

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian

Hasil pengujian biopelet biji ketapang (*Terminalia catappa*) yang telah dilakukan dengan variasi temperatur operasi 150°C serta kecepatan putaran *screw* 15 Hz, 25 Hz, 35 Hz 45 Hz dan 50 Hz disajikan pada **Tabel 4.1** berikut. Data hasil pengujian menunjukkan bahwa parameter kualitas biopelet, yang meliputi kadar air, kadar abu, zat terbang, fixed carbon, densitas, nilai kalor, laju pembakaran, dan ketahanan mekanik (*drop test*), telah dipengaruhi oleh variasi kondisi proses yang diterapkan.

Tabel 4.1 Data Hasil Pengujian Biopelet Biji Ketapang

Temperatur (°C)	Screw (Hz)	Kadar Air (%)	Kadar Abu (%)	Zat Terbang (%)	Densitas (g/cm ³)	Nilai Kalor (cal/g)
150	15	3,30	1,10	72,15	1,10	5132,9419
	25	3,60	1,25	72,32	1,19	5057,9716
	35	4,40	0,45	76,48	1,26	4979,9595
	45	5,04	0,78	78,19	1,27	5514,0695
	50	7,31	3,64	79,85	1,56	6749.0285

Tabel 4.2 Data Kadar Abu Biopelet Biji Ketapang (*Terminalia catappa*)

Temperatur (°C)	Screw (Hz)	Kadar Abu (%)
150	15	1,10
	2	1,25
	5	
	35	0,45
	45	0,78
	50	3,64

Tabel 4.3 Kadar Zat Terbang Biopellet Biji Ketapang (*Terminalia catappa*)

Temperatur (°C)	Screw (Hz)	Kadar Zat Terbang (%)
150	15	72,15
	25	74,32
	35	76,48
	45	78,19
	50	78,19

Tabel 4.4 Kadar Karbon Tetap (Fixed Carbon) Biopellet Biji Ketapang (*Terminalia catappa*)

Temperatur (°C)	Screw (Hz)	Kadar Air (%)	Kadar Abu (%)	Zat Terbang (%)	Fixed Carbon (%)
150	15	3,30	1,10	72,15	23,45
	25	3,60	1,25	74,32	20,83
	35	4,40	0,45	76,48	18,67
	45	5,04	0,78	78,19	15,99
	50	7,31	5,87	78,19	8,63

Tabel 4.5 Densitas Biopellet Biji Ketapang (*Terminalia catappa*)

Temperatur (°C)	Screw (Hz)	Massa (g)	Diameter (cm)	Tinggi (cm)	Densitas (g/cm ³)
150	15	3,10	1,00	3,60	1,10
	25	3,35	1,00	3,60	1,19
	35	3,56	1,00	3,60	1,26
	45	3,58	1,00	3,60	1,27
	50	4,40	1,00	3,60	1,56

Tabel 4.6 Nilai Kalor Biopellet Biji Ketapang (*Terminalia catappa*)

Temperatur (°C)	Screw (Hz)	Nilai Kalor (Cal/gr)
150	15	7800
	25	7750
	35	7600
	45	7350
	50	6749

Tabel 4.7 Laju Pembakaran Biopellet Biji Ketapang (*Terminalia catappa*)

Temperatur (°C)	Screw (Hz)	Massa (g)	Waktu (s)	Laju Pembakaran (g/s)
150	15	3,14	13,9	0,226
	25	3,34	16,5	0,202
	35	3,50	18,2	0,192
	45	3,80	21,2	0,179
	50	4,10	25,6	0,160

Tabel 4.8 Drop Test Biopelet Biji Ketapang (*Terminalia catappa*)

Temperatur (°C)	Screw (Hz)	Massa Sebelum (g)	Massa Sesudah (g)	Ketahanan (%)
150	15	3,1110	2,9358	94,37
	25	3,3600	3,2424	96,50
	35	3,5800	3,5120	98,10
	45	3,8200	3,7742	98,80
	50	3,4500	3,4135	98,94

4.2 Pembahasan

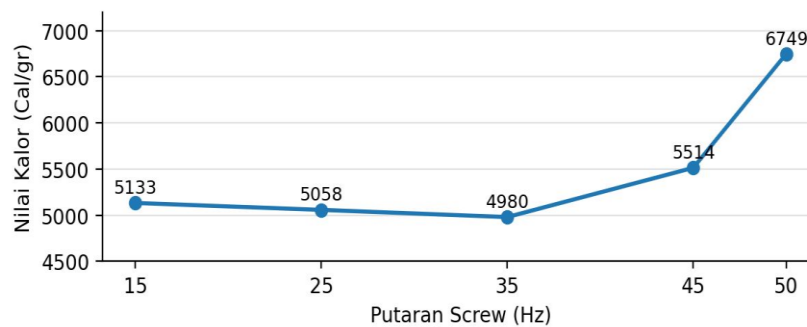
Pembahasan pada penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kecepatan putaran screw terhadap karakteristik biopelet berbahan baku biji ketapang (*Terminallia cattapa*). Parameter yang dianalisis meliputi parameter analisis proksimat, yaitu nilai kalor, kadar air, kadar abu, kadar zat terbang (*volatile matter*), dan *fixed carbon*, serta karakteristik fisik biopelet yang terdiri atas densitas, laju pembakaran, dan *drop test*. Analisis dilakukan berdasarkan hasil pengujian pada setiap variasi kecepatan putaran screw dengan mengacu pada teori pendukung serta persyaratan mutu biopelet berdasarkan SNI 8021:2014.

4.2.1 Pengaruh Frekuensi Putaran Screw Terhadap Karakteristik Biopelet

Analisis proksimat merupakan metode pengujian yang digunakan untuk mengetahui karakteristik kimia dasar biopelet. Parameter yang dianalisis meliputi nilai kalor, kadar air, kadar abu, kadar zat terbang (*volatile matter*), dan *fixed carbon*. Kelima parameter tersebut saling berkaitan dalam menentukan kualitas biopelet sebagai bahan bakar padat karena memengaruhi energi yang dihasilkan, efisiensi pembakaran, serta mutu biopelet yang dihasilkan. Pembahasan masing-masing parameter disajikan sebagai berikut

A. Pengaruh Frekuensi Putaran Screw Terhadap Nilai Kalor

Nilai kalor merupakan salah satu parameter utama yang digunakan untuk mengetahui besarnya energi panas yang dihasilkan biopelet selama proses pembakaran. Semakin tinggi nilai kalor suatu biopelet, maka semakin besar energi yang dapat dihasilkan sehingga kualitas biopelet sebagai bahan bakar juga semakin baik. Nilai kalor dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain kadar air, kadar abu, kandungan *fixed carbon*, serta tingkat kepadatan (densitas) biopelet.



Gambar 4.1 Grafik Pengaruh Kecepatan Putaran Screw terhadap Nilai Kalor (Temperatur 150°C)

Berdasarkan Gambar 4.1, nilai kalor biopelet mengalami perubahan pada setiap variasi kecepatan putaran *screw*. Nilai kalor tertinggi diperoleh pada kecepatan putaran 50 Hz sebesar 6749,02 cal/g, sedangkan nilai kalor terendah diperoleh pada kecepatan putaran 35 Hz sebesar 4979,96 cal/g. Nilai kalor mengalami penurunan dari putaran 15 Hz hingga 35 Hz, kemudian meningkat kembali pada putaran 45 Hz dan mencapai nilai tertinggi pada putaran 50 Hz. Pola tersebut menunjukkan bahwa kecepatan putaran *screw* berpengaruh terhadap nilai kalor biopelet yang dihasilkan.

Penurunan nilai kalor pada putaran 15 Hz hingga 35 Hz diduga disebabkan oleh karakteristik biopelet yang belum mengalami proses pemadatan secara optimal. Nilai kalor dipengaruhi oleh kandungan air, kadar abu, dan kandungan *fixed carbon* di dalam biopelet. Apabila kadar air dan kadar abu meningkat, maka sebagian energi panas akan digunakan untuk menguapkan air dan menyisakan residu pembakaran, sehingga energi yang dihasilkan selama proses pembakaran menjadi lebih rendah.

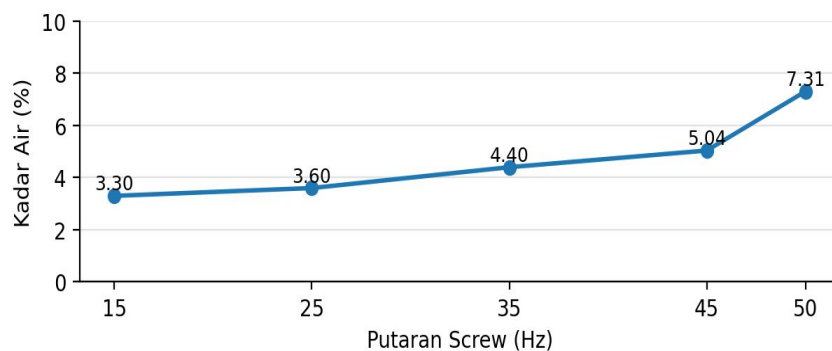
Peningkatan nilai kalor pada kecepatan putaran 45 Hz dan 50 Hz menunjukkan bahwa proses pemadatan biomassa berlangsung lebih baik dibandingkan putaran yang lebih rendah. Putaran *screw* yang lebih tinggi menghasilkan tekanan yang lebih besar sehingga partikel-partikel biomassa menjadi lebih rapat dan ikatan antarpartikel semakin kuat. Kondisi tersebut dapat meningkatkan kualitas biopelet karena energi yang tersimpan di dalam biopelet menjadi lebih besar sehingga nilai kalor yang dihasilkan juga meningkat.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa variasi kecepatan putaran *screw* memberikan pengaruh terhadap nilai kalor biopelet. Temuan ini sejalan dengan

teori bahwa karakteristik fisik biopelet, terutama tingkat kepadatan dan komposisi hasil analisis proksimat, memengaruhi energi panas yang dihasilkan selama proses pembakaran. Oleh karena itu, pemilihan kecepatan putaran *screw* yang sesuai menjadi salah satu faktor penting untuk memperoleh biopelet dengan kualitas pembakaran yang lebih baik.

B. Pengaruh Frekuensi Putaran Screw Terhadap Kadar Air

Kadar air merupakan salah satu parameter penting dalam menentukan kualitas biopelet karena memengaruhi proses penyalaan, efisiensi pembakaran, serta nilai kalor yang dihasilkan. Biopelet dengan kadar air yang rendah umumnya lebih mudah terbakar dan menghasilkan energi yang lebih tinggi dibandingkan biopelet dengan kadar air yang tinggi. Oleh karena itu, kadar air menjadi salah satu parameter mutu yang dipersyaratkan dalam Standar Nasional Indonesia (SNI) 8021:2014.



Gambar 4.2. Grafik Pengaruh Frekuensi Putaran *Screw* Terhadap Kadar Air

Berdasarkan Gambar 4.2, kadar air biopelet mengalami peningkatan pada setiap variasi kecepatan putaran *screw*. Nilai kadar air terendah diperoleh pada kecepatan putaran 15 Hz, yaitu sebesar 3,30%, kemudian meningkat menjadi 3,60% pada putaran 25 Hz, 4,40% pada putaran 35 Hz, 5,04% pada putaran 45 Hz, dan mencapai nilai tertinggi sebesar 7,31% pada kecepatan putaran 50 Hz. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan putaran *screw*, kadar air biopelet yang dihasilkan juga semakin meningkat.

Peningkatan kadar air diduga dipengaruhi oleh semakin cepatnya proses pencetakan biopelet pada kecepatan putaran *screw* yang lebih tinggi. Waktu tinggal (*residence time*) biomassa di dalam ruang pengepresan menjadi lebih singkat sehingga pelepasan air selama proses pemadatan belum berlangsung secara

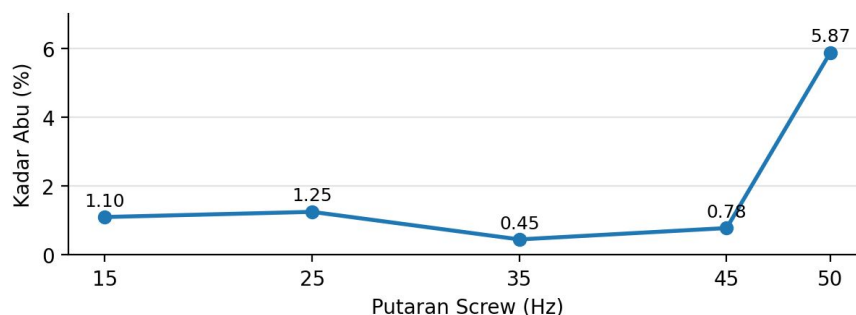
optimal. Akibatnya, sebagian kandungan air masih tertahan di dalam biopelet dan menyebabkan kadar air akhir menjadi lebih tinggi (Science, 2023).

Kadar air yang tinggi dapat memengaruhi kualitas biopelet sebagai bahan bakar. Sebelum biomassa terbakar, energi panas terlebih dahulu digunakan untuk menguapkan kandungan air sehingga energi yang tersedia untuk proses pembakaran menjadi berkurang. Kondisi tersebut menyebabkan biopelet dengan kadar air tinggi cenderung memiliki efisiensi pembakaran yang lebih rendah dibandingkan biopelet dengan kadar air rendah. Hal ini juga dapat berpengaruh terhadap nilai kalor biopelet yang dihasilkan.

Berdasarkan hasil penelitian, seluruh sampel biopelet memiliki kadar air antara 3,30–7,31%, sehingga masih memenuhi persyaratan kadar air biopelet berdasarkan SNI 8021:2014, yaitu maksimum 12%. Dengan demikian, meskipun kadar air meningkat seiring bertambahnya kecepatan putaran *screw*, seluruh biopelet yang dihasilkan masih berada dalam batas mutu yang dipersyaratkan.

C. Pengaruh Frekuensi Putaran *Screw* Terhadap Kadar Abu

Kadar abu merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk mengetahui jumlah residu anorganik yang tersisa setelah biopelet mengalami proses pembakaran sempurna. Semakin rendah kadar abu yang dihasilkan, semakin baik kualitas biopelet karena menunjukkan bahwa sebagian besar komponen penyusunnya merupakan bahan organik yang dapat terbakar. Sebaliknya, kadar abu yang tinggi dapat menurunkan kualitas pembakaran karena sebagian material tidak dapat menghasilkan energi panas.



Gambar 2.3. Grafik Pengaruh Frekuensi Putaran *Screw* Terhadap Kadar Abu

Berdasarkan Gambar 2.3, kadar abu biopelet menunjukkan perubahan pada setiap variasi kecepatan putaran *screw*. Nilai kadar abu sebesar 1,10% diperoleh pada kecepatan putaran 15 Hz, kemudian meningkat menjadi 1,25% pada 25 Hz.

Selanjutnya kadar abu menurun hingga 0,45% pada putaran 35 Hz, kemudian sedikit meningkat menjadi 0,78% pada 45 Hz, dan mengalami peningkatan yang sangat signifikan hingga mencapai 5,87% pada kecepatan putaran 50 Hz. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pengaruh kecepatan putaran *screw* terhadap kadar abu tidak membentuk hubungan linier, namun terjadi peningkatan kadar abu yang cukup tajam pada putaran tertinggi.

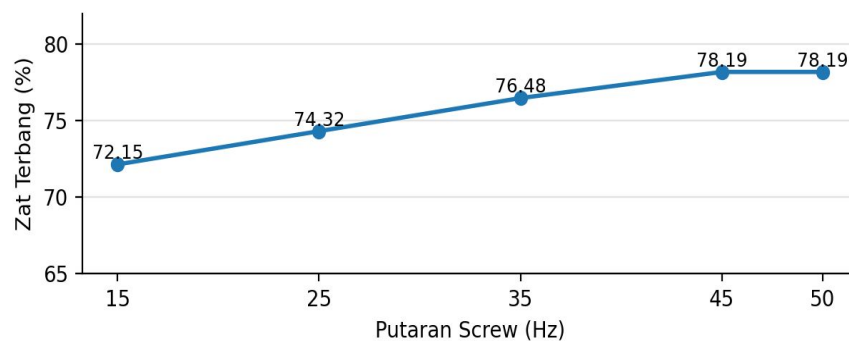
Peningkatan kadar abu pada kecepatan putaran 50 Hz diduga berkaitan dengan semakin tingginya gesekan antara biomassa dan *screw* selama proses pencetakan. Gesekan tersebut dapat memengaruhi perubahan karakteristik biomassa sehingga fraksi mineral atau komponen anorganik yang tersisa setelah proses pembakaran menjadi lebih besar. Selain itu, proses pemadatan yang berlangsung pada putaran tinggi juga dapat menyebabkan distribusi komponen penyusun biopellet menjadi tidak seragam, sehingga kadar abu yang dihasilkan meningkat (Chao et al., 2022).

Kadar abu memiliki hubungan yang erat dengan kualitas biopellet sebagai bahan bakar. Semakin tinggi kadar abu, semakin banyak residu pembakaran yang tertinggal sehingga dapat mengurangi efisiensi pembakaran serta menurunkan energi panas yang dihasilkan. Oleh karena itu, biopellet dengan kadar abu rendah umumnya memiliki kualitas yang lebih baik dibandingkan biopellet dengan kadar abu tinggi. Pada penelitian ini, kadar abu terendah diperoleh pada putaran 35 Hz, sedangkan kadar abu tertinggi diperoleh pada putaran 50 Hz, sehingga menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan putaran *screw* yang terlalu tinggi berpotensi meningkatkan kandungan abu biopellet.

Berdasarkan persyaratan mutu SNI 8021:2014, kadar abu biopellet yang baik adalah maksimum 1,5%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa biopellet pada kecepatan putaran 15 Hz, 25 Hz, 35 Hz, dan 45 Hz masih memenuhi persyaratan tersebut, sedangkan biopellet pada kecepatan putaran 50 Hz belum memenuhi standar karena memiliki kadar abu sebesar 5,87%. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan putaran *screw* hingga 50 Hz memberikan dampak kurang baik terhadap mutu biopellet berdasarkan parameter kadar abu.

D. Pengaruh Frekuensi Putaran Screw Terhadap Zat Terbang

Zat terbang (*volatile matter*) merupakan komponen biomassa yang akan menguap ketika dipanaskan pada suhu tinggi tanpa adanya oksigen. Kandungan zat terbang berpengaruh terhadap proses penyalan awal, laju pembakaran, serta karakteristik pembakaran biopellet. Biopellet dengan kadar zat terbang yang tinggi umumnya lebih mudah menyala, namun menghasilkan asap lebih banyak dan pembakaran berlangsung lebih cepat dibandingkan biopellet dengan kadar zat terbang yang rendah.



Gambar 4.4. Grafik Pengaruh Frekuensi Putaran Screw Terhadap Zat Terbang

Berdasarkan Gambar 4.4, kadar zat terbang biopellet menunjukkan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya kecepatan putaran screw. Nilai zat terbang sebesar 72,15% diperoleh pada kecepatan putaran 15 Hz, kemudian meningkat menjadi 74,32% pada 25 Hz, 76,48% pada 35 Hz, dan 78,19% pada 45 Hz. Pada kecepatan putaran 50 Hz, nilai zat terbang tetap sebesar 78,19%, sehingga menunjukkan bahwa peningkatan kadar zat terbang mulai stabil pada putaran tertinggi.

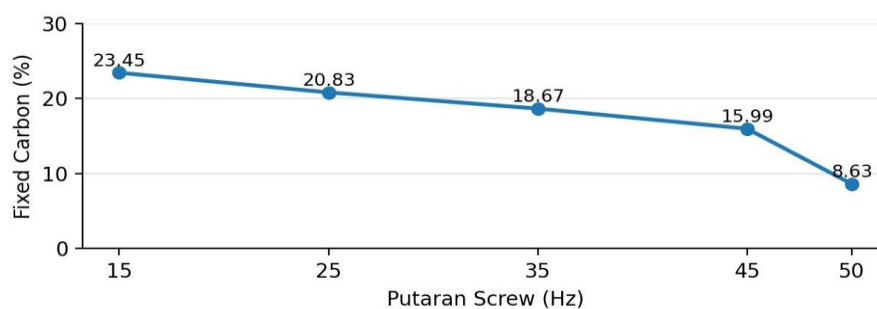
Peningkatan kadar zat terbang diduga dipengaruhi oleh perubahan karakteristik biomassa selama proses pencetakan menggunakan *Screw Oil Press Machine*. Semakin tinggi kecepatan putaran screw, proses pemadatan berlangsung lebih cepat sehingga sebagian komponen organik yang mudah menguap masih tersimpan di dalam biopellet. Kondisi tersebut menyebabkan kandungan zat terbang cenderung meningkat seiring bertambahnya kecepatan putaran screw. (Matli et al., 2023).

Kadar zat terbang memiliki hubungan yang erat dengan nilai *fixed carbon*. Pada analisis proksimat, peningkatan kadar zat terbang umumnya diikuti oleh penurunan kandungan *fixed carbon*, karena kedua parameter tersebut saling memengaruhi dalam komposisi biopelet. Hasil penelitian ini juga menunjukkan kecenderungan yang sama, yaitu meningkatnya kadar zat terbang diikuti dengan menurunnya nilai *fixed carbon* pada setiap variasi kecepatan putaran *screw*.

Berdasarkan hasil penelitian, kadar zat terbang biopelet berada pada kisaran 72,15–78,19%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa variasi kecepatan putaran *screw* memberikan pengaruh terhadap kandungan zat terbang biopelet. Semakin tinggi kecepatan putaran *screw*, kandungan zat terbang cenderung meningkat hingga mencapai kondisi yang relatif stabil pada putaran 45 Hz dan 50 Hz.

E. Pengaruh Frekuensi Putaran Screw Terhadap Karbon Tetap

Fixed carbon atau karbon tetap merupakan fraksi karbon padat yang masih tersisa setelah kandungan air dan zat terbang pada biopelet dihilangkan. Parameter ini menunjukkan jumlah karbon yang dapat terbakar selama proses pembakaran sehingga menjadi salah satu indikator penting dalam menentukan kualitas biopelet. Semakin tinggi nilai *fixed carbon*, semakin besar potensi energi yang dapat dihasilkan karena kandungan karbon yang tersedia untuk proses pembakaran semakin banyak.



Gambar 4.5. Grafik Pengaruh Frekuensi Putaran Screw Terhadap Karbon Tetap

Berdasarkan Gambar 4.5, nilai *fixed carbon* biopelet mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya kecepatan putaran *screw*. Nilai *fixed carbon* tertinggi diperoleh pada kecepatan putaran 15 Hz, yaitu sebesar 23,45%, kemudian menurun menjadi 20,83% pada putaran 25 Hz, 18,67% pada 35 Hz, 15,99% pada 45 Hz, dan mencapai nilai terendah sebesar 8,63% pada kecepatan putaran 50 Hz. Hasil

tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan putaran *screw* memberikan pengaruh terhadap penurunan kandungan karbon tetap pada biopelet.

Penurunan nilai *fixed carbon* diduga berkaitan dengan meningkatnya kadar air, kadar abu, dan kadar zat terbang pada biopelet. Berdasarkan analisis proksimat, nilai *fixed carbon* dihitung dari selisih 100% dengan jumlah kadar air, kadar abu, dan kadar zat terbang. Oleh karena itu, apabila ketiga parameter tersebut meningkat, maka nilai *fixed carbon* akan mengalami penurunan. Kondisi ini menunjukkan bahwa setiap parameter dalam analisis proksimat saling berhubungan dan memengaruhi karakteristik biopelet secara keseluruhan (Ma et al., 2022).

Selain itu, peningkatan kecepatan putaran *screw* juga memengaruhi proses pemadatan biomassa selama pencetakan biopelet. Putaran *screw* yang lebih tinggi menghasilkan gaya gesek dan tekanan yang lebih besar sehingga dapat menyebabkan perubahan karakteristik fisik maupun kimia biomassa. Perubahan tersebut berpotensi meningkatkan kandungan zat terbang dan menurunkan fraksi karbon tetap yang tersisa setelah proses pemanasan. Akibatnya, nilai *fixed carbon* cenderung menurun pada kecepatan putaran yang lebih tinggi.

Nilai *fixed carbon* memiliki hubungan yang erat dengan nilai kalor biopelet karena karbon tetap merupakan komponen utama yang menghasilkan energi selama pembakaran. Semakin tinggi kandungan *fixed carbon*, semakin besar energi panas yang dapat dihasilkan. Sebaliknya, penurunan nilai *fixed carbon* dapat mengurangi potensi energi biopelet apabila tidak diimbangi oleh karakteristik pembakaran yang baik. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa variasi kecepatan putaran *screw* memengaruhi kandungan *fixed carbon* biopelet, sehingga pengaturan kecepatan putaran menjadi salah satu faktor penting dalam menghasilkan biopelet dengan karakteristik pembakaran yang optimal.

4.2.2 Pengaruh Frekuensi Putaran Screw Terhadap Densitas, Laju

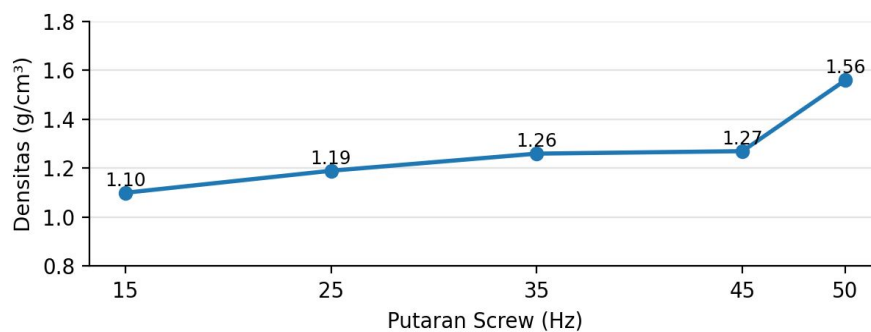
Pembakaran dan *Drop Test*

Selain analisis proksimat, kualitas biopelet juga ditentukan oleh karakteristik fisiknya. Pada penelitian ini, karakteristik biopelet yang dianalisis meliputi densitas, laju pembakaran, dan *drop test*. Ketiga parameter tersebut digunakan untuk mengevaluasi tingkat kepadatan, perilaku pembakaran, serta

ketahanan mekanik biopelet selama proses penanganan dan penyimpanan. Pembahasan masing-masing parameter disajikan sebagai berikut.

A. Pengaruh Frekuensi Putaran Screw Terhadap Densitas

Densitas merupakan salah satu sifat fisik biopelet yang menunjukkan tingkat kerapatan atau kepadatan material setelah melalui proses pencetakan. Nilai densitas menggambarkan seberapa rapat partikel-partikel biomassa tersusun di dalam biopelet. Semakin besar nilai densitas, semakin padat dan kompak struktur biopelet yang dihasilkan sehingga kualitas fisiknya cenderung lebih baik.



Gambar 4.6. Grafik Pengaruh Frekuensi Putaran Screw Terhadap Densitas

Berdasarkan Gambar 4.6, nilai densitas biopelet mengalami peningkatan seiring bertambahnya kecepatan putaran *screw*. Densitas biopelet pada putaran 15 Hz sebesar 1,10 g/cm³, kemudian meningkat menjadi 1,19 g/cm³ pada 25 Hz, 1,26 g/cm³ pada 35 Hz, 1,27 g/cm³ pada 45 Hz, dan mencapai nilai tertinggi sebesar 1,56 g/cm³ pada kecepatan putaran 50 Hz. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan putaran *screw* memberikan pengaruh terhadap meningkatnya kerapatan biopelet yang dihasilkan.

Peningkatan densitas diduga disebabkan oleh semakin besarnya tekanan yang dihasilkan selama proses pencetakan. Pada kecepatan putaran *screw* yang lebih tinggi, biomassa mengalami proses pemadatan yang lebih efektif sehingga rongga antarpartikel menjadi semakin kecil. Kondisi tersebut menyebabkan partikel-partikel biomassa saling berikatan lebih kuat dan menghasilkan biopelet dengan struktur yang lebih padat.

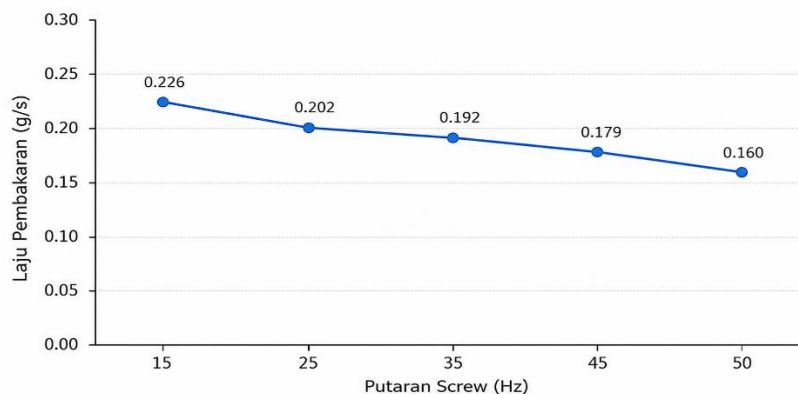
Nilai densitas yang tinggi memberikan beberapa keuntungan terhadap kualitas biopelet. Biopelet yang lebih padat memiliki kekuatan mekanik yang lebih baik, tidak mudah hancur selama proses penyimpanan maupun transportasi, serta

memiliki nilai energi per satuan volume yang lebih tinggi. Selain itu, densitas yang tinggi juga dapat meningkatkan efisiensi penanganan dan penyimpanan biopelet karena volume penyimpanan yang dibutuhkan menjadi lebih kecil (Ma et al., 2022).

Berdasarkan persyaratan mutu SNI 8021:2014, densitas biopelet minimum adalah $0,8 \text{ g/cm}^3$ ($\approx 800 \text{ kg/m}^3$). Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh biopelet memiliki densitas antara $1,10\text{--}1,56 \text{ g/cm}^3$, sehingga seluruh sampel telah memenuhi persyaratan tersebut. Dengan demikian, variasi kecepatan putaran *screw* memberikan pengaruh positif terhadap peningkatan densitas biopelet, dan seluruh biopelet yang dihasilkan telah memenuhi standar mutu berdasarkan parameter densitas.

B. Pengaruh Frekuensi Putaran Screw Terhadap Laju Pembakaran

Laju pembakaran merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk mengetahui kecepatan biopelet habis terbakar selama proses pembakaran. Nilai laju pembakaran menunjukkan banyaknya massa biopelet yang terbakar dalam satuan waktu sehingga dapat digunakan untuk mengevaluasi karakteristik pembakaran biopelet sebagai bahan bakar padat. Karakteristik pembakaran biopelet dipengaruhi oleh sifat fisik biopelet yang dihasilkan selama proses densifikasi, seperti tingkat kepadatan dan ikatan antarpartikel (Sari et al., 2026).



Gambar 4.7. Gambar Pengaruh Frekuensi Putaran Screw Terhadap Laju Pembakaran

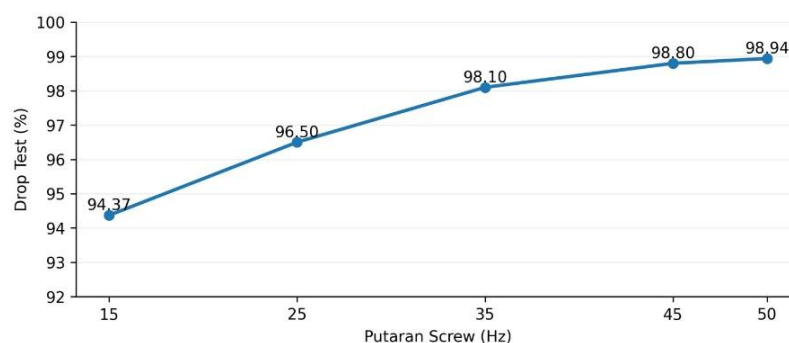
Berdasarkan Gambar 4.7, nilai laju pembakaran biopelet menunjukkan kecenderungan menurun seiring dengan meningkatnya kecepatan putaran *screw*. Nilai laju pembakaran yang diperoleh pada kecepatan putaran *screw* 15 Hz, 25 Hz, 35 Hz, 45 Hz, dan 50 Hz berturut-turut sebesar 0,226 g/s, 0,202 g/s, 0,192 g/s, 0,179 g/s, dan 0,160 g/s.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa biopelet yang dihasilkan pada kecepatan putaran *screw* 50 Hz memiliki nilai laju pembakaran terendah, yaitu sebesar 0,160 g/s, sedangkan biopelet pada kecepatan putaran *screw* 15 Hz memiliki nilai laju pembakaran tertinggi, yaitu sebesar 0,226 g/s. Perbedaan nilai laju pembakaran pada setiap variasi kecepatan putaran *screw* menunjukkan bahwa perubahan kecepatan putaran *screw* memberikan pengaruh terhadap karakteristik pembakaran biopelet yang dihasilkan.

Penurunan nilai laju pembakaran pada penelitian ini diduga berkaitan dengan proses densifikasi selama pencetakan biopelet. Peningkatan kecepatan putaran *screw* menyebabkan material biomassa mengalami proses pemadatan yang lebih baik sehingga karakteristik biopelet yang dihasilkan menjadi lebih kompak. Biopelet yang memiliki struktur lebih rapat cenderung mengalami proses pembakaran yang lebih lambat dibandingkan biopelet dengan struktur yang kurang padat. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian (Sari et al., 2026) yang menyatakan bahwa proses densifikasi memberikan pengaruh terhadap karakteristik fisik biopelet sehingga turut memengaruhi karakteristik pembakarannya.

C. Pengaruh Frekuensi Putaran Screw Terhadap Drop Test

Pengujian *drop test* dilakukan untuk mengetahui kekuatan mekanik biopelet terhadap benturan atau guncangan selama proses penanganan, penyimpanan, maupun transportasi. Semakin tinggi nilai *drop test* yang diperoleh, maka semakin baik ketahanan biopelet terhadap kerusakan mekanik. Karakteristik mekanik biopelet dipengaruhi oleh kualitas proses densifikasi yang terjadi selama pencetakan biopelet (Sari et al., 2026).



Gambar 4.8 Pengaruh Kecepatan Putaran Screw terhadap Nilai Drop Test Biopelet

Berdasarkan Gambar 4.8, nilai *drop test* biopelet menunjukkan kecenderungan meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan putaran *screw*. Nilai *drop test* yang diperoleh pada kecepatan putaran *screw* 15 Hz, 25 Hz, 35 Hz, 45 Hz, dan 50 Hz berturut-turut sebesar 94,37%, 96,50%, 98,10%, 98,80%, dan 98,94%.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa biopelet yang dihasilkan pada kecepatan putaran *screw* 50 Hz memiliki nilai *drop test* tertinggi, yaitu sebesar 98,94%, sedangkan nilai *drop test* terendah diperoleh pada kecepatan putaran *screw* 15 Hz, yaitu sebesar 94,37%. Perbedaan nilai *drop test* pada setiap variasi kecepatan putaran *screw* menunjukkan bahwa kecepatan putaran *screw* memberikan pengaruh terhadap ketahanan mekanik biopelet yang dihasilkan.

Peningkatan nilai *drop test* pada penelitian ini diduga berkaitan dengan proses densifikasi selama pencetakan biopelet. Proses densifikasi menghasilkan biopelet yang lebih kompak sehingga meningkatkan kekuatan mekanik biopelet terhadap benturan. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian (Sari et al., 2026) yang menyatakan bahwa proses densifikasi berpengaruh terhadap karakteristik fisik biopelet yang dihasilkan.

4.2.3 Pembahasan Keseluruhan Karakteristik Biopelet Biji Ketapang variasi Putaran Screw

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan pada temperatur operasi 150°C dengan variasi kecepatan putaran *screw* 15 Hz, 25 Hz, 35 Hz, 45 Hz, dan 50 Hz, menunjukkan bahwa perubahan kecepatan putaran *screw* memberikan pengaruh terhadap karakteristik biopelet biji ketapang (*Terminalia catappa*). Pengaruh tersebut dapat diamati dari perubahan nilai kadar air, kadar abu, zat terbang (volatile matter), fixed carbon, densitas, nilai kalor, laju pembakaran, serta ketahanan mekanik (*drop test*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa setiap parameter memiliki kecenderungan yang berbeda pada setiap variasi putaran *screw*, sehingga dapat disimpulkan bahwa kecepatan putaran *screw* merupakan salah satu faktor penting dalam menentukan mutu biopelet yang dihasilkan.

Pada parameter kadar air terjadi peningkatan dari 3,30% pada putaran 15 Hz menjadi 7,31% pada putaran 50 Hz. Peningkatan kadar air tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan putaran *screw*, kadar air biopelet cenderung

meningkat. Meskipun demikian, kadar air yang diperoleh masih berada pada kisaran yang dapat mendukung proses pembakaran biopelet karena kadar air merupakan salah satu faktor yang memengaruhi kemudahan penyalaan bahan bakar. Kadar air yang rendah akan menghasilkan proses pembakaran yang lebih efisien karena energi panas tidak banyak digunakan untuk menguapkan kandungan air yang terdapat di dalam biopelet.

Pada parameter kadar abu diperoleh nilai sebesar 1,10%, 1,25%, 0,45%, 0,78%, dan meningkat menjadi 3,64% pada putaran 50 Hz. Nilai kadar abu terendah diperoleh pada putaran 35 Hz yaitu 0,45%, sedangkan nilai tertinggi terdapat pada putaran 50 Hz sebesar 3,64%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan kecepatan putaran screw turut memengaruhi jumlah residu hasil pembakaran. Semakin rendah kadar abu yang dihasilkan maka kualitas biopelet akan semakin baik karena residu pembakaran yang dihasilkan lebih sedikit.

Nilai zat terbang (volatile matter) mengalami peningkatan dari 72,15% pada putaran 15 Hz menjadi 79,85% pada putaran 50 Hz. Peningkatan kandungan zat terbang menyebabkan biopelet lebih mudah menyala pada tahap awal pembakaran. Namun demikian, kandungan zat terbang yang terlalu tinggi dapat menyebabkan proses pembakaran berlangsung lebih cepat sehingga waktu pembakaran menjadi lebih singkat. Oleh karena itu, kandungan zat terbang perlu berada pada kisaran yang sesuai agar proses pembakaran berlangsung stabil.

Berbeda dengan kadar air dan zat terbang, nilai fixed carbon justru mengalami penurunan dari 23,45% pada putaran 15 Hz menjadi 8,63% pada putaran 50 Hz. Penurunan tersebut terjadi karena semakin tinggi kadar air dan zat terbang maka kandungan karbon tetap yang tersisa menjadi semakin rendah. Kandungan fixed carbon yang tinggi sangat penting karena berperan dalam mempertahankan proses pembakaran setelah zat terbang habis terbakar. Oleh sebab itu, biopelet dengan kandungan fixed carbon yang lebih tinggi umumnya memiliki waktu pembakaran yang lebih lama.

Pada pengujian densitas diperoleh nilai sebesar 1,10 g/cm³, 1,19 g/cm³, 1,26 g/cm³, 1,27 g/cm³, dan 1,56 g/cm³. Nilai densitas tertinggi diperoleh pada putaran 50 Hz, yang menunjukkan bahwa semakin tinggi putaran screw, proses pemadatan biomassa berlangsung lebih baik sehingga menghasilkan biopelet yang lebih rapat.

Densitas yang tinggi juga berpengaruh terhadap kekuatan biopelet karena ikatan antarpartikel menjadi lebih kuat dan tidak mudah mengalami kerusakan selama proses penyimpanan maupun transportasi.

Hasil pengujian laju pembakaran menunjukkan nilai sebesar 0,226 g/s, 0,202 g/s, 0,192 g/s, 0,179 g/s, dan 0,160 g/s. Nilai tersebut menunjukkan bahwa laju pembakaran cenderung menurun seiring meningkatnya kecepatan putaran screw. Hal ini berkaitan dengan meningkatnya densitas biopelet sehingga proses pembakaran berlangsung lebih lambat dan lebih stabil. Biopelet dengan laju pembakaran yang lebih rendah umumnya memiliki waktu nyala yang lebih lama sehingga lebih efisien sebagai bahan bakar padat.

Hasil drop test menunjukkan bahwa ketahanan mekanik biopelet mengalami peningkatan dari 94,37% pada putaran 15 Hz menjadi 98,94% pada putaran 50 Hz. Nilai tersebut menunjukkan bahwa biopelet yang dihasilkan pada putaran screw yang lebih tinggi memiliki struktur yang lebih kuat sehingga kehilangan massa akibat benturan menjadi lebih kecil. Kondisi ini membuktikan bahwa proses densifikasi selama pencetakan mampu meningkatkan kekuatan mekanik biopelet sehingga lebih tahan terhadap proses pengemasan, penyimpanan, dan distribusi.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi kecepatan putaran screw memberikan pengaruh terhadap seluruh karakteristik biopelet biji ketapang. Putaran 50 Hz menghasilkan densitas tertinggi sebesar 1,56 g/cm³, nilai kalor sebesar 6749 cal/g, serta ketahanan mekanik tertinggi sebesar 98,94%, namun juga menghasilkan kadar air dan kadar abu yang lebih tinggi dibandingkan variasi lainnya. Sementara itu, putaran 35 Hz menghasilkan kadar abu terendah yaitu 0,45%, sedangkan putaran 15 Hz menghasilkan nilai fixed carbon tertinggi yaitu 23,45%. Dengan demikian, setiap variasi putaran screw memiliki kelebihan dan kekurangan terhadap karakteristik biopelet yang dihasilkan, sehingga pemilihan putaran screw perlu disesuaikan dengan karakteristik biopelet yang diinginkan.