

Produksi Bahan Bakar Minyak dari Pirolisis Pelet *Hydropulper Reject* Industri Kertas

Syamsudin^{1*}, Reza Bastari Imran Wattimena¹, Ibrahim Syaharuddin², Andri Taufick Rizaluddin¹, Yusup Setiawan¹

¹Balai Besar Pulp dan Kertas, Jl. Raya Dayeuhkolot No. 132, Bandung, Indonesia

²Institut Teknologi Nasional, Jl. PH.H. Mustofa No.23, Bandung, Indonesia

Diterima : 12 November 2020, Revisi akhir : 24 Desember 2020, Disetujui terbit : 30 Desember 2020

Production of Oil Fuel From Pyrolysis of Hydropulper Reject Pellet from Paper Industry

Abstract

Waste paper consumption in Indonesian paper industries reached 6,598,464 tons/year and produced hydropulper reject about 5-10% of waste paper. Pyrolysis of hydropulper reject from the paper industry for bio-oil production has been investigated. Hydropulper reject consists of 20% fiber and 80% plastic (High Density Polyethylene, HDPE >90%). This solid material has potential to be converted into oil fuel through pyrolysis. This study aims to investigate the pyrolysis of hydropulper reject pellets for bio-oil as fuel oil production. After being separated from the metals, hydropulper reject was dried, shredded, and shaped into pellets with 10 mm diameter and 20-30 mm length. The pellets had calorific value of 29.30 MJ/kg (dried based, db) with volatile matter 84.84% (db). The pellets were pyrolyzed with a combustion-pyrolysis combination reactor. The product was combustible bio-oil as much as ±40% of feedstock and had calorific value of 77.79 MJ/kg. Estimated electricity generated from syngas utilization about 1.08 kWh/kg.

Keywords: hydropulper reject, pyrolysis, bio-oil, syngas, electricity

Abstrak

Konsumsi kertas bekas di industri kertas Indonesia mencapai 6.598.464 ton/tahun dan menghasilkan *hydropulper reject* sebesar 5-10% dari kertas bekas yang digunakan. Penelitian pirolisis *hydropulper reject* dari industri kertas untuk produksi *bio-oil* telah dilakukan. Tipikal limbah *hydropulper reject* terdiri dari 20% serat dan 80% plastik (*High Density Polyethylene*, HDPE >90%). Bahan padat tersebut berpotensi dikonversi menjadi bahan bakar minyak melalui proses pirolisis. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pirolisis pelet *hydropulper reject* untuk produksi *bio-oil* sebagai bahan bakar minyak. Setelah dipisahkan dari logam, *hydropulper reject* dikeringkan, dicacah, dan dibentuk menjadi pelet berdiameter 10 mm dan panjang 20-30 mm. Nilai kalor pelet *hydropulper reject* mencapai 29,30 MJ/kg (*dried based*, db) dengan kadar zat terbang 84,84% (db). Pelet *hydropulper reject* dipirolisis dengan reaktor kombinasi pembakaran-pirolisis. Produk yang dihasilkan berupa *bio-oil* mampu bakar sebanyak ±40% bahan baku dengan nilai kalor 77,79 MJ/kg. Perkiraan listrik yang dapat dihasilkan dari pemanfaatan *syngas* sebesar 1,08 kWh/kg *hydropulper reject*.

Kata kunci: *hydropulper reject*, pirolisis, *bio-oil*, *syngas*, listrik

Pendahuluan

Kebijakan Energi Nasional (KEN) yang menjadi program pemerintah seperti tertuang dalam Peraturan Presiden No. 79/2014 mengamanatkan untuk pemanfaatan energi baru dan terbarukan pada tahun 2025 dengan pangsa sebesar 23% terhadap bauran energi primer dan meningkat menjadi 31% pada tahun 2050 (BPPT, 2019). Saat ini konsumsi energi final masih didominasi oleh penggunaan bahan bakar minyak dengan pangsa sebesar 50% dengan pengguna energi terbesar adalah sektor transportasi (43%), sektor industri (35%), dan sektor rumah tangga (14%) (BPPT, 2019). Cadangan minyak bumi Indonesia pada tahun 2018 sebesar 7,51 miliar barel. Cadangan ini mengalami penurunan 0,27% terhadap tahun 2017. Serupa dengan minyak bumi, cadangan gas bumi pada tahun 2018 sebesar 135,55 TSCF (*trillions of standard cubic feet*). Cadangan ini juga mengalami penurunan sebesar 5,02% terhadap tahun 2017 (BPPT, 2019). Penurunan cadangan minyak bumi dan gas bumi mendorong perlunya peningkatan efisiensi dan diversifikasi sumber energi supaya ketahanan energi tetap terjaga. Potensi energi baru dan terbarukan di Indonesia cukup besar mengingat letak geografisnya di daerah tropis, dengan variasi jenis yang sangat beragam.

Salah satu bahan bakar baru yang menarik perhatian adalah *hydropulper reject* dari industri kertas. *Hydropulper reject* adalah limbah yang dikeluarkan dari proses repulping pada tahap awal proses pembuatan pulp dari kertas bekas. *Hydropulper reject* sebagian besar terdiri dari bundel serat, *foil*, dan plastik polimer dengan jumlah tergantung pada kualitas kertas bekas yang digunakan sebagai bahan baku (Gavrilescu, 2008; Monte *et al.*, 2009). Pada saat ini, terdapat empat puluh lima industri kertas di Indonesia yang beroperasi menggunakan bahan baku kertas bekas (Indonesian Pulp and Paper Association, 2011). Asosiasi Pulp dan Kertas Indonesia (IPPA) melaporkan bahwa konsumsi kertas bekas untuk produksi kertas mencapai jumlah 6.598.464 ton per tahun (Indonesian Pulp and Paper Association, 2011). Sebagian besar industri kertas Indonesia menghasilkan limbah *hydropulper reject* sebesar 5-10% dari kertas bekas yang digunakan, atau sekitar 329.923 hingga 659.846 ton limbah *hydropulper reject* kering udara per tahun (Gavrilescu, 2008).

Hydropulper reject dapat dikonversi menjadi bentuk energi melalui konversi termal seperti

pembakaran, gasifikasi, dan pirolisis. Proses pirolisis adalah pilihan yang efektif dan ramah lingkungan untuk pengolahan limbah *hydropulper reject* untuk mendapatkan bahan bakar cair yang disebut sebagai minyak pirolitik atau *bio-oil* berkualitas yang dapat memiliki sifat serupa dengan bahan bakar minyak bumi yang biasa digunakan (Casoni *et al.*, 2015; Fadhil, 2017; Fadhil, Alhayali and Saeed, 2017). Keunggulan teknologi pirolisis dibandingkan dengan insinerator yang digunakan untuk pengolahan limbah *hydropulper reject*, antara lain emisi lebih bersih, tidak diperlukan peralatan pengendalian polusi, area lebih kecil, operasi lebih, desain fleksibel karena bentuk modular, konsumsi energi rendah, abu atau *inert* material sebagai residu dapat didaur ulang khususnya untuk metal, sesuai untuk fasilitas pengolahan skala kecil dan sekitar tempat pembuangan limbah padat, memberikan solusi atas penolakan teknologi insinerasi, yang ditengarai menghasilkan dioksin dan furans.

Pembuatan pelet dengan kadar air bahan <15% dapat menghasilkan pelet *hydropulper reject* yang kompak tidak mudah pecah dengan nilai kalor tinggi (30 - 37 MJ/kg), rendah kadar abu dan kadar sulfur (Setiawan *et al.*, 2016). Pirolisis non-katalitik terhadap plastik HDPE pada suhu 450–470°C dan memperoleh hasil produk cair yang relatif tinggi yaitu 78,7% dan gas 17,8%, sedangkan pirolisis menggunakan katalis zeolit memberikan hasil gas tertinggi mencapai 95,7% dan produk cair 2,4% (Zeaiter, 2014). Penelitian pirolisis terhadap *pulper reject* telah dilakukan menggunakan katalis klinoptilolit aktif dan meerschaum untuk produksi bahan bakar minyak pirolitik menghasilkan cairan tertinggi (61,4%) dan arang (32,19%) diperoleh menggunakan klinoptilolit 15% dan meerschaum 5%, sedangkan hasil gas tertinggi (21,44%) diperoleh melalui proses non-katalitik (Salan, Alma and Altuntaş, 2019). Park *et al.* (2012) melakukan percobaan pirolisis RPF (*Refuse derived paper and plastics densified Fuel*) menggunakan tungku tabung dalam lingkungan nitrogen pada kondisi non-isotermal (suhu maksimum: 400°C, 600°C, dan 800°C). Pirolisis RPF menghasilkan cairan (50%), padatan (15%), dan gas (35%) pada 400°C; cair (53%), padatan (10%), dan gas (37%) pada 600°C; dan cair (41%), padatan (6%), dan gas (53%) pada 800°C dengan senyawa utama dari cairan direpresentasikan sebagai kelas benzena dan stirena pada semua suhu percobaan.

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pirolisis pelet *hydropulper reject* dari industri kertas untuk produksi *bio-oil* sebagai bahan bakar minyak. Ruang lingkup penelitian dibatasi pada karakterisasi pelet, uji coba pirolisis pelet, karakterisasi *bio-oil*, dan perhitungan perkiraan listrik yang dihasilkan.

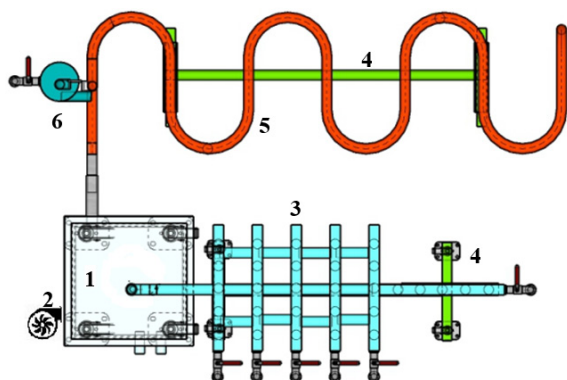
Bahan dan Metode

Bahan

Hydropulper reject dengan kadar air 40-50% diambil dari alat *hydropulper* pada proses produksi kertas medium bergelombang dari kertas daur ulang di industri kertas. Potongan kayu bakar sebanyak ± 7 kg dan LPG (*Liquefied Petroleum Gas*) disediakan untuk keperluan *start up* pada proses pemanasan reaktor pirolisis.

Alat

Peralatan untuk pembuatan pelet berupa mesin pencacah kapasitas 100 kg/hari dan mesin pelet tipe vertikal *flat die* dengan plat cetakan yang berlubang-lubang berdiameter 10 mm kapasitas 100 kg/hari. Peralatan untuk pirolisis berupa reaktor kombinasi pembakaran-pirolisis skala 100 kg/*batch*. Peralatan pendukung lainnya yaitu, kondensor *syngas* hasil pirolisis, pendingin gas pembakaran, separator, dan blower. Diagram skematik dari sistem reaktor pirolisis ditampilkan dalam **Gambar 1**.



Keterangan:
1. Reaktor
2. Blower
3. Kondensor pirolisis
4. Tiang penyangga
5. Pendingin gas
6. Separator

Gambar 1. Rangkaian Reaktor Pirolisis

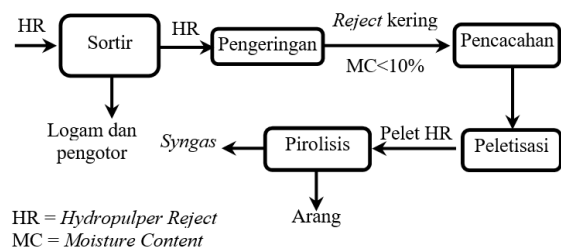
Metode

Hydropulper reject diumpankan ke dalam reaktor pirolisis dalam bentuk pelet. Proses pembuatan pelet dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

1. *Hydrapulper reject* disortir untuk memisahkan logam dan pengotor lainnya secara manual;
2. *Hydropulper reject* dikeringkan dengan panas matahari sampai kadar air $\pm 10\%$;
3. *Hydrapulper reject* kering dan bebas logam dicacah dengan mesin pencacah menjadi bentuk cacahan dengan ukuran ± 4 mm;
4. Cacahan *hydrapulper reject* kering (kadar air $\pm 10\%$) dibentuk menjadi pelet menggunakan mesin pelet tipe *flat die*. Pelet yang dihasilkan memiliki diameter ± 10 mm dan panjang 10 – 15 mm.
5. Pelet digunakan sebagai umpan proses pirolisis.

Diagram percobaan pirolisis pelet *hydropulper reject* terdapat dalam **Gambar 2**. Pelet *hydropulper reject* sebanyak ± 50 kg diumpankan ke dalam reaktor pirolisis. Untuk proses *start up*, potongan kayu sebanyak ± 7 kg diumpankan ke dalam reaktor pembakaran yang berada di bagian luar reaktor pirolisis. Ketika proses produksi sudah stabil, umpan reaktor pembakaran dapat diganti dengan arang hasil pirolisis. Proses pirolisis dipertahankan pada suhu 900-950°C. Panas yang diperlukan untuk proses pirolisis diambil dari panas pembakaran dari reaktor pembakaran.

Gas hasil pirolisis dikondensasi menjadi *bio-oil* menggunakan kondenser. Proses kondensasi menjadi cairan *bio-oil* dilakukan dengan rekayasa aliran gas. Gas yang tidak terkondensasi dapat diumpankan sebagai bahan bakar genset listrik untuk menghasilkan listrik.



HR = *Hydropulper Reject*
MC = *Moisture Content*

Gambar 2. Alur Percobaan Pirolisis Pelet *Hydropulper Reject*

Analisis

Karakterisasi jenis plastik yang terdapat dalam *hydropulper reject* dilakukan menggunakan metode Exler (Exler, 2008). Jenis plastik diidentifikasi menggunakan tahapan uji air dan uji isopropil alkohol.

Karakterisasi pelet dilakukan melalui analisis proksimat, ultimat, dan nilai kalor. Analisis proksimat meliputi kadar air *inherent* (ASTM D3173 - *Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke*), abu (ASTM D3174 - *Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal*), zat terbang (ISO 562:2010 - *Hard coal and coke — Determination of volatile matter*), dan karbon padat (*by difference*). Analisis ultimat meliputi kadar karbon, hidrogen, nitrogen (ASTM D5373 - *Standard Test Methods for Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Analysis Samples of Coal and Carbon in Analysis Samples of Coal and Coke*), total sulfur (ASTM D4239 - *Standard Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High-Temperature Tube Furnace Combustion*), dan oksigen (*by difference*). Nilai kalor dianalisis dengan standar ASTM D5865 - *Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke*.

Mutu *bio-oil* yang dihasilkan diuji melalui analisis nilai kalor menggunakan *bomb calorimeter*. Komposisi *syngas* dilakukan menggunakan kromatografi gas. Mutu *bio-oil* hasil penelitian dibandingkan dengan mutu *bio-oil* dari penelitian lain, diesel komersial, dan ASTM D7544-12 - *Standard Specification for Pyrolysis Liquid Biofuel*.

Hasil dan Pembahasan

Hydropulper Reject Industri Kertas

Hydropulper reject terdiri dari serat 20% dan plastik 80%. Karakterisasi plastik menunjukkan >90% plastik yang terdapat dalam *hydropulper reject* berupa plastik jenis HDPE. Komposisi ini berbeda dengan hasil penelitian oleh Setiawan *et al.* (2014) yang menyebutkan bahwa komponen *hydropulper reject* terdiri dari serat 50,75% dan plastik 49,25% dengan kandungan plastik HDPE >99%. Perbedaan ini terjadi karena komposisi *hydropulper reject* dipengaruhi oleh kualitas kertas bekas yang digunakan sebagai bahan baku

dan efisiensi alat *hydropulper* dalam memisahkan serat dan *reject*. Komposisi ini menunjukkan bahwa *hydropulper reject* sebagian besar terdiri dari plastik HDPE. HDPE merupakan salah satu jenis plastik yang tersusun dari hidrokarbon yang terdiri dari karbon dan hidrogen, mirip dengan bahan bakar hidrokarbon seperti gas minyak cair (LPG), bensin dan solar. Pembakaran plastik HDPE lebih ramah lingkungan daripada senyawa plastik lainnya (misalnya *Polyvinyl Chloride*, PVC) karena bahan ini terbuat dari hidrokarbon rantai lurus yang bebas dari halogen. Hasil penelitian co-pembakaran HDPE dan biomassa menunjukkan tidak terjadi peningkatan konsentrasi dioksin dan partikulat dengan penambahan HDPE (Colapicchioni *et al.*, 2020). Bagian penting lain dari *hydropulper reject* yaitu serat selulosa dan berbagai bahan berbasis biomassa dalam jumlah kecil.

Nilai proksimat, ultimat, dan nilai kalor *hydropulper reject* terdapat dalam **Tabel 1**. Nilai kalor *hydropulper reject* mencapai 29,30 MJ/kg (db), lebih tinggi dari nilai kalor batubara pada umumnya. Nilai kalor *hydropulper reject* semakin meningkat dengan bertambahnya jumlah plastik, dimana plastik memiliki nilai kalor lebih tinggi dibandingkan biomassa (Salan, Alma and Altuntaş, 2019). HDPE memiliki nilai kalor LHV 43,01 MJ/kg (Chattopadhyay *et al.*, 2016).

Hydropulper reject memiliki kandungan zat terbang tinggi, mencapai 84,84% (db). Zat terbang secara signifikan mempengaruhi perolehan produk *bio-oil*. Kandungan zat terbang tinggi menyebabkan peningkatan hasil *bio-oil* (Abnisa, Arami-Niya, *et al.*, 2013). Asadullah *et al.* (2008) meneliti bahwa zat terbang biasanya diubah menjadi *bio-oil* setelah kondensasi. Dengan

Tabel 1. Nilai Proksimat dan Nilai Kalor Pelet *Hydropulper Reject* Industri Kertas

Parameter	Nilai	Parameter Ultimat (db):	Nilai
Proksimat (db):			
Abu	9,66%	C	64,17%
Zat terbang	84,84%	H	9,89%
K a r b o n padat	5,49%	O	16,06%
		N	0,11%
Nilai kalor (HHV, db)	29,30MJ/kg	S	0,10%

db = dried based

HHV = Higher Heating Value

demikian, dapat disimpulkan bahwa semakin besar jumlah zat terbang dalam *hydropulper reject* maka semakin banyak jumlah *bio-oil* yang dapat dihasilkan. Kadar karbon padat pada *hydropulper reject* cukup rendah, yaitu 5,49% (db). Pirolisis material dengan kadar karbon padat rendah akan menghasilkan sedikit arang. Kadar abu mencapai 9,66% (db). Kandungan abu mempengaruhi terjadinya proses *slagging* dan *fouling* pada dinding reaktor dan pipa-pipa saluran gas selama proses pirolisis.

Pirolisis Pelet *Hydropulper Reject*

Perolehan *bio-oil* dari pirolisis *hydropulper reject* mencapai 40% (Tabel 2). Hasil ini lebih rendah dari perolehan *bio-oil* dari pirolisis biomassa lain, kemungkinan disebabkan oleh suhu pirolisis yang tinggi dan proses kondensasi yang belum maksimal sehingga masih ada gas kondensabel yang terbawa aliran bersama gas non-kondensabel lainnya. Kualitas produk *bio-oil* hasil penelitian ini dibandingkan dengan hasil

penelitian lain, diesel komersial, dan ASTM D7544-12 terdapat dalam Tabel 3.

Nilai kalor adalah parameter kritis untuk menentukan mutu bahan bakar. Nilai kalor sangat dipengaruhi oleh komposisi unsur, khususnya kandungan oksigen, serta sifat lain seperti kadar air (Salan, Alma and Altuntaş, 2019). Hasil karakterisasi *bio-oil* menunjukkan nilai kalor yang tinggi mencapai 77,79 MJ/kg, lebih tinggi dari nilai kalor diesel komersial. Nilai kalor ini diperoleh setelah dilakukan pemisahan air dari *bio-oil*. Kadar air *bio-oil* masih cukup tinggi, yaitu 21,87%, paling tinggi dibandingkan *bio-oil* lainnya pada Tabel 3. Kadar air yang tinggi menurunkan viskositas, nilai pemanasan, laju pembakaran, dan suhu nyala adiabatik selama proses pembakaran. Menurut data literatur, kandungan air dari minyak yang diperoleh dari sumber biomassa biasanya bervariasi dalam kisaran 15-35% berat (Salan, Alma and Altuntaş, 2019). Pemisahan air dari *bio-oil* diperlukan untuk meningkatkan kualitasnya sebagai bahan bakar minyak.

Tabel 2. Perbandingan Perolehan *Bio-Oil* dari Pirolisis Hasil Penelitian dengan Literatur

No	Biomassa	Suhu	Katalis	<i>Bio-oil</i>	Ref.
1.	<i>Pulper reject</i>	550°C 400°C	Klinoptilolit, meerschaum -	61,4% 50,0%	1
2.	RPF	600°C 800°C	- -	53,0% 41,0%	2
3.	RPF	500°C	-	78,7%	3
4.	HDPE	450–470°C	- Zeolit	2,4%	4
5.	<i>Hydropulper reject</i>	950°C	-	40%	5

Sumber: 1. Salan, Alma and Altuntaş (2019); 2. Park et al. (2012); 3. Hwang, Kobayashi and Kawamoto (2014); 4. Zeaiter (2014); 5. Penelitian ini

Tabel 3. Perbandingan Mutu *Bio-Oil* Hasil Pirolisis

Karakteristik	1	2	3	4	5
Nilai kalor (MJ/kg)	13-40	21-46	42-46	min. 15	77,79
Kadar air (%berat)	15-35	0-15	0-0,02	maks. 30	21,87
Viskositas 40°C (cSt)	10-175	5-30	2-5	maks. 125	3,29
Massa jenis (g/mL)	0,9-1,3	1-1,25	0,81-0,87	1,1-1,3	0,8205
pH	1,8-5,5	n.d.a	5–6	n.d.a	4-5

Keterangan: 1. Basis biomassa (Mohan, Pittman and Steele, 2006; Vamvuka, 2011); 2. Basis campuran biomassa-plastik (Abnisa, Wan Daud, et al., 2013; Chen et al., 2016; Xue et al., 2015); 3. Diesel komersial (Chen et al., 2016; Miandad et al., 2017); 4. ASTM D7544-12; 5. Penelitian ini.

n.d.a = data tidak tersedia.

Perkiraan Produksi Listrik dari Syngas

Perkiraan produk listrik yang dapat dihasilkan ketika *syngas* yang dikonversi menjadi listrik sebagai berikut:

- Satu kg *hydropulper reject* menghasilkan 2 m³ *syngas* (diperkirakan berdasarkan hasil pengukuran laju gas).
- Komposisi *syngas* hasil pirolisis ditampilkan dalam **Tabel 4**.

Nilai kalor *syngas* diperkirakan dengan perhitungan nilai kalor dari H₂, CH₄ dan CO, yaitu 11,09 MJ/kg *hydropulper reject*. Asumsi efisiensi pembangkit listrik sebesar 35%, maka satu kg *hydropulper reject* dapat menghasilkan energi listrik sebesar sebanyak 1,08 kWh.

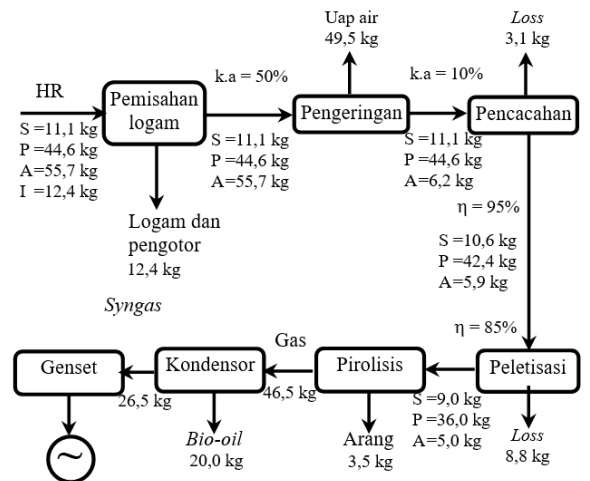
Neraca Massa, Konsumsi, dan Produksi Energi

Gambar 3 menyajikan neraca massa pada pembuatan dan pirolisis pelet *hydropulper reject* 50 kg/batch. Bahan baku *hydropulper reject* sebanyak 123,8 kg dengan kadar air 50% mengandung logam dan pengotor sebanyak ±10%. Logam dan pengotor ini dipisahkan sebelum diproses lebih lanjut. Proses pengeringan menggunakan panas matahari selama dua hari dapat menurunkan kadar air bahan baku menjadi ±10% dengan menguapkan air sebanyak 49,5 kg. Mesin pencacah dan mesin pelet, masing-masing memiliki efisiensi ±95% dan ±85%. Efisiensi ini dihitung dari jumlah produk yang dihasilkan dibandingkan dengan bahan baku yang diproses oleh mesin tersebut. Proses pirolisis menghasilkan ±20 kg *bio-oil* (40%) dan ±3,5 kg arang (7%). Jumlah *syngas* yang dihasilkan dihitung dari selisih antara jumlah pelet *hydropulper reject* yang masuk ke reaktor pirolisis dengan jumlah *bio-oil* dan arang yang dihasilkan.

Tabel 4. Komposisi *Syngas* Hasil Pirolisis

No.	Gas	Nilai kalor (kJ/mol)*	Komposisi
1.	H ₂	241,82	20,0%
2.	CO	283,00	19,0%
3.	CH ₄	802,62	1,5%
4.	CO ₂		12,0%
5.	Gas lain		47,5%

* Sumber: Green and Perry (2008)



S = serat; P = plastik; A = air; I = logam dan pengotor; k.a = kadar air

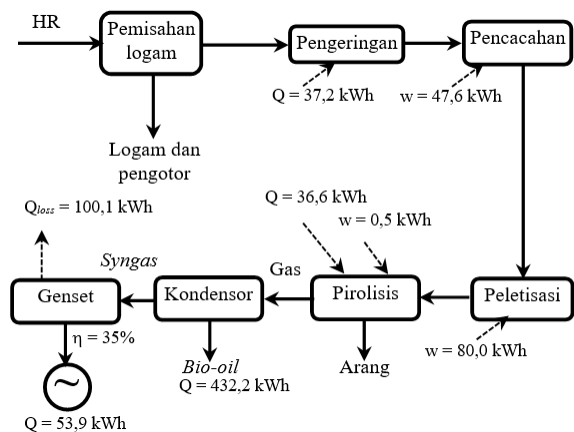
Gambar 3. Neraca Massa Pirolisis Pelet *Hydropulper Reject*

Tabel 5. Peralatan Pengguna Listrik

No.	Pengguna Listrik	Daya (kW)	Konsumsi Listrik (kWh)
1.	Mesin pencacah	3,2	47,6
2.	Mesin pelet	5,67	80,0
3.	Blower	0,36	0,5
Total			128,1

Proses produksi dan pirolisis pelet *hydropulper reject* menggunakan beberapa peralatan yang mengkonsumsi listrik, yaitu mesin pencacah, mesin pelet, dan blower. Daya dan konsumsi listrik dari masing-masing peralatan tersebut ditampilkan pada **Tabel 5**. Mesin pelet menggunakan bahan bakar solar dengan konsumsi setara dengan listrik 80 kWh. Kebutuhan listrik secara keseluruhan mencapai 128,1 kWh.

Gambar 4 menyajikan konsumsi dan produksi energi pada proses pembuatan dan pirolisis pelet *hydropulper reject*. Energi masuk dari bahan baku pelet *hydropulper reject* sebesar 366,4 kWh. Pirolisis merupakan reaksi endotermik yang membutuhkan sumber panas. Panas tersebut dipenuhi dengan pembakaran kayu yang menghasilkan panas setara 36,6 kWh. Pirolisis menghasilkan *bio-oil* setara 432,2 kWh dan *syngas* setara 154,0 kWh. Secara teoritis, jika *syngas* tersebut diumpungkan ke mesin genset yang memiliki efisiensi 35%, maka dapat menghasilkan listrik sebesar 53,9 kWh. Kebutuhan energi *start-up*, seperti LPG untuk menyalakan reaktor



Gambar 4. Konsumsi dan Produksi Energi pada Pirolisis Pelet *Hydropulper Reject*

pembakaran hingga mencapai suhu yang dibutuhkan belum diperhitungkan.

Kesimpulan

Nilai kalor pelet *hydropulper reject* cukup tinggi sehingga sangat berpotensi sebagai bahan bakar alternatif. Pemanfaatan pelet *hydropulper reject* melalui pirolisis pada suhu 950°C dapat menghasilkan produksi bahan bakar minyak *bio-oil* sebanyak ±40% bahan baku dengan nilai kalor 77,79 MJ/kg. Perkiraan listrik yang dapat dihasilkan dari pemanfaatan *syngas* yaitu 1,08 kWh/kg *hydropulper reject*. Perkiraan produk listrik yang dihasilkan dari pemanfaatan *syngas* setelah dikurangi kebutuhan listrik untuk proses menunjukkan surplus listrik.

Saran

Produk *bio-oil* dan *syngas* masih memerlukan uji coba lebih lanjut pada penggunaannya dalam motor bakar. Penggunaan *bio-oil* untuk substitusi solar dalam motor bakar kemungkinan dapat menyebabkan korosi dan pembentukan kerak. Penggunaan *syngas* untuk bahan bakar genset listrik memerlukan modifikasi pada sistem ruang bakar.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didanai oleh Direktorat Pengembangan Teknologi Industri, Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi melalui Program Pengembangan Teknologi Industri TA 2019.

Daftar Pustaka

- Abnisa, F., Wan Daud, W. M. A., Ramalingam, S., Azemi, M. N. B. M. and Sahu, J. N. (2013) 'Co-pyrolysis of palm shell and polystyrene waste mixtures to synthesis liquid fuel', *Fuel*, 108, pp. 311–318. doi: 10.1016/j.fuel.2013.02.013.
- Abnisa, F., Arami-Niya, A., Wan Daud, W. M. A., Sahu, J. N. and Noor, I. M. (2013) 'Utilization of oil palm tree residues to produce bio-oil and bio-char via pyrolysis', *Energy Conversion and Management*. Elsevier Ltd, 76, pp. 1073–1082. doi: 10.1016/j.enconman.2013.08.038.
- Asadullah, M., Anisur Rahman, M., Mohsin Ali, M., Abdul Motin, M., Borhanus Sultan, M., Robiul Alam, M. and Sahedur Rahman, M. (2008) 'Jute stick pyrolysis for bio-oil production in fluidized bed reactor', *Bioresource Technology*. Elsevier, 99(1), pp. 44–50. doi: 10.1016/j.biortech.2006.12.002.
- BPPT (2019) *Indonesia Energy Outlook 2019: The Impact of Increased Utilization of New and Renewable Energy on the National Economy*.
- Casoni, A. I., Bidegain, M., Cubitto, M. A., Curvetto, N. and Volpe, M. A. (2015) 'Pyrolysis of sunflower seed hulls for obtaining bio-oils', *Bioresource Technology*. Elsevier Ltd, 177, pp. 406–409. doi: 10.1016/j.biortech.2014.11.105.
- Chattopadhyay, J., Pathak, T. S., Srivastava, R. and Singh, A. C. (2016) 'Catalytic co-pyrolysis of paper biomass and plastic mixtures (HDPE (high density polyethylene), PP (polypropylene) and PET (polyethylene terephthalate)) and product analysis', *Energy*. Elsevier Ltd, 103, pp. 513–521. doi: 10.1016/j.energy.2016.03.015.
- Chen, W., Shi, S., Zhang, J., Chen, M. and Zhou, X. (2016) 'Co-pyrolysis of waste newspaper with high-density polyethylene: Synergistic effect and oil characterization', *Energy Conversion and Management*, 112, pp. 41–48. doi: 10.1016/j.enconman.2016.01.005.
- Colapicchioni, V., Mosca, S., Guerriero, E., Cerasa, M., Khalid, A., Perilli, M. and Rotatori, M. (2020) 'Environmental impact of co-combustion of polyethylene wastes in a rice husks fueled plant: Evaluation of organic micropollutants and PM emissions', *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 716, p. 135354. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135354.
- Exler, J. (2008) *Chemistry of Polymers*.

- Fadhil, A. B. (2017) 'Evaluation of apricot (*Prunus armeniaca* L.) seed kernel as a potential feedstock for the production of liquid bio-fuels and activated carbons', *Energy Conversion and Management*. Elsevier Ltd, 133, pp. 307–317. doi: 10.1016/j.enconman.2016.12.014.
- Fadhil, A. B., Alhayali, M. A. and Saeed, L. I. (2017) 'Date (*Phoenix dactylifera* L.) palm stones as a potential new feedstock for liquid bio-fuels production', *Fuel*. Elsevier Ltd, 210, pp. 165–176. doi: 10.1016/j.fuel.2017.08.059.
- Gavrilescu, D. (2008) 'Energy from biomass in pulp and paper mills', *Environmental Engineering and Management Journal*, pp. 537–546.
- Green, D. W. and Perry, R. H. (2008) *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. USA: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Hwang, I. H., Kobayashi, J. and Kawamoto, K. (2014) 'Characterization of products obtained from pyrolysis and steam gasification of wood waste, RDF, and RPF', *Waste Management*. Elsevier Ltd, 34(2), pp. 402–410. doi: 10.1016/j.wasman.2013.10.009.
- Indonesian Pulp and Paper Association (2011) *Indonesian Pulp & Paper Industry Directory 2011*. Jakarta.
- Miandad, R., Barakat, M. A., Aburiazaiza, A. S., Rehan, M., Ismail, I. M. I. and Nizami, A. S. (2017) 'Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil', *International Biodeterioration and Biodegradation*. Elsevier Ltd, 119, pp. 239–252. doi: 10.1016/j.ibiod.2016.09.017.
- Mohan, D., Pittman, C. U. and Steele, P. H. (2006) 'Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review', *Energy Fuels*, 20(3), pp. 848–889.
- Monte, M. C., Fuente, E., Blanco, A. and Negro, C. (2009) 'Waste management from pulp and paper production in the European Union', *Waste Management*. Pergamon, 29(1), pp. 293–308. doi: 10.1016/J.WASMAN.2008.02.002.
- Park, S. S., Seo, D. K., Lee, S. H., Yu, T. U. and Hwang, J. (2012) 'Study on pyrolysis characteristics of refuse plastic fuel using lab-scale tube furnace and thermogravimetric analysis reactor', *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. Elsevier B.V., 97, pp. 29–38. doi: 10.1016/j.jaap.2012.06.009.
- Salan, T., Alma, M. H. and Altuntaş, E. (2019) 'The fuel properties of pyrolytic oils obtained from catalytic pyrolysis of non-recyclable pulper rejects using activated natural minerals', *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*. Taylor & Francis, 41(12), pp. 1460–1473. doi: 10.1080/15567036.2018.1548522.
- Setiawan, Y., Purwati, S., Surachman, A., Wattimena, R. B. I. and Hardiani, H. (2014) 'Pelet Reject Industri Kertas Sebagai Bahan Bakar Boiler', *Jurnal Selulosa*, 4(02), pp. 57–64. doi: 10.25269/jsel.v4i02.87.
- Setiawan, Y., Purwati, S., Surachman, A., Bastari I. W., R. and Pramono, K. J. (2016) 'Pemanfaatan plastik dari reje industri kertas untuk bahan bakar', *Jurnal Selulosa*, 6(01), pp. 11–18. doi: 10.25269/jsel.v6i01.70.
- Vamvuka, D. (2011) 'Bio-oil, solid and gaseous biofuels from biomass pyrolysis processes—An overview', *International Journal of Energy Research*, 35(10), pp. 835–862. doi: 10.1002/er.v35.10.
- Xue, Y., Zhou, S., Brown, R. C., Kelkar, A. and Bai, X. (2015) 'Fast pyrolysis of biomass and waste plastic in a fluidized bed reactor', *Fuel*. Elsevier Ltd, 156, pp. 40–46. doi: 10.1016/j.fuel.2015.04.033.
- Zeaiter, J. (2014) 'A process study on the pyrolysis of waste polyethylene', *Fuel*. Elsevier Ltd, 133, pp. 276–282. doi: 10.1016/j.fuel.2014.05.028.