

Submitted : 19 March 2025

Revised : 27 April 2025

Accepted : 20 May 2025

OPTIMASI PROSES ADSORPSI PENURUNAN ANGKA ASAM *BIO-OIL* HASIL PIROLISIS BATANG TEMBAKAU MENGGUNAKAN *RESPONSE SURFACE METHODOLOGY* (RSM)

Annisa Mutiara Salma Haque, Anita Ristikawati, Sintha Soraya Santi*

Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering and Science, Universitas Pembangunan “Veteran” Jawa Timur, Surabaya, 60294, Indonesia

*Email: sintha.tk@upnjatim.ac.id

Abstrak

Limbah tembakau, khususnya batang tembakau, masih kurang dimanfaatkan meskipun Indonesia merupakan salah satu produsen tembakau terbesar. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan kualitas *bio-oil* yang berasal dari pirolisis limbah tembakau dengan menurunkan bilangan asam melalui adsorpsi menggunakan karbon aktif. Keasaman yang tinggi dari *bio-oil* berdampak negatif pada stabilitas, korosivitas, dan efisiensi energi, sehingga membatasi aplikasi langsung sebagai bahan bakar. Proses percobaan melibatkan pirolisis pada suhu 400°C, diikuti dengan adsorpsi dengan karbon aktif pada berbagai massa dan waktu kontak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan massa adsorben dan waktu adsorpsi secara signifikan menurunkan bilangan asam *bio-oil*. Berdasarkan optimasi menggunakan RSM, kondisi terbaik diperoleh pada massa adsorben 14,964 g dan waktu adsorpsi 148,562 menit, dengan bilangan asam minimum sebesar 0,600 mg KOH/g. Karakterisasi tambahan, termasuk analisis proksimat dan pengukuran titik nyala, mengkonfirmasi peningkatan sifat bahan bakar. Temuan ini menggarisbawahi efektivitas adsorpsi karbon aktif sebagai metode yang hemat biaya dan terukur untuk meningkatkan kualitas *bio-oil*, mendorong penggunaan praktisnya dalam aplikasi energi terbarukan.

Kata Kunci: Adsorpsi; Angka asam; *Bio-oil*; Pirolisis; Tembakau

Abstract

Tobacco waste, particularly stalks, remains underutilized despite Indonesia being one of the largest tobacco producers. This study aims to optimize the quality of bio-oil derived from the pyrolysis of tobacco waste by reducing its acid number through adsorption using activated carbon. The high acidity of bio-oil negatively affects its stability, corrosiveness, and energy efficiency, limiting its direct application as a fuel. The experimental process involved pyrolysis at 400°C and adsorption with activated carbon at varying masses and contact times. The results indicate that increasing the adsorbent mass and adsorption time significantly reduces the acid number of bio-oil. Based on optimization using response surface methodology (RSM), the optimal conditions were obtained at an adsorbent mass of 14.964 g and an adsorption time of 148.562 minutes, resulting in a minimum acid number of 0.600 mg KOH/g. Additional characterization confirmed the improved fuel properties, including proximate analysis and flash point measurement. These findings highlight the effectiveness of activated carbon adsorption as a cost-efficient and scalable method for enhancing bio-oil quality, promoting its practical use in renewable energy applications.

Keywords: Acid number; Adsorption; *Bio-oil*; Pyrolysis; Tobacco

1. PENDAHULUAN

Batang tembakau merupakan salah satu jenis biomassa yang berpotensi diolah lebih lanjut sebagai sumber energi terbarukan. Indonesia merupakan

penghasil tembakau terbesar ke-enam di dunia dengan jumlah produksi tembakau pada tahun 2022 mencapai nilai 225.700.000 ton menurut Badan Pusat Statistik (Data Indonesia, 2023). Namun, pemanfaatan batang

tembakau hingga saat ini masih belum optimal, karena selama ini tanaman tembakau hanya dimanfaatkan bagian daunnya. Melalui proses pirolisis, yaitu metode pemanasan tanpa kehadiran oksigen, batang tembakau mengalami dekomposisi termal senyawa organik. Proses ini menghasilkan tiga produk utama yaitu senyawa volatil, uap, dan residu padat (*biochar*). Senyawa volatil yang dihasilkan terdiri dari berbagai hidrokarbon, air, dan senyawa organik lainnya yang dapat terkondensasi menjadi cairan yang disebut *bio-oil* (Crocker, 2010).

Batang tembakau memiliki kandungan selulosa sebesar 56,10%, hemiselulosa 22,44%, dan lignin 15,11% (Liu et al., 2015). Kandungan selulosa yang tinggi pada batang tembakau dapat menghasilkan turunan alkohol seperti ester dan eter melalui proses *thermal cracking*. Sementara itu, lignin akan menghasilkan senyawa aromatik seperti fenol dan kresol, yang kemudian terdegradasi menjadi senyawa alkohol dan senyawa aromatik lainnya selama pemanasan biomassa (Fardhyanti, 2020). Degradasi lignin ini menyebabkan *bio-oil* yang dihasilkan memiliki kandungan asam organik yang cukup tinggi. Hal tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan Hasibuan et al. (2021), yang mana dilakukan *semi fast pyrolysis* dari pelepah sawit didapatkan hasil karakteristik *bio-oil* mengandung angka asam yang cukup tinggi yaitu 2,3 sampai 2,7. Hal tersebut menyebabkan kurang efektif jika langsung digunakan sebagai bahan bakar.

Beberapa teknik peningkatan kualitas telah dieksplorasi untuk memperbaiki sifat *bio-oil*, termasuk hidrogenasi katalitik, esterifikasi, dan adsorpsi. Di antara metode tersebut, adsorpsi menggunakan karbon aktif dikenal sebagai metode yang efisien dan hemat biaya karena kesederhanaannya, kondisi operasi yang tidak memerlukan tekanan tinggi, serta selektivitas tinggi dalam menghilangkan komponen asam (Hu et al., 2023). Karbon aktif, yang memiliki luas permukaan besar dan struktur berpori, memungkinkan adsorpsi efektif terhadap senyawa asam organik, sehingga dapat menurunkan angka keasaman serta meningkatkan stabilitas bahan bakar, nilai kalor, dan ketahanan terhadap korosi (Yahya et al., 2020). Dibandingkan dengan proses pemurnian lainnya, adsorpsi tidak memerlukan katalis mahal, gas hidrogen bertekanan tinggi, atau modifikasi kimia yang kompleks, sehingga lebih layak untuk diterapkan dalam skala industri besar. Selain itu, karbon aktif juga memiliki keunggulan karena dapat diregenerasi melalui pemanasan atau perlakuan kimia untuk menghilangkan zat yang teradsorpsi, sehingga memungkinkan penggunaannya kembali dalam berbagai aplikasi lainnya. Namun, proses regenerasi ini tidak selalu sempurna, dan kapasitas adsorpsi dapat menurun seiring waktu.

Penelitian sebelumnya telah menggunakan karbon aktif untuk menurunkan keasaman *bio-oil* dari berbagai jenis biomassa, namun belum banyak yang secara spesifik memanfaatkan limbah batang tembakau maupun mengevaluasi efektivitas adsorpsi menggunakan pendekatan optimasi seperti RSM. Hal

ini menjadi celah penelitian yang penting untuk dieksplorasi lebih lanjut.

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan kualitas *bio-oil* yang dihasilkan dari pirolisis limbah tembakau melalui penerapan metode adsorpsi menggunakan karbon aktif guna menurunkan angka keasaman. Dengan meningkatkan stabilitas dan sifat bahan bakar *bio-oil*, penelitian ini berkontribusi pada pemanfaatan limbah tembakau secara berkelanjutan serta pengembangan produksi biofuel terbarukan. Untuk memperoleh kondisi optimum dalam proses adsorpsi, digunakan pendekatan optimasi menggunakan *response surface methodology* (RSM). Metode ini dipilih karena mampu mengevaluasi pengaruh simultan dari beberapa variabel proses, membentuk model prediktif yang akurat, serta menentukan kondisi operasi terbaik secara efisien dengan jumlah percobaan yang lebih sedikit dibandingkan metode konvensional.

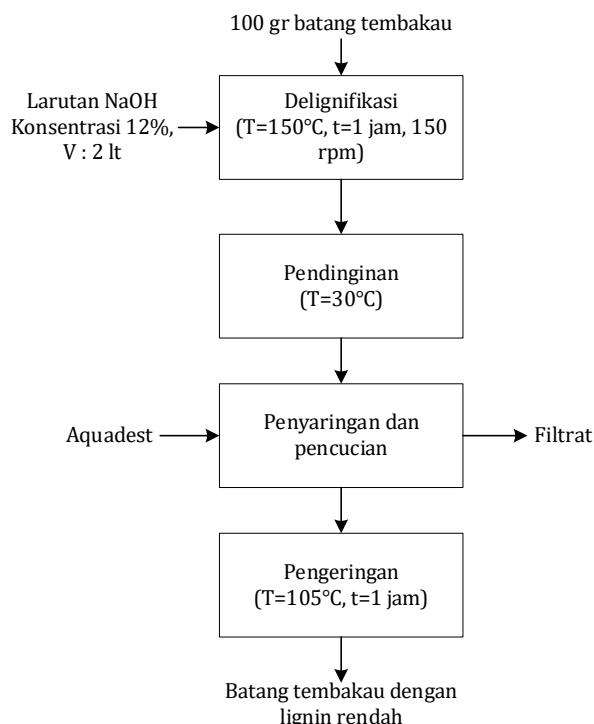
2. BAHAN DAN METODE

Bahan utama yang digunakan yaitu limbah batang tembakau diperoleh dari Madura, larutan NaOH sebagai basa untuk proses delignifikasi, karbon aktif sebagai adsorben. Bahan pendukung lainnya yaitu akuades sebagai fluida dingin pada kondensor, sebagai pelarut NaOH, serta pencucian batang tembakau setelah didelignifikasi.

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Material UPN “Veteran” Jawa Timur dengan tahapan penelitian delignifikasi batang tembakau, pirolisis batang tembakau, dan adsorpsi *bio-oil* hasil pirolisis limbah batang tembakau. *Bio-oil* dianalisis uji angka asam untuk menentukan kesesuaiannya dengan standar dan mutu (spesifikasi) bahan bakar nabati (*Biofuel*) jenis biodiesel sebagai bahan bakar lain yang dipasarkan di dalam negeri. Selanjutnya hasil analisis angka asam dioptimasi menggunakan *response surface methodology* (RSM) agar mencapai nilai yang memenuhi SNI. Data yang diperoleh kemudian diproses dan dibandingkan dengan nilai standar untuk mengevaluasi efektivitas proses adsorpsi dalam peningkatan kualitas *bio-oil*.

2.1 Delignifikasi Batang Tembakau

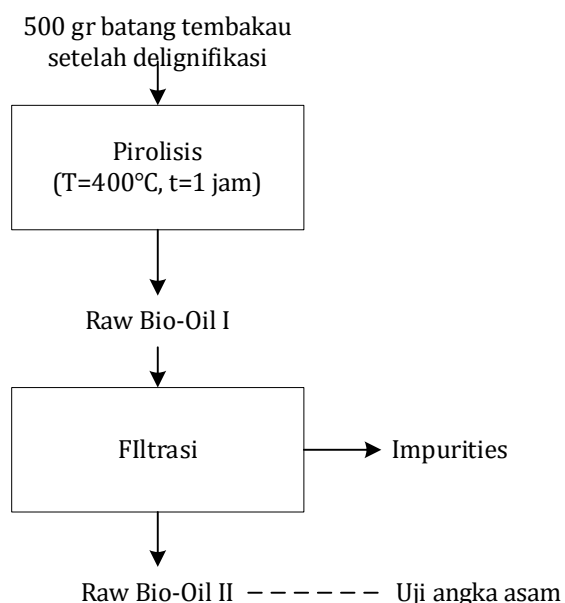
Batang tembakau dimasukkan ke dalam gelas beaker yang berisi *magnetic stirrer*, kemudian diletakkan di atas *hotplate*. Larutan NaOH 12% sebanyak 2 liter ditambahkan, kemudian diaduk dengan kecepatan 150 rpm selama 1 jam. Selanjutnya, dilakukan filtrasi untuk memisahkan batang tembakau dengan larutan NaOH. Endapan batang tembakau kemudian dicuci dengan menggunakan akuades hingga pH netral. Kemudian, dikeringkan dengan oven bersuhu 105 °C selama 1 jam. Diagram alur proses delignifikasi dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir proses delignifikasi

2.2 Pirolisis Batang Tembakau

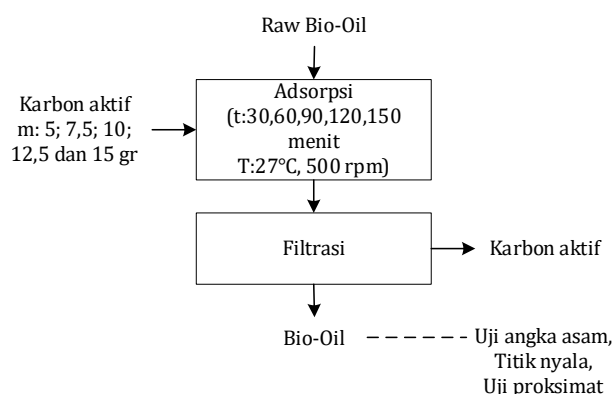
Batang tembakau yang telah didelignifikasi dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis sebanyak 500 g. Selanjutnya dilakukan proses pirolisis pada temperatur 400 °C dengan waktu pirolisis selama 1 jam. Produk *bio-oil* berupa cairan keluar dari reaktor pirolisis didinginkan hingga mencapai suhu ruang. *Raw bio-oil* hasil pirolisis kemudian difiltrasi menggunakan kertas saring Whatman No. 42 (diameter 90 mm) untuk dipisahkan dari pengotornya. Diagram alir proses pirolisis dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir proses pirolisis

2.3 Adsorpsi Bio-Oil

Raw bio-oil hasil pirolisis kemudian dimasukkan ke dalam gelas piala. Kemudian, karbon aktif ditambahkan ke dalam gelas piala yang berisi *raw bio-oil* sebanyak variabel yang telah ditentukan. Gelas piala ditutup agar tidak ada udara yang masuk. Gelas piala yang berisi *raw bio-oil* dan karbon aktif diletakkan pada *magnetic stirrer* dan dilakukan pengadukan dengan kecepatan putaran 500 rpm. Proses adsorpsi dilakukan selama variabel waktu yang telah ditentukan. Setelah dilakukan adsorpsi, *bio-oil* difiltrasi menggunakan kertas saring Whatman No 42 untuk memisahkan *bio-oil* dengan karbon aktif. Diagram alir proses adsorpsi *bio-oil* dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 3. Diagram alir proses adsorpsi *bio-oil*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Analisis Angka Asam

Bio-oil sebelum dilakukan proses pemurnian dengan metode adsorpsi menggunakan karbon aktif dari tempurung kelapa memiliki angka asam sebesar 2,74685 mg KOH/g. Analisis angka asam dilakukan dengan menggunakan metode titrasi dengan larutan KOH, sehingga diperoleh angka asam seperti yang tersaji pada Tabel 1.

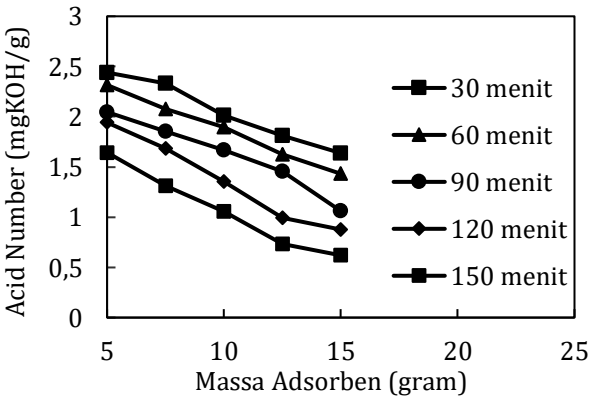
Berdasarkan Tabel 1 diperoleh kadar angka asam paling rendah pada waktu adsorpsi 150 menit dengan massa adsorben 15 g. Hal ini dapat terjadi karena dengan semakin besarnya massa adsorben di dalam larutan, maka semakin banyak jumlah substrat yang dapat terikat dengan permukaan adsorben. Kemudian dengan meningkatnya waktu kontak maka adsorben akan lebih lama berinteraksi dengan adsorbat sehingga daya serap adsorben juga meningkat.

Berdasarkan Gambar 4 menunjukkan hubungan antara massa adsorben dengan angka asam pada tiap waktu yang berbeda. Kadar angka asam terendah terjadi pada massa adsorben 15 g dengan waktu adsorpsi 150 menit yakni sebesar 0,61990 mg KOH/g. Angka asam adalah jumlah miligram kalium hidroksida (KOH) yang dibutuhkan untuk menetralkan asam lemak bebas dalam setiap gram sampel. Berdasarkan Gambar 4 dapat diketahui bahwa semakin besar massa adsorben maka semakin rendah kadar angka asam. Penambahan massa adsorben dapat meningkatkan efisiensi dalam proses adsorpsi dan mengurangi

kapasitas adsorpsi (Juwitaningtyas & Vennada, 2024). Meningkatnya massa adsorben akan menyebabkan terjadinya penurunan kapasitas adsorpsi adsorben tetapi meningkatkan persentase penyisihan adsorbat karena ada peningkatan permukaan adsorpsi yang tersedia (Ifa et al., 2021).

Tabel 1. Analisis angka asam

Massa Adsorben (g)	Waktu Adsorpsi (menit)	Angka Asam (mg KOH/g)
5	30	2,43977
	60	2,31541
	90	2,04672
	120	1,94232
	150	1,64342
7,5	30	2,33231
	60	2,07652
	90	1,85347
	120	1,68533
	150	1,31424
10	30	2,01505
	60	1,89648
	90	1,66654
	120	1,35543
	150	1,05703
12,5	30	1,81343
	60	1,62543
	90	1,45654
	120	0,99332
	150	0,73435
15	30	1,63771
	60	1,43212
	90	1,06102
	120	0,87645
	150	0,61990



Gambar 4. Grafik hubungan antara massa adsorben (gram) terhadap angka asam (mg KOH/g)

Berdasarkan Tabel 2 dapat diketahui bahwa semakin besar massa adsorben semakin besar pula persentase penyisihan. Persentase penyisihan terbesar terjadi pada kondisi massa adsorben 15 g dan waktu adsorpsi 150 menit yakni sebesar 77,432%, dengan angka asam sebelum adsorpsi 2,74685 mg KOH/g dan setelah proses adsorpsi 0,61990 mg KOH/g.

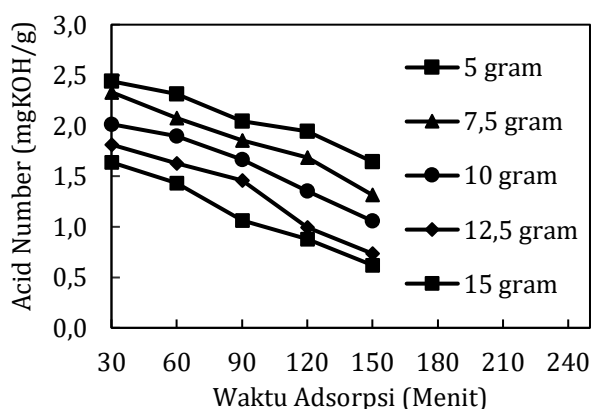
Tabel 2. Persentase penyisihan angka asam

Massa Adsorben (g)	Waktu Adsorpsi (menit)	Angka Asam (mg KOH/g)		Persen penyisihan (%)
		Sebelum adsorpsi	Sesudah adsorpsi	
5	30		2,43977	11,179
	60		2,31541	15,707
	90		2,04672	25,489
	120		1,94232	29,289
	150		1,64342	40,171
7,5	30		2,33231	15,091
	60		2,07652	24,404
	90		1,85347	32,524
	120		1,68533	38,645
	150		1,31424	52,155
10	30		2,01505	26,641
	60		1,89648	30,958
	90	2,74685	1,66654	39,329
	120		1,35543	50,655
	150		1,05703	61,519
12,5	30		1,81343	33,981
	60		1,62543	40,826
	90		1,45654	46,974
	120		0,99332	63,838
	150		0,73435	73,266
15	30		1,63771	40,379
	60		1,43212	47,863
	90		1,06102	61,373
	120		0,87645	68,093
	150		0,61990	77,432

Berdasarkan Gambar 5, kadar angka asam terendah terjadi pada waktu adsorpsi 150 menit dengan massa adsorben 15 g yakni sebesar 0,61990 mg KOH/g. Semakin lama waktu adsorpsi maka semakin rendah kadar angka asam. Semakin lama waktu adsorpsi semakin lama pula kontak antara permukaan adsorben dengan *bio-oil* sehingga jumlah adsorbat yang diikat oleh permukaan adsorben juga semakin banyak sehingga angka asam menurun (Wijayanti et al., 2012).

Berdasarkan hasil analisis angka asam diketahui bahwa angka asam paling rendah berdasarkan penelitian yang dilakukan adalah 0,6199 mg KOH/g. Angka ini belum memenuhi standar angka asam menurut SNI bahan bakar nabati. Berdasarkan standar SNI bahan bakar nabati, angka asam maksimum 0,4 mg KOH/g. Dalam hal ini, penelitian yang dilakukan oleh Rahayu et al. pada tahun (2018) dapat dijadikan perbandingan, di mana digunakan karbon aktif berbasis ampas tebu untuk menurunkan angka asam. Hasil yang dicapai adalah penurunan angka asam hingga 4,79 mg KOH/g dengan menggunakan 10 g adsorben dengan 150 g *bio-oil*. Jika dibandingkan

dengan hasil penelitian ini, angka asam yang diperoleh masih lebih tinggi, yang bisa dipengaruhi oleh perbedaan komposisi material yang digunakan, seperti *bio-oil* dari batang tembakau dalam penelitian ini yang mungkin memiliki karakteristik kimia yang berbeda.



Gambar 5. Grafik hubungan antara waktu adsorpsi (menit) terhadap angka asam (mg KOH/g)

Menurut Siswanti et al. pada tahun (2024), waktu kontak merupakan parameter penting dalam proses adsorpsi karena menentukan jumlah interaksi antara adsorben dan adsorbat. Interaksi ini terus terjadi hingga mencapai kondisi kesetimbangan. Berdasarkan Tabel 2 dapat diketahui bahwa kondisi kesetimbangan belum tercapai karena persen penyisihan belum mencapai kondisi konstan atau hampir konstan. Oleh karena itu, disarankan untuk meningkatkan lama waktu adsorpsi untuk memaksimalkan persen penyisihan angka asam agar tercapai kandungan angka asam sesuai dengan SNI. Tingginya kandungan angka asam akan mempengaruhi kualitas *bio-oil* sebagai bahan bakar. Menurut Adhani et al., (2016) menyatakan bahwa kadar angka asam yang terlalu tinggi tidak diinginkan, karena pada suhu tinggi, asam lemak bebas dapat bereaksi dengan logam seperti besi, seng, timbal, mangan, kobalt, timah, dan logam lainnya. Reaksi ini dapat mempercepat kerusakan pada komponen mesin diesel.

3.2 Optimasi Menggunakan Response Surface Methodology (RSM)

Pada penelitian ini, dua faktor yang digunakan adalah massa adsorben (g) dan lama waktu adsorpsi (menit) dan menghasilkan respon angka asam (mg KOH/g). Berdasarkan data hasil penelitian dilakukan analisis lebih lanjut untuk memperoleh kondisi optimum yakni menghasilkan respon angka asam minimum yang dipengaruhi oleh dua faktor. Dalam *central composite design*, hasil dari tiap respon digunakan untuk menentukan model statistik manakah yang sesuai untuk digunakan. Dalam Design Expert 13 terdapat beberapa model statistik yakni model linear, 2 factor interaction (2FI), *quadratic*, dan *cubic*. Model statistik yang sesuai nantinya akan dilanjutkan untuk *analysis of variance* (ANOVA) yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh tiap faktor pada respon yang dihasilkan.

Tabel 3. Model summary statistic

Respon Angka Asam					
Source	Std. Dev.	R ²	Adjusted R ²	Predicted R ²	PRESS
Linear	0,1438	0,9237	0,9168	0,8464	0,9155
2FI	0,1333	0,9374	0,9284	0,7919	1,24
Quadratic	0,0817	0,9787	0,9731	0,8349	0,9841
Cubic**	0,0513	0,9934	0,9894	0,9556	0,2647
Quartic	0,0547	0,9950	0,9880	0,0037	5,94
Fifth***	0,0492	0,9980	0,9903		*

**suggested

***aliased

Berdasarkan analisis *response surface methodology* (RSM) dengan model *central composite design* menggunakan perangkat lunak Design Expert 13, direkomendasikan untuk menggunakan model *cubic* seperti yang terlihat pada Tabel 3. *R-square* menjelaskan tentang proporsi variasi suatu variabel independen yang dapat menjelaskan variasi variabel dependen. Apabila nilai *R-square* mendekati satu, maka variasi variabel independen yang digunakan dalam model dapat menjelaskan variasi variabel dependen dengan baik. Model yang optimal ditentukan berdasarkan nilai standar deviasi serta *R-square* yang maksimal, yaitu satu (Montgomery, 2013). Dalam memilih model yang tepat, beberapa parameter yang dipertimbangkan meliputi standar deviasi terendah, *R-square* tertinggi, *adjusted R-square* tertinggi, *predicted R-square* tertinggi, serta nilai PRESS terendah (Adiansyah et al., 2018). PRESS (*prediction error sum of squares*) pada model *cubic* bernilai 0,2647. Nilai PRESS merepresentasikan kesalahan jumlah kuadrat dari model, di mana semakin kecil nilai PRESS, semakin rendah pula tingkat kesalahan prediksi.

Berdasarkan hasil dari tiap respon dapat ditentukan model statistik yang sesuai menggunakan *analysis of variance* (ANOVA). Penentuan model statistik yang sesuai dapat dilihat dari nilai *p-value*. Suatu model dapat diterima apabila nilai *p-value* kurang dari 0,05 yang menandakan bahwa model tersebut mampu menunjukkan pengaruh secara signifikan terhadap respon (Montgomery, 2013). *F-value* merupakan nilai yang diperoleh dari uji F dalam analisis statistik, terutama dalam regresi dan ANOVA (*analysis of variance*). Nilai ini berfungsi untuk menilai apakah model yang diterapkan secara keseluruhan memiliki signifikansi dalam menjelaskan variasi data. Berdasarkan Tabel 4, *F-value* model sebesar 250,29 dengan *p-value* < 0,0001 dapat dikatakan bahwa model secara keseluruhan sangat signifikan. Nilai *F-value* pada tiap faktor individu dapat menjelaskan pengaruh masing-masing faktor terhadap respon. Faktor massa adsorben (A) memiliki *F-value* = 369,10 yang dapat diartikan bahwa massa adsorben memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap respon angka asam. Faktor waktu adsorpsi (B) memiliki *F-value* = 128,21 juga memiliki pengaruh yang cukup signifikan. Interaksi AB memiliki *F-value* = 8,38 yang berarti interaksi kedua faktor tersebut signifikan terhadap

respon, tetapi pengaruhnya lebih kecil dibanding faktor individu.

Tabel 4. ANOVA untuk model kubik
Respon Angka Asam

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	5,92	9	0,6581	250,29	<0,0001
A- massa adsorben	0,9704	1	0,9704	369,10	<0,0001
B- waktu adsorpsi	0,3371	1	0,3371	128,21	<0,0001
AB	0,0220	1	0,0220	8,38	0,0111
A ²	0,0011	1	0,0011	0,4171	0,5281
B ²	0,0208	1	0,0208	7,90	0,0132
A ² B	0,0053	1	0,0053	2,03	0,9481
AB ²	0,0000	1	0,0000	0,0044	0,0194
A ³	0,0180	1	0,0180	6,86	0,6613
B ³	0,0005	1	0,0005	0,1997	
Residual	0,0022	15	0,0026		
Cor Total	2,44	24			

Tabel 5. Solusi angka asam minimum

Massa Adsorben (gram)	Waktu Adsorpsi (menit)	Angka Asam (mg KOH/g)	Desirability
14,964	148,562	0,600	1

Berdasarkan Tabel 5 dapat diketahui solusi yang diperoleh dari Design Expert 13. Titik optimum dengan hasil respon angka asam terendah diperoleh pada kombinasi massa adsorben 14,964 g dan waktu adsorpsi 148,562 menit. Berdasarkan kombinasi kedua variabel, didapatkan kadar angka asam sebesar 0,600 mg KOH/g. *Desirability* merupakan suatu karakteristik yang digunakan untuk mengukur sejauh mana solusi optimal yang dihasilkan sesuai dengan tujuan respons yang diharapkan. Pada percobaan ini, nilai *desirability* yang diperoleh adalah 1, yang menunjukkan bahwa titik optimum yang dihasilkan dari analisis sudah sangat baik, karena mendekati nilai maksimum, yaitu 1.

Hasil optimasi akan menampilkan fungsi persamaan dari perubahan massa adsorben dan waktu adsorpsi. Hasil optimasi pada Design-Expert 13 menghasilkan persamaan yang mengikuti orde 3, berikut fungsi persamaan yang dihasilkan:

$$y = 2,44230 + 0,072278x_1 + 0,002251x_2 - 0,000817x_1x_2 - 0,013568x_1^2 - 0,000046x_2^2 + 0,000032x_1^2x_2 - 1,30608.10^{-7}x_1x_2^2 + 0,000378x_1^3 + 1,01549.10^{-7}x_2^3 \quad (1)$$

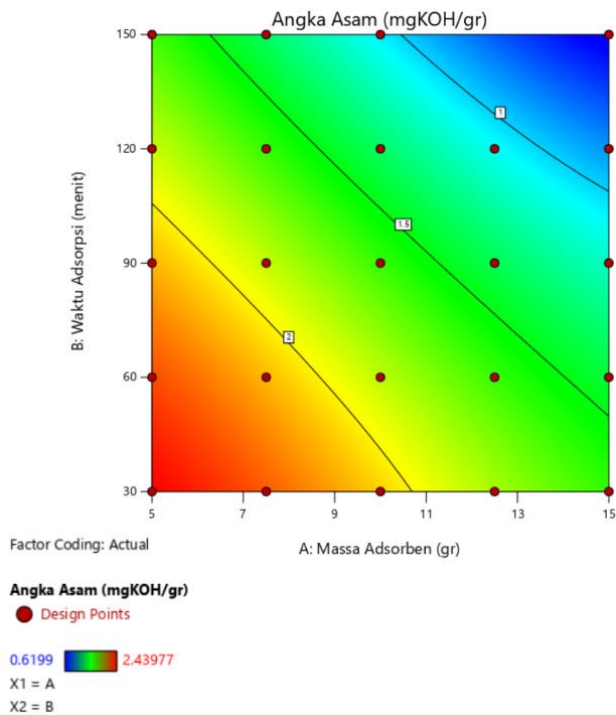
Di mana y adalah angka asam (mg KOH/g), x_1 adalah massa adsorben (g), dan x_2 adalah waktu adsorpsi (menit).

Tabel 6. Perbandingan angka asam eksperimen dan prediksi

Massa Adsorben (g)	Waktu Adsorpsi (menit)	Angka Asam (mg KOH)	
		Eksperimen	Prediksi
5	30	2,43977	2,44147
	60	2,31541	2,30368
	90	2,04672	2,11482
	120	1,94232	1,89133
	150	1,64342	1,64967
7,5	30	2,33231	2,27882
	60	2,07652	2,10887
	90	1,85347	1,88726
	120	1,68533	1,63044
	150	1,31424	1,35487
10	30	2,01505	2,06488
	60	1,89648	1,87477
	90	1,66654	1,63242
	120	1,35543	1,35427
	150	1,05703	1,05677
12,5	30	1,81343	1,83508
	60	1,62543	1,63682
	90	1,45654	1,38573
	120	0,99332	1,09824
	150	0,73435	0,79083
15	30	1,63771	1,62488
	60	1,43212	1,43046
	90	1,06102	1,18262
	120	0,87645	0,89781
	150	0,61990	0,59247

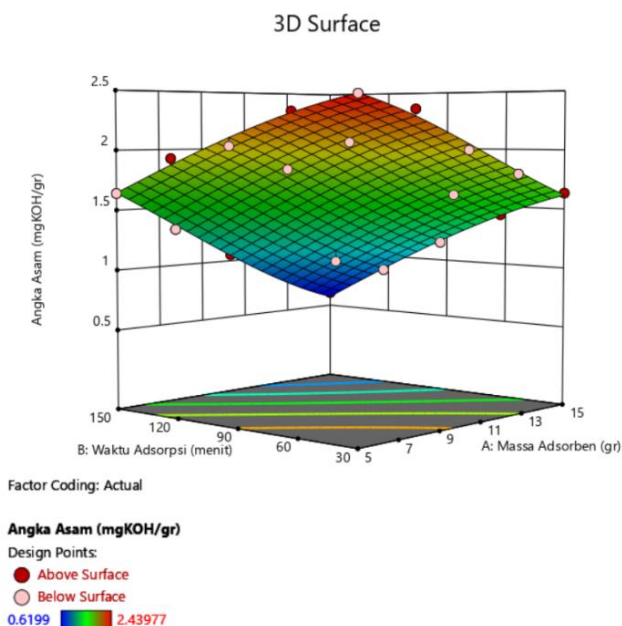
Berdasarkan Tabel 6 disajikan data prediksi dan data hasil eksperimen yang memiliki data dengan angka yang hampir sama. Berdasarkan *model summary fit* yang dihasilkan serta nilai selisih antara *adjusted R²* dan *predicted R²* yang telah memenuhi kriteria yang ditetapkan, maka model *response surface methodology* (RSM) ini dapat diterapkan. Perbedaan antara hasil prediksi dan eksperimen dapat terjadi dikarenakan keterbatasan model. Model prediksi sering kali memakai metode matematis yang lebih sederhana, seperti polinomial dalam RSM atau regresi linear. Namun, pendekatan ini mungkin kurang mampu merepresentasikan dari kompleksitas sistem.

Berdasarkan Gambar 6. *contour plot* angka asam vs waktu adsorpsi; massa adsorben, dapat diketahui bahwa terbentuk empat lapisan. Daerah berwarna merah menunjukkan angka asam yang tinggi, sedangkan daerah berwarna biru menunjukkan angka asam rendah. Pada lapisan pertama menunjukkan nilai angka asam > 2 mg KOH/g, kemudian pada lapisan kedua menunjukkan angka asam berkisar 2,0-1,5 mg KOH/g, pada lapisan ketiga menampilkan angka asam berkisar 1,5-1,0 mg KOH/g, dan lapisan terakhir menunjukkan angka asam <1 mg KOH/g. Angka asam menurun seiring dengan meningkatnya massa adsorben dan lama waktu adsorpsi.



Gambar 6. contour plot angka asam (mg KOH/g) vs waktu adsorpsi (menit), massa adsorben (g)

Pada Gambar 7 merupakan *surface plot* angka asam (mg KOH/g) vs waktu adsorpsi (menit); massa adsorben (g). Angka asam terdapat pada koordinat z, massa adsorben pada koordinat x, dan waktu adsorpsi pada koordinat y. Gambar 7 menunjukkan hubungan antara lama waktu adsorpsi dan massa adsorben terhadap perolehan angka asam. Nilai angka asam menurun pada peningkatan massa adsorben mulai dari 5–15 g seiring dengan bertambahnya waktu adsorpsi 30-150 menit.



Gambar 7. Surface plot angka asam (mg KOH/g) vs waktu adsorpsi (menit), massa adsorben (g)

3.3 Hasil Analisis Karakteristik *Bio-Oil*

Titik nyala suatu bahan bakar merupakan suhu terendah di mana suatu bahan bakar yang dipanaskan mengeluarkan nyala apabila dilewatkan suatu nyala api (Ridhuan & Irawan, 2020). *Bio-oil* dari proses pirolisis batang tembakau memiliki titik nyala 202°C. Berdasarkan standar SNI mutu bahan bakar nabati (*biofuel*), titik nyala suatu bahan bakar nabati yakni minimal 130°C. Hal ini terjadi karena semakin sedikit asam yang terdapat pada bahan bakar maka semakin tinggi titik nyala (Permana et al., 2020). Mengetahui titik nyala suatu bahan bakar berguna untuk meminimalkan terjadinya letupan ketika proses pemanasan.

Uji proksimat adalah analisis untuk mengukur kandungan kadar air (*moisture content*), zat volatil (*volatile matter*), karbon tetap (*fixed carbon*), dan abu (*ash*) dalam suatu bahan. Hasil uji proksimat *bio-oil* disajikan dalam Tabel 7.

Tabel 7. Hasil analisis uji proksimat

Air (%)	Abu (%)	Karbon (%)	Volatil (%)
18,4116	0,1393	28,2643	53,1847

Hasil uji menunjukkan kadar air *bio-oil* yang tinggi, berkisar antara 18,41% dan 18,45%. Kadar air yang tinggi menunjukkan bahwa *bio-oil* memiliki kandungan air yang signifikan. Kadar air yang tinggi dapat mengurangi nilai kalor, efisiensi pembakaran, dan mempercepat korosi pada komponen mesin. Beberapa metode yang dapat diterapkan untuk tujuan ini antara lain distilasi dan adsorpsi lanjutan menggunakan adsorben seperti *silica gel* dan zeolit, sehingga *bio-oil* dapat menjadi bahan bakar yang lebih efisien dan aman digunakan.

Kadar abu *bio-oil* yang sangat rendah (0,1393–0,1437%) menunjukkan bahwa tidak ada residu setelah pembakaran. Hal ini baik untuk bahan bakar karena dapat mengurangi kemungkinan kerak atau endapan pada mesin pembakaran. *Bio-oil* memiliki kadar karbon antara 28,26 dan 28,24%. Meskipun potensi energi *bio-oil* tidak setinggi bahan bakar fosil seperti batu bara, kandungan karbonnya cukup untuk mendukung pembakaran. Memiliki kandungan volatil yang tinggi (sekitar 53,18 hingga 53,16%) menunjukkan bahwa *bio-oil* memiliki banyak senyawa yang mudah menguap yang dapat membantu proses pembakaran awal. Kandungan volatil yang tinggi juga dapat meningkatkan efisiensi pembakaran (Ridhuan, 2020).

Perbandingan karakteristik *bio-oil* juga dilakukan dengan hasil penelitian lain untuk meninjau kualitas yang dihasilkan. Salah satunya adalah *bio-oil* hasil pirolisis biji kurma oleh Said et al. (2023), yang menunjukkan kadar air sebesar 6,59%, kadar abu 2,24%, kadar karbon 46,9%, dan *volatile matter* sebesar 73,46%. Dibandingkan dengan *bio-oil* dalam penelitian ini yang memiliki kadar air 18,41%, kadar abu 0,14%, kadar karbon 28,26%, dan *volatile matter* 53,18%, terlihat adanya perbedaan mencolok. Kadar air yang lebih tinggi dalam penelitian ini berpotensi

menurunkan nilai kalor serta efisiensi pembakaran. Sementara itu, kadar karbon dan *volatile matter* yang lebih rendah turut menunjukkan bahwa kualitas *bio-oil* masih dapat ditingkatkan. Perbedaan tersebut kemungkinan besar disebabkan oleh variasi jenis bahan baku, yakni batang tembakau pada penelitian ini dibandingkan dengan biji kurma, serta perbedaan kondisi pirolisis yang diterapkan. Untuk meningkatkan kualitas *bio-oil*, penurunan kadar air dapat menjadi fokus pengembangan selanjutnya, misalnya melalui distilasi atau adsorpsi menggunakan adsorben seperti *silica gel* dan zeolit. Selain itu, pengoptimalan suhu dan waktu pirolisis juga berperan penting dalam memperbaiki komposisi *bio-oil* dan meningkatkan nilai kalor bahan bakar yang dihasilkan.

4. KESIMPULAN

Peningkatan massa adsorben dan waktu adsorpsi berkontribusi terhadap penurunan angka asam dalam *bio-oil*. Kondisi terbaik diperoleh pada percobaan massa adsorben 15 gram dan waktu adsorpsi 150 menit, dengan angka asam mencapai 0,61990 mg KOH/g, yang merupakan nilai terendah dalam penelitian ini. Analisis menggunakan *response surface methodology* (RSM) dengan *central composite design* (CCD) menunjukkan bahwa model *cubic* adalah yang paling sesuai untuk menggambarkan hubungan antara faktor dan respons. Model ini memiliki R^2 0,9934, dengan p -value < 0,0001, menunjukkan bahwa variabel massa adsorben dan waktu adsorpsi berpengaruh signifikan terhadap penurunan angka asam. Berdasarkan RSM diperoleh titik optimum dengan hasil respon angka asam terendah pada kombinasi massa adsorben 14,964 g dan waktu adsorpsi 148,562 menit. Berdasarkan kombinasi kedua variabel didapatkan kadar angka asam sebesar 0,600 mg KOH/g. Untuk memperoleh *bio-oil* dengan angka asam yang memenuhi standar SNI, disarankan untuk memperpanjang waktu adsorpsi, agar semua sisi aktif dari adsorben dapat lebih lama berinteraksi dengan adsorbat, sehingga kadar angka asam dalam *bio-oil* semakin menurun hingga mencapai kadar angka asam sesuai dengan SNI *bio-fuel*.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Saya mengucapkan terima kasih kepada Ibu Sintha Soraya Santi atas bimbingan dan masukan yang berharga dalam penelitian ini. Apresiasi juga saya sampaikan kepada Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur atas fasilitas yang diberikan. Terakhir, saya berterima kasih kepada keluarga dan teman-teman atas dukungan dan motivasi yang tidak ternilai.

6. DAFTAR PUSTAKA

Adhani, L., Aziz, I., Nurbayati, S., & Oktaviana, C. (2016). Pembuatan biodiesel dengan cara adsorpsi dan transesterifikasi dari minyak goreng bekas. *Jurnal Kimia VALENSI: Jurnal Penelitian dan Pengembangan*, 2(1), 71-80.

Adiansyah, M., Hendrawan, Y., & Sumarian, S. H. (2018). Pemodelan dan optimasi proses biofiksasi

karbondioksida pada biogas menggunakan java moss (*Taxiphyllum Barbieri*) dengan response surface methodology. *Jurnal Keteknik Pertanian Tropis Dan Biosistem*, 6(1), 1-8.

Crocker, M. (2010). *Thermochemical conversion of biomass to liquid fuels and chemicals*, RSC Publishing.

Data Indonesia. (2023, Februari 2). Produksi tembakau Indonesia sebanyak 225.700 ton pada 2022. Data Indonesia. <https://dataindonesia.id/agribisnis-kehutanan/detail/produksi-tembakau-indonesia-sebanyak-225700-ton-pada-2022>

Fardhyanti, D. (2020). *Monografi bio-oil berbasis biomassa*. Sleman, Deepublish

Hasibuan, M. I., Husna, A. F., Febrianti, F., Pangaribuan, R. A., Subakti, T. A., & Pulungan, A. N. (2021). Studi awal konversi limbah pelepah sawit menjadi bio-oil dengan teknik semi fast pyrolysis sebagai sumber bahan bakar alternatif. *Prosiding Seminar Nasional Kimia dan Pendidikan Kimia*, 2(1), 32-38.

Hu, P. X., Ang, L. T., & Loh, S. K. (2023). An overview of recent development in bio-oil upgrading and separation techniques. *Environmental Engineering Research*, 28(4), 220551.

Ifa, L., Nurdjannah., Syarif, T., & Darnengsih. (2021). Bioadsorben dan aplikasinya. *Solok, Yayasan Pendidikan Cendekia Muslim*, 4(1), 276532.

Juwitaningtyas, T., & Vennada, A. (2024). Effect of mass and size husk ash adsorbent on acid number and free fatty acid of virgin coconut oil (VCO) produced by enzymatic process. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*, 4(1), 1-8.

Liu, Y., Dong, J., Liu, G., Yang, H., Liu, W., Wang, L., ... & Wang, S. (2015). Co-digestion of tobacco waste with different agricultural biomass feedstocks and the inhibition of tobacco viruses by anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 189, 210-216.

Montgomery, D. C. (2013). *Design and analysis of experiments* (7th ed.). Wiley.

Permana, E., Naswir, M., Sinaga, M., Alfairuz, H., & Murti, S. (2020). Kualitas biodiesel dari minyak jelantah berdasarkan proses saponifikasi dan tanpa saponifikasi. *Jurnal Teknologi Terapan*. 6(2), 26-31.

Rahayu, S., Supriyatin, S., & Bintari, A. (2018). Activated carbon-based bio-adsorbent for reducing free fatty acid number of cooking oil. *AIP Conference Proceedings*, 2019(1), 050004

Ridhuan, K., & Irawan, D. (2020). Energi terbarukan pirolisis. *Lampung, CV. Laduny Alifatama*, 1(1), 219286.

Said, M. A., Mohammed, B. A., Ahmed, M. J., & Hameed, B. H. (2023). Production and characterization of bio-oil and bio-char from date stone via pyrolysis using response surface methodology. *Comptes Rendus Chimie*, 26(S1), 1-15.

Siswanti, Puti, Y., & Oktaviana, A. (2024). Adsorpsi zat warna remazol brilliant blue R pada limbah industri batik menggunakan adsorben dari mahkota buah nenas. *Jurnal Ilmiah Teknik Kimia*. 21(1), 9-16.

Wijayanti, H., Nora, H., & Amelia, R. (2012). Pemanfaatan arang aktif dari serbuk gergaji kayu ulin untuk meningkatkan kualitas minyak goreng

bekas. Konversi. 1(1), 26-32.

Yahya, A. A., Al-Qodah, Z., & Ngah, C. W. (2020).
Activated carbon from agricultural wastes for
adsorption of organic compounds. *Molecules*.
25(21), 5105.