

MICROWAVE PYROLYSIS LIMBAH SEKAM PADI DENGAN VARIASI HOLDING TIME DAN PARTICLE SIZE UNTUK MENGHASILKAN BAHAN BAKAR TERBARUKAN

Ahmad Murtadlo Zaka¹, Harwin Sptoadi^{2*}, Robertus Dhimas Dhewangga Putra³

^{1,2,3} Departemen Teknik Mesin dan Industri Universitas Gadjah Mada

e-mail:¹ahmadmurtadlozaka@mail.ugm.ac.id, ²harwins@ugm.ac.id, ³robertus.dhimas.d.p@ugm.ac.id,

ABSTRACT

This study aims to examine the pyrolysis of rice husk waste mixed with silicon carbide (SiC) as an absorber using a primary microwave reactor, as well as the role of natural zeolite catalysts heated in a secondary reactor. Microwave pyrolysis converts rice husks into products with more value, in the form of biochar, bio-oil, and gas. Pyrolysis is carried out in a primary reactor, by mixing rice husks and SiC absorber. SiC is used to maximize microwave absorption to produce fast and efficient heating, and increase pyrolysis results. Meanwhile, the natural zeolite catalyst in the secondary reactor is heated conventionally with an oven maintained at a temperature of 400 °C. Then the variations in the holding time of the test are 5, 10, 15, and 20 minutes, while the particle size of rice husk waste is 18-35 and 35-60 mesh. The pyrolysis results show that the particle size of 18-35 mesh with a holding time of 5 minutes gives the highest biochar yield (72.20%). In addition, the larger particle size of rice husk waste (18-35 mesh) with a holding time of 20 minutes gave the highest bio-oil yield of 18.80%, due to the slower pyrolysis reaction compared to the size of 35-60 mesh. Then the highest gas product (21.60%) was obtained at a particle size of 35-60 mesh with a holding time of 20 minutes. In addition, the particle size of 35-60 mesh was 37 seconds faster to reach a temperature of 450 °C compared to the particle size of 18-35 mesh.

Keywords: microwave, natural zeolite, pyrolysis, rice husk, silicon carbide (SiC)

INTISARI

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pirolisis limbah sekam padi yang dicampur dengan silikon karbida (SiC) sebagai absorber menggunakan reaktor microwave primer, serta peran katalis zeolit alam yang dipanaskan dalam reaktor sekunder. Microwave pyrolysis mengubah sekam padi menjadi produk yang bernilai lebih, berupa biochar, bio-oil, dan gas. Pirolisis dilakukan di dalam suatu reaktor primer dengan mencampurkan sekam padi dan SiC absorber. SiC digunakan untuk memaksimalkan penyerapan gelombang mikro untuk menghasilkan pemanasan cepat dan efisien, serta meningkatkan hasil pirolisis. Sementara itu, katalis zeolit alam pada reaktor sekunder dipanaskan secara konvensional dengan oven yang dijaga pada temperatur 400 °C. Kemudian variasi holding time pengujian adalah 5, 10, 15, dan 20 menit, sedangkan particle size limbah sekam padi adalah 18-35 dan 35-60 mesh. Hasil pirolisis menunjukkan bahwa ukuran partikel 18-35 mesh dengan waktu tahan 5 menit memberikan hasil biochar yang paling tinggi (72,20%). Selain itu, ukuran partikel limbah sekam padi yang lebih besar (18-35 mesh) dengan waktu tahan 20 menit memberikan hasil bio-oil yang paling tinggi yaitu 18,80%, karena reaksi pirolisis yang lebih lambat dibandingkan dengan ukuran 35-60 mesh. Kemudian produk gas tertinggi (21,60%) diperoleh pada ukuran partikel 35-60 mesh dengan waktu tahan 20 menit. Selain itu, ukuran partikel 35-60 mesh lebih cepat 37 detik untuk mencapai suhu 450 °C dibandingkan dengan ukuran partikel 18-35 mesh.

Kata kunci: microwave, pirolisis, sekam padi, silikon karbida (SiC), zeolite alam

1. PENDAHULUAN

Energi terbarukan (ET) merupakan energi yang berasal dari alam dan dapat dimanfaatkan secara terus menerus. Persediaan ET sangat melimpah dan belum dimanfaatkan secara optimal di Indonesia. *Renewable energy transition* (RET) telah diidentifikasi sebagai pendorong utama transformasi energi, memungkinkan peralihan ke sumber energi yang lebih bersih dan berkelanjutan (Omri dan Ben Jabeur, 2024). ET mudah ditemukan di dalam kehidupan sehari-hari manusia. Penelitian energi terbarukan sedang mencari bahan bakar yang murah, hijau, dan terbarukan (Yana dkk., 2022). Meningkatnya kekhawatiran tentang perubahan iklim global, hujan asam, dan polusi udara akibat pembakaran bahan bakar fosil menyebabkan biomassa dipertimbangkan sebagai sumber energi alternatif, terbarukan, dan ramah lingkungan (Amjith dan Bavanish, 2022).

Limbah sekam padi merupakan salah satu energi terbarukan biomassa yang melimpah di Indonesia, dikarenakan makanan pokok masyarakat Indonesia adalah nasi. Sekam padi merupakan lapisan pelindung yang memiliki tekstur keras untuk mengelilingi butir padi. Ketika padi diproses untuk menghasilkan beras, sekam padi

dipisahkan sebagai produk sampingan. Meskipun sering dianggap sebagai limbah pertanian, sekam padi memiliki banyak manfaat dan aplikasi yang berharga. Secara komposisi, sekam padi mengandung silika, lignin, dan selulosa, yang membuatnya tahan terhadap dekomposisi dan memberikan sifat isolasi yang baik. Penggunaan sekam padi sangat beragam, mulai dari bahan bakar biomassa, bahan baku untuk pembuatan arang, bahan isolasi termal, hingga bahan tambahan dalam pembuatan beton dan bahan konstruksi lainnya. Pemanfaatan sekam padi sebagai biomassa mendukung energi berkelanjutan, serta untuk mengurangi limbah pertanian dan memberikan manfaat ekonomi. Di negara-negara penghasil beras, sekam padi merupakan bahan limbah yang mengandung antara 30% dan 50% karbon organik. Secara fungsional, terdiri dari 60-65% bahan mudah menguap, 10-15% karbon tetap, dan 17-23% abu (Rajamanikandan dkk., 2023). Melalui pirolisis *microwave* limbah sekam padi dapat diketahui produk *biochar*, *bio-oil*, dan gas sebagai bahan bakar alternatif. Pirolisis merupakan suatu metode konversi termokimia representatif yang mengubah suatu bahan menjadi produk padat, cair, dan gas dalam atmosfer *inert* (Park dkk., 2024). Metode pirolisis digolongkan menjadi 2, yaitu metode pirolisis konvensional dan gelombang mikro. Pirolisis konvensional adalah pemanasan biomassa/bahan organik tanpa atau dengan pasokan oksigen terbatas dengan laju pemanasan lambat, suhu rendah (<600 °C) dan menghasilkan produk padat yang disebut *bio-char* atau sederhananya arang, *bio-oil* dan gas (Ruiz dkk., 2023). Sementara itu, pirolisis gelombang mikro melampaui pirolisis konvensional dalam produksi gas sintesis karena reaksi arang dan tar biogenik yang ditingkatkan dengan iradiasi gelombang mikro (Zhou dkk., 2024). Pirolisis gelombang mikro adalah metode efisien untuk mengubah limbah menjadi produk sampingan yang berharga, seperti *biochar*, *bio-oil*, dan *biogas* (Fang dkk., 2021). Meskipun pirolisis gelombang mikro memiliki tingkat pemrosesan bahan baku yang lebih tinggi (Sharma dkk., 2023), berbagai jenis bahan bakar dan biomassa mampu menghantarkan radiasi gelombang mikro dengan cara yang berbeda (Nzediegwu dkk., 2021). Begitupun di dalam proses pirolisis *microwave*, terdapat beberapa bahan baku tidak dapat menyerap gelombang mikro dengan baik, sehingga membutuhkan "*absorber*" untuk memperbaiki suatu efisiensi proses. Penelitian menggunakan *silicon carbide* (SiC) sebagai *absorber* dan berfungsi sebagai peredam pantulan/penyerap gelombang mikro.

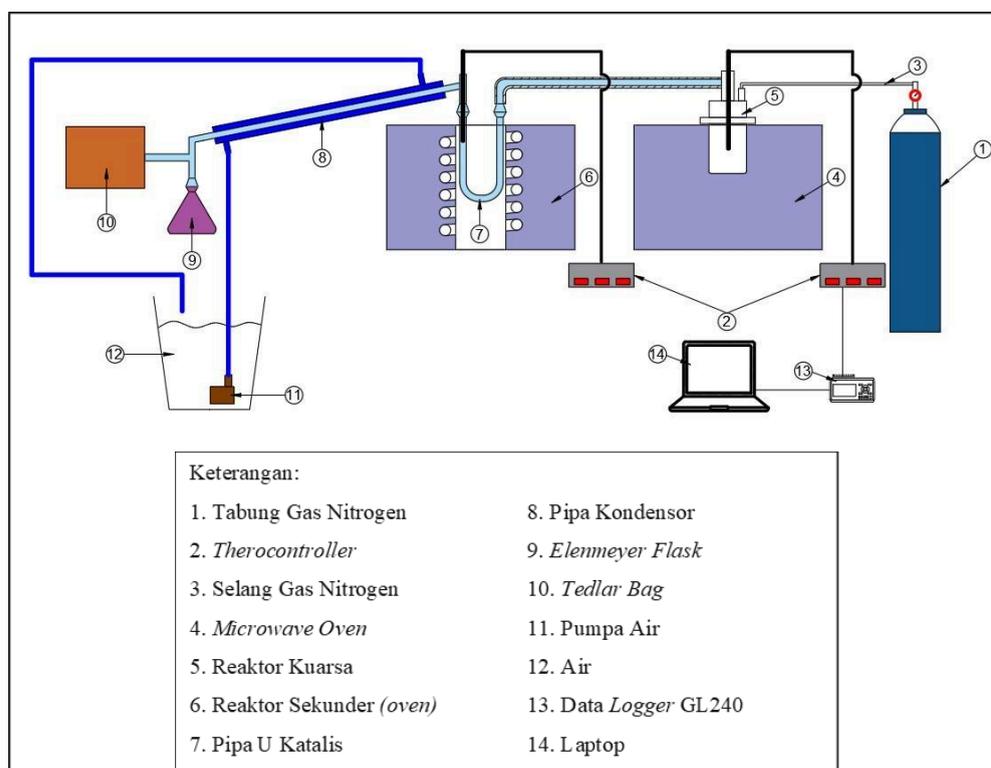
Sementara itu, rendahnya kualitas produk pirolisis biomassa telah membatasi pengembangan teknologi pirolisis lebih lanjut (Hu dkk., 2023). Mengoptimalkan metode pemanasan dengan memilih katalis yang tepat merupakan pendekatan efektif untuk meningkatkan kualitas produk pirolisis dan mengatasi tantangan dalam pemanfaatan biomassa secara efisien. Katalis adalah zat yang mempercepat laju reaksi kimia, tanpa mengalami perubahan atau terpakai oleh reaksi itu sendiri. Katalis memungkinkan reaksi berlangsung lebih cepat atau reaksi terjadi pada temperatur yang lebih rendah. Katalis sangat penting untuk meningkatkan kualitas produk pirolisis gelombang mikro, mengingat komposisi yang kompleks dan kualitas suboptimal yang melekat pada *bio-oil* (Sui dkk., 2024). Sampai saat ini, zeolit dianggap sebagai katalis yang efektif untuk menghilangkan oksigen dalam biomassa dan meningkatkan kualitas *bio-oil* (Liang dkk., 2021). Sementara itu, kinerja katalitik zeolit sangat bergantung pada sifat fisikokimia, seperti struktur pori dan keasaman (Liang dkk., 2021). Karena rendemen yang diperoleh tinggi serta penggunaan suhu dan waktu yang lebih rendah, zeolit alam mempunyai potensi yang baik sebagai katalis pada pirolisis (Hendrawati dkk., 2023). Sehingga katalis yang digunakan untuk penelitian *microwave pyrolysis* ini adalah jenis katalis zeolit alam.

Potensi *renewable energy* dari limbah sekam padi yang belum termanfaatkan secara optimal. Melatarbelakangi penelitian pirolisis gelombang mikro menggunakan biomassa limbah sekam padi dengan penambahan SiC *absorber* dan memanfaatkan katalis zeolit alam untuk mengetahui produk hasil pirolisis berupa *biochar*, *bio-oil*, dan gas yang dapat dimanfaatkan sebagai energi terbarukan. Pirolisis dengan variasi *holding time* dan *particle size* untuk mengetahui hasil terbaik terhadap produk *biochar*, *bio-oil*, dan gas. Oleh karena itu, penulis memiliki pemikiran untuk memvariasikan *holding time* pengujian adalah 5, 10, 15, dan 20 menit, sedangkan *particle size* limbah sekam padi adalah 18-35 dan 35-60 *mesh*. Selain itu, limbah sekam padi dapat dimanfaatkan menjadi bahan bakar alternatif melalui proses pirolisis gelombang mikro, sehingga mendukung transisi dari energi konvensional yang tidak terbarukan menjadi energi terbarukan yang ramah lingkungan. Pengujian pirolisis limbah sekam padi dengan penambahan SiC *absorber* dan katalis zeolit alam menggunakan pemanas gelombang mikro perlu dilakukan untuk mengetahui karakteristik proses dalam menghasilkan bahan bakar terbarukan.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian pirolisis biomassa limbah sekam padi dilakukan pada bulan September s.d November 2024 di Laboratorium Konversi Energi, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada, Daerah Istimewa Yogyakarta. Limbah sekam padi (*rice husk*) diperoleh dari sisa penggilingan padi di kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimen. Kemudian penelitian ini dilakukan dengan memanfaatkan limbah sekam padi sebanyak 100 gram per pengujian, yang dicampur dengan SiC sebagai *absorber* dengan massa 100 gram per pengujian dalam sebuah reaktor primer. Selain itu, memanfaatkan katalis zeolit alam dengan massa 50 gram yang dipanaskan

pada suhu 400 °C di dalam reaktor sekunder. Gas nitrogen digunakan sebagai gas *inert* yang dialirkan selama proses pirolisis dengan laju alir 200 ml/min. Pirolisis ini menggunakan pemanas gelombang mikro yang dapat mempercepat dan meningkatkan kualitas produk pirolisis sebagai bahan bakar. Produk pirolisis limbah sekam padi yang dihasilkan berupa *biochar*, *bio-oil*, dan gas. Proses *microwave pyrolysis* dilakukan pada temperatur 450 °C dengan variasi *holding time* pengujian selama 5, 10, 15, dan 20 menit, sedangkan *particle size* limbah sekam padi adalah 18-35 dan 35-60 *mesh*. Kemudian instalasi alat penelitian yang digunakan untuk proses pirolisis menggunakan reaktor *microwave oven* primer dan pemanas katalis di dalam reaktor sekunder (*oven*) ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Skema Instalasi Alat Penelitian Pirolisis

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian proses pirolisis sekam padi dilakukan dalam reaktor *microwave* yang dirancang khusus, yaitu dengan penambahan *absorber* silikon karbida (SiC) untuk meningkatkan efisiensi pemanasan, serta katalis zeolit alam yang digunakan pada reaktor sekunder. Pirolisis ini menghasilkan distribusi produk yang bervariasi, mencakup *biochar*, *bio-oil*, dan gas. Setiap produk dihasilkan dalam proporsi berbeda yang secara signifikan dipengaruhi oleh beberapa parameter utama yaitu ukuran partikel sekam padi (18-35 dan 35-60 *mesh*) dan waktu tahan selama proses pirolisis berlangsung (5, 10, 15, dan 20 menit). Penelitian *microwave pyrolysis* ini dilakukan untuk memahami bagaimana setiap variabel memberikan pengaruh terhadap produk akhir, serta mengetahui hasil maksimal proses pirolisis.

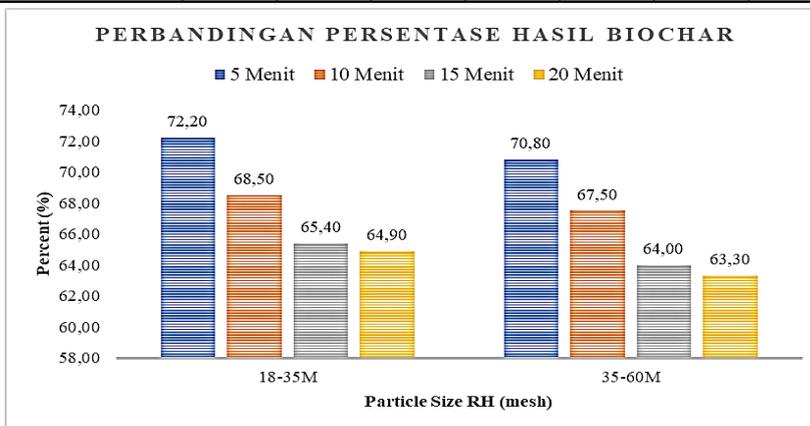
Produk pirolisis yang diperoleh pada variasi ukuran partikel 18-35 dan 35-60 *mesh*, menunjukkan bahwa sekam padi ukuran partikel 18-35 *mesh* dengan waktu tahan 5 menit memberikan hasil *biochar* yang paling tinggi sebesar 72,20%. Selain itu, ukuran partikel limbah sekam padi 18-35 *mesh* dengan variasi waktu tahan 20 menit memberikan hasil *bio-oil* yang paling tinggi yaitu 18,80%, karena reaksi pirolisis yang lebih lambat dibandingkan dengan ukuran 35-60 *mesh*. Kemudian produk gas tertinggi sebesar 21,60%, diperoleh pada ukuran partikel 35-60 *mesh* dengan waktu tahan 20 menit. Selain itu, ukuran partikel 35-60 *mesh* lebih cepat 37 detik untuk mencapai suhu 450 °C dibandingkan dengan ukuran partikel 18-35 *mesh*. Selanjutnya, pembahasan mengenai pengaruh masing-masing variasi *holding time* dan *particle size* dijelaskan pada bagian berikut.

3.1 Produk *Biochar* Pirolisis

Diperoleh produk *biochar* dari *microwave pyrolysis* limbah sekam padi, seperti pada tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Produk *Biochar* Pirolisis

Particle Size	Holding Time							
	5 Menit		10 Menit		15 Menit		20 Menit	
	gram	%	gram	%	gram	%	gram	%
RH 18-35M	72,20	72,20	68,50	68,50	65,40	65,40	64,90	64,90
RH 35-60M	70,80	70,80	67,50	67,50	64,00	64,00	63,30	63,30

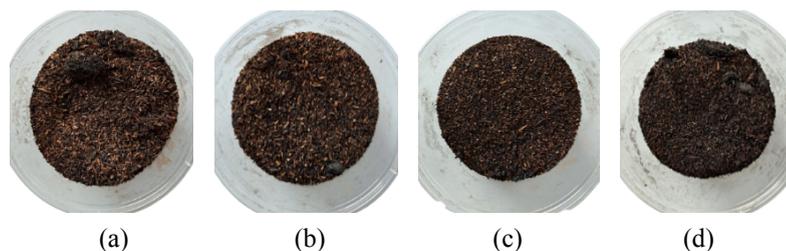


Gambar 2. Perbandingan Persentase Hasil *Biochar* Pirolisis

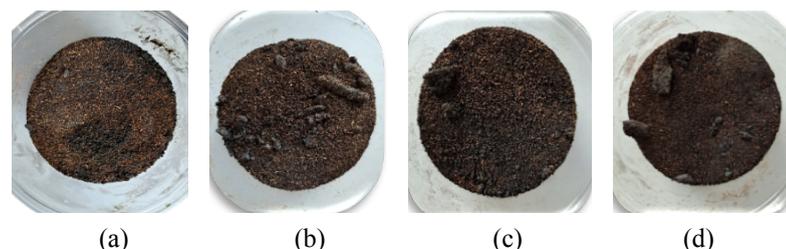
Grafik hasil pirolisis *microwave* sekam padi pada gambar 2 menunjukkan kombinasi antara ukuran partikel dan waktu tahan memiliki pengaruh signifikan terhadap persentase produk *biochar* yang dihasilkan. Ukuran partikel 18-35 *mesh* menunjukkan hasil *biochar* tertinggi pada waktu tahan 5 menit, yaitu sebesar 72,20%. Hasil ini menurun secara bertahap dengan peningkatan waktu tahan menjadi 10, 15, dan 20 menit, yang masing-masing menghasilkan 68,50%, 65,40%, dan 64,90%. Tren serupa terlihat pada ukuran partikel yang lebih kecil (35-60 *mesh*), di mana *biochar* tertinggi dicapai pada waktu tahan 5 menit dengan persentase 70,80%, kemudian menurun seiring penambahan waktu tahan hingga memperoleh 63,30% pada 20 menit. Penurunan ini menunjukkan bahwa waktu tahan yang lebih lama menyebabkan suatu dekomposisi lebih lanjut dari *biochar*, sehingga menjadi komponen volatil lain seperti *bio-oil* dan gas. Selisih untuk produk *biochar* tertinggi pada ukuran partikel 18-35 *mesh* dan 35-60 *mesh* dengan waktu tahan 5 menit yaitu sebesar 1,40%. Disimpulkan bahwa, untuk memaksimalkan hasil produksi *biochar* diperlukan ukuran partikel yang lebih besar dan waktu tahan yang lebih singkat, sedangkan untuk waktu tahan lebih lama dan ukuran partikel yang lebih kecil akan meningkatkan konversi ke produk lainnya. Produk *biochar* yang dihasilkan dalam proses *microwave pyrolysis* ditunjukkan pada gambar 3 dan gambar 4. Kemudian rumus untuk menghitung persentase *yield* produk *biochar* ($Y_{biochar}$) diperoleh dengan persamaan (1) sebagai berikut:

$$Y_{biochar}(\%) = \frac{\text{massa produk dalam fase padat (gram)}}{\text{massa awal bahan baku pirolisis (gram)}} \times 100\% \dots\dots\dots(1)$$

Gambar 3 dan gambar 4 menunjukkan hasil *biochar* dari pirolisis sekam padi menggunakan *microwave pyrolysis* dengan variasi *holding time* pengujian adalah 5, 10, 15, dan 20 menit, sedangkan *particle size* limbah sekam padi adalah 18-35 dan 35-60 *mesh*. Gambar di atas terlihat bahwa *biochar* yang dihasilkan memiliki perbedaan tekstur dan kerapatan seiring dengan perubahan waktu tahan dan ukuran partikel. Hasil eksperimen menunjukkan pada waktu tahan yang lebih singkat, mengakibatkan *biochar* terlihat lebih kasar dan berwarna lebih coklat, sedangkan waktu tahan yang lebih lama menghasilkan *biochar* dengan struktur lebih padat dan warna yang lebih gelap. Perbedaan ini menunjukkan bahwa waktu tahan yang lebih lama menyebabkan dekomposisi material yang lebih intensif, untuk menghasilkan *biochar* dengan struktur yang lebih stabil dan homogen, terutama pada ukuran partikel yang lebih kecil yaitu 35-60 *mesh*. Struktur yang stabil menunjukkan kandungan karbon terikat yang lebih besar, sementara keseragaman membantu mengoptimalkan distribusi energi dalam material. Selain itu, dekomposisi material yang intensif selama waktu tahan yang lebih lama dapat menghilangkan senyawa volatil dan meningkatkan kadar karbon tetap, yang berkontribusi pada peningkatan nilai kalor *biochar*.



Gambar 3. Biochar ukuran partikel 18-35 mesh, dengan holding time (a) 5 menit (b) 10 menit (c) 15 menit (d) 20 menit



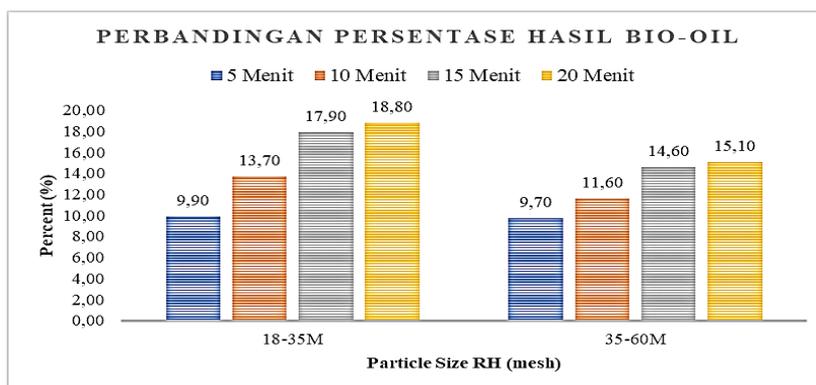
Gambar 4. Biochar ukuran partikel 35-60 mesh, dengan holding time (a) 5 menit (b) 10 menit (c) 15 menit (d) 20 menit

3.2 Produk *Bio-oil* Pirolisis

Diperoleh produk *bio-oil* dari *microwave pyrolysis* limbah sekam padi, seperti pada tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan Produk *Bio-oil* Pirolisis

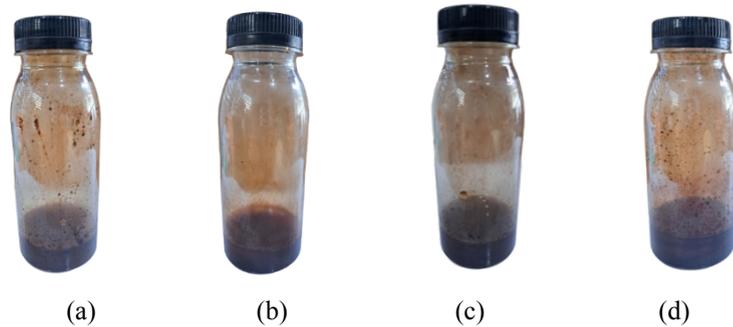
Particle Size	Holding Time							
	5 Menit		10 Menit		15 Menit		20 Menit	
	gram	%	gram	%	gram	%	gram	%
RH 18-35M	9,90	9,90	13,70	13,70	17,90	17,90	18,80	18,80
RH 35-60M	9,70	9,70	11,60	11,60	14,60	14,60	15,10	15,10



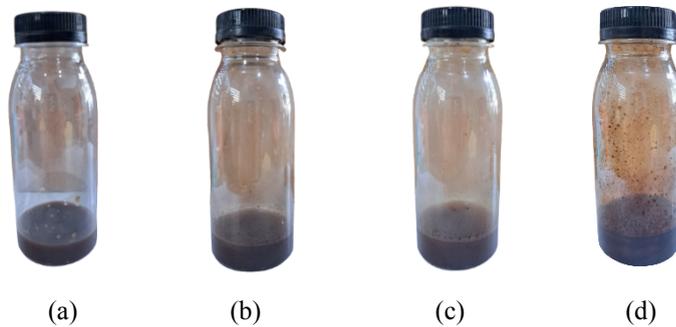
Gambar 5. Perbandingan Persentase Hasil *Bio-oil* Pirolisis

Grafik hasil *bio-oil* pada gambar 5 menunjukkan bahwa proses pirolisis *microwave* sekam padi menghasilkan persentase *bio-oil* yang bervariasi tergantung ukuran partikel dan waktu tahan pengujian. Ukuran partikel 18-35 mesh menghasilkan *bio-oil* yang terus meningkat seiring bertambahnya waktu tahan dengan nilai tertinggi sebesar 18,80% pada waktu tahan 20 menit. Menunjukkan bahwa ukuran partikel yang lebih besar (18-35 mesh) dan waktu tahan yang lebih lama memberikan kondisi maksimal untuk memproduksi *bio-oil*. Sementara itu pada ukuran partikel yang lebih kecil (35-60 mesh), diperoleh *bio-oil* tertinggi pada waktu tahan 20 menit yaitu sebesar 15,10% lebih rendah dibandingkan ukuran partikel yang lebih besar. Grafik diatas menunjukkan bahwa peningkatan waktu tahan dan ukuran partikel yang lebih besar meningkatkan *yield bio-oil*, sedangkan ukuran partikel yang lebih kecil menghasilkan *bio-oil* yang lebih sedikit dikarenakan laju reaksi yang lebih cepat. Selisih untuk produk *bio-oil* tertinggi ukuran partikel 18-35 dan 35-60 mesh dengan waktu tahan 20 menit yaitu sebesar

3,70%. Grafik di atas menunjukkan pentingnya memilih ukuran partikel dan waktu tahan yang tepat untuk memaksimalkan produksi *bio-oil* dari *microwave pyrolysis* limbah sekam padi. Kemudian produk *bio-oil* yang dihasilkan dalam proses *microwave pyrolysis* ditunjukkan pada gambar 6 dan gambar 7 sebagai berikut.



Gambar 6. *Bio-oil* ukuran partikel 18-35 mesh, dengan holding time (a) 5 menit (b) 10 menit (c) 15 menit (d) 20 menit



Gambar 7. *Bio-oil* ukuran partikel 35-60 mesh, dengan holding time (a) 5 menit (b) 10 menit (c) 15 menit (d) 20 menit

Gambar 6 menunjukkan ukuran partikel 18-35 mesh mengalami peningkatan jumlah *bio-oil* seiring bertambahnya waktu tahan. Botol (a) dengan waktu tahan 5 menit menghasilkan produk *bio-oil* sebesar 9,90 %, botol (b) waktu tahan 10 menit menghasilkan 13,70%, botol (c) waktu tahan 15 menit memperoleh 17,90 %, dan botol (d) sebanyak 18,80% dengan waktu tahan 20 menit. Begitupun pada ukuran partikel 35-60 mesh dengan jumlah *bio-oil* yang dihasilkan meningkat seiring bertambahnya waktu tahan, walaupun hasil *bio-oil* yang diperoleh tidak sebanyak 18-35 mesh. Gambar 7 menunjukkan, pada botol (a) dengan waktu tahan 5 menit menghasilkan produk *bio-oil* sebesar 9,70%, botol (b) waktu tahan 10 menit menghasilkan 11,60%, botol (c) waktu tahan 15 menit memperoleh 14,60%, dan botol (d) sebanyak 15,10% dengan waktu tahan 20 menit. Secara keseluruhan hasil produk *bio-oil* yang diperoleh, menunjukkan bahwa ukuran partikel dan waktu tahan mempengaruhi jumlah *bio-oil* yang dihasilkan. Kemudian rumus untuk menghitung persentase *yield* produk *bio-oil* ($Y_{bio-oil}$) diperoleh dengan persamaan (2) sebagai berikut:

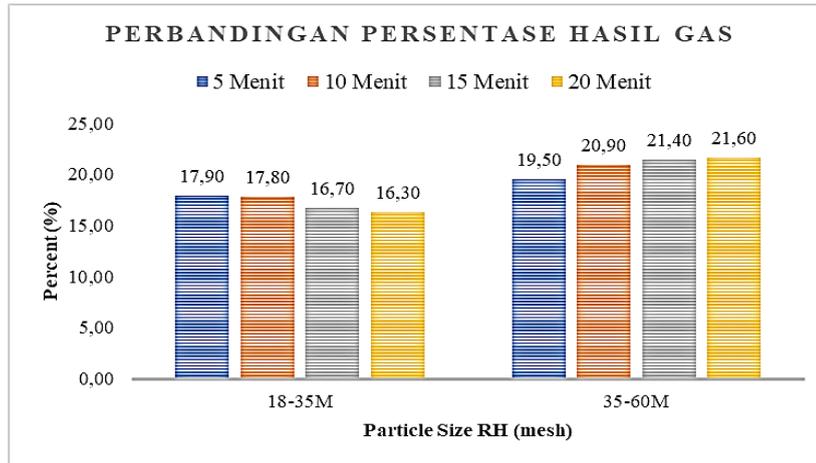
$$Y_{bio-oil}(\%) = \frac{\text{massa produk dalam fase cair (gram)}}{\text{massa awal bahan baku pirolisis (gram)}} \times 100\% \dots\dots\dots(2)$$

3.3 Produk Gas Pirolisis

Diperoleh produk gas dari *microwave pyrolysis* limbah sekam padi, seperti pada tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan Produk Gas Pirolisis

<i>Particle Size</i>	<i>Holding Time</i>			
	5 Menit (%)	10 Menit (%)	15 Menit (%)	20 Menit (%)
RH 18-35M	17,90	17,80	16,70	16,30
RH 35-60M	19,50	20,90	21,40	21,60



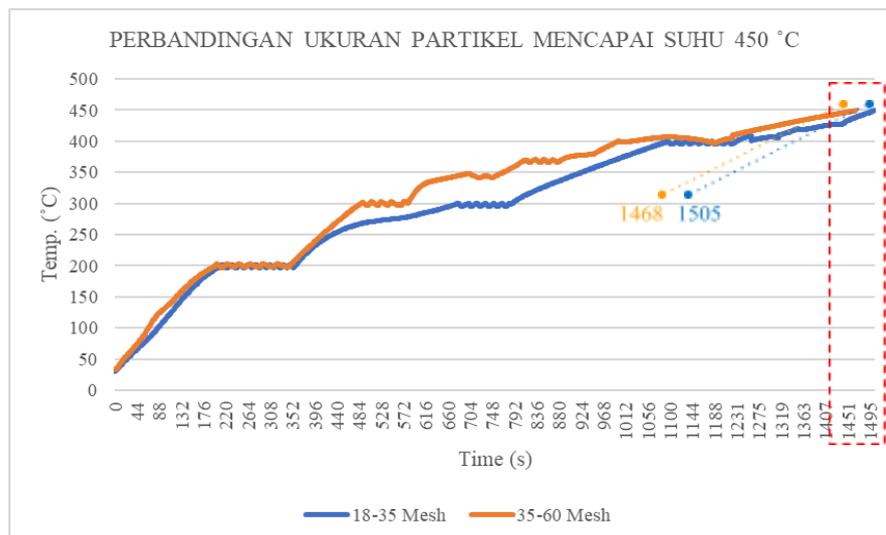
Gambar 8. Perbandingan Persentase Hasil Gas Pirolisis

Berdasarkan gambar 8, proporsi gas pirolisis *microwave* sekam padi yang dihasilkan bervariasi tergantung pada ukuran partikel dan waktu tahan pengujian. Partikel berukuran 18-35 *mesh* menghasilkan persentase gas tertinggi sebesar 17,90% pada waktu tahan 5 menit. Persentase tersebut menurun seiring bertambahnya waktu tahan hingga mencapai nilai terendah sebesar 16,30% pada waktu tahan 20 menit. Berbanding terbalik terhadap ukuran partikel 35-60 *mesh*, dimana persentase gas terendah (19,50%) tercatat pada waktu tahan 5 menit dan meningkat hingga mencapai puncak tertinggi 21,60% pada waktu tahan 20 menit. Produk gas tertinggi yang dihasilkan oleh partikel berukuran 35-60 *mesh* dibandingkan dengan partikel berukuran 18-35 *mesh* pada waktu tahan yang sama yaitu 20 menit, menunjukkan selisih sebesar 5,30%. Hasil ini menunjukkan bahwa ukuran partikel dan waktu tahan pirolisis mempengaruhi proporsi gas yang dihasilkan. Waktu tahan yang lebih lama pada partikel 35-60 *mesh* cenderung meningkatkan produksi gas, karena peningkatan dekomposisi senyawa volatil yang terjadi lebih cepat pada ukuran partikel yang lebih halus. Sebaliknya untuk partikel berukuran lebih besar yaitu 18-35 *mesh* menghasilkan gas dengan persentase yang lebih rendah seiring dengan waktu tahan yang lebih lama yaitu 20 menit, menunjukkan bahwa proses pirolisis berlangsung lebih lambat. Berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan, setelah waktu tahan 15 menit untuk produksi gas yang dihasilkan dalam proses pirolisis *microwave* semakin sedikit dan mulai habis. Kemudian rumus untuk menghitung persentase *yield* produk gas (Y_{gas}) diperoleh dengan persamaan (3) sebagai berikut:

$$Y_{gas}(\%) = 100\% - Y_{cair}(\%) - Y_{padat}(\%) \dots\dots\dots(3)$$

3.4 Ukuran Partikel dalam Mencapai Suhu 450 °C

Diperoleh perbandingan ukuran partikel dalam mencapai suhu 450 °C, seperti pada gambar 9.



Gambar 9. Perbandingan Ukuran Partikel dalam Mencapai Suhu 450 °C

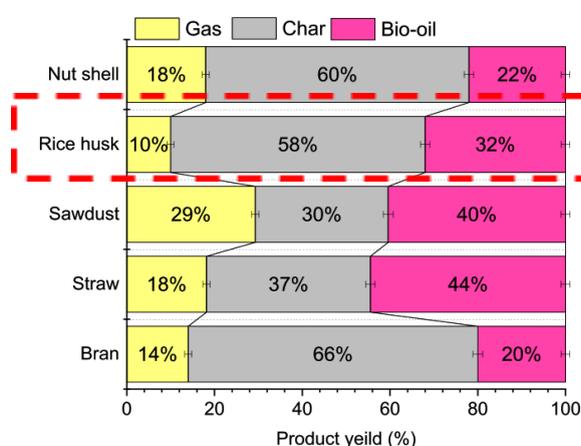
Data logger GL240 yang dihubungkan dengan *thermocouple* untuk mendeteksi panas di dalam reaktor *microwave* primer selama proses pirolisis. Berdasarkan grafik gambar 9 menunjukkan perbandingan ukuran

partikel dalam mencapai suhu 450 °C pada proses *microwave pyrolysis* sekam padi antara dua ukuran *mesh*, yaitu 18-35 *mesh* (garis biru) dan 35-60 *mesh* (garis oranye). Grafik diatas menjelaskan bahwa ukuran 35-60 *mesh* mencapai suhu target lebih cepat dibandingkan ukuran 18-35 *mesh*. Pemanasan awal pada kedua ukuran *mesh* mengalami peningkatan suhu dengan kecepatan yang serupa hingga mencapai 250 °C, namun setelah itu ukuran 35-60 *mesh* terus mengalami peningkatan suhu yang lebih cepat dan stabil. Sementara itu, ukuran 18-35 *mesh* menunjukkan beberapa fluktuasi sebelum akhirnya mencapai suhu target yaitu 450 °C. Perbedaan ini disebabkan karena ukuran partikel yang lebih kecil pada 35-60 *mesh* memungkinkan penyerapan panas lebih cepat dan merata, sehingga untuk mencapai suhu 450 °C memerlukan waktu lebih singkat dibandingkan dengan ukuran *mesh* yang lebih besar. Selisih waktu yang dibutuhkan antara ukuran partikel 18-35 dan 35-60 *mesh* yaitu 37 detik untuk mencapai temperatur 450 °C.

3.5 Perbandingan Hasil Penelitian dengan Hasil Penelitian Terdahulu

Penelitian *microwave pyrolysis* biomassa sekam padi yang dicampur dengan *absorber* untuk menghasilkan produk *biochar*, *bio-oil*, dan gas. Penelitian ini menggunakan limbah sekam padi dengan massa 100 gram, serta menambahkan SiC sebagai *absorber* dengan massa yang sama yaitu 100 gram. *Microwave* dengan daya sebesar 1250 W ditahan/dijaga pada temperatur 450 °C, sedangkan variasi *holding time* pengujian adalah 5, 10, 15, dan 20 menit pada *particle size* limbah sekam padi 18-35 dan 35-60 *mesh*. *Holding time* 10-15 menit untuk ukuran partikel 18-35 *mesh* rata-rata memperoleh produk *biochar* sebesar 66,95%, *bio-oil* 15,80%, dan gas 17,25%. Selain itu, ukuran partikel 35-60 *mesh* pada waktu 10-15 menit rata-rata memperoleh produk *biochar* sebesar 65,75%, *bio-oil* 13,10%, dan gas 21,15%.

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh (Fricler dkk., 2023) menggunakan *microwave pyrolysis* biomassa sekam padi yang dicampur dengan air keran sebagai *absorber*. Sementara itu, berat total sampel pirolisis dalam setiap pengujian adalah 10 gram (6 gram sekam padi dan 4 gram *absorber*), dengan proses pirolisis dilakukan menggunakan *microwave* berdaya 700 W. Kemudian *holding time* rata-rata yang diterapkan dalam proses ini adalah 10-15 menit, sementara ukuran partikel sekam padi yang digunakan sebesar 800 µm. Persentase hasil yang diperoleh seperti pada gambar 10.



Gambar 10. Produk *Microwave Pyrolysis* dengan Berbagai Jenis Biomassa (ukuran partikel 800 µm dan air keran sebagai *absorber*) (Fricler dkk., 2023)

Sekam padi ukuran partikel 800 µm dengan *holding time* rata-rata 10-15 menit menghasilkan produk *biochar* sebesar 58,00%, *bio-oil* 32,00%, dan gas 10,00%. Kemudian hasil penelitian ini dengan hasil penelitian terdahulu memiliki kesamaan produk *biochar* yang mendominasi dibandingkan dengan hasil *bio-oil*, dan gas yaitu sebesar ± 60,00%. Sementara itu, penelitian dengan menggunakan SiC *absorber* memperoleh hasil *bio-oil* lebih sedikit dibandingkan dengan produk gas. Hal ini berbanding terbalik dengan menggunakan air keran *absorber* yang menghasilkan persentase hasil *bio-oil* lebih tinggi dibandingkan dengan produk gas.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini mengkaji proses *microwave pyrolysis* terhadap konversi limbah sekam padi menjadi produk energi terbarukan berupa *biochar*, *bio-oil*, dan gas dengan penambahan silikon karbida (SiC) sebagai *absorber*, serta menggunakan reaktor *microwave* primer dan katalis zeolit alam pada reaktor *oven* sekunder. Sementara itu, variasi *holding time* pengujian adalah 5, 10, 15, dan 20 menit, sedangkan *particle size* limbah sekam padi adalah 18-35 dan 35-60 *mesh*. Berdasarkan hasil eksperimen, menunjukkan bahwa variasi ukuran partikel dan waktu tahan berpengaruh besar terhadap distribusi produk yang dihasilkan. Ukuran partikel 18-35 *mesh* mencapai hasil

biochar dengan nilai tertinggi yaitu sebesar 72,20% pada waktu tahan 5 menit. Disimpulkan bahwa ukuran partikel yang lebih besar dengan waktu tahan singkat lebih cocok untuk memproduksi *biochar*. Hasil eksperimen menunjukkan pada waktu tahan yang lebih singkat mengakibatkan *biochar* terlihat lebih kasar dan berwarna lebih coklat, sedangkan waktu tahan yang lebih lama menghasilkan *biochar* dengan struktur lebih padat dan warna yang lebih gelap. Kemudian produk *bio-oil* tertinggi sebesar 18,80% diperoleh pada ukuran partikel 18-35 *mesh* dengan waktu tahan 20 menit, karena reaksi pirolisis yang lebih lambat berperan dalam meningkatkan produksi *bio-oil* dibandingkan dengan ukuran partikel 35-60 *mesh*. Sementara itu, produksi gas tertinggi sebesar 21,60% diperoleh pada ukuran partikel 35-60 *mesh* dengan waktu tahan 20 menit. Berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan, setelah waktu tahan 15 menit untuk produksi gas yang dihasilkan dalam proses pirolisis *microwave* semakin sedikit dan mulai habis. Kemudian untuk ukuran partikel 35-60 *mesh* lebih cepat 37 detik dalam mencapai suhu 450 °C dibandingkan dengan ukuran partikel 18-35 *mesh*. Kemudian hasil penelitian ini dengan hasil penelitian terdahulu memiliki kesamaan produk *biochar* yang mendominasi yaitu sebesar ± 60,00%, dibandingkan dengan hasil *bio-oil*, dan gas. Sementara itu, penelitian dengan menggunakan SiC sebagai *absorber* memperoleh hasil *bio-oil* yang lebih sedikit dibandingkan dengan produk gas. Sebaliknya, penggunaan air keran sebagai *absorber* menghasilkan persentase *bio-oil* yang lebih tinggi dibandingkan produk gas. Penelitian ini menunjukkan bahwa konfigurasi ukuran partikel dan waktu tahan dapat dioptimalkan sesuai dengan jenis produk energi terbarukan yang diinginkan. Kesimpulannya, produk *biochar*, *bio-oil*, dan gas limbah sekam padi dengan *microwave pyrolysis* memiliki potensi yang besar untuk diterapkan dalam pengolahan limbah biomassa menjadi sumber energi alternatif yang ramah lingkungan, sehingga mendukung transisi energi yang lebih berkelanjutan di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

- Amjith, L. R., dan Bavanish, B. (2022). A review on biomass and wind as renewable energy for sustainable environment. *Chemosphere*, 293. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133579>.
- Fang, Z., Liu, F., Li, Y., Li, B., Yang, T., dan Li, R. (2021). Influence of microwave-assisted pyrolysis parameters and additives on phosphorus speciation and transformation in phosphorus-enriched biochar derived from municipal sewage sludge. *Journal of Cleaner Production*, 287. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125550>.
- Fricler, V. Y., Nyashina, G. S., Vershinina, K. Y., Vinogradskiy, K. V., Shvets, A. S., dan Strizhak, P. A. (2023). Microwave pyrolysis of agricultural waste: Influence of catalysts, absorbers, particle size and blending components. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 171. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105962>.
- Hendrawati, Liandi, A. R., Solehah, M., Setyono, M. H., Aziz, I., dan Siregar, Y. D. I. (2023). Pyrolysis of PP and HDPE from plastic packaging waste into liquid hydrocarbons using natural zeolite Lampung as a catalyst. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100290>.
- Hu, J., He, Y., Zhang, J., Chen, L., Zhou, Y., Zhang, J., Tao, H., Zhou, N., Mi, B., dan Wu, F. (2023). In-situ catalytic pyrolysis of biomass with nickel salts: Effect of nickel salt type. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 172. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106029>.
- Liang J, Shan G, Sun Y. (2021). Catalytic fast pyrolysis of lignocellulosic biomass: Critical role of zeolite catalysts. *Renew Sustain Energy Rev* 2021;139:110707.
- Nzediegwu C, Arshad M, Ulah A, Naeth MA, Chang SX. (2021). Fuel, thermal and surface properties of microwave-pyrolyzed biochars depend on feedstock type and pyrolysis temperature. *Bioresour Technol* 2021;320:124282. <https://doi.org/10.1016/j.BIORTECH.2020.124282>.
- Omri, A., dan Ben Jabeur, S. (2024). Climate policies and legislation for renewable energy transition: The roles of financial sector and political institutions. *Technological Forecasting and Social Change*, 203. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123347>.
- Park, K. B., Chae, D. Y., Fini, E. H., dan Kim, J. S. (2024). Pyrolysis of biomass harvested from heavy-metal contaminated area: Characteristics of bio-oils and biochars from batch-wise one-stage and continuous two-stage pyrolysis. *Chemosphere*, 355. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141715>.
- Rajamanikandan, T., Banumathi, S., Karthikeyan, B., Palanisamy, R., Bajaj, M., Zawbaa, H. M., dan Kamel, S. (2023). Investigation of dielectric and mechanical properties of Lignocellulosic Rice Husk Fibril for high and medium voltage electrical insulation applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 22, 865–878. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.145>.
- Ruiz, B., Fuente, E., Pérez, A., Taboada-Ruiz, L., Sanz, J. M., Calvo, L. F., dan Paniagua, S. (2023). Employment of conventional and flash pyrolysis for biomass wastes from the textile industry with sustainable prospects. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105864>.

- Sharma P, Gedanken A, Chowdhury Asif F, Saha GC. (2023). Graphene-like Carbon Structure Synthesis from Biomass Pyrolysis: A Critical Review on Feedstock–Process–Properties Relationship. *Vol 9*, Page 31 2023;9:31.10.3390/C9010031.
- Sui, H., Hu, Q., Chen, W., Chang, C., Pang, S., & Li, P. (2024). Microwave-assisted catalytic pyrolysis with char-supported Fe-Mn catalysts: A new method for utilizing furfural residue. *Fuel*, 362. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130820>.
- Yana, S., Nizar, M., Irhamni, dan Mulyati, D. (2022). Biomass waste as a renewable energy in developing bio-based economies in Indonesia: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol. 160)*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112268>.
- Zhou, Y., Lin, F., Ling, Z., Zhan, M., Zhang, G., dan Yuan, D. (2024). Comparative study by microwave pyrolysis and conventional pyrolysis of pharmaceutical sludge: Resourceful disposal and antibiotic adsorption. *Journal of Hazardous Materials*, 468. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133867>.