. D. Marquez, and A. P. Adornado, “Study on the proximate and ultimate analyses and calorific value of coal blending between torrefied biomass from coconut (*Cocos nucifera*) husk and Semirara coal,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing, May 2020. doi: 10.1088/1755-1315/471/1/012004.
- [21] M. B. Hall and D. R. Mertens, “Technical Note: Effect of Sample Processing Procedures on Measurement

- of Starch in Corn Silage and Corn Grain,” *J Dairy Sci*, vol. 91, no. 12, pp. 4830–4833, 2008, doi: 10.3168/jds.2008-1183.
- [22] Sartono Putro; Musabbikhah; Suranto., “Variasi temperatur dan waktu karbonisasi untuk meningkatkan nilai kalor dan memperbaiki sifat proximate biomassa sebagai bahan pembuat briket yang berkualitas.,” *Simposium Nasional RAPI XIV - 2015 FT UMS*, 2015.
- [23] K. Jørgensen *et al.*, “Cassava Plants With a Depleted Cyanogenic Glucoside Content in Leaves and Tubers. Distribution of Cyanogenic Glucosides, Their Site of Synthesis and Transport, and Blockage of the Biosynthesis by RNA Interference Technology,” *Plant Physiol*, vol. 139, no. 1, pp. 363–374, 2005, doi: 10.1104/pp.105.065904.
- [24] J. Dai, S. Sokhansanj, J. R. Grace, X. Bi, C. J. Lim, and S. Melin, “Overview and Some Issues Related to Co-firing Biomass and Coal,” *Can J Chem Eng*, vol. 86, no. 3, pp. 367–386, 2008, doi: 10.1002/cjce.20052.
- [25] M. N. Maruthi, S. Jeremiah, I. U. Mohammed, and J. P. Legg, “The role of the whitefly, *Bemisia tabaci* (Gennadius), and farmer practices in the spread of cassava brown streak ipomoviruses,” *Journal of Phytopathology*, vol. 165, no. 11–12, pp. 707–717, 2017, doi: 10.1111/jph.12609.
- [26] Y. Shao, J. Wang, F. Preto, J. Zhu, and C. Xu, “Ash Deposition in Biomass Combustion or *Co-firing* for Power/Heat Generation,” *Energies (Basel)*, vol. 5, no. 12, pp. 5171–5189, 2012, doi: 10.3390/en5125171.
- [27] Y. W. M. Purba, P. Karo-Karo, E. Ginting, and K. Kunci, “Analisis Batubara Jenis Antrasit di PTBA Berdasarkan Kandungan *Volatile matter* dan Kalori.” [Online]. Available: <https://jemit.fmipa.unila.ac.id/>
- [28] M. C. Díaz-Ramírez, C. Boman, F. Sebastián, S. Xiong, and D. Boström, “Ash Characterization and Transformation Behavior of the Fixed-Bed Combustion of Novel Crops: Poplar, Brassica, and Cassava Fuels,” *Energy & Fuels*, vol. 26, no. 6, pp. 3218–3229, 2012, doi: 10.1021/ef2018622.