

OPTIMASI KONDISI NILAI KALOR ARANG DENGAN PROSES CO-TOREFAKSI BIOMASSA DAN PLASTIK MENGGUNAKAN *RESPONSE SURFACE METHODOLOGY* (RSM)

CONDITION OPTIMIZATION OF CHARCOAL HEATING VALUE BY CO-TOREFACTION OF BIOMASS AND PLASTIC USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY (RSM)

Bintang Angelica N.¹, Wahyu Kristian S.², S. Rosalinda³, Otong Nurhilal⁴

^{1,2,3}Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Industri Pertanian,
 Universitas Padjadjaran

⁴Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan IPA, Universitas Padjadjaran

¹bintang19004@mail.unpad.ac.id, ²wahyu.sugandi@unpad.ac.id, ³s.rosalinda@unpad.ac.id,

⁴otong.nurhilal@unpad.ac.id*

Abstract

Universities are public spaces that will generate organic and inorganic waste every day. Waste can be decomposed by thermochemical conversion of two materials or co-torefaction into alternative fuels such as briquettes. Hydrophobic plastic with a high heating value is known to be a contributor to hydrogen so as to improve the heating value of biomass. Material type, temperature and residence time are factors that can influence the co-torefaction process. Using Response Surface Methodology (RSM) type CCD with a minimum temperature limit of 250°C and a maximum temperature limit of 400°C and a minimum residence time limit of 30 minutes and a maximum residence time limit of 120 minutes. It was found that a temperature of 343°C with a residence time of 102 minutes produced an optimal heating value of 6551 cal/g with a moisture content of 0.96%, ash content of 18.65%, fly matter content of 49.90% and bound carbon content of 31.45%.

Keywords: Co-Torrefaction, Time, Temperature, Waste, Char, Calorific Value

Abstrak

Universitas merupakan ruang publik yang akan menghasilkan sampah organik maupun anorganik setiap harinya. Keberadaan sampah dapat diurai dengan proses konversi termokimia dua bahan atau co-torefaksi menjadi bahan bakar alternatif seperti briket. Plastik yang bersifat hidrofobik dengan nilai kalor tinggi diketahui dapat menjadi penyumbang hidrogen sehingga dapat memperbaiki nilai kalor pada biomassa. Jenis bahan, suhu dan waktu tinggal merupakan faktor yang dapat mempengaruhi proses co-torefaksi. Menggunakan Response Surface Methodology (RSM) tipe CCD dengan batas minimum suhu yaitu 250°C dan batas maksimum suhu yaitu 400°C serta batas minimum waktu tinggal yaitu 30 menit dan batas maksimum waktu tinggal yaitu 120 menit. Diketahui suhu 343°C dengan waktu tinggal 102 menit menghasilkan nilai kalor optimal sebesar 6551 kal/g dengan kadar air sebesar 0.96%, kadar abu sebesar 18.65%, kadar zat terbang 49.90% dan kadar karbon terikat sebesar 31.45%.

Kata kunci: Ko-Torefaksi, Waktu, Suhu, Limbah, Arang, Nilai Kalor

Pendahuluan

Universitas merupakan ruang publik yang mewadahi kegiatan manusia sebagai individu maupun kelompok yang dilengkapi dengan jalan, taman maupun ruang terbuka. Tanaman pada wilayah ruang publik akan

menghasilkan bahan organik berupa produk maupun buangan dari proses fotosintesis yang diketahui sebagai sampah biomassa. Ruang publik juga akan menghasilkan sampah anorganik yang jumlahnya berbanding lurus dengan jumlah populasi didalamnya (Suchayo & Fanida, 2021). Keberadaan sampah tersebut dapat diurai dengan proses konversi termokimia dua bahan atau co-torefaksi menjadi bahan bakar alternatif seperti briket. Menurut (Seah et al., 2023) proses konversi termokimia pada biomassa dan plastik menghasilkan produk akhir yang lebih baik dikarenakan terjadinya interaksi sinergis antara kedua bahan. Plastik yang bersifat hidrofobik dengan nilai kalor tinggi diharapkan dapat memperbaiki nilai kalor pada biomassa dan menghasilkan arang dengan nilai kalor lebih baik. Perbedaan suhu degradasi antara biomassa dan plastik menyebabkan perlu dilakukan optimasi suhu dan waktu untuk menghasilkan nilai kalor arang yang optimal.

Biomassa

Biomassa merupakan bahan organik yang tersedia secara terbarukan dan dihasilkan berupa produk maupun limbah yang dapat dimanfaatkan menjadi bahan bakar padat, cair maupun gas dengan beberapa teknologi konversi seperti pembakaran langsung, pirolisis, karbonisasi maupun gasifikasi. Biomassa dedaunan akan tersusun dari lignoselulosa yaitu lignin, selulosa dan hemiselulosa yang berkaitan dengan karbon yang terkandung. Polimer lignin memiliki nilai kalor lebih tinggi dibandingkan selulosa dan hemiselulosa karena kaya akan karbon dan oksigen. Kadar lignin juga berpengaruh terhadap kadar karbon terikat yang berkaitan dengan nilai kalor (Nawawi et al., 2018). Unsur pada biomassa mengandung berbagai zat kimia yang mengandung atom karbon, namun kandungan karbon yang rendah dengan kadar volatil tinggi menyebabkan biomassa perlu pengelolaan dengan konversi termokimia jika ingin dimanfaatkan menjadi *biofuel*.

Polyethylene Terephthale (PET)

Polyethylene Terephthale merupakan jenis polimer yang tersusun atas rantai polimer kaku sehingga bersifat kuat dan tahan terhadap bahan kimia, ringan serta dapat dibentuk pada suhu tertentu. Berdasarkan jenis bahan yang digunakan, biomassa umumnya akan terdekomposisi pada suhu 250°C-300°C dan plastik akan meleleh pada suhu < 300°C (Waheed et al., 2022). Botol plastik berbahan PET ditemukan sekitar 31% dari jenis botol plastik lainnya. Nilai kadar karbon berbanding lurus dengan nilai kalor sehingga plastik dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan nilai kalor pada sumber energi alternatif seperti briket. Berdasarkan uji proksimat yang dilakukan oleh (Zannikos et al., 2013) diketahui bahwa:

Tabel 1. Uji Proksimat Botol Berbahan Polyethylene Terephthale (PET)

Komponen	Nilai (%W/W)
<i>Volatile</i>	91.75
<i>Moisture</i>	0.46
<i>Ash</i>	0.02
<i>Fixed Carbon</i>	7.77
<i>Nitrogen</i>	0
<i>Carbon</i>	62.5
<i>Hydrogen</i>	4.2
<i>Sulfur</i>	0
<i>Oxygen</i>	33.3

Konversi Termokimia

Konversi termokimia merupakan suatu proses degradasi termal menjadi molekul yang lebih kecil dengan sedikit atau tanpa bantuan udara. Adapun proses ini terbagi menjadi beberapa teknik yaitu torefaksi, karbonisasi dan pirolisis.

a. Torefaksi

Torefaksi terjadi pada suhu rendah yaitu 200°C – 300°C dengan laju pemanasan 0.07 - 0.18°C/s. Pada proses ini, kadar air dan zat mudah menguap pada biomassa akan terbuang dan fokus

menghasilkan produk berupa padatan dengan nilai kalor yang lebih tinggi (Iáñez-Rodríguez et al., 2017). Produk berupa padatan (arang) mengandung energi sekitar 90% atau lebih tinggi dari arang proses pirolisis sekitar 55 – 65% (Rago et al., 2020).

b. Karbonisasi

Karbonisasi serupa dengan proses torefaksi namun dilakukan pada suhu yang lebih tinggi yaitu >300°C - 600°C sehingga dapat menghasilkan arang dengan energi lebih baik namun jumlah yang lebih sedikit dibandingkan proses torefaksi (Basu, 2018)

c. Pirolisis

Proses pirolisis terjadi pada suhu 300°C - 700°C dengan laju pemanasan 0.02 - 1°C/s yang dipengaruhi oleh kadar air bahan, waktu serta suhu yang digunakan. Produk yang dihasilkan pada proses pirolisis antara lain adalah arang (*char*), asap cair (*bio-oil*) dan gas (*syngas*). Adapun produk hasil pirolisis terdapat pada Tabel 2

Tabel 2. Produk Hasil Pirolisis Berhubungan Dengan Suhu

Proses	Padatan (<i>char</i>)	Cairan (<i>bio-oil</i>)	Gas (<i>syngas</i>)
Pirolisis lambat	35%	30% (70% air)	35%
Pirolisis sedang	25%	50% (50% air)	25%
Pirolisis cepat	12%	75% (25% air)	13%
Gasifikasi	10%	5% (5% air)	85%

Karakteristik dan Sifat Briket

a. Kadar Air

Kadar air merupakan parameter yang dapat menentukan kebasahan pada suatu bahan. Kadar air dapat menentukan kualitas pada suatu bahan termasuk briket. Briket dengan kadar air yang rendah akan memiliki nilai kalor yang lebih baik dibandingkan briket dengan kadar air yang tinggi. Proses pengeringan dapat digunakan untuk menekan kadar air briket. Menurut Mani et al. pada Nurek et al. (2019), kadar air pada briket yang terbuat dari biomassa sebaiknya diantara 5 – 10% dikarenakan daya tahan dan kepadatan aglomerat lebih tinggi. Briket dengan kualitas yang baik akan menyalakan api yang bagus, cepat menyala dan tidak berasap (Eka Putri & Andasuryani, 2017). Kadar air dapat ditentukan menggunakan rumus:

$$\text{Kadar air (\%)} = \frac{\text{berat basah (g)} - \text{berat kering tanur (g)}}{\text{berat kering tanur (g)}} \times 100\%$$

b. Kadar Abu

Kadar abu merupakan sisa residu proses pembakaran yang tidak lagi memiliki kadar karbon, namun mengandung senyawa logam seperti natrium, vanadium, magnesium, dan lainnya yang berpengaruh menurunkan nilai kalor. Kadar abu dapat ditentukan dengan perbandingan antara jumlah bahan tersisa dengan jumlah bahan yang dibakar. Briket dengan sedikit kadar abu akan memiliki sifat pembakaran yang lebih baik. Kadar abu dapat ditentukan dengan rumus:

$$\text{Kadar abu (\%)} = \frac{\text{bobot abu (gr)}}{\text{bobot sampel (gr)}} \times 100\%$$

c. Zat Terbang

Zat terbang merupakan parameter yang menentukan kualitas briket saat pembakaran. Semakin tinggi kandungan silika pada briket maka akan semakin tinggi pula zat terbang (Ristianingsih et al., 2013). Zat terbang dihasilkan dari berat yang hilang pada proses pembakaran dikurangi kadar air pada briket. Zat terbang dapat ditentukan dengan rumus:

$$\text{Zat terbang} = \frac{\text{berat sampel uji kadar air (g)} - \text{berat sample muffle furnace}}{\text{berat awal (g)}}$$

d. Kadar Karbon Terikat

Kadar karbon terikat merupakan jumlah karbon dalam bentuk arang yang terkandung pada suatu bahan. Semakin tinggi kadar karbon yang terkandung maka akan semakin tinggi nilai kalor pada briket. Kadar karbon cenderung menurun seiring meningkatnya konsentrasi perekat yang ditambahkan dan suhu pengarangan yang terlalu tinggi (Ristianingsih et al., 2013). Kadar karbon terikat dapat ditentukan dengan rumus:

$$\text{Karbon Terikat} = 100\% - (\text{kadar air} + \text{kadar abu} + \text{kadar zat terbang})$$

e. Nilai Kalor

Nilai kalor merupakan jumlah energi panas yang terkandung pada suatu bahan dan dihasilkan dari proses pembakaran sempurna. Nilai kalor dapat diukur menggunakan bom kalori meter. Semakin tinggi nilai kalor pada briket maka semakin baik pula kualitas briket tersebut. Nilai kalor berkaitan dengan kadar karbon bahan, semakin tinggi kadar karbon terkandung maka semakin tinggi nilai kalor bahan. Nilai kalor dapat ditentukan dengan rumus:

$$\text{Nilai kalor} = \frac{W \times (T_2 - T_1)}{A} - B_1 + B_2$$

Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Perbengkelan Gedung IV, Laboratorium Kimia Pangan dan Laboratorium Pascapanen dan Teknologi Proses, Fakultas Teknologi Industri Pertanian, Universitas Padjadjaran yang berlangsung dari bulan September 2023 hingga Desember 2023. Variabel penelitian yang digunakan yaitu suhu dan waktu engan respon yaitu kadar air, kadar abu, kadar zat terbang, kadar karbon terikat dan nilai kalor arang. Variabel suhu menggunakan batas minimum yaitu 250°C dengan batas maksimum yaitu 400°C dan variabel waktu menggunakan batas minimum yaitu 30 menit dengan batas maksimum yaitu 120 menit. Berdasarkan variabel yang telah diinputkan pada aplikasi *Design Expert*, maka jumlah perlakuan penelitian terdapat pada Tabel 3.

Tabel 3. Jumlah Perlakuan Penelitian Berdasarkan RSM Tipe *Central Composite Design* (CCD)

Std	Run	Faktor 1: Temperature	Faktor 2: Time
1	10	250	30
2	13	400	30
3	11	250	120
4	1	400	120
5	7	219	75
6	4	431	75
7	3	325	11
8	5	325	139
9	2	325	75
10	12	325	75
11	6	325	75
12	8	325	75
13	9	325	75

Kombinasi perlakuan antara suhu dan waktu kemudian diaplikasikan pada proses co-torefaksi sebanyak 13 percobaan. Perlakuan tersebut terdiri atas 5 *central point* (titik tengah variabel) dan 8 *factorial point* (perlakuan batas maksimum dan batas minimum variabel). Respon yaitu kadar air, kadar abu, kadar zat terbang, kadar karbon terikat dan nilai kalor yang telah diketahui kemudian dimasukkan kedalam RSM untuk selanjutnya dianalisis hingga memperoleh kondisi optimum pada nilai kalor briket.

Hasil dan Pembahasan

Analisa Kadar Air

Kadar air merupakan salah satu faktor paling berpengaruh dalam menentukan kualitas dan kuantitas arang. Bahan dengan kadar air yang tinggi dapat mengganggu proses konversi sehingga akan menurunkan kuantitas yang dihasilkan. Kadar air juga berpengaruh terhadap kualitas arang seperti nilai kalor, dimana semakin tinggi kadar air yang terkandung akan semakin rendah nilai kalor yang dihasilkan. Hasil pengujian ANOVA pada kadar air terdapat pada Tabel 4.

Tabel 4. Uji ANOVA Kadar Air Arang

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	5.13	5	1.03	6.62	0.0139	Significant
A-Suhu	1.66	1	1.66	10.69	0.0137	
B-Waktu	1.11	1	1.11	7.18	0.0316	
AB	0.3364	1	0.3364	2.17	0.1840	
A ²	1.81	1	1.81	11.71	0.0111	
B ²	0.3945	1	0.3945	2.55	0.1545	
Residual	1.08	7	0.1549			
Lack of Fit	1.08	3	0.3614			
Pure Error	0.0000	4	0.0000			
Cor Total	6.21	12				

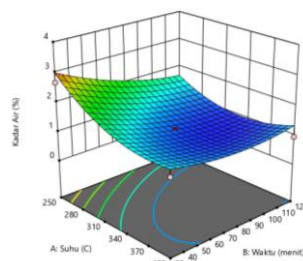
Uji ANOVA menunjukkan pengaruh setiap variabel terhadap respon yang telah ditentukan yaitu kadar air. Diketahui jika nilai yang muncul > 0.0500 menunjukkan bahwa variabel tidak berpengaruh secara signifikan, namun jika nilai yang muncul ≤ 0.0500 hal tersebut menunjukkan bahwa variabel berpengaruh secara signifikan. Berdasarkan Tabel 4 diketahui bahwa *F-value* model diketahui sebesar 6.62 dengan peluang ketidaktepatan nilai tersebut sebesar 0.0139 atau 1,39% sehingga dapat memberikan pengaruh yang signifikan. Adapun model yang disarankan adalah *Quadratic* dan *2FI*. Parameter seperti suhu, waktu dan suhu kuadrat memiliki *p-value* ≤ 0.0500 sehingga diketahui dapat berpengaruh signifikan terhadap respon, namun parameter paling berpengaruh adalah suhu kuadrat dengan *p-value* 0.0111 atau sebesar 1,11%.

Tabel 5. Coefficient in Terms Of Coded Factors Kadar Air Arang

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	1.13	1	0.1760	0.7138	1.55	
A-Suhu	-0.4550	1	0.1391	-0.7840	-0.1260	1.0000
B-Waktu	-0.3728	1	0.1391	-0.7018	-0.0437	1.0000
AB	0.2900	1	0.1968	-0.1753	0.7553	1.0000
A ²	0.5106	1	0.1492	0.1578	0.8635	1.02
B ²	0.2381	1	0.1492	-0.1147	0.5910	1.02

Berdasarkan Tabel 5 didapatkan persamaan untuk model terhadap kadar air pada arang co-torefaksi, yaitu:

$$Y = 1.13 - 0.4550A - 0.3728B + 0.2900AB + 0.5106A^2 + 0.2381B^2$$



Gambar 1. Grafik Tiga Dimensi Kadar Air

Berdasarkan Gambar 1 diketahui hubungan antara kadar air dengan suhu dan waktu tinggal pada proses co-torefaksi yaitu semakin tinggi suhu dan waktu tinggal maka kadar air akan semakin menurun. Hal tersebut ditunjukkan pada perlakuan suhu 219°C selama 30 menit menghasilkan kadar air sebesar 3.21% dan pada perlakuan suhu 400°C selama 120 menit menghasilkan kadar air sebesar 0.95%. Suhu yang tinggi dapat menekan penguraian unsur yang tidak dibutuhkan pada proses torefaksi menjadi arang seperti hidrogen, oksigen, nitrogen dan sulfur. Selaras dengan penelitian yang dilakukan oleh (Iáñez-Rodríguez et al., 2017) menunjukkan bahwa seiring peningkatan suhu, kadar unsur yang tidak dibutuhkan akan menurun sementara kadar karbon akan meningkat. Berdasarkan diketahui bahwa kadar air yang diperoleh telah sesuai standar SNI arang kayu yaitu $\leq 8\%$, selaras dengan pernyataan (Izzatie et al., 2016) bahwa kadar air sebaiknya $\leq 10\%$.

Analisa Kadar Abu

Kadar abu berkaitan dengan suhu, waktu tinggal dan bahan yang digunakan pada proses torefaksi. Semakin tinggi suhu dan waktu tinggal yang digunakan maka akan semakin tinggi kadar abu yang dihasilkan, hal ini dikarenakan bahan plastik menjadi bahan utama yang digunakan sehingga menjadi endapan bersama dengan arang yang dihasilkan. Hasil pengujian ANOVA pada kadar air terdapat pada Tabel 6.

Tabel 6. Uji ANOVA Kadar Abu Arang

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	P-value	
Model	199.46	5	39.89	11.52	0.0028	Significant
A-Suhu	16.20	1	16.20	4.68	0,0673	
B-Waktu	56.37	1	56.37	16.28	0.0050	
AB	5,625	1	0.8100	0.2340	0.6434	
A ²	109.47	1	109.47	31.62	0.0008	
B ²	29.22	1	29.22	8.44	0,0228	
Residual	24.23	7	3.46			
Lack of Fit	24.23	3	8.08			
Pure Error	0.0000	4	0.0000			
Cor Total	223.69	12				

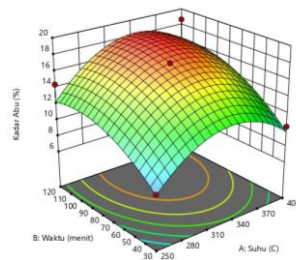
Uji ANOVA menunjukkan pengaruh setiap variabel terhadap respon yang telah ditentukan yaitu kadar abu. Diketahui jika nilai *p-value* yang muncul > 0.0500 (5%) hal tersebut menunjukkan bahwa variabel tidak berpengaruh secara signifikan, namun jika nilai yang muncul ≤ 0.0500 (5%) hal tersebut menunjukkan bahwa variabel berpengaruh secara signifikan. Berdasarkan Tabel 6 diketahui bahwa *F-value* model dihasilkan sebesar 11.52 dengan peluang ketidaktepatan nilai tersebut sebesar 0.0028 atau 0.28% sehingga dapat memberikan pengaruh yang signifikan, adapun model yang disarankan adalah *Quadratic*. Variabel suhu dan waktu dinyatakan tidak signifikan karena memiliki nilai > 0.0500 (5%) yaitu sebesar 0.0673 (6.73%) dan 0.6434 (64.34%), sehingga parameter suhu kuadrat, waktu dan waktu kuadrat memberi pengaruh paling signifikan terhadap respon nilai kalor.

Tabel 7. Coefficients in Terms of Coded Factors Kadar Abu

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	17.50	1	0.8321	15.53	19.47	
A-Suhu	1.42	1	0.6578	-0.1326	2.98	1.0000
B-Waktu	2.65	1	0.6578	1.10	4.21	1.0000
AB	0.4500	1	0.9303	-1.75	2.65	1.0000
A ²	-3.97	1	0.7054	-5.63	-2.30	1.02
B ²	2.05	1	0.7054	3.72	0.3813	1.02

Berdasarkan Tabel 7 didapatkan persamaan untuk model terhadap kadar air pada arang co-torefaksi, yaitu:

$$Y = 17.50 + 1.42A + 2.65B + 0.4500AB - 3.97A^2 + 2.05B^2$$



Gambar 2. Grafik Tiga Dimensi Kadar Abu

Berdasarkan Gambar 2 diketahui hubungan antara suhu dan waktu terhadap kadar abu yaitu semakin tinggi suhu dan waktu tinggal, semakin tinggi kadar abu yang dihasilkan. Hal tersebut dibuktikan pada perlakuan suhu 250°C selama 30 menit menghasilkan kadar abu sebesar 8% dan pada perlakuan suhu 400°C selama 120 menit menghasilkan kadar abu sebesar 18.66. Selaras dengan penelitian yang dilakukan oleh (Martín-Lara et al., 2021) pada co-torefaksi biomassa dan plastik, perlakuan pada suhu 550°C memiliki kadar abu lebih tinggi sebesar 67.87% dibandingkan pada suhu 450°C memiliki kadar abu lebih rendah sebesar 35.04%. Plastik yang terdeformasi akan melapisi partikel biomassa sehingga membentuk arang dengan kadar abu yang lebih tinggi terutama pada suhu 400°C, hal tersebut selaras dengan pernyataan (Adeniyi et al., 2023) bahwa semakin tinggi suhu yang digunakan akan semakin tinggi pula kadar abu yang terkandung. Berkaitan dengan SNI Arang Kayu Tahun 2000, kadar abu yang sesuai adalah maksimum 8%. Berdasarkan perhitungan kadar abu pada co-torefaksi biomassa dan plastik, hanya terdapat tiga (3) sampel yang memenuhi SNI tersebut yaitu sampel dengan perlakuan suhu dibawah 250°C. Hal tersebut selaras dengan hubungan antara suhu dan waktu tinggal yang berbanding lurus dengan kadar abu pada arang.

Analisa Kadar Zat Terbang

Kadar zat terbang merupakan materi pada pengarangan yang mudah menguap dan dipengaruhi oleh suhu dan waktu tinggal yang digunakan. Kadar zat terbang yang tinggi dapat mempengaruhi kualitas briket yang dihasilkan karena, semakin tinggi kadar zat terbang akan menghasilkan briket yang mudah terbakar namun memiliki laju pembakaran yang singkat. Hasil pengujian ANOVA pada kadar air terdapat pada Tabel 8

Tabel 8. Uji ANOVA Kadar Zat Terbang Arang

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	1121.43	5	224.29	5.10	0.0273	Significant
A-Suhu	212.20	1	212.20	4.83	0.0640	
B-Waktu	206.87	1	206.87	4.70	0.0667	
AB	14.03	1	14.03	0.3190	0.5899	
A ²	635.62	1	635.62	14.46	0.0067	
B ²	109.99	1	109.99	2.50	0.1578	
Residual	307.80	7	43.97			
Lack of Fit	307.80	3	102.60			
Pure Error	0.0000	4	0.0000			
Cor Total	1429.23	12				

Uji ANOVA menunjukkan pengaruh setiap variabel terhadap respon yang telah ditentukan yaitu kadar zat terbang. Diketahui jika nilai *p-value* yang muncul > 0.0500 (5%) hal tersebut menunjukkan bahwa variabel tidak berpengaruh secara signifikan, namun jika nilai yang muncul ≤ 0.0500 (5%) hal tersebut menunjukkan bahwa variabel berpengaruh secara signifikan. Berdasarkan Tabel 8 diketahui bahwa model memiliki *F-value* sebesar 5.10 dengan peluang ketidaktepatan nilai tersebut sebesar 0.0273 atau 2,73% sehingga dapat

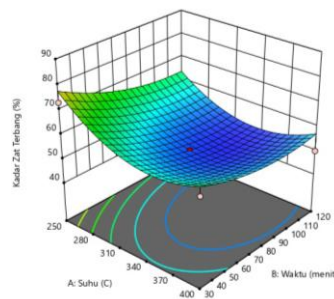
memberikan pengaruh yang signifikan, adapun model yang disarankan adalah *Quadratic*. Variabel suhu, waktu, suhu waktu dan waktu kuadrat dinyatakan tidak signifikan karena memiliki nilai > 0.0500 (5%) yaitu sebesar 0.0640 (6.40%), 0.0667 (6.67%), 0.5899 (58.99%) dan 0.1578 (15.78%), sehingga parameter suhu kuadrat memberi pengaruh paling signifikan terhadap respon zat terbang.

Tabel 9. Coefficients in Terms of Coded Factors Kadar Zat Terbang

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	51.96	1	2.97	44.95	58.97	
A-Suhu	-5.15	1	2.34	-10.69	0.3935	1.0000
B-Waktu	-5.09	1	2.34	-10/63	0.4586	1.0000
AB	1.87	1	3.32	-5.97	9.71	1.0000
A ²	9.56	1	2.51	3.61	15.50	1.02
B ²	3.08	1	2.51	1.07	8.92	1.02

Berdasarkan Tabel 9 didapatkan persamaan untuk model terhadap kadar zat terbang pada proses co-torefaksi, yaitu:

$$Y = 51.96 - 5.15A - 5.09B + 1.87AB + 9.56A^2 + 3.0B^2$$



Gambar 3. Gambar Tiga Dimensi Kadar Zat Terbang Arang

Berdasarkan Gambar 3 diketahui hubungan antara suhu dan waktu terhadap kadar zat terbang yaitu semakin tinggi suhu dan waktu tinggal, maka kadar zat terbang akan semakin rendah. Hal tersebut dibuktikan pada perlakuan pada suhu 219°C selama 75 menit menghasilkan kadar zat terbang sebesar 84.93% dan pada perlakuan suhu 400°C selama 120 menit menghasilkan kadar abu sebesar 49.86%. Selaras dengan penelitian (Kalus et al., 2019) bahwa semakin tinggi suhu yang digunakan maka akan semakin rendah kadar zat terbang, arang yang dihasilkan serta rasio H/C pada arang. Hal tersebut dikarenakan suhu yang menyebar akan menguapkan lebih banyak zat terbang. Berkaitan dengan perhitungan kadar zat terbang pada co-torefaksi biomassa dan plastik, menurut (Sunaryo et al., 2023), tingginya kadar zat terbang dapat menunjukkan proses dekomposisi bahan yang belum sempurna. PET merupakan jenis plastik yang digunakan pada proses co-torefaksi bersama biomassa memiliki titik leleh pada 245°C - 265°C, hal tersebut berkaitan dengan kadar zat terbang yang tidak memenuhi SNI arang kayu, hal tersebut diasumsikan terjadi karena perlakuan pada sampel menggunakan suhu dibawah titik leleh plastik atau sampel pada perlakuan 219°C selama 75 menit.

Analisa Kadar Karbon Terikat

Kadar karbon terikat merupakan parameter yang berbanding lurus dengan nilai kalor pada arang, semakin tinggi kadar karbon terikat maka akan semakin tinggi nilai kalor yang dihasilkan. Nilai kadar karbon terikat sangat dipengaruhi oleh parameter lain seperti kadar zat terbang dan kadar abu, semakin tinggi total dari kedua parameter tersebut maka kadar karbon terikat akan semakin rendah dan sebaliknya. Hasil pengujian ANOVA pada kadar air terdapat pada Tabel 10.

Tabel 10. Uji ANOVA Kadar Karbon Terikat

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	406.69	5	81.34	3.30	0.0754	Not significant
A-Suhu	111.07	1	111.07	4.51	0.0713	
B-Waktu	47.31	1	47.31	1.92	0.2083	
AB	21.62	1	21.62	0.8781	0.3799	
A ²	216.70	1	216.70	8.80	0.0209	
B ²	25.54	1	25.54	1.04	0.3424	
Residual	172.37	7	24.62			
Lack of Fit	172.37	3	57.46			
Pure Error	0.0000	4	0.0000			
Cor Total	579.06	12				

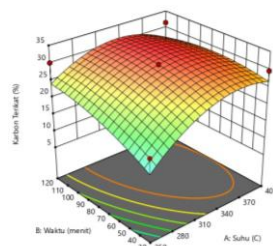
Uji ANOVA menunjukkan pengaruh setiap variabel terhadap respon yang telah ditentukan yaitu kadar karbon terikat. Diketahui jika nilai *p-value* yang muncul > 0.0500 (5%) hal tersebut menunjukkan bahwa variabel tidak berpengaruh secara signifikan, namun jika nilai yang muncul ≤ 0.0500 (5%) hal tersebut menunjukkan bahwa variabel berpengaruh secara signifikan. Berdasarkan Tabel 10 diketahui bahwa *F-value* model dihasilkan sebesar 3.30 dengan *p-value* atau peluang ketidaktepatan nilai tersebut sebesar 0.0754 (7.54%), nilai tersebut > 0.0500 (5%) sehingga tidak akan menunjukkan pengaruh signifikan dan kurang disarankan untuk digunakan karena dapat menimbulkan kekeliruan, adapun model yang disarankan adalah *Quadratic*. Variabel suhu, waktu, suhu waktu dan waktu kuadrat dinyatakan tidak signifikan karena memiliki nilai > 0.0500 (5%) yaitu sebesar 0.0713 (7.13%), 0.2083 (20.83%), 0.3799 (37.99%) dan 0.3424 (34.24%), sehingga parameter suhu kuadrat memberi pengaruh paling signifikan terhadap respon karbon terikat.

Tabel 11. Coefficients in Terms of Coded Factors Karbon Terikat Arang

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	30.52	1	2.22	25.27	35.77	
A-Suhu	3.73	1	1.75	-	7.87	1.0000
				0.4225		
B-Waktu	2.43	1	1.75	-1.72	6.58	1.0000
AB	-2.32	1	2.48	-8.19	3.54	1.0000
A ²	-5.58	1	1.88	-10.03	-1.13	1.02
B ²	1.92	1	1.88	6.37	2.53	1.02

Berdasarkan Tabel 11 didapatkan persamaan untuk model terhadap kadar karbon terikat pada proses co-torefaksi, yaitu:

$$Y = 30.52 + 3.73A + 2.43B - 2.32AB - 5.58A^2 + 1.92B^2$$



Gambar 4. Grafik Tiga Dimensi Kadar Karbon Terikat Arang

Berdasarkan Gambar 4 diketahui hubungan antara suhu dan waktu terhadap kadar zat terbang yaitu semakin tinggi suhu dan waktu tinggal, maka kadar karbon terikat akan semakin tinggi. Hal tersebut dibuktikan pada

perlakuan pada suhu 219°C selama 75 menit menghasilkan kadar zat terbang sebesar 8.57% dan pada perlakuan suhu 400°C selama 120 menit menghasilkan kadar abu sebesar 31.48%. Hal tersebut dikarenakan pada suhu yang tinggi dan waktu tinggal yang lama, kadar oksigen dan hidrogen akan semakin rendah karena digunakan dalam pembentukan uap air. Penurunan kadar oksigen dan hidrogen menyebabkan peningkatan nilai kalor yang berbanding lurus dengan karbon terikat. Selaras dengan penelitian (Iáñez-Rodríguez et al., 2017) bahwa karbon terikat dan kadar abu akan meningkat seiring zat terbang menurun.

Analisa Nilai Kalor

Nilai kalor merupakan total energi panas yang dapat dihasilkan pada arang yang dinyatakan dalam kal/g. Pada proses co-torefaksi biomassa dan plastik nilai kalor berbanding lurus dengan kadar abu dan kadar karbon terikat sementara berbanding terbalik dengan kadar air dan kadar zat terbang. Hasil pengujian ANOVA pada kadar air terdapat pada Tabel 12

Tabel 12. Uji ANOVA Nilai Kalor Arang

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	4.183E+06	5	8.366E+05	4.57	0.0358	Significant
A-Suhu	1.259E+06	1	1.259E+06	6.88	0.0342	
B-Waktu	8.636E+05	1	8.636E+05	4.72	0.0663	
AB	2.030E+05	1	2.030E+05	1.11	0.3272	
A ²	1.501E+06	1	1.501E+06	8.21	0.0242	
B ²	5.653E+05	1	5.653E+05	3.09	0.1222	
Residual	1.280E+06	7	1.829E+05			
Lack of Fit	1.280E+06	3	4.268E+05			
Pure Error	0.0000	4	0.0000			
Cor Total	5.464E+06	12				

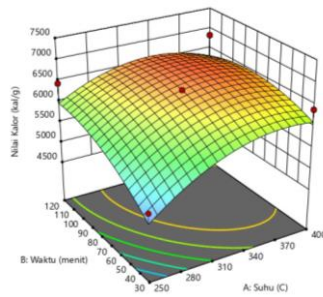
Uji ANOVA menunjukkan pengaruh setiap variabel terhadap respon yang telah ditentukan yaitu nilai kalor. Diketahui jika nilai *p-value* yang muncul > 0.0500 (5%) hal tersebut menunjukkan bahwa variabel tidak berpengaruh secara signifikan, namun jika nilai yang muncul ≤ 0.0500 (5%) hal tersebut menunjukkan bahwa variabel berpengaruh secara signifikan. Berdasarkan Tabel 12 diketahui bahwa model memiliki *F-value* sebesar 4.57 dengan peluang ketidaktepatan nilai tersebut sebesar 0.0358 (3.58) atau < 0.0500 sehingga dapat menunjukkan pengaruh signifikan, adapun model yang disarankan adalah *Quadratic*. Variabel waktu, suhu waktu dan waktu kuadrat dinyatakan tidak signifikan karena memiliki nilai > 0.0500 (5%) yaitu sebesar 0.0663 (6.63%), 0.3272 (32.72%) dan 0.1222 (12.22%), sehingga parameter suhu kuadrat memberi pengaruh paling signifikan terhadap respon nilai kalor.

Tabel 13. Coefficients in Terms of Coded Factors Nilai Kalor Arang

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	6554.00	1	191.26	6101.73	7006.27	
A-Suhu	396.67	1	151.21	39.12	754.22	1.0000
B-Waktu	328.56	1	151.21	-28.99	686.11	1.0000
AB	-225,25	1	213.84	-730.90	280.40	1.0000
A ²	-464,56	1	162.15	-847.99	-81.13	1.02
B ²	285.06	1	162.15	668.49	08.37	1.02

Berdasarkan Tabel 13 didapatkan persamaan untuk model terhadap nilai kalor terikat pada proses co-torefaksi, yaitu:

$$Y = 6554.00 + 396.67A + 328.56B - 225.25AB - 464.56A^2 + 285.06B^2$$



Gambar 5. Grafik Tiga Dimensi Nilai Kalor Arang

Berdasarkan Gambar 5 diketahui hubungan antara suhu dan waktu terhadap nilai kalor yaitu semakin tinggi suhu dan waktu tinggal, maka kadar nilai kalor akan semakin tinggi. Berdasarkan hasil pengujian nilai kalor diketahui bahwa pada perlakuan suhu 400°C selama 120 menit memiliki nilai kalor tertinggi sebesar 6.829 kal/g dan pada perlakuan suhu 219°C selama 75 menit memiliki nilai kalor terendah sebesar 4.718 kal/g. Selaras dengan penelitian yang dilakukan oleh (Martín-Lara et al., 2021), nilai kalor tertinggi dihasilkan pada perlakuan suhu 450°C dibandingkan pada suhu 550°C dikarenakan kadar air, kadar zat terbang dan kadar abu masih dalam keadaan optimal atau belum jenuh dan kembali meningkat. Pada sampel dengan perlakuan suhu diatas 400°C dan waktu tinggal diatas 120 menit, nilai kalor pada arang terlihat menurun dibandingkan perlakuan sebelumnya. Hal tersebut dapat dikarenakan oleh perubahan bentuk arang menjadi tar maupun gas dikarenakan suhu yang terlalu tinggi terhadap lignoselulosa yang terkandung pada bahan yang digunakan. Selaras dengan penelitian (Martín-Lara et al., 2021) bahwa dapat terjadi perubahan bentuk karbon menjadi gas CH₄, CO₂ maupun CO. Dikaitkan dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) Briket Arang Kayu Tahun 2000, nilai kalor yang sesuai adalah ≥ 5000 kal/g. Berdasarkan grafik kalor diketahui bahwa terdapat sampel yang tidak memenuhi SNI seperti sampel pada suhu 219°C selama 75 menit dengan nilai kalor sebesar 4.718 kal/g.

Hasil Optimasi Waktu dan Suhu Terhadap Kualitas Arang

Berdasarkan optimasi yang telah dilakukan, pengujian perlu dilakukan untuk memvalidasi suhu dan waktu terbaik terhadap kualitas arang berdasarkan parameter kadar air, kadar abu, kadar zat terbang, kadar karbon terikat dan nilai kalor. Model yang sesuai akan menunjukkan hasil ≤ 0.0500 (5%) sehingga memberikan pengaruh yang signifikan. Adapun batasan variabel dan respon tersebut terdapat pada Tabel 14

Tabel 14. Batasan Variabel dan Respon Optimasi

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Importance
A: Suhu	Is in range	250	400	3
B: Waktu	Is in range	30	120	3
Kadar Air	Minimize	0.95	3.21	5
Kadar Abu	Maximize	6.5	18.66	5
Kadar Zat Terbang	Minimize	49.86	84.93	5
Karbon Terikat	Maximize	8.57	31.48	5
Nilai Kalor	Maximize	4718	6829	5

Kombinasi batasan tersebut menghasilkan suhu dan waktu yang dapat mengoptimalkan kualitas arang co-torefaksi dengan rentang *desirability* 0 hingga 1. Terdapat satu (1) solusi yang dihasilkan berdasarkan *Design Expert* model CCD pada Tabel 15

Tabel 15. Solusi Nilai Optimum Variabel dan Respon

Suhu (°C)	Waktu (menit)	Kadar Air	Kadar Abu	Kadar Zat Terbang	Karbon Terikat	Nilai Kalor	Desirability
343	102	0.95	18.53	49.93	31.53	6685	0.983

Berdasarkan Tabel 15 diketahui bahwa proses co-torefaksi pada suhu 343°C dengan waktu tinggal 102 menit dapat menghasilkan kadar air sebesar 0.95%, kadar abu sebesar 18.53%, kadar zat terbang sebesar 49.93%, karbon terikat sebesar 31.53% dan nilai kalor sebesar 6685 kal/g dengan nilai *desirability* sebesar 0.983 atau setara dengan 98.3%. Adapun hasil validasi solusi nilai optimum pada Tabel 16

Tabel 16. Validasi Hasil Berdasarkan Solusi RSM

Suhu (°C)	Waktu (menit)	Kadar Air	Kadar Abu	Kadar Zat Terbang	Karbon Terikat	Nilai Kalor
343	102	0.96	18.65	49.90	31.45	6551

Berdasarkan Tabel 16 diketahui bahwa variabel kadar air, kadar zat terbang, karbon terikat dan nilai kalor telah sesuai dengan SNI Arang Kayu Tahun 2000 dengan variabel kadar abu dan karbon terikat tidak sesuai yang dapat dikarenakan proses bersama dengan plastik sehingga menghasilkan karakteristik arang yang berbeda.

Kesimpulan

Kesimpulan pada penelitian ini adalah co-torefaksi biomassa bersama plastik PET dapat menurunkan kadar air dan kadar zat terbang, namun menghasilkan kadar abu yang berbanding lurus dengan nilai kalor. Berdasarkan RSM model CCD pada perlakuan suhu 343°C dengan waktu tinggal 102 menit, hasil arang optimal memiliki kadar air sebesar 0.96%, kadar abu sebesar 18.65%, kadar zat terbang sebesar 49.90%, karbon terikat sebesar 31.45% dan nilai kalor sebesar 6551 kal/g.

Daftar Rujukan

- [1] Adeniyi, A. G., Iwuozor, K. O., Emenike, E. C., Ajala, O. J., Ogunniyi, S., & Muritala, K. B. (2023). Thermochemical co-conversion of biomass-plastic waste to biochar: A review. *Green Chemical Engineering*, S2666952823000080. <https://doi.org/10.1016/j.gce.2023.03.002>
- [2] Basu, P. (2018). *Chapter 4—Torrefaction*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-04056-1>
- [3] Eka Putri, R., & Andasuryani, A. (2017). STUDI MUTU BRIKET ARANG DENGAN BAHAN BAKU LIMBAH BIOMASSA. *Jurnal Teknologi Pertanian Andalas*, 21(2), 143. <https://doi.org/10.25077/jtpa.21.2.143-151.2017>
- [4] Iáñez-Rodríguez, I., Martín-Lara, M. Á., Blázquez, G., Pérez, A., & Calero, M. (2017). Effect of torrefaction conditions on greenhouse crop residue: Optimization of conditions to upgrade solid characteristics. *Bioresource Technology*, 244, 741–749. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.031>
- [5] Izzatie, N. I., Basha, M. H., Uemura, Y., Mazlan, M. A., Hashim, M. S. M., Amin, N. A. M., & Hamid, M. F. (2016). Co-pyrolysis of rice straw and polypropylene using *fixed-bed* pyrolyzer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 160(1), 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/160/1/012033>
- [6] Kalus, K., Koziel, J., & Opaliński, S. (2019). A Review of Biochar Properties and Their Utilization in Crop Agriculture and Livestock Production. *Applied Sciences*, 9(17), 3494. <https://doi.org/10.3390/app9173494>
- [7] Martín-Lara, M. A., Piñar, A., Ligeró, A., Blázquez, G., & Calero, M. (2021). Characterization and Use of Char Produced from Pyrolysis of Post-Consumer Mixed Plastic Waste. *Water*, 13(9), 1188. <https://doi.org/10.3390/w13091188>
- [8] Nawawi, D. S., Carolina, A., Saskia, T., Darmawan, D., Gusvina, S. L., Wistara, N. J., Sari, R. K., & Syafii, W. (2018). *Karakteristik Kimia Biomassa untuk Energi*. 16(1).
- [9] Rago, Y. P., Collard, F.-X., Görgens, J. F., Surroop, D., & Mohee, R. (2020). Torrefaction of biomass and plastic from municipal solid waste streams and their blends: Evaluation of interactive effects. *Fuel*, 277, 118089. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118089>
- [10] Ristianingsih, Y., Mardina, P., Poetra, A., & Febrida, M. Y. (n.d.). PEMBUATAN BRIKET BIOARANG BERBAHAN BAKU SAMPAH ORGANIK DAUN KETAPANG SEBAGAI ENERGI ALTERNATIF.

- [11] Seah, C. C., Tan, C. H., Arifin, N. A., Hafriz, R. S. R. M., Salmiaton, A., Nomanbhay, S., & Shamsuddin, A. H. (2023). Co-pyrolysis of biomass and plastic: Circularity of wastes and comprehensive review of synergistic mechanism. *Results in Engineering*, 17, 100989. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100989>
- [12] Suchahyo, F. M., & Fanida, E. H. (2021). INOVASI PENGELOLAAN SAMPAH MENJADI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SAMPAH (PLTSa) OLEH DINAS KEBERSIHAN DAN RUANG TERBUKA HIJAU (DKRTH) SURABAYA (Studi Kasus di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Benowo Surabaya). *Publika*, 39–52. <https://doi.org/10.26740/publika.v9n2.p39-52>
- [13] Sunaryo, S., Sutoyo, S., Suyitno, S., Arifin, Z., Kivevele, T., & Petrov, A. I. (2023). Characteristics of briquettes from plastic pyrolysis by-products. *Mechanical Engineering for Society and Industry*, 3(2), 57–65. <https://doi.org/10.31603/mesi.9114>
- [14] Waheed, A., Naqvi, S. R., & Ali, I. (2022). Co-Torrefaction Progress of Biomass Residue/Waste Obtained for High-Value Bio-Solid Products. *Energies*, 15(21), 8297. <https://doi.org/10.3390/en15218297>
- [15] Zannikos, F., Kalligeros, S., Anastopoulos, G., & Lois, E. (2013). Converting Biomass and Waste Plastic to Solid Fuel Briquettes. *Journal of Renewable Energy*, 2013, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2013/360368>