Pengaruh Kadar Air Biomassa dan Suhu Proses terhadap Kualitas Biopellet dari Cangkang Buah Karet dan Bambu Ater (*Gigantochloa atter*)
Effect of Biomass Moisture Content and Process Temperature on Biopellet Quality Derived from Rubber Seed Shell and Ater Bamboo (*Gigantochloa atter*)

I Dewa Gede Putra Prabawa^{a*}

^aBalai Riset dan Standardisasi Industri Banjarbaru
Jalan Panglima Batur Barat No. 2, Banjarbaru, Indonesia 70711

*Email: dewa.pprabawa@gmail.com

Diterima 22 Juni 2018 Disetujui 09 November 2018 Diterbitkan 29 Desember 2018

ABSTRAK

Tujuan penelitian ini untuk mempelajari pengaruh kadar air biomassa dan suhu proses terhadap kualitas biopellet dari campuran cangkang buah karet dan bambu ater (*Gigantochloa atter*). Biomassa dikondisikan dengan kadar air yang berbeda (6, 12, 14, 16, 18, dan 20% b.b) dan biopellet diproduksi pada tekanan 597,24 kg/cm² dengan variasi suhu proses (100, 125, 150, 175, dan 200°C). Telah diamati bahwa sebagian besar sifat biopellet dipengaruhi secara signifikan oleh perubahan kadar air biomassa dan suhu proses. Pada kadar air biomassa yang tinggi terjadi peningkatan kadar air biopellet, sedangkan kalori dan kadar abu menurun. Pada suhu proses yang tinggi terjadi peningkatan kalori dan kadar abu, sedangkan kadar air biopellet menurun. *Mechanical durability* biopellet semakin tinggi dengan meningkatnya kadar air biomassa dari 6% ke 18% dan meningkatnya suhu proses dari 100°C ke 175°C, sedangkan *bulk density* semakin tinggi dengan meningkatnya kadar air biomassa dari 6% ke 16% dan meningkatnya suhu proses dari 100°C ke 150°C. Kualitas biopellet terbaik diperoleh pada kadar air biomassa 16% dan suhu proses 150°C. Kualitas biopellet yang dihasilkan memiliki nilai *mechanical durability* 99,16%, kalori 4.402 kal/g, *bulk density* 1.157 kg/m³, kadar air 6,71%, abu 1,19%, nitrogen 0,15 %, sulphur 0,013%, dan klorin <0,1 ppm. Kualitas tersebut dapat memenuhi standar biopellet Eropa (EN 14961-2).

Kata Kunci : biopellet, cangkang buah karet, *Gigantochloa atter*, kadar air, suhu.

ABSTRACT

*The purposes of this research were to study the effects of biomass moisture content and process temperature on the quality of biopellet derived from rubber seed shell and bamboo ater (*Gigantochloa atter*). The biomass was conditioned at different moisture contents (6, 12, 14, 16, 18, and 20% w/w), and the biopellet was produced at a pressure of 597,24 kg/cm² with various process temperatures (100, 125, 150, 175, and 200°C). The results showed that the properties of produced biopellets were significantly affected by the variation of moisture content and process temperature. High moisture content of biomass could increase the moisture content of biopellet while the calorific value and ash content decreased. With the increase in process temperatures, calorific value and ash increased whereas the moisture content of biopellet decreased. Mechanical durability was enhanced with the increase in the moisture content of biomass, starting from 6% to 18%; and was improved with the increase in the process temperatures, starting from 100°C to 175°C. However, the bulk density of biopellet increased with the increase in the moisture content of biomass, starting from 6% to 16%, and was improved with the increase in the process temperatures from 100°C to 150°C. The best quality of biopellet was produced in the biomass moisture content of 16% and the process temperature of 150°C. That biopellet had mechanical durability of 99.16%, calorific value of 4,402 cal/g, bulk density of 1,157 kg/m³, moisture content of 6.71%, ash of 1.19%, nitrogen of 0.15%, sulphur of 0.013%, and chlorine of <0.1 ppm. That biopellet quality met European standards (EN 14961-2).*

Keywords : biopellet, rubber seed shell, *Gigantochloa atter*, moisture content, temperature

I. PENDAHULUAN

Biomassa pelet atau biopelet adalah bahan bakar padat berbentuk silinder pelet yang dibuat dari bahan dasar biomassa dan melalui proses densifikasi. Biopelet dapat digunakan sebagai alternatif pengganti batubara untuk pemanas dan sumber energi lainnya, khususnya untuk pemanfaatan sektor *residential*. Terdapat beberapa keuntungan dalam pengembangan bahan bakar padat (*densified fuels*), diantaranya meningkatkan nilai *bulk density* (kepadatan) sehingga biaya transportasi biomassa menjadi lebih rendah, menghasilkan efisiensi konversi energi yang lebih tinggi, dan meningkatkan masa penyimpanan ketika kadar air biomassa dapat dikurangi menjadi sekitar 10% (Carone, Pantaleo, & Pellerano, 2011).

Pada penelitian sebelumnya telah dipelajari sifat fisika dan kimia biopelet dari campuran cangkang buah karet (CBK) dan bambu ater, hasil penelitian menunjukkan biopelet terbaik dihasilkan dengan campuran 85% CBK dan 15% bambu ater, dengan temperatur proses 150°C, kadar air biomassa dikondisikan 10% berdasarkan berat kering (b.k), dan tekanan 597,24 kg/cm² (Prabawa & Miyono, 2017). Kualitas biopelet yang dihasilkan masih memiliki nilai *mechanical durability* yang belum memenuhi standar mutu (EN 14961-2) yaitu minimal 96,50%.

Kualitas fisik biopelet dapat dipengaruhi oleh sifat bahan baku biomassa dan proses produksinya. Variabel tersebut dapat dikontrol dengan optimalisasi efisiensi produksi dan memperbaiki kualitas produk akhir (Carone et al., 2011). Beberapa penelitian telah menganalisis pengaruh parameter proses dan sifat biomassa terhadap sifat fisik biopelet yang dihasilkan. Rhen, Rolf, Sjostrom, & Wasterlund (2005) melaporkan dengan meningkatnya suhu peletisasi dari 26°C sampai 144°C dan menurunkan kadar air biomassa saat dimulainya proses kompresi hingga mencapai 6,3%, dapat meningkatkan densitas (kepadatan) dan kuat tekan biopelet dari Norway spruce (*Picea abies*). Carone et al. (2011) meneliti

pengaruh parameter proses dan karakteristik biomassa terhadap *durability* biopelet dari residu *Olea europaea* L., hasil penelitian menunjukkan suhu menjadi parameter yang paling penting dalam mempengaruhi sifat mekanis biopelet, diikuti dengan kadar air awal, dan ukuran partikel biomassa.

Mani, Tabil, & Sokhansanj (2006) meneliti pengaruh kadar air dan ukuran partikel bahan baku (biomassa) terhadap sifat mekanis beberapa biopelet dari limbah pertanian gandum, limbah pertanian jagung, dan *switchgrass* (*Panicum virgatum*). Penelitian tersebut melaporkan peningkatan kadar air biomassa dari 12 sampai 15% berdasarkan berat basah (b.b) dan pengurangan ukuran partikel dari 3,2 sampai 0,8 mm dapat meningkatkan densitas dari biopelet.

Menurut Kaliyan & Morey (2009) produksi *alfalfa pellet* dengan kualitas tinggi dapat dilakukan dengan menggunakan kadar air bahan baku antara 8-12% b.b. Penggunaan kadar air yang lebih tinggi atau kurang dari nilai tersebut dapat menghasilkan *alfalfa pellet* dengan kualitas rendah. Pada penelitian tersebut juga dilaporkan penggunaan kadar air biomassa antara 16-18% b.b. dapat menyebabkan tersumbatnya *pellet-mill* saat proses produksi biopelet.

Prabawa & Miyono (2017) telah meneliti mutu biopelet dari campuran bahan CBK dan bambu ater dengan formulasi secara berturut-turut 100%:0%, 95%:5%, 90%:10%, 85%:15%, dan 80%:20% (b/b). Mutu biopelet yang dihasilkan masih memiliki sifat fisik yang rendah khususnya *mechanical durability*, yang mana rendahnya nilai tersebut dapat menyebabkan biopelet mudah patah/rapuh. Pada penelitian ini akan dipelajari lebih lanjut pengaruh kadar air biomassa dan suhu proses terhadap kualitas biopelet dari campuran CBK dan bambu ater, khususnya untuk meningkatkan sifat fisik *mechanical durability*. Kualitas biopelet yang dihasilkan dievaluasi berdasarkan standar mutu biopelet Eropa (EN 14961-2).

II. BAHAN DAN METODE

2.1. Bahan

Bahan biomassa yang digunakan adalah cangkang buah karet (CBK) yang diambil dari perkebunan rakyat di Kecamatan Cempaka, Kota Banjarbaru dan bambu ater (*Gigantochloa atter*) yang diambil di Kecamatan Kandangan, Kabupaten Hulu Sungai Selatan, Provinsi Kalimantan Selatan. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Aneka Komoditi dan Laboratorium Proses, Baristand Industri Banjarbaru.

2.2 Metode

Tahapan penelitian yang dilakukan meliputi persiapan bahan baku (pengecilan ukuran partikel dan pengeringan), penambahan kadar air biomassa, produksi biopellet, analisis sifat fisik, kimia, termal, dan analisis data biopellet terbaik.

2.2.1 Persiapan Bahan Baku

CBK dan bambu ater dibersihkan dari sisa kulit, *chips*, daun, dan kotoran yang menempel. Bahan yang telah bersih kemudian dikeringkan pada ruangan terbuka hingga kadar air bahan kurang dari 10%. Selanjutnya bahan dihancurkan menjadi bentuk serbuk dan disaring hingga didapat ukuran dengan lolos ayakan 25 mesh. Bahan yang telah berbentuk serbuk selanjutnya diukur kadar air awalnya (M_i), pada penelitian ini kadar air awal yang digunakan adalah kadar air kering udara yaitu kadar air awal CBK 5,80% dan bambu ater 5,56%. Kadar air awal diukur dengan metode gravimetri oven. Bahan selanjutnya dikondisikan kadar airnya (M_f 6%, 12%, 14%, 16%, 18%, dan 20%) sesuai Persamaan 1, kemudian masing-masing dicampurkan dengan formulasi CBK 85% dan bambu ater 15% (b/b) hingga homogen.

2.2.2 Produksi Biopellet dengan Variasi Kadar Air dan Suhu Proses

Pengaruh kadar air biomassa terhadap kualitas biopellet diamati pada variasi kadar air (M_f) 6%, 12%, 14%, 16%, 18%, dan 20% b.b. Variasi kadar air masing-masing biomassa 6-20% dikondisikan dengan

penambahan sejumlah akuades dengan perhitungan seperti Persamaan 1 (Mahapatra et al., 2010).

$$Q = W_i (M_f - M_i) / (100 - M_f) \quad (1)$$

Keterangan: Q = massa akuades yang ditambahkan (kg)
 W_i = massa awal biomassa (kg)
 M_f = kadar air akhir (%), dan
 M_i = kadar air awal (%).

Massa awal biomassa dihitung dengan terlebih dahulu mengkondisikan masing-masing bahan sehingga kadar airnya menjadi 6-20% dengan Persamaan 1. Selanjutnya masing-masing bahan dengan kadar air yang sama dicampur dengan perbandingan CBK dan bambu ater 85 :15 (b/b), sehingga diperoleh campuran bahan baku biopellet dengan variasi kadar air 6%, 12%, 14%, 16%, 18%, dan 20%. Campuran bahan dimasukan ke dalam cetakan pellet yang memiliki diameter silinder 0,80 cm dan tinggi 10 cm. Pada pengamatan pengaruh kadar air biomassa terhadap kualitas biopellet, pellet dibuat dengan dikempa press hidrolik merek Carver pada tekanan 597,24 kg/cm² dan pada suhu tetap 150°C.

Pada pengamatan pengaruh suhu proses, biopellet diproduksi pada lima suhu berbeda yaitu 100°C, 125°C, 150°C, 175°C, dan 200°C, sedangkan kadar air dibuat tetap dengan dipilih kadar air yang menghasilkan kualitas pellet terbaik. Biomassa dicetak dengan dimensi dan tekanan yang sama pada proses sebelumnya, sedangkan kadar air biomassa yang digunakan juga dibuat tetap, dimana kadar air dipilih dari variasi kadar air biomassa (M_f 6-20%) yang menghasilkan kualitas biopellet terbaik. Masing-masing biopellet diproduksi dengan 3 kali ulangan dan diuji kualitasnya berdasarkan standar pellet Eropa (EN 14961-2).

2.2.3 Analisis Sifat Fisik dan Kimia Biopellet

A. Dimensi

Dipilih 10 biopellet secara acak pada setiap perlakuan, kemudian lebar dan diameter dari setiap sampel diukur menggunakan jangka sorong, dan

dihitung rata-rata lebar dan diameter yang dihasilkan (EN 16127).

B. Kadar air

Kadar air ditentukan dengan metode gravimetri oven. Sejumlah massa biopelet (mi) dipanaskan dalam oven pada suhu 105°C, selama 8 jam. Kemudian dipindahkan dalam desikator untuk mendinginkan biopelet hingga temperatur sesuai dengan suhu ruangan. Biopelet ditimbang pada neraca analitik, kemudian sampel kembali dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama 2 jam, didinginkan dalam desikator dan ditimbang kembali hingga diperoleh berat konstan (mf). Kadar air (M) dihitung menggunakan Persamaan 2 (EN 14774-2).

$$M = (mi - mf) / mi \times 100 \% \dots\dots\dots (2)$$

C. Kadar Abu

Kadar abu ditentukan dengan memanaskan biopelet dalam tanur pada suhu 500-600°C selama 3 jam. Kemudian sampel didinginkan dalam desikator dan ditimbang berat akhir sampel pada neraca analitik. Kadar abu (A) dihitung menggunakan Persamaan 3 (EN 14775).

$$A = (af - ai) / mi \times 100 \% \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan:

A = Kadar abu (%)
af = berat cawan dan abu (g)
ai = berat cawan kosong (g), dan
mi = berat awal sampel (g).

D. Bulk density

Bulk density adalah massa partikel yang menempati suatu unit volume tertentu (Gilang, Affandi, & Ishartani, 2013). *Bulk density* dihitung sebagai rasio berat biopelet berbanding volume biopelet, kemudian dihitung menggunakan Persamaan 4 (EN 15103).

$$BD = mb / Vb \dots\dots\dots (4)$$

Keterangan:

BD = *Bulk Density* (kg/m³),
mb = berat sampel (g), dan
Vb = Volume sampel (cm³)

E. Mechanical durability

Mechanical durability menunjukkan daya tahan biopelet terhadap guncangan/getaran dengan membandingkan persentase pelet yang rusak (Oveisi-Fordiie, 2011). *Mechanical durability* ditentukan melalui uji ayakan (*vibrating sieve*) biopelet. Lima puluh sampel biopelet ditimbang pada neraca analitik, berat awal dicatat, kemudian sampel diletakkan pada *vibrating sieve* menggunakan ayakan dengan ukuran screen 3,36 mm (6 mesh). Uji *durability* dilakukan selama 10 menit, kemudian sampel yang tertahan di ayakan ditimbang pada neraca analitik sebagai berat akhir. *Mechanical durability* dihitung menggunakan Persamaan 5 (Liu, Fei, Jiang, Cai, & Liu, 2014).

$$DU = 100 - (mi - mf) / mi \times 100 \% \dots\dots (5)$$

Keterangan:

DU = Mechanical durability (%),
mi = berat sampel awal (g), dan
mf = berat akhir sampel (g)

F. Nilai kalori (Q)

Kalori diuji menggunakan metode bomb kalorimetri, dengan instrumentasi bomb kalorimeter tipe PARR 6400.

G. Pengujian Emisi yang berasal dari Nitrogen (N), Sulfur (S), dan Klorin (Cl)

Pengujian Nitrogen dilakukan dengan metode Kjeldahl sesuai dengan EN 15104. Sulfur diuji dengan metode turbidimetri menggunakan spektrofotometer shimadzu UV-1800 pada panjang gelombang 420 nm (ASTM D516 - 02). Klorin diuji dengan metode tes kit klorin merck kode 1.14978.0001 yang memiliki kepekaan analisis 0,1 ppm - 2,0 mg/L Cl₂.

2.2.4 Analisis Data

Pengaruh kadar air biomassa dan suhu proses terhadap kualitas biopelet dianalisis menggunakan SPSS 16.0 dengan menggunakan One Way ANOVA dan Tukey *multiple range test* dengan nilai signifikansi ($\alpha = 0.05$). Pengaruh kadar air diteliti dengan mengamati kualitas biopelet pada variasi kadar air biomassa (Mf) 6%, 12%, 14%, 16%, 18%, dan 20% b.b, yang diproduksi dengan suhu, tekanan, dan

waktu yang tetap. Kadar air biomassa yang menghasilkan kualitas biopellet terbaik selanjutnya digunakan untuk meneliti pengaruh variasi suhu proses pada suhu 100°, 125°, 150°, 175°, dan 200°C terhadap kualitas biopellet yang diproduksi dengan kadar air biomassa, tekanan, dan waktu yang tetap.

Kadar air dan suhu proses terbaik dipilih dengan menganalisis kualitas biopellet yang dihasilkan dengan metode *scoring* (Lamanda, Setyawati, Nurhaida, Diba, & Roslinda, 2015), yaitu dengan memberikan penilaian terhadap hasil analisis kualitas biopellet dari yang terendah sampai terbaik dengan skor 0-6, nilai 0 diberikan untuk parameter uji yang tidak memenuhi standar. Penilaian dilakukan berdasarkan standar biopellet Eropa (EN 14961-2.), kemudian hasil penilaian direkapitulasi dan dipilih total nilai tertinggi sebagai biopellet terbaik.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengaruh Kadar Air Biomassa terhadap Kualitas Biopellet

Tabel 1 menampilkan pengaruh kadar air biomassa terhadap kualitas

biopellet yang dihasilkan. Kualitas biopellet yang ditampilkan adalah rata-rata analisis dengan tiga kali ulangan pada setiap parameternya.

Hasil penelitian pada Tabel 1 menunjukkan biopellet yang dihasilkan memiliki rata-rata diameter 8,40 mm dan panjang yang dihasilkan berkisar antara 15,6-20,9 mm. Secara keseluruhan dimensi semua biopellet yang dihasilkan dapat memenuhi standar EN 14961-2. Gambar 1 menampilkan biopellet yang dihasilkan dari penelitian ini. Variasi kadar air biomassa memberikan pengaruh terhadap dimensi biopellet yang dihasilkan. Hal tersebut ditunjukkan dengan terbentuknya dimensi biopellet yang semakin baik dengan meningkatnya Mf yang digunakan dari 6-18% yang menunjukkan semakin berkurangnya retakan/patahan yang terlihat pada biopellet, namun peningkatan kadar air lebih lanjut pada Mf 20% justru menurunkan kualitas dimensi biopellet yang dihasilkan (Gambar 1). Kandungan air pada biomassa dapat membantu pembentukan ikatan antara partikel biomassa selama proses peletisasi sehingga akan menghasilkan pellet dengan dimensi yang baik,

Tabel 1. Kualitas Biopellet yang Dibuat dengan Kadar Air Biomassa (Mf) yang Berbeda

Parameter Uji	EN 14961-2	Kualitas Biopellet					
		Mf 6%	Mf 12%	Mf 14%	Mf 16%	Mf 18%	Mf 20%
Diameter (mm)	6 atau 8	8,4±0,0 ⁽²⁾	8,4±0,1 ⁽²⁾	8,4±0,0 ⁽³⁾	8,4±0,1 ⁽³⁾	8,4±0,0 ⁽³⁾	8,4±0,3 ⁽¹⁾
Panjang (mm)	3,15 ≤ P ≤ 40	20,3±0,4 ⁽¹⁾	20,9±0,6 ⁽²⁾	20,3±0,3 ⁽³⁾	19,9±0,6 ⁽³⁾	19,4±1,4 ⁽³⁾	15,6±5,3 ⁽¹⁾
Kadar air (%)	Maks. 10	2,08±0,04 ⁽⁶⁾	4,16±0,07 ⁽⁵⁾	4,84±0,07 ⁽⁴⁾	5,21±0,05 ⁽³⁾	5,46±0,09 ⁽²⁾	6,48±0,07 ⁽¹⁾
Kadar abu (%)	Maks. 3	1,35±0,05 ⁽¹⁾	1,19±0,02 ⁽²⁾	1,16±0,02 ⁽³⁾	1,02±0,02 ⁽⁴⁾	0,96±0,02 ⁽⁵⁾	0,94±0,01 ⁽⁶⁾
Kalori (kal/g)	3941 ≤ Q ≤ 4538	4451±23 ⁽⁶⁾	4406±13 ⁽⁵⁾	4397±5 ⁽⁴⁾	4394±12 ⁽³⁾	4361±10 ⁽²⁾	4201±10 ⁽¹⁾
Bulk density (kg/m ³)	Min. 600	1080±40 ⁽³⁾	1154±40 ⁽⁴⁾	1165±7 ⁽⁵⁾	1185±5 ⁽⁶⁾	1061±58 ⁽²⁾	972±28 ⁽¹⁾
Mechanical durability (%)	Min. 96,5	82,78±0,33 ⁽⁰⁾	91,72±0,50 ⁽⁰⁾	96,42±0,55 ⁽⁰⁾	99,67±0,10 ⁽¹⁾	99,76±0,05 ⁽²⁾	94,47±0,43 ⁽⁰⁾
Nitrogen (%)	Maks. 1,00	0,25±0,02 ⁽¹⁾	0,22±0,01 ⁽²⁾	0,19±0,01 ⁽³⁾	0,16±0,01 ⁽⁴⁾	0,16±0,01 ⁽⁴⁾	0,14±0,02 ⁽⁵⁾
Sulfur (%)	Maks. 0,04	0,017±0,001 ⁽¹⁾	0,015±0,001 ⁽²⁾	0,015±0,001 ⁽²⁾	0,013±0,001 ⁽³⁾	0,013±0,001 ⁽³⁾	0,011±0,001 ⁽⁴⁾
Klorin (%)	Maks. 0,03	ND ⁽¹⁾	ND ⁽¹⁾	ND ⁽¹⁾	ND ⁽¹⁾	ND ⁽¹⁾	ND ⁽¹⁾
Total nilai (<i>scoring</i>)		22	25	28	31	27	21

Keterangan : warna merah = hasil pengujian tidak memenuhi standar
 tanda ⁽⁰⁻⁶⁾ = hasil penilaian (*scoring*) data
 ND = tidak terdeteksi

Gambar 1. Biopellet CBK-Bambu Ater yang Dibuat dengan Kadar Air Biomassa (Mf) Berbeda

namun kehadiran air yang berlebih dalam biomassa justru akan menurunkan kualitas dimensi biopellet, karena tingginya kelebihan air yang tidak ikut bereaksi selama proses peletisasi. Menurut Mahapatra et al. (2010), kandungan air pada biomassa akan mengisi ruang kosong dari biopellet sehingga mengganggu ikatan yang terbentuk selama proses peletisasi. Hal tersebut yang diduga menjadi penyebab turunnya kualitas dimensi biopellet pada penggunaan Mf 20%, yang ditandai dengan banyaknya retakan/patahan yang dihasilkan pada biopellet. Akibatnya pada produksi biopellet menggunakan Mf 20% menghasilkan panjang biopellet yang beragam, mulai dari 12,9 mm – 20,4 mm, dengan nilai deviasi (SD) mencapai 5,3 mm. Pada penelitian sebelumnya juga telah dilaporkan pengaruh kadar air pada pembuatan pellet *sericea lespedeza* (*Lespedeza cuneata*), penggunaan kadar air biomassa 7,26% - 11,01% pada pembuatan pellet menyebabkan terjadinya peningkatan kualitas dimensi pellet yang ditandai dengan meningkatnya rata-rata panjang pellet yang dihasilkan, sedangkan pada penggunaan kadar air biomassa 12,91% dan 15,55% menyebabkan menurunnya panjang biopellet yang diakibatkan oleh banyaknya retakan/patahan pada biopellet yang dihasilkan (Mahapatra et al., 2010).

Dimensi biopellet yang dihasilkan pada Gambar 1 berkaitan dengan ketahanan/kekuatan. Ketahanan dari

biopellet yang dihasilkan merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi proses penyimpanan dan transportasi biopellet. Dalam penelitian ini diamati dua parameter terkait dengan ketahanan biopellet yang dihasilkan yaitu *bulk density* dan *mechanical durability*. Nilai *bulk density* dan *mechanical durability* yang semakin tinggi memudahkan dalam proses penyimpanan dan transportasi biopellet (Kaliyan & Morey, 2009). Nilai *bulk density* pada biopellet yang dihasilkan berkisar antara 972 kg/m³ sampai 1.185 kg/m³. *Mechanical durability* yang dihasilkan berkisar antara 91,72% sampai 99,76%. Hasil analisis statistik menunjukkan perubahan kadar air biomassa (Mf) 6-20% memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perubahan ketahanan biopellet yang dihasilkan. Hasil analisis pada Tabel 1 menunjukkan semakin tinggi kadar air biomassa yang digunakan (Mf 6-18%) menghasilkan *bulk density* dan *mechanical durability* biopellet yang semakin baik, namun pada Mf 20% terjadi penurunan *bulk density* dan *mechanical durability* biopellet. Penurunan ketahanan biopellet pada perlakuan Mf 20% dapat terjadi karena kelebihan kandungan air pada biomassa menyebabkan terganggunya ikatan yang terbentuk selama proses pembuatan biopellet (Larsson & Rudolfsson, 2012), sehingga menghasilkan biopellet yang rapuh. Nilai *bulk density* yang dihasilkan pada seluruh perlakuan dapat memenuhi standar EN 14961-2 yaitu

minimal 600 kg/m³, sedangkan untuk *mechanical durability* hanya dua perlakuan yang dapat memenuhi standar nilai minimal 96,5%, yaitu perlakuan Mf 16% dan 18%.

Kadar air biopellet merupakan salah satu parameter yang berpengaruh terhadap nilai kalori, efisiensi pembakaran, suhu pembakaran, dan kesetimbangan kelembaban yang berkaitan dengan kondisi penyimpanan biopellet (Bantacut, Hendra, & Nuwigha, 2013). Hasil penelitian menunjukkan variasi kadar air biomassa Mf 6 – 20% memberikan pengaruh terhadap meningkatnya kadar air biopellet yang dihasilkan, dimana kadar air yang dihasilkan pada penelitian ini berkisar antara 4,16% sampai 6,48%. Meskipun terjadi peningkatan kadar air, namun secara keseluruhan kandungannya tidak melebihi standar EN 14961-2 yaitu maksimal 10%.

Kadar abu pada biopellet yang dihasilkan berkisar antara 0,94% sampai 1,19%. Hasil analisis pada Tabel 1 menunjukkan kadar abu biopellet menurun seiring dengan meningkatnya kadar air biomassa yang ditambahkan. Menurut Liu et al. (2014), penurunan kadar abu yang terjadi disebabkan oleh semakin berkurangnya komposisi biomassa murni dalam setiap gram biopellet yang sebagian tergantikan oleh kehadiran molekul air yang semakin meningkat dalam biopellet. Secara keseluruhan kadar abu yang terkandung pada setiap biopellet masih dapat memenuhi standar EN 14961-2 yaitu maksimal 1,5%. Kadar abu yang tinggi pada biopellet dapat menurunkan efisiensi pembakaran dan tidak memenuhi persyaratan digunakan sebagai keperluan residensial (Prabawa & Miyono, 2017).

Sifat *thermal* biopellet ditentukan melalui pengujian nilai kalori. Nilai kalori adalah jumlah energi per-unit massa yang dilepaskan pada pembakaran sempurna suatu bahan (Llorente & Garcia, 2008). Tabel 1 menunjukkan nilai kalori yang dihasilkan cenderung menurun seiring meningkatnya kadar air biomassa yang digunakan. Nilai kalori pada biopellet yang dihasilkan berkisar antara 4.201 kal/g sampai 4.451 kal/g. Hasil analisis statistik menunjukkan terdapat perbedaan yang

signifikan pada nilai kalori biopellet yang diproduksi menggunakan kadar air biomassa yang berbeda (Mf 6-20%), hasil analisis menunjukkan semakin tinggi kadar air biomassa yang digunakan menghasilkan nilai kalori biopellet yang semakin rendah. Hal tersebut dikarenakan semakin banyak energi panas yang digunakan untuk mengevaporasi air yang terkandung dalam biopellet (Mahapatra et al., 2010). Secara keseluruhan penggunaan biomassa yang memiliki kadar air 6-20% pada pembuatan biopellet dari CBK dan bambu ater menghasilkan nilai kalori yang dapat memenuhi standar EN 14961-2 yaitu $3.941 \leq \text{kalori} \leq 4.538$ kal/g.

Parameter terakhir yang diamati adalah perubahan kadar sulfur, nitrogen, dan klorin dari biopellet. Kadar sulfur dan nitrogen yang dihasilkan menunjukkan kecenderungan menurun seiring dengan meningkatnya kadar air biomassa yang digunakan. Hal tersebut dapat dilihat pada Tabel 1, dimana kadar sulfur dan nitrogen secara berturut-turut berkisar antara 0,015-0,011 % dan 0,22-0,14 %, sedangkan kadar klorin pada semua biopellet yang dihasilkan nilainya di bawah limit deteksi pengujian (<0,10 ppm). Menurut Sa'adah (2014), biomassa secara alami mengandung sulfur, nitrogen, dan klorin dengan kadar sangat kecil, kadar tersebut dapat berbeda-beda tergantung pada sumber bahan biomassa yang digunakan. Berdasarkan hal tersebut, penurunan kandungan sulfur dan nitrogen dapat disebabkan oleh semakin berkurangnya kandungan biomassa dalam setiap unit biopellet, dimana kandungan bahan organik telah digantikan oleh kehadiran molekul air. Hal tersebut juga didukung oleh hasil analisis kadar air biopellet pada Tabel 1, yang menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar air biopellet akan menghasilkan kadar sulfur dan nitrogen yang semakin rendah. Secara keseluruhan nilai kadar sulfur, nitrogen, dan klorin pada biopellet CBK-bambu ater yang diproduksi dengan variasi kadar air biomassa (Mf) 6-18% masih dapat memenuhi standar EN 14961-2 yaitu sulfur maksimal 0,04%, nitrogen maksimal 1%, dan klorin maksimal 0,03%.

Berdasarkan hasil analisis data Tabel 1 menunjukkan perubahan kadar air biomassa berpengaruh signifikan terhadap perubahan sifat *mechanical durability*, kalori, kadar air, abu, *bulk density*, sedangkan dimensi biopelet hanya menghasilkan nilai berbeda signifikan pada perlakuan Mf 20% dengan nilai $p = 0,05$. Kadar air terbaik yang direkomendasikan untuk pembuatan biopelet CBK-bambu ater dipilih dengan metode *scoring* kualitas dari setiap biopelet. Hasil analisis *scoring* data pada Tabel 1 menunjukkan biopelet terbaik dihasilkan menggunakan kadar air biomassa (Mf) 16 %.

2.1. Pengaruh Suhu Proses terhadap Kualitas Biopelet

Tabel 2 menampilkan pengaruh suhu proses terhadap kualitas biopelet yang dihasilkan. Pengaruh suhu proses pada pembuatan biopelet CBK dan bambu ater diteliti pada variasi suhu 100°, 125°, 150°,

175°, dan 200°C. Masing-masing biopelet diproduksi menggunakan formulasi kadar air biomassa terbaik yang dianalisis sebelumnya yaitu (Mf) 16%.

Biopelet yang dihasilkan memiliki rata-rata diameter berkisar antara 8,4-8,5 mm dan panjang biopelet yang dihasilkan berkisar antara 12,0-20,2 mm. Gambar 2 menampilkan biopelet yang dihasilkan pada perlakuan suhu proses yang berbeda (100°-200°C). Hasil tersebut menunjukkan adanya penurunan rata-rata panjang biopelet yang dihasilkan dengan semakin tinggi suhu proses yang digunakan. Menurut Carone et al. (2011), ketika temperatur proses yang digunakan dalam produksi biopelet lebih tinggi dari 100°C, air dalam biomassa akan mengalami evaporasi yang mengakibatkan massa biopelet berkurang. Hal tersebut yang mengakibatkan berkurangnya dimensi panjang biopelet saat proses pencetakan menggunakan suhu yang semakin tinggi.

Tabel 2. Kualitas Biopelet yang Diproduksi dengan Suhu Proses (T) Berbeda

Parameter Uji	EN 14961-2	Kualitas Biopelet				
		T100°C	T125°C	T150°C	T175°C	T200°C
Diameter (mm)	6 atau 8	8,5±0,1 ⁽²⁾	8,4±0,1 ⁽³⁾	8,4±0,1 ⁽⁴⁾	8,4±0,1 ⁽⁴⁾	8,4±0,1 ⁽¹⁾
Panjang (mm)	3,15 ≤ P ≤ 40	20,2±4,4 ⁽²⁾	19,7±0,4 ⁽³⁾	19,2±0,4 ⁽⁴⁾	19,2±0,2 ⁽⁴⁾	12,0±7,3 ⁽¹⁾
Kadar air (%)	Maks. 10	8,70±0,08 ⁽¹⁾	6,90±0,05 ⁽²⁾	6,71±0,06 ⁽³⁾	2,46±0,03 ⁽⁴⁾	1,82±0,02 ⁽⁵⁾
Kadar abu (%)	Maks. 3	0,85±0,05 ⁽⁵⁾	0,95±0,03 ⁽⁴⁾	1,19±0,03 ⁽³⁾	1,23±0,02 ⁽²⁾	1,27±0,02 ⁽¹⁾
Kalori (kal/g)	3941 ≤ Q ≤ 4538	4367±9 ⁽¹⁾	4391±9 ⁽²⁾	4402±5 ⁽³⁾	4573±13 ⁽⁰⁾	4655±16 ⁽⁰⁾
Bulk density (kg/m ³)	Min. 600	966±97 ⁽¹⁾	1155±46 ⁽⁴⁾	1157±16 ⁽⁵⁾	1142±5 ⁽³⁾	1071±120 ⁽²⁾
Mechanical durability (%)	Min. 96,5	94,54±0,91 ⁽⁰⁾	97,18±0,35 ⁽¹⁾	99,16±0,32 ⁽²⁾	99,51±0,25 ⁽³⁾	78,66±1,18 ⁽⁰⁾
Nitrogen (%)	Maks. 1,00	0,13 ⁽⁵⁾	0,16 ⁽³⁾	0,15 ⁽⁴⁾	0,20 ⁽²⁾	0,21 ⁽¹⁾
Sulfur (%)	Maks. 0,04	0,011 ⁽³⁾	0,012 ⁽²⁾	0,013 ⁽¹⁾	0,011 ⁽³⁾	0,013 ⁽¹⁾
Klorin (%)	Maks. 0,03	ND ⁽¹⁾	ND ⁽¹⁾	ND ⁽¹⁾	ND ⁽¹⁾	ND ⁽¹⁾
Total nilai (scoring)		21	25	30	26	13

Keterangan : warna merah = hasil pengujian tidak memenuhi standar
 tanda ⁽⁰⁻⁶⁾ = hasil penilaian (*scoring*) data
 ND = tidak terdeteksi

Gambar 2. Biopelet CBK-Bambu Ater yang Dibuat dengan Suhu Proses (T) Berbeda

Pada penggunaan suhu proses 200°C, banyak dihasilkan biopelet yang pecah/patah, hal ini diakibatkan oleh tersumbatnya alat pencetak biopelet saat melakukan proses produksi dengan suhu 200°C, sehingga saat diberi tekanan yang lebih besar untuk mengeluarkan biopelet dari alat menyebabkan banyak biopelet yang patah. Hasil tersebut menunjukkan penggunaan suhu proses $\geq 200^\circ\text{C}$ tidak direkomendasikan dalam produksi biopelet.

Dimensi biopelet berkaitan dengan ketahanan biopelet yang dihasilkan yaitu *bulk density* dan *mechanical durability*. Nilai *bulk density* dan *mechanical durability* yang semakin tinggi akan menghasilkan biopelet yang tidak mudah patah/rapuh dan akan menghasilkan biopelet dengan dimensi yang baik. Hasil analisis pada Tabel 2 menunjukkan nilai *bulk density* pada biopelet yang dihasilkan berkisar antara 966 kg/m^3 sampai 1.157 kg/m^3 , sedangkan nilai *mechanical durability* berkisar antara 78,66% sampai 99,51%. Hasil penelitian yang ditampilkan pada Gambar 2 menunjukkan dimensi biopelet yang baik dihasilkan pada produksi biopelet menggunakan suhu 150° dan 175°C. Biopelet tersebut memiliki nilai *bulk density* dan *mechanical durability* yang dapat memenuhi standar EN 14961-2, yaitu secara berturut-turut $1.156,69 \text{ kg/m}^3$; $1.142,05 \text{ kg/m}^3$ dan 99,16%; 99,51%. Pada penelitian sebelumnya juga telah dilaporkan, penggunaan suhu proses 150°C dengan tekanan 170-180 MPa dapat menghasilkan *bulk density* dan *mechanical durability* yang tinggi (Carone et al., 2011).

Pada suhu tersebut biopelet dengan kualitas tinggi dapat dihasilkan meskipun tekanan yang digunakan cukup rendah (70 MPa), kadar airnya tinggi, dan ukuran partikel biomassa tidak terlalu kecil (lolos saringan diameter 4 mm) (Carone et al., 2011).

Variasi suhu proses 100°-200°C dalam produksi biopelet CBK-bambu ater menghasilkan biopelet dengan kadar air berkisar antara 1,82-8,70% (Tabel 2). Semakin tinggi suhu proses yang digunakan, kadar air pada biopelet yang dihasilkan semakin rendah yang diakibatkan karena semakin banyak terjadi evaporasi kandungan air di dalam biomassa. Secara keseluruhan kadar air yang terkandung pada semua biopelet yang dihasilkan pada perlakuan ini masih dapat memenuhi standar EN 14961-2 yaitu maksimal 10%.

Kadar abu pada biopelet yang dihasilkan cenderung meningkat seiring dengan meningkatnya suhu proses yang digunakan. Nilai yang dihasilkan berkisar antara 0,85-1,27%. Peningkatan tersebut terjadi karena adanya penguapan molekul air yang semakin tinggi, sehingga komposisi kandungan air dalam biopelet akan semakin berkurang. Hal tersebut mengakibatkan komposisi biomassa murni dalam setiap gram biopelet menjadi semakin tinggi sehingga kadar abunya juga akan meningkat. Menurut Winata (2013) jumlah kadar abu yang dihasilkan dipengaruhi oleh jenis biomassa yang digunakan. Pada penelitian ini biomassa yang digunakan adalah cangkang buah

karet (CBK) dan bambu ater yang memiliki kadar abu 0,58% dan 1,75% (Prabawa & Miyono, 2017). Pengaruh suhu proses terhadap perubahan kadar abu biomassa juga telah dilaporkan oleh Van Der Stelt, Gerhauser, Kiel, & Ptasinski (2011), bahwa kadar abu kayu setelah melalui proses torefaksi mengalami peningkatan dari 1,3% menjadi 1,5% saat menggunakan suhu torefaksi 250°C dan meningkat lebih tinggi lagi menjadi 1,9% saat menggunakan suhu torefaksi 300°C. Secara keseluruhan kadar abu yang dimiliki biopelet pada semua perlakuan suhu proses dapat memenuhi standar EN 14961-2 yaitu maksimal 3%.

Pengaruh suhu proses terhadap nilai kalori biopelet ditampilkan pada Tabel 2. Hasil analisis menunjukkan nilai kalori semakin meningkat seiring dengan semakin tingginya suhu proses yang digunakan. Nilai kalori yang dihasilkan pada perlakuan suhu proses 100°-200°C berkisar antara 4.367 – 4.655 kal/g. Semakin meningkatnya nilai kalori dapat disebabkan oleh semakin berkurangnya kadar air dalam biopelet akibat menggunakan suhu proses yang semakin tinggi (Tabel 2). Menurut Nasir (2015) nilai kalori berbanding terbalik dengan kadar air biopelet, semakin tinggi kadar air dapat menurunkan nilai kalor, karena sebagian panas digunakan untuk menguapkan air pada saat awal proses pembakaran. Hasil analisis kualitas kalori menunjukkan walaupun biopelet CBK-bambu ater yang diproduksi pada suhu proses 175-200°C memiliki nilai kalori yang lebih baik dari biopelet yang diproduksi menggunakan suhu dibawahnya, namun nilai kalori yang dihasilkan pada rentang suhu tersebut tidak dapat memenuhi standar EN 14961-2, karena nilainya melebihi persyaratan yaitu maksimal yaitu 4.538 kal/g. Sedangkan biopelet yang diproduksi pada rentang suhu proses antara 100-150°C sudah memiliki nilai kalori yang dapat memenuhi standar EN 14961-2 yaitu $3.941 \leq \text{kalori} \leq 4.538$ kal/g.

Pengaruh suhu proses tidak terlalu berpengaruh terhadap perubahan kualitas emisi gas yang dihasilkan. Emisi diamati melalui perubahan kadar sulfur, nitrogen, dan klorin dari biopelet (Tabel 2). Kadar

nitrogen yang dihasilkan menunjukkan nilai yang tinggi dan meningkat seiring dengan meningkatnya suhu proses yang digunakan, nilai yang dihasilkan berkisar antara 0,13-0,21%. Kadar sulfur yang dihasilkan tidak menunjukkan perubahan yang signifikan pada setiap perlakuannya, nilai yang dihasilkan berkisar antara 0,011-0,013%, sedangkan kadar klorin nilainya kurang dari limit deteksi pengujian ($<0,1$ ppm). Walaupun terdapat perubahan nilai, namun secara keseluruhan kadar nitrogen, sulfur, dan klorin pada semua biopelet yang dihasilkan nilainya masih dalam batas standar EN 14961-2, yang nilai batas maksimalnya secara berturut-turut 1%, 0,04%, dan 0,03%.

Dari hasil analisis data Tabel 2 menunjukkan suhu proses berpengaruh signifikan terhadap perubahan sifat *mechanical durability*, kalori, kadar air, abu, *bulk density*, sedangkan dimensi biopelet hanya menghasilkan nilai berbeda signifikan pada T 200°C, pada nilai $p = 0,05$. Hasil *scoring* data menunjukkan, suhu proses terbaik yang direkomendasikan untuk pembuatan biopelet CBK-bambu ater dihasilkan pada suhu proses 150°C.

Berdasarkan hasil rekapitulasi penilaian kualitas biopelet ditampilkan pada kolom *scoring* pada Tabel 1 dan 2, kadar air biomassa dan suhu proses yang optimal dalam pembuatan biopelet CBK-bambu ater adalah Mf 16% dan T 150°C. Biopelet dibuat dengan formulasi campuran serbuk biomassa 85% CBK dan 15% bambu ater, pada tekanan proses 597,24 kg/cm². Kualitas biopelet yang dihasilkan pada kondisi tersebut dapat memenuhi standar EN 14961-2 dengan nilai *mechanical durability* 99,16%, kalori 4.402 kal/g, *bulk density* 1.157 kg/m³, kadar air 6,71%, abu 1,19%, nitrogen 0,15 %, sulphur 0,013%, dan klorin $<0,1$ ppm, diameter 8,4 mm, dan panjang 19,2 mm. Hasil penelitian ini dapat memperbaiki kualitas biopelet CBK-bambu ater pada penelitian sebelumnya yang tidak memenuhi persyaratan khususnya pada parameter *mechanical durability* yang memiliki nilai 91,93% (Prabawa & Miyono, 2017).

III. KESIMPULAN DAN SARAN

Dapat disimpulkan dari penelitian ini perubahan kadar air biomassa dan suhu proses dapat memberikan pengaruh terhadap kualitas biopellet CBK-bambu ater yang dihasilkan. Meningkatnya kadar air biomassa yang digunakan dari 6-18% dan suhu proses 100°-175°C dapat meningkatkan *mechanical durability* biopellet. Penggunaan kadar air biomassa diatas 18% dan suhu proses diatas 175°C tidak disarankan pada pembuatan biopellet karena dapat menurunkan *mechanical durability* biopellet dan menyebabkan tersumbatnya alat saat produksi biopellet. Perubahan kadar air biomassa dan suhu proses memberikan pengaruh signifikan terhadap perubahan sifat *mechanical durability*, kalori, kadar air, abu, dan *bulk density* biopellet.

Untuk menghasilkan biopellet CBK-bambu ater dengan nilai *mechanical durability* yang tinggi dan sifat yang baik, disarankan proses produksi biopellet dilakukan pada kondisi kadar air biomassa 16%, suhu proses pencetakan 150°C, formulasi campuran biomassa CBK dan bambu ater 85%:15%, dan tekanan proses pencetakan 597,24 kg/cm².

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Balai Riset dan Standarisasi Industri Banjarbaru yang telah membantu menyediakan bahan kimia dan instrumen analisis dalam pelaksanaan penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Ibu Endang Sriningsih dan Bapak Muses Aprilius yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Bantacut, T., Hendra, D., & Nuwigha, R. (2013). The Quality of Biopellet from Combination of Palm Shell Charcoal and Palm Fiber. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 23(1), 1–12.

Carone, M. T., Pantaleo, A., & Pellerano, A. (2011). Influence of Process Parameters and Biomass

Characteristics on The Durability of Pellets from The Pruning Residues of *Olea europaea* L. *Journal Biomass and Bioenergy*, 35(1), 402–410. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.08.052>

Gilang, R., Affandi, D. R., & Ishartani, D. (2013). Karakteristik Fisik dan Kimia Tepung Koro Pedang (*Canavalia ensiformis*) dengan Variasi Perlakuan Pendahuluan. *Jurnal Teknosains Pangan*, 2(3), 34–42.

Kaliyan, N., & Morey, R. (2009). Factors Affecting Strength and Durability of Densified Biomass Products: A Review. *Journal Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337–359.

Kaliyan, N., & Morey, R. V. (2009). Factors Affecting Strength and Durability of Densified Biomass Products. *Journal Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337–359. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>

Lamanda, D. D., Setyawati, D., Nurhaida, Diba, F., & Roslinda, E. (2015). Karakteristik Biopellet Berdasarkan Komposisi Serbuk Batang Kelapa Sawit dan Arang Kayu Laban dengan Jenis Perekat sebagai Bahan Bakar Alternatif Terbarukan. *Jurnal Hutan Lestari*, 3(2), 313–321.

Larsson, S., & Rudolfsson, M. (2012). Temperature Control in Energy Grass Pellet Production – Effects on Process Stability and Pellet Quality. *Journal Applied Energy*, 97, 24–29.

Liu, Z., Fei, B., Jiang, Z., Cai, Z., & Liu, X. (2014). Important Properties of Bamboo Pellets to Be Used as Commercial Solid Fuel in China. *Wood Science and Technology*, 48(5), 903–917. <https://doi.org/10.1007/s00226-014-0648-x>

Llorente, M. J., & Garcia, J. E. . (2008). Suitability of Thermo-Chemical Corrections for Determining Gross Calorific Value in Biomass. *Journal Thermochimica Acta*, 468(1–2), 101–

- 107.
- Mahapatra, A. K., Harris, D. L., Durham, D. L., Lucas, S., Terrill, T. H., Kouakou, B., & Kannan, G. (2010). Effects of Moisture Change on The Physical and Thermal Properties of *Sericea lespedeza* Pellets. *International Agricultural Engineering Journal*, 19(3), 23–29.
- Mani, S., Tabil, L. G., & Sokhansanj, S. (2006). Effects of Compressive Force, Particle Size and Moisture Content on Mechanical Properties of Biomass Pellets from Grasses. *Biomass and Bioenergy*, 30(7), 648–654. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.01.004>
- Nasir, A. (2015). *Karakteristik Wood Pellet Campuran Cangkang Sawit dan Kayu Bakau (Rhizophora spp.) (Skripsi)*. Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia.
- Oveisi-Fordiie, E. (2011). *Durability of Wood Pellets (Thesis)*. Faculty of Graduate Study Chemical and Biological Engineering, University Of British Columbia, Vancouver, British Columbia, Canada.
- Prabawa, I., & Miyono. (2017). Mutu Biopellet dari Campuran Cangkang Buah Karet dan Bambu Ater (*Gigantochloa atter*). *Jurnal Riset Industri Hasil Hutan*, 9(2), 99–110.
- Rhen, C., Rolf, G., Sjostrom, M., & Wasterlund, I. (2005). Effects Of Raw Material Moisture Content, Densification Pressure and Temperature on Some Properties of Norway Spruce Pellets. *Journal Fuel Process Technology*, 87(1), 11–16.
- Sa'adah, W. A. (2014). *Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit (Elaeis Guineensis Jacq.) dan Serbuk Kayu Mahoni sebagai Bahan Baku Biopellet (Skripsi)*. Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia
- Van der Stelt, M. J. C., Gerhauser, H., Kiel, J. H. A., & Ptasiński, K. J. (2011). Biomass Upgrading by Torrefaction for The Production of Biofuels: A Review. *Biomass and Bioenergy*, 35(9), 3748–3762. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.023>
- Winata, A. (2013). *Karakteristik Biopellet dari Campuran Serbuk Kayu Sengon dengan Arang Sekam Padi sebagai Bahan Bakar Alternatif Terbarukan (Skripsi)*. Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia.