

KARAKTERISTIK BIOARANG DAN ASAP CAIR DARI LIMBAH AMPAS TEH MENGGUNAKAN PIROLISIS *ROCKET STOVE* DENGAN *DOUBLE CONDENSOR*

Muhammad Noviansyah Aridito¹⁾; Syaiful Mansyur²⁾; Endah Ayuningtyas³⁾

¹⁾Teknik Lingkungan, Universitas Proklamasi 45 Yogyakarta

²⁾ Teknik Industri, Universitas Proklamasi 45 Yogyakarta

³⁾ Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Yogyakarta Yogyakarta

Alamat E-mail : noviansyaharidito@up45.ac.id

ABSTRAK

Limbah dari ampas daun teh terus meningkat seiring dengan konsumsi daun teh oleh masyarakat Indonesia sebagai minuman. Limbah ampas teh merupakan salah satu biomassa yang belum dimanfaatkan secara optimal, padahal memiliki kandungan lignoselulosa yang berpotensi dikonversi menjadi bioarang dan asap cair melalui proses pirolisis. Penelitian mengenai pemanfaatan ampas teh menggunakan sistem rocket stove-retort dengan double condenser masih sangat terbatas sehingga diperlukan kajian mengenai karakteristik produk yang dihasilkan. Perusahaan minuman teh kemasan pun terus meningkat baik jumlah merk maupun produksinya. Berdasarkan data BPS 2016 produksi daun teh kering secara nasional sebesar 74.793 Ton pertahun Limbah yang dihasilkan perlu dikeloladengan pendekatan Teknologi salah satunya Pirolisis. Teknologi pirolisis yang digunakan pada penelitian ini dengan metode pirolisis rocket stove retort dengan dikombinasikan sistem double condenser yang saling terhubung pada saluran gas pirolisisnya.

Penelitian dilakukan menggunakan reaktor pirolisis rocket stove-retort dengan sistem double condenser selama 240 menit menggunakan tiga variasi suhu operasi yang dikontrol melalui bukaan katup burner ($\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ dan penuh). Produk bioarang dianalisis menggunakan analisis proksimat sedangkan asap cair dianalisis terhadap kadar fenol, karbonil dan total asam. Penelitian ini difokuskan untuk mengetahui karakteristik bioarang dan asap cair dari ampas daun teh menggunakan teknologi rocket stove retort dengan double condenser. Variabel penelitian ini suhu puncak dengan variasi bukaan katup burner rendah (bukaan katup $\frac{1}{4}$), sedang (bukaan katup $\frac{1}{2}$) dan tinggi (bukaan katup 1-penuh) selama 4 jam proses dengan holding time pada menit ke 180. Berdasarkan hasil penelitian diperoleh informasi karakteristik bioarang yakni Nilai Kalor, Kadar Karbon Terikat, Kadar Abu, dan kadar air tertinggi yakni pada sampel dengan suhu puncak tertinggi yakni 5.718,81 kkal/kg ; 44,96% ; 9,91% dan 7,65% . Kadar Volatile matter terendah yakni 37.48% pada sampel dengan suhu tertinggi Kadar Phenol , karbonil dan total asam tertinggi pada sampel dengan suhu tertinggi dan waktu proses pada 2 jam terakhir yakni 1,126% ; 0,3601% ; dan 1,5746% Terdapat kecenderungan bahwa semakin tinggi suhu proses, nilai kalor, kadar karbon terikat, kadar abu, kadar air untuk bioarang semakin tinggi dan kadar phenol, karbonil, total asam untuk asap cair juga semakin tinggi. Pemanfaatan bioarang untuk berbagai produk turunan seperti karbon aktif dan asap cair untuk pengawet alami. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem rocket stove-retort dengan double condenser berpotensi menjadi teknologi sederhana yang mampu mengkonversi limbah ampas teh menjadi produk bernilai tambah sehingga mendukung konsep waste-to-energy dan ekonomi sirkular.

Kata Kunci : Ampas teh, asap cair, bioarang, pirolisis, rocket stove.

ABSTRACT

Waste in the form of spent tea leaves (tea dregs) continues to increase alongside the public consumption of tea as a beverage. Spent tea leaves represent an underutilized biomass resource; however, their lignocellulosic content holds potential for conversion into biochar and liquid smoke via pyrolysis. Research into utilizing spent tea leaves via a rocket stove-retort system equipped with a double condenser remains limited, necessitating a study on the characteristics of the resulting products. Meanwhile, the packaged tea beverage industry continues to expand in terms of both the number of brands and production volume. According to 2016 BPS data, national dry tea leaf production stood at 74,793 tons per year; the resulting waste requires management through technological approaches, such as pyrolysis. This study employs a pyrolysis method utilizing a rocket stove-retort reactor combined with a double condenser system connected to the pyrolysis gas outlet.

The experiment was conducted over 240 minutes using three operating temperature variations controlled by the burner valve ($\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, and full open). The biochar product underwent proximate analysis, while the liquid smoke was characterized based on phenol, carbonyl, and total acid content. The study focused on determining the characteristics of biochar and liquid smoke derived from spent tea leaves using the rocket stove-retort technology with a double condenser. The research variable was the peak temperature, determined by varying the burner valve opening—low ($\frac{1}{4}$ opening), medium ($\frac{1}{2}$ opening), and high (full opening)—over a 4-hour process with a holding time at the 180-minute mark. The results revealed that the sample subjected to the highest peak temperature exhibited the following biochar characteristics: a calorific value of 5,718.81 kcal/kg, fixed carbon content of 44.96%, ash content of 9.91%, and moisture content of 7.65%. The lowest volatile matter content (37.48%) was observed in the sample processed at the highest temperature. Similarly, the highest levels of phenols, carbonyls, and total acids—recorded at 1.126%, 0.3601%, and 1.5746%, respectively—were found in the sample processed at the highest temperature with a processing time of two hours. A trend was observed wherein higher processing temperatures resulted in increased calorific values, fixed carbon content, ash content, and moisture content for the biochar, as well as higher levels of phenols, carbonyls, and total acids in the liquid smoke. Biochar can be utilized for various derivative products, such as activated carbon, while liquid smoke serves as a natural preservative. The study results indicate that the rocket-stove retort system with a dual condenser holds potential as a simple technology capable of converting tea waste into valuable products, thereby supporting waste-to-energy concepts and the circular economy.

Keyword : Tea dregs, Liquid Smoke, Biochar, Pyrolysis, Rocket Stove

PENDAHULUAN

Teh merupakan minuman favorit yang banyak dikonsumsi oleh masyarakat Indonesia. Perusahaan minuman teh kemasan pun terus meningkat baik jumlah merk maupun produksinya. Berdasarkan data BPS 2016 produksi daun teh kering secara nasional sebesar 74.793 Ton pertahun. Padahal, minuman teh menghasilkan limbah ampas daun teh sehingga jumlah limbah ini pertahun cukup besar dan tersebar di lingkungan. Minuman teh dapat memberi rasa segar, dapat memulihkan kesehatan badan karena kandungan senyawa kimia yaitu golongan Fenol (Katekin dan Flavanol), golongan non-Fenol (Karbohidrat, Pektin, Alkaloid, Protein/Asam amino), golongan senyawa aromatis dan golongan enzim-enzim [1,2]. Disisi lain, konsumsi energi rumah tangga pada tahun 2016 [3] cukup besar yakni pada jenis biomassa dengan volume 114.546 ribu ton, minyak tanah 505.259 kiloliter dan LPG 6,37 juta ton. Penggunaan biomassa kayu bakar, arang kayu dan gas LPG berpengaruh terhadap jumlah luas hutan dan perairan. Hal tersebut menjadi perhatian khusus dari pemerintah melalui kebijakan tentang pemenuhan energi dari sumberdaya baru terbarukan sesuai dengan renstra EBT.

Pemanfaatan Limbah ampas daun teh (*Tea waste*) menjadi Bioarang sebagai sumber energi dapat mendukung terwujudnya dari konsep *Waste to Energy* dan pemenuhan energi baru terbarukan berbasis biomassa. Arang ampas daun teh memiliki potensi menjadi bahan campuran briket arang sebagai substitusi arang kayu guna menunjang *clean energy*. Saat ini terdapat lebih dari 20 perusahaan produsen teh di Indonesia yang menjadi pemasok the yang beredar di masyarakat [4].

Salah satu sumber lokasi riset untuk memperoleh bahan baku limbah ampas teh secara kolektif yakni di Pusat industri pengecoran logam Kecamatan Ceper, Klaten Jawa Tengah. Koperasi Batur Jaya terdapat sekitar 3500 pengusaha IKM (Industri Kecil dan Menengah) pengecoran logam yang memproduksi secara aktif. Industri-industri ini selalu menyediakan minuman the kepada karyawannya. Salah satu sampel yakni perusahaan permesinan CV.Mulya Jaya yang memiliki 17 orang karyawan dengan jumlah ampas daun teh yang dihasilkan sekitar 1200 gram teh per bulan. Jika terdapat 3.500 pengusaha IKM maka asumsi ampas teh sekitar 4,2 ton perbulan. Estimasi ini belum ditambahkan dengan penggunaan teh oleh warung-warung makan/angkringan disekitar kecamatan Ceper akibat keberadaan Industri ini.

Sumber limbah ampas teh lainnya yakni di Yogyakarta, sampel dari angkringan yang setiap bulan menghasilkan setidaknya 1 kg ampas teh padahal ada lebih dari 3000 angkringan, sehingga ada lebih dari 3 ton limbah ampas teh perhari dari sumber angkringan. Selain itu ada lebih dari 10 perusahaan air minum teh di Indonesia yang juga memiliki limbah ampas daun the Limbah atau ampas teh dapat digunakan sebagai sumber energi, namun jika digunakan dengan pembakaran langsung masih memiliki nilai kalor yang rendah sehingga kurang efisien untuk sumber panas. Untuk itu diperlukan teknologi untuk meningkatka kualitas limbah ampas daun teh. Teknologi Pirolisis dapat mengubah biomassa menjadi bioarang yang memiliki nilai kalor lebih tinggi. Gas pirolisis jika dikondensasi dapat menghasilkan produk cair berupa asap cair sebagai bahan pengawet makanan. Kandungan senyawa fenol dari teh dan asam asetat menjadi senyawa dominan dari gas pirolisis sehingga diprediksi menjadi senyawa utama dari asap cair [5] .

Teknologi pirolisis yang digunakan dan ujicoba yakni dengan metode pirolisis *rocket stove retort* dengan dikombinasikan sistem *double condenser* menggunakan dua kondensor yang saling terhubung pada saluran gas pirolisisnya. Gas Pirolisis yang melalui kondensor dicairkan menjadi asap cair dalam dua tingkat sedangkan uncondensable gas digunakan kembali sebagai *recycle gas* untuk sumber energi panas (*self heating*) yang dapat dikontrol penggunaannya melalui katup dan *gas holder*. Sistem teknologi ini memungkinkan gas pirolisis yang menjadi emisi digunakan sebagai sumber energi sehingga lebih hemat energi. Selain itu, desain reaktor *rocket stove* memungkinkan panas merambat lebih merata dari bawah hingga bagian atas reaktor sehingga proses lebih cepat dan lebih efisien.

Penelitian ini difokuskan untuk mengetahui karakteristik bioarang dan asap cair dari ampas daun teh menggunakan teknologi *rocket stove retort* dengan *double condenser*. Produk dari proses ini berupa padat yakni bioarang yang dapat menjadi bahan baku briket arang sebagai sumber energi dari limbah dan produk cair berupa asap cair yang dapat menjadi bahan pengawet

[6], Keunikan lainnya briket arang dan asap cair dari the akan memiliki kekhasan baik dari bau dan manfaat karena berasal dari daun teh yang selama ini favorit dimasyarakat.

Berbagai penelitian sebelumnya telah melaporkan pirolisis biomassa menggunakan reaktor fixed bed maupun batch reactor konvensional. Namun sebagian besar penelitian masih berfokus pada karakteristik biochar tanpa memanfaatkan gas pirolisis secara optimal. Sistem rocket stove-retort dengan double condenser memiliki potensi meningkatkan efisiensi energi melalui pemanfaatan kembali gas tidak terkondensasi (recycle gas) serta meningkatkan perolehan asap cair melalui kondensasi bertingkat. Hingga saat ini penelitian mengenai karakteristik bioarang dan asap cair dari limbah ampas teh menggunakan konfigurasi tersebut masih sangat terbatas. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi suhu terhadap kualitas bioarang dan asap cair yang dihasilkan.

METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Bahan Penelitian

Bahan Penelitian Bahan baku yang digunakan pada penelitian ini adalah Sampel Biomassa Limbah ampas daun teh (*tea waste*) yang diambil dari konsumen di Yogyakarta. Air digunakan pada penelitian ini berfungsi untuk pendingin pada kondensor. Ampas teh terlebih dahulu dikeringkan secara alami hingga kadar air awal kurang dari $\pm 10\%$, kemudian diseragamkan ukuran partikelnya sekitar 1–3 cm sebelum dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis.

2.2 Variabel Penelitian

Variabel bebas pada penelitian ini adalah suhu puncak tanpa memperhatikan laju pemaasanan. Suhu puncak dikontrol dengan penyalan katup pada burner dan pembacaan pada thermometer di pirolisis rocket stove [8,9,10]. Suhu puncak penelitian ini yakni sample 1 (suhu rendah) dengan pembukaan katup burner $\frac{1}{4}$ valve, sample 2 (suhu sedang) dengan pembukaan katup burner valve $\frac{1}{2}$ dan sample 3 (suhu tinggi) dengan pembukaan valve burner 1 (penuh). Kontrol variable yakni bahan baku diambil dari lokasi yang sama, waktu/lama proses yakni 1.5 jam. Variabel Terikatnya yakni suhu puncak, Karakteristik bioarang dan karakteristik asap cair. Karakteristik Bioarang berupa *Gross Heating Value/Nilai Kalor*, *Fixed Carbon*, *volatile matter*, *moisture content* dan *Ash Content* menggunakan proksimate analisis. Karakteristik asap cair yakni phenol, karbonil dan total asam .[13,14,15] . Variabel bebas penelitian adalah suhu puncak pirolisis yang dikontrol melalui variasi bukaan katup burner sebesar $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ dan penuh. Variabel kontrol meliputi massa biomassa sebesar 5 kg, jenis biomassa, ukuran partikel, waktu pirolisis selama 240

menit, holding time 60 menit, debit air pendingin kondensor yang dijaga konstan, tekanan operasi atmosfer serta jenis bahan bakar pemanas. Variabel terikat berupa karakteristik bioarang (kadar air, kadar abu, volatile matter, fixed carbon dan nilai kalor) serta karakteristik asap cair (fenol, karbonil dan total asam).

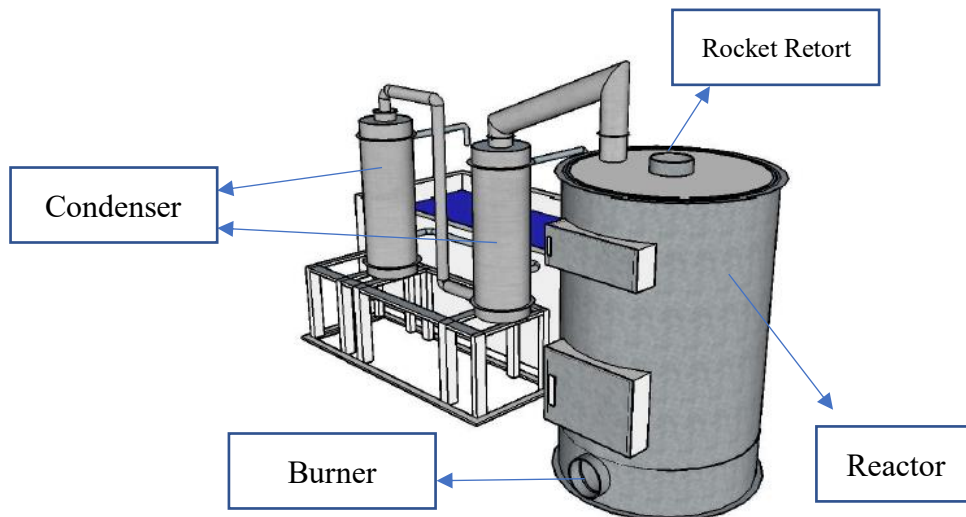
2.3 Peralatan penelitian

Skema Alat Penelitian Retort-Rocket Stove Pirolizer dengan double condenser [12,13,14,15]. Reaktor pirolisis dibuat dari logam berbentuk silinder dengan sistem rocket stove-retort berkapasitas sekitar 200 L. Sistem kondensasi terdiri atas dua buah kondensor yang dihubungkan secara seri menggunakan pipa logam diameter ½ inch. Pendinginan menggunakan air bersirkulasi kontinu sehingga temperatur kondensor tetap stabil selama proses pirolisis berlangsung. Temperatur reaktor dipantau menggunakan thermocouple tipe-K yang dipasang pada reaktor. Teknologi Pirolisis dengan Metode Retort-Rocket Pirolizer dengan double condenser memiliki spesifikasi alat sebagai berikut :

Table 1. Spesifikasi Pirolisis Rocket Retort Doble Condenser

Unit	Nilai	Satuan
Reactor Rocket Retort		
Volume reaktor	200	Liter
Tinggi reaktor	95	cm
Diameter reaktor	58	cm
Diameter Fire Channel	12,7	cm
Condensor Shell&tube		
Volume Kondensor	18,8	liter
Tinggi kondensor	60	cm
Diameter kondensor	20	cm
Jumlah Pipa Pendingin	6	unit
Diameter Pipa Pendingin	0,5	inch
Burner		
Kompresor	2	HP
Tekanan Nozzle	4	Bar
Konsumsi BBM	2	Liter/jam
Performance		
Suhu	+/- 600	°C
Waktu	2-4	Jam/batch

Desain alat terlihat pada gambar 1 sebagai berikut :



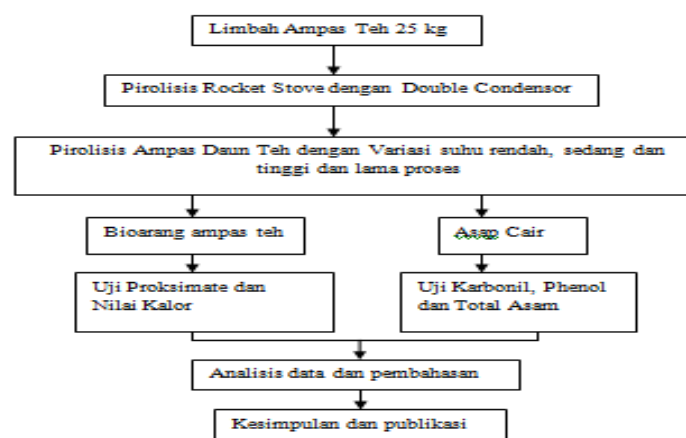
Gambar 1 . Alat Pirolisis Rocket Stove dengan Double Condenser

Kondisi operasional dari proses pirolisis dengan metode ini adalah sebagai berikut :
Tabel. 2 Kondisi Operasi Proses Pirolisis Rocket Retort

Parameter	Nilai	Satuan
Laju Pemanasan	5-15	°C/menit
Suhu Puncak	450-550	°C
Holding Time	60	menit
Total Waktu Proses	240	menit/batch

2.4. Tahapan Pelaksanaan Penelitian

Penelitian dilakukan dengan penyiapan alat dan bahan, melakukan seting variable, pengambilan data , pengujian laboratorium [11,12] dan analisis data. Tahapan penelitian dilakukan seperti pada diagram pada gambar 2 dibawah ini:



Gambar 2 . Diagram Jalannya penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses pirolisis limbah ampas teh dilakukan dengan sistem batch dengan pemanasan dari suhu ruang kamar menggunakan burner yang di atur pada beberapa variable bukaan sehingga laju pemanasan berada diantara 5°C/menit hingga 15 °C/menit hingga berada pada suhu puncak antara 450°C-550°C. Proses di dalam reactor terjadi dengan meminimalkan oksigen karena proses pirolisis adalah kondisi degradasi termal tanpa oksigen pada biomassa dalam penelitian ini adalah ampas teh. Suhu proses naik hingga 100°C uapair terlepas dari limbah the lalu suhu danik di kisaran 200°C-250°C maka lignin dan volatile matter mulai terlepas menjadi gas, di fase ini gas mulai mempan untuk di bakar ,lalu asap cair telah terbentuk melalui kondensasi di kondensor. Suhu naik hingga 450-550 °C dan ditahan 60 menit hingga semua material terkonversi menyisakan arang karbon sisa proses . pada akhir proses diperoleh produk berupa arang karbon (biochar), asap cair (Liquod Smoke) dan gas pirolisis yg dibakar selama proses.

Berikut tahapan proses pirolisis :

1. Biomassa berupalimbah ampas teh di timbang
2. Limbah ampas the dimasukkan ke retort reactor pirolisis
3. Reaktor ditutup dan Air sirkulasi kondensor dialirkan
4. Burner dinyalakan, sesuai dengan bukaan katup/variable
5. Temperatur dicatat , suhu puncak dicatat,proses pirolisis berjalan
6. Asap cair yang terbentuk di kondensor di tambung, di ukur volume dan beratnya
7. Setelah tidak terbentuk gas pirolisis,burner dimatikan, Biochar di dalam rekator di keluarkan esok hari setelah dingin lalu dianalisis proksimat
8. Asap cair dianalisis kadar fenol, karbonil dan total asam.



Gambar 3. Pembakaran Gas Pirolisis (kiri) , Proses Pirolisis (tengah), suhu puncak (kanan)

Biomassa ampas teh termasuk biomassa lignoselulosa yang tersusun atas hemiselulosa, selulosa, lignin, ekstrakatif, protein, dan mineral. Selama proses pirolisis pada kondisi minim oksigen, komponen-komponen tersebut mengalami degradasi termal secara bertahap

menghasilkan produk padat (biochar), produk cair (bio-oil/asap cair), dan gas pirolisis. Mekanisme dekomposisi setiap komponen biomassa berlangsung pada rentang temperatur yang berbeda sehingga mempengaruhi komposisi kimia produk akhir. [27,28]

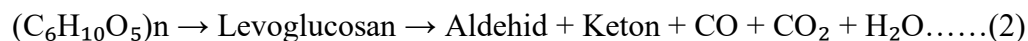
Hemiselulosa merupakan fraksi biomassa yang paling mudah terdegradasi dengan kisaran temperatur sekitar 200–320°C. Gugus asetil yang terdapat pada hemiselulosa mengalami reaksi deasetilasi menghasilkan asam asetat (CH₃COOH) sebagai komponen dominan pada asap cair. Selain itu terbentuk pula senyawa furfural, hidroksiaseton, metanol, karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂), dan sejumlah kecil aldehyd rantai pendek. Secara sederhana reaksi deasetilasi dapat dituliskan sebagai [29] :



Semakin tinggi suhu pirolisis maka semakin banyak gugus asetil yang terlepas sehingga konsentrasi total asam meningkat. Fenomena ini sesuai dengan hasil penelitian yang menunjukkan peningkatan kadar total asam pada suhu pirolisis tertinggi.

Selulosa mulai mengalami depolimerisasi pada temperatur sekitar 300–380°C. Ikatan β-(1→4)-glikosidik mengalami pemutusan sehingga menghasilkan senyawa antara berupa levoglucosan yang selanjutnya mengalami cracking menjadi hidroksiasetaldehyd, asetaldehyd, hidroksiaseton, furfural, formaldehyd, aseton serta berbagai senyawa karbonil lainnya.

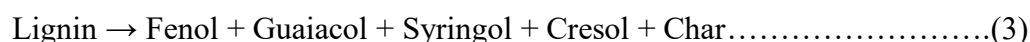
Reaksi sederhananya dapat digambarkan sebagai berikut:



Terbentuknya aldehyd dan keton inilah yang menyebabkan kadar karbonil asap cair meningkat pada temperatur pirolisis yang lebih tinggi. Senyawa karbonil juga berperan memberikan aroma khas asap cair sekaligus berkontribusi terhadap sifat antimikroba dan antioksidan.[30,31,]

Lignin merupakan komponen biomassa yang paling stabil secara termal sehingga mengalami degradasi secara perlahan pada rentang suhu 250–600°C. Struktur lignin yang tersusun atas unit guaiacyl (G), syringyl (S), dan p-hydroxyphenyl (H) mengalami pemutusan ikatan β-O-4 sehingga menghasilkan berbagai senyawa fenolik.

Reaksi sederhana degradasi lignin dapat dituliskan sebagai



Semakin tinggi temperatur pirolisis maka reaksi pemutusan ikatan eter pada lignin berlangsung lebih intensif sehingga kadar fenol meningkat. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian dimana kadar fenol tertinggi diperoleh pada perlakuan suhu tertinggi.

Selain menghasilkan senyawa cair, proses pirolisis juga menghasilkan gas yang terdiri atas karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂), hidrogen (H₂), metana (CH₄), dan hidrokarbon ringan. Pada sistem rocket stove-retort yang digunakan dalam penelitian ini, gas tidak terkondensasi dimanfaatkan kembali sebagai bahan bakar burner sehingga meningkatkan efisiensi energi proses. Kondisi tersebut menjadikan sistem lebih hemat energi dibandingkan reaktor batch konvensional karena sebagian energi berasal dari hasil pirolisis itu sendiri.[32,33]

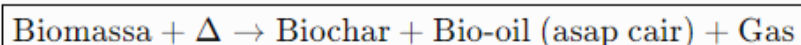
Hubungan Suhu Pirolisis terhadap Reaksi Kimia

Kenaikan temperatur menyebabkan meningkatnya energi aktivasi yang mampu memutus ikatan C–O, C–C dan β-O-4 pada lignin. Akibatnya reaksi cracking primer dan sekunder berlangsung lebih sempurna sehingga kandungan senyawa volatil berkurang, fixed carbon meningkat, sedangkan konsentrasi senyawa fenol, karbonil dan asam organik dalam asap cair menjadi lebih tinggi. Pada temperatur di atas 500°C sebagian bio-oil juga mengalami cracking lanjutan menghasilkan gas ringan sehingga komposisi gas CO, H₂ dan CH₄ meningkat.

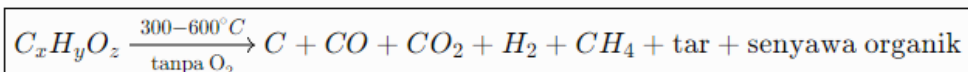
Fenomena tersebut konsisten dengan hasil penelitian ini yang menunjukkan peningkatan nilai kalor biochar, fixed carbon, fenol, karbonil dan total asam seiring meningkatnya temperatur pirolisis, sedangkan volatile matter mengalami penurunan.[34]

Reaksi umum pirolisis biomassa

Secara keseluruhan proses pirolisis dapat dituliskan sebagai [35,36]



Atau



Produk utama terdiri atas:

- Biochar (karbon padat)
- Bio-oil/asap cair
- Syngas (CO, CO₂, H₂, CH₄)

Tabel 3. Reaksi tiap komponen biomassa pada Pirolisis [35,36,37]

Komponen biomassa	Rentang suhu (°C)	Reaksi dominan	Produk utama
Hemiselulosa	200–320	Deasetilasi, dekarboksilasi	Asam asetat, CO ₂ , furfural
Selulosa	300–380	Depolimerisasi, cracking	Levoglucosan, aldehyd, keton, furan
Lignin	250–600	Pemutusan β -O-4, demetoksilasi	Fenol, guaiacol, syringol
Residu karbon	>400	Karbonisasi	Biochar

3.1. Karakteristik Bioarang Ampas Teh

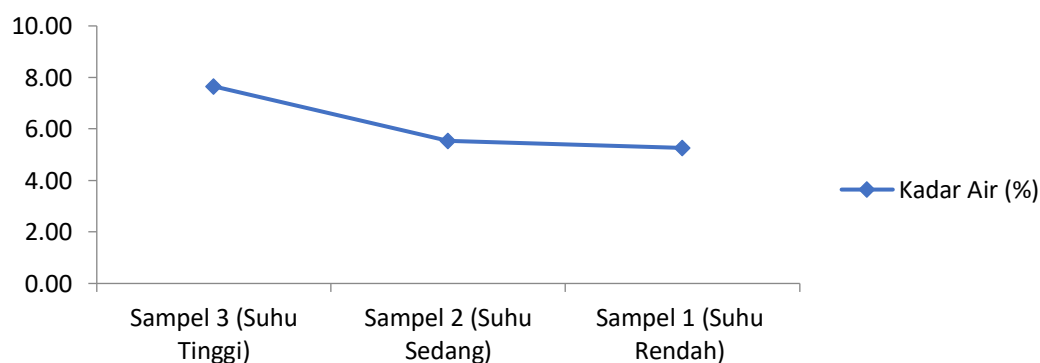
Berdasarkan hasil uji proksimate dari bioarang ampas teh dengan pirolisis rocket stove dengan 3 variabel suhu puncak maka diperoleh informasi data karakteristik berupa kadar air, kadar abu, kadar volatile matter, kadar karbon terikat dan nilai kalor. Data yang diperoleh menunjukkan bahwa terdapat pengaruh suhu puncak dari proses pirolisis terhadap karakteristik bioarang.



Gambar 4. Biochar hasil pirolisis limbah ampas teh

Kadar Air

Kadar air dari proses pirolisis dapat ditunjukkan pada grafik gambar 3 sebagai berikut :



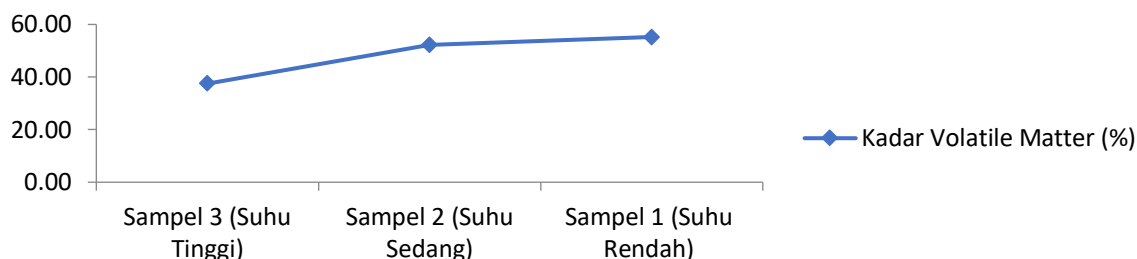
Grafik 1 . Kadar air bioarang ampas teh

Kadar Air bioarang tertinggi yakni pada bioarang dengan suhu tinggi (Bukaan katup penuh) sebesar 7,65%. Kadar air terendah yakni pada sample dengan perlakuan suhu terendah (bukaan katup 1/4) yakni 5.26% . Peningkatan kadar air pada bioarang yang diperoleh pada suhu tinggi menunjukkan bahwa struktur pori bioarang yang semakin berkembang mampu mengadsorpsi kembali uap air selama proses pendinginan. Selain itu, semakin tingginya

temperatur menyebabkan perubahan struktur karbon menjadi lebih berpori sehingga kapasitas penyerapan kelembaban meningkat. Fenomena serupa juga dilaporkan oleh Basu (2013) dan Cai et al. (2018).

Kadar Volatile Matter

Kadar volatile matter atau kadar zat terbang dari proses pirolisis dapat ditunjukkan pada grafik pada gambar 4 sebagai berikut :

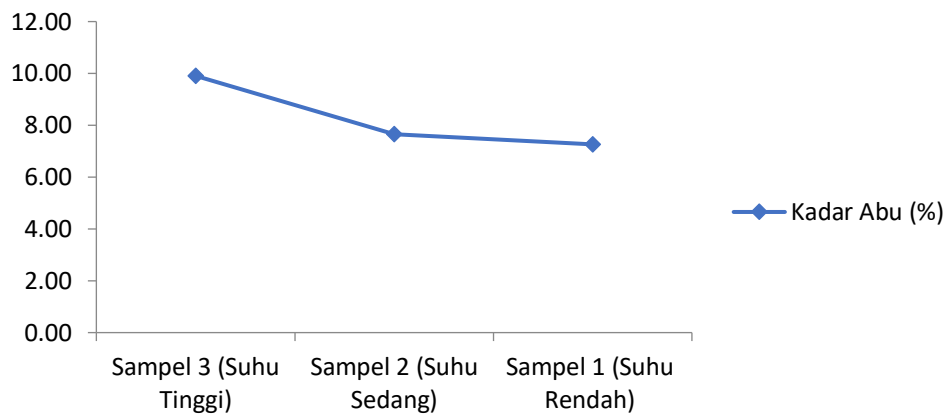


Grafik 2 . Kadar volatile matter bioarang ampas teh

Kadar Zat Terbang/volatile matter bioarang tertinggi yakni pada bioarang dengan terendah sebesar 55,23%. Kadar Zat Terbang terendah yakni pada sample dengan perlakuan suhu tertinggi 37,48% . Secara umum terlihat kecenderungan semakin tinggi suhu maka semakin rendah kadar zat terbang . Penurunan volatile matter merupakan indikasi semakin sempurnanya proses pirolisis karena senyawa volatil telah terurai menjadi gas pirolisis. Akibatnya residu padat menjadi lebih kaya karbon sehingga nilai kalor meningkat. Penurunan volatile matter merupakan indikasi berlangsungnya proses devolatilisasi biomassa secara lebih sempurna. Pada temperatur tinggi hemiselulosa dan selulosa mengalami dekomposisi menjadi gas pirolisis sehingga kandungan senyawa volatil yang tertinggal dalam bioarang semakin kecil. Kondisi tersebut menyebabkan kualitas bioarang meningkat karena kandungan karbon relatif menjadi lebih tinggi.

Kadar Abu

Kadar Abu dari proses pirolisis dapat ditunjukkan pada grafik pada gambar 5 sebagai berikut :

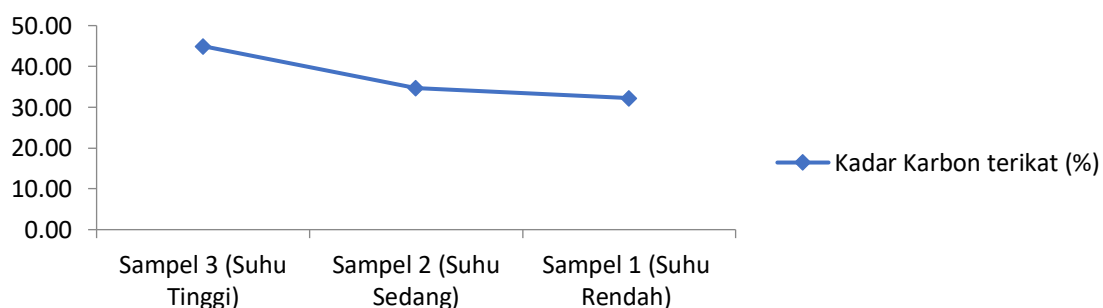


Grafik 3 . Kadar abu bioarang ampas teh

Kadar abu bioarang tertinggi yakni pada bioarang dengan suhu tertinggi sebesar 9,91%. Kadar abu terendah yakni pada sample dengan perlakuan suhu terendah yakni sebesar 7,26% . Secara umum terlihat kecenderungan semakin rendah suhu maka semakin rendah kadar abu. Persentase abu meningkat bukan karena terbentuknya mineral baru, melainkan akibat berkurangnya massa organik selama pirolisis sehingga fraksi mineral menjadi lebih dominan. Peningkatan kadar abu bukan menunjukkan terbentuknya mineral baru, tetapi merupakan akibat berkurangnya fraksi organik selama pirolisis sehingga persentase mineral menjadi relatif lebih besar. Dengan kata lain, semakin banyak material volatil yang keluar maka fraksi abu akan meningkat.

Kadar Karbon Terikat

Kadar Karbon Terikat dari proses pirolisis dapat ditunjukkan pada grafik pada gambar 6 sebagai berikut :



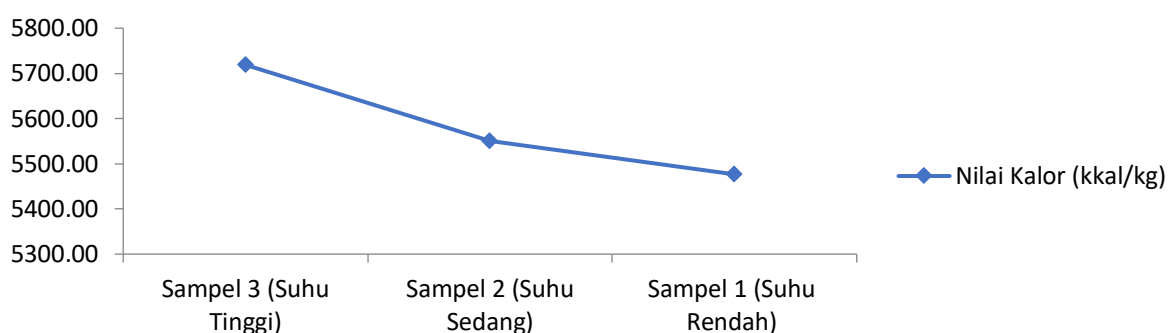
Grafik 4 . Kadar karbon terikat bioarang ampas teh

Kadar karbon terikat bioarang tertinggi yakni pada bioarang dengan suhu proses tertinggi sebesar 44,96%. Kadar karbon terikat terendah yakni pada sample dengan perlakuan suhu

terendah yakni sebesar 32,24% . Secara umum terlihat kecenderungan semakin tinggi suhu maka semakin tinggi kadar karbon terikat. Peningkatan kadar karbon terikat pada suhu yang lebih tinggi disebabkan oleh semakin intensifnya proses devolatilisasi biomassa. Selulosa, hemiselulosa dan lignin mengalami dekomposisi termal sehingga fraksi volatil keluar dari matriks biomassa dan menyisakan struktur karbon aromatik yang lebih stabil. Kondisi ini menyebabkan fixed carbon meningkat seiring peningkatan temperatur pirolisis. Fenomena tersebut juga telah dilaporkan oleh Bridgwater (2012), Basu (2013), dan Cai et al. (2018). Kadar karbon terikat meningkat karena pembentukan struktur karbon aromatik selama proses karbonisasi. Pada temperatur tinggi terjadi pelepasan gugus hidroksil, karbonil dan metoksil sehingga residu padat menjadi semakin kaya karbon. Fenomena tersebut merupakan karakteristik umum proses pirolisis biomassa lignoselulosa.

Nilai Kalor

Nilai kalor dari proses pirolisis dapat ditunjukkan pada grafik pada gambar 7 sebagai berikut :



Grafik 5. Nilai Kalor bioarang ampas teh

Nilai kalor tertinggi yakni pada bioarang dengan suhu proses tertinggi sebesar 5.718,81 kkal/kg. Nilai terendah yakni pada sample dengan perlakuan suhu terendah yakni sebesar 5.476,50 kkal/kg. Secara umum terlihat kecenderungan semakin tinggi suhu maka semakin tinggi nilai kalor. Berdasarkan hasil penelitian dan uji laboratorium, terdapat beberapa informasi yakni karakteristik bioarang dari pirolisis ampas teh dengan metode rocket stove dan variasi suhu. Nilai kalor, kadar karbon terikat, kadar abu dan kadar air menunjukkan nilai tertinggi pada sample dengan suhu tinggi.[16,17,18] Kadar Zat terbang menunjukkan nilai tertinggi pada suhu terendah. Hal ini menunjukkan kecenderungan pada Pirolisis dengan temperatur puncak yakni 500C dan waktu 240 menit dengan Rocket stove Retort menunjukkan kualitas terbaik pada nilai kalor dan kadar karbon terikat. Nilai yang diperoleh untuk hampir kesemua sample berada pada standar SNI Briket Arang untuk nilai kalor, kadar abu dan kadar air. Nilai kalor seluruh sample diatas 5000 kkal/kg, kadar abu semua sampel di bawah 15%,

dan kadar air semua sampel dibawah 8%. Namun kesemua sample tidak memenuhi standar Kadar Zat terbang maksimal 15%. Selain itu seluruh sample tidak memenuhi standar kadar karbon Terikat dengan nilai minimal 72%. [19,20,21] Nilai kalor meningkat seiring meningkatnya fixed carbon dan menurunnya volatile matter. Bioarang dengan kandungan karbon yang lebih tinggi memiliki energi pembakaran lebih besar sehingga berpotensi digunakan sebagai bahan bakar padat maupun bahan baku briket.

Nilai kalor bioarang penelitian ini sedikit lebih tinggi dibanding penelitian sebelumnya yang diduga dipengaruhi oleh distribusi panas yang lebih merata pada sistem rocket stove-retort.

Tabel 4. Perbandingan Nilai Kalor Biochar Ampas Teh

Penelitian	Biomassa	Nilai kalor
Penelitian ini	Ampas teh	5718 kkal/kg
Cai et al.	Tea waste	5600 kkal/kg
Anuskha et al.	Tea waste	5550 kkal/kg
Tian et al.	Tea leaves	5530 kkal/kg
Roy et al.	Tea waste	5450 kkal/kg

Nilai kalor penelitian ini sedikit lebih tinggi dibanding beberapa penelitian terdahulu. Hal ini diduga dipengaruhi oleh penggunaan sistem rocket stove retort yang menghasilkan distribusi panas lebih merata serta pemanfaatan double condenser sehingga efisiensi proses meningkat

3.2. Karakteristik Asap Cair Dari Ampas Daun Teh

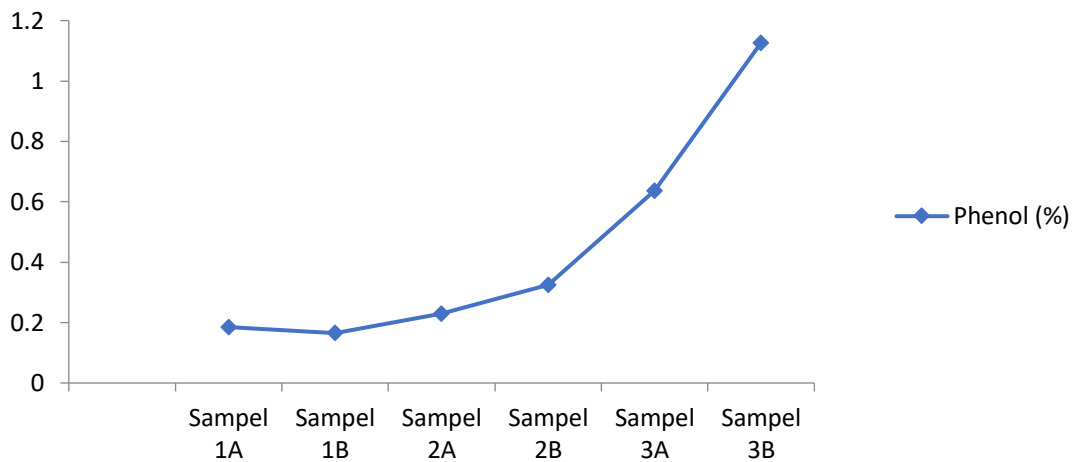
Proses pirolisis dengan Double Condensor menghasilkan asap cair/liquid smoke dengan karakteristik phenol, karbonil dan Total Asam sebagai berikut :



Gambar 5. Liquid Smoke atau Asap Cair Hasil Pirolisis Limbah Ampas Teh

Phenol

Karakteristik Phenol dari proses pirolisis dapat ditunjukkan pada grafik pada gambar 8 sebagai berikut :

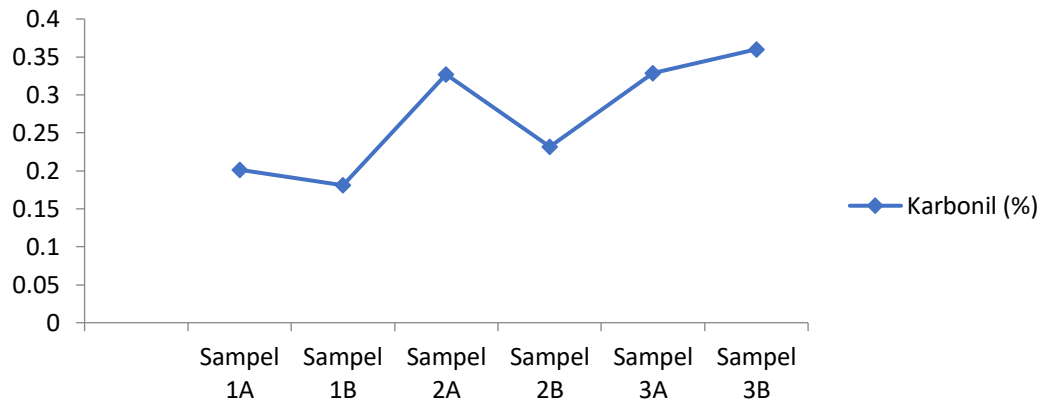


Grafik 6 . Kadar phenol asap cair ampas teh

Kadar phenol asap cair ampas teh tertinggi yakni pada asap cair dengan suhu proses tertinggi dan waktu 2 jam terakhir sebesar 1,126%. Kadar phenol terendah yakni pada sample dengan perlakuan suhu terendah pada dua jam terakhir yakni sebesar 0,1651% . Secara umum terlihat kecenderungan semakin tinggi suhu maka semakin tinggi kadar phenol pada asap cair[22,23]. Fenol terutama berasal dari degradasi lignin. Pada temperatur tinggi ikatan eter lignin mengalami pemutusan sehingga menghasilkan berbagai turunan fenolik yang berfungsi sebagai antimikroba alami. Fenol terutama dihasilkan dari degradasi lignin. Semakin tinggi suhu pirolisis maka semakin besar pemutusan ikatan eter lignin sehingga menghasilkan senyawa fenolik yang lebih tinggi.

Karbonil

Karakteristik Karbonil dari proses pirolisis dapat ditunjukkan pada grafik pada gambar 9 sebagai berikut :

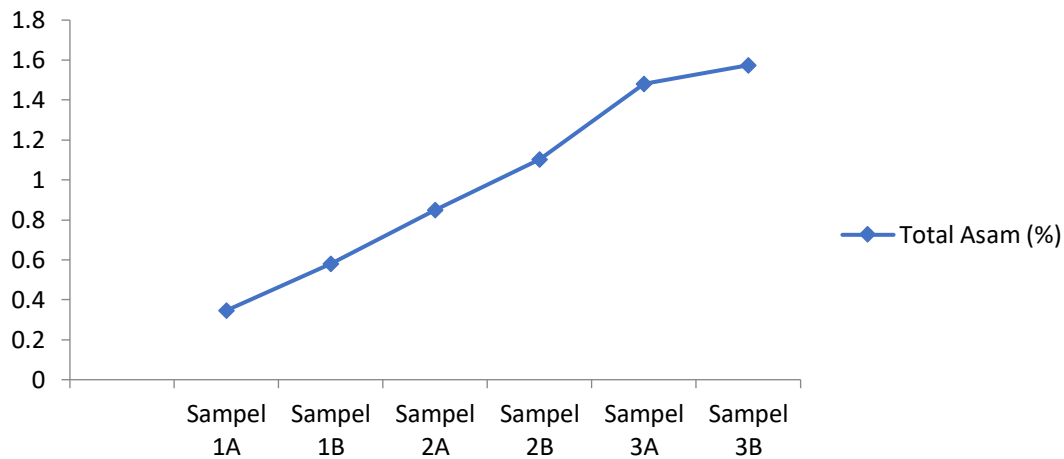


Grafik 7 . Kadar karbonil asap cair ampas teh

Kadar karbonil asap cair ampas teh tertinggi yakni pada asap cair dengan suhu proses tertinggi dan waktu 2 jam terakhir sebesar 0,3601%. Kadar karbonil terendah yakni pada sample dengan perlakuan suhu terendah pada dua jam terakhir yakni sebesar 0,1810% . Secara umum terlihat kecenderungan semakin tinggi suhu maka semakin tinggi kadar karbonil pada asap cair.[24]. Senyawa karbonil terbentuk terutama dari degradasi hemiselulosa dan selulosa selama pirolisis pada kisaran suhu 250–450°C. Peningkatan suhu mempercepat pemutusan ikatan glikosidik sehingga menghasilkan aldehid dan keton yang selanjutnya terkondensasi menjadi fraksi asap cair. Oleh karena itu kadar karbonil meningkat pada suhu puncak yang lebih tinggi. Senyawa karbonil berasal dari degradasi hemiselulosa dan selulosa. Peningkatan temperatur mempercepat pembentukan aldehid dan keton sehingga kadar karbonil meningkat.

Total Asam

Karakteristik Total Asam dari proses pirolisis dapat ditunjukkan pada grafik pada gambar 10 sebagai berikut :



Grafik 8. Total Asam asap cair ampas the

Total asam asap cair ampas teh tertinggi yakni pada asap cair dengan suhu proses tertinggi dan waktu 2 jam terakhir sebesar 1,4534%. Total asam terendah yakni pada sample dengan perlakuan suhu terendah pada dua jam pertama yakni sebesar 0,4625% . Secara umum terlihat kecenderungan semakin tinggi suhu maka semakin tinggi total asam pada asap cair[25,26]. Pemanfaatan lebih lanjut dari asap cari pirolisis daun teh dapat dikembangkan sebagai pengawet alami baik untuk *foodgrade* mauoun *non food grade*. Total asam terutama didominasi oleh asam asetat yang berasal dari gugus asetil hemiselulosa. Semakin tinggi suhu pirolisis maka semakin besar deasetilasi biomassa sehingga menghasilkan konsentrasi asam asetat yang lebih tinggi. Total asam didominasi oleh asam asetat hasil deasetilasi hemiselulosa. Oleh karena itu semakin tinggi temperatur maka konsentrasi total asam meningkat.

Implikasi Praktis

Tabel 5. Implikasi Praktis produk pirolisis ampas teh

Biochar Ampas Teh	AsapCair Ampas Teh
• bahan baku karbon aktif • adsorben logam berat • soil amendment • bahan baku briket	• pengawet pangan • antibakteri • pestisida organik • koagulan lateks • pengawet kayu

Kandungan fenol dan total asam yang meningkat pada suhu tinggi menunjukkan bahwa asap cair hasil penelitian ini memiliki potensi sebagai pengawet alami karena kedua komponen tersebut merupakan senyawa antimikroba utama

Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan, yaitu belum dilakukan identifikasi komponen kimia menggunakan GC-MS atau FTIR sehingga komposisi individual senyawa asap cair belum diketahui. Selain itu, penelitian masih menggunakan pendekatan eksploratif tanpa analisis statistik inferensial. Penelitian selanjutnya perlu melakukan optimasi parameter pirolisis menggunakan Response Surface Methodology (RSM) maupun analisis kinetika untuk memperoleh kondisi operasi optimum.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian diperoleh beberapa kesimpulan yakni:

1. Nilai Kalor, Kadar Karbon Terikat, Kadar Abu, dan kadar air tertinggi yakni pada sampel dengan yakni 5.718,81 kkal/kg ; 44,96% ; 9,91% dan 7,65% . Kadar Volatile matter terendah yakni 37.48% pada sampel dengan suhu tertinggi
2. Kadar Phenol , karbonil dan total asam tertinggi pada sampel dengan suhu tertinggi dan waktu proses pada 2 jam terakhir yakni 1,126%; 0,3601%; dan 1,5746%
3. Terdapat kecenderungan bahwa semakin tinggi suhu proses, nilai kalor, kadar karbon terikat, kadar abu, kadar air untuk bioarang semakin tinggi dan kadar phenol, karbonil, total asam untuk asap cair juga semakin tinggi.

Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan sistem rocket stove-retort dengan double condenser mampu menghasilkan bioarang dan asap cair dengan karakteristik yang dipengaruhi oleh suhu pirolisis. Peningkatan suhu meningkatkan nilai kalor, fixed carbon, fenol, karbonil dan total asam, namun menurunkan volatile matter. Temuan ini menunjukkan bahwa teknologi tersebut berpotensi dikembangkan sebagai alternatif pengolahan limbah ampas teh yang mendukung konsep waste-to-energy dan ekonomi sirkular.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementrian Riset dan Pendidikan Tinggi yang telah membiayai penelitian ini melalui skema Penelitian Dosen Pemula Tahun 2019.

DAFTAR PUSTAKA

1. Chen H, Liu J, Chang X, Chen D, Xue Y, Liu P. A review on the pretreatment of lignocellulose for high-value chemicals. *Fuel Processing Technology*. 2017;160:196–206.
2. Tea Research Institute. Tea chemistry and health benefits. *Journal of Food Science and Nutrition*. 2016;54(3):345–356
3. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. *Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia 2017*. Jakarta: ESDM; 2017.
4. Badan Pusat Statistik. *Statistik Teh Indonesia 2016*. Jakarta: BPS; 2016
5. Bridgwater AV. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*. 2012;38:68–94.

6. Demirbas A. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*. 2001;42(11):1357–1378.
7. Mohan D, Pittman CU, Steele PH. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. *Energy & Fuels*. 2006;20(3):848–889.
8. Basu P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. 2nd ed. London: Academic Press; 2013.
9. Onay O, Koçkar OM. Fixed-bed pyrolysis of rapeseed. *Renewable Energy*. 2003;28(15):2417–2433.
10. ASTM International. Standard Test Method for Proximate Analysis of Coal and Coke. ASTM D3172-13. West Conshohocken; 2013.
11. AOAC. Official Methods of Analysis. 18th ed. Washington DC: Association of Official Analytical Chemists; 2005.
12. Hidayat T, Rahayu S. Desain kondensor pada sistem pirolisis biomassa. *Jurnal Rekayasa Proses*. 2015;9(2):45–52.
13. Aridito MN, Ayuningtyas E, Kurniawati YK, Nurusman HA. Variasi suhu pada pengolahan limbah sludge IPAL tekstil dengan teknologi pirolisis 2 fire channel 500 L. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*. 2025;25(1):72–82.
14. Ayuningtyas E, Aridito MN, Studi Karakteristik proses Pirolisis dan Arang dari Briket Serbuk Kayu Dengan Variasi Laju Pemanasan Menggunakan Metode Pirolisis Single Rocket Stove. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*. 2019; 19 (1)
15. Ayuningtyas E, Aridito MN, Karakteristik Arang Karbon Dari Limbah Serbuk Kayu Dengan Variasi Laju Pemanasan dan Laju Hisap Gas Sebagai Adsorben Dengan Pirolisis Twin Retort . *Jurnal Rekayasa Lingkungan*. 2022; 22 (2)
16. Anuska, Meththika, Zhang, Ahmad Mohan, Chang, Y.S. Ok., (2014) “Pyrolysis condition affected sulfamethazine sorption by tea waste biochars”, *Bioresource Technology*. 303-308
17. D.Czajczyńska, T. Nannou, L. Anguilano, R. Krzyzyska, H. Ghazal, N. Spencer, H. Jouhara., (2017) “Potentials of pyrolysis processes in the waste management sector”, *Energy Procedia* 123 387–394
18. M. Nandal, R. Hooda, G. Dhanial., (2014) “Tea Wastes as a Sorbent for Removal of Heavy Metals from wastewater”, *International Journal of Current Engineering and Technology* 243-247
19. Amarasinghe, S.K. Gunhatilake, A.K Karanarathna., (2016) “Ascertaining of optimum pyrolysis conditions in producing refuse tea biochar as a soil amendment”, *Procedia Food Science* 6 97-102
20. H. Cai, H. Zhou, J. Liu, W. Xie, J. Kuo, M. Buyukada, F. Evrendilek., (2018) “Thermal degradations and processes of waste tea and tea leaves via TG-FTIR: combustion performances, kinetics, thermodynamics, products and optimization” *Journal of bioresource technology*.
21. L. Tian, B. Shen, H. Xu, F. Li, Y. Wang, S. Singh., (2016) “Thermal behavior of waste tea pyrolysis by TG-FTIR analysis” *Journal of Energy* 533-542
22. R. Soysha, Y.S. Choi, S.J. Kim, S.K. Choy., (2016) "Fast pyrolysis characteristics and kinetic study of Ceylon tea waste". *International Journal of hydrogen energy*. 1-8
23. S. Besler and P. T. William, (2014) "The Influence of Temperature and Heating Rate on Slow Pyrolysis of Biomass," *Journal of Renewable Energy*, vol. 7, pp. 233 - 255.
24. S. Roy, S. Sengupta, S. Manna, P. Das., (2018) "Chemically reduced tea waste biochar and its application in treatment of fluoride containing wastewater: Batch and Optimization using Response Surface Methodology" *Procees Safety and Environmental Protection*.
25. Z. Hu, L. Zhang, Z. Liu, B. Xiao, S. Liu., (2013) “Experimental study on bio-oil production from pyrolysis of biomass micron fuel (BMF) in a free-fall reactor”, *Journal Fuel* 106., 52–557

26. Lingbeck JM, Cordero P, O'Bryan CA, Johnson MG, Rieke SC, Crandall PG. Functionality of liquid smoke as antimicrobial. ***Food Control***. 2014;40:109–115.
27. Yang, H., Wang, S., Chen, Y., et al. (2022). Advances in biomass pyrolysis for production of biochar, bio-oil and syngas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162, 112451.
28. Basu, P. (2023). *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory* (3rd Edition). Academic Press.
29. Wang, Y., Zhang, X., Li, J., et al. (2023). Recent advances in lignocellulosic biomass pyrolysis: Reaction mechanisms, products and applications. *Fuel*, 344, 127935.
30. Li, X., Zhao, C., Liu, Z., et al. (2024). Chemical evolution of phenolic compounds during biomass pyrolysis and their applications. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 176, 106291.
31. Chen, Y., Liu, P., Wang, S., et al. (2024). Pyrolysis behavior and product evolution of lignocellulosic biomass: Recent progress. *Bioresource Technology*, 392, 130126.
32. Zhang, L., Xu, H., Wang, Y., et al. (2025). Biochar production from agricultural biomass: Influence of pyrolysis temperature on physicochemical properties. *Fuel Processing Technology*, 267, 108321.
33. Kumar, R., Singh, P., Sharma, A., et al. (2025). Chemical characterization of liquid smoke derived from lignocellulosic biomass using GC–MS. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 180, 106742.
34. International Energy Agency (IEA) Bioenergy. (2023). *Pyrolysis and Biochar: Status and Future Perspectives*.
35. Vuppaladadiyam, A. K., et al. (2023). A critical review on biomass pyrolysis: Reaction mechanisms, process modeling and potential challenges. *Journal of the Energy Institute*, 108, 101236. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2023.101236> (the UWA Profiles and Research Repository)
36. Leng, L., et al. (2022). A comprehensive review on lignin pyrolysis: Mechanism, modeling and the effects of inherent metals in biomass. *Fuel*. (OUCI)
37. Zhao, C., et al. (2022). A review on lignin pyrolysis: Pyrolytic behavior, mechanism, and relevant upgrading for improving process efficiency. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*. (PMC)