

# INOVASI REAKTOR PIROLISIS PRODUKSI BIOCHAR BERBAHAN BAKU ORGANIC WASTE SLURRY DARI SAMPAH PERKOTAAN TERPILAH DENGAN KONTROL TEKANAN

<sup>1</sup>Tris Sugiarto, <sup>2</sup>Junun Sartohadi, <sup>3</sup>Nur Ainun Harlin Jennie Pulungan, <sup>4</sup>Ngadisih, <sup>5</sup>YB Praharto, <sup>6</sup>Nurul Hidayati

<sup>1,5,6</sup>Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknik Wiworotomo Purwokerto, Indonesia

<sup>2,3,4</sup>Magister Ilmu Tanah, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, Indonesia

<sup>1</sup>[trissugiarto@stt-wiworotomo.ac.id](mailto:trissugiarto@stt-wiworotomo.ac.id)

<sup>2</sup>[junun@ugm.ac.id](mailto:junun@ugm.ac.id)

<sup>3</sup>[nurainun.pulungan@ugm.ac.id](mailto:nurainun.pulungan@ugm.ac.id)

<sup>4</sup>[ngadisih@ugm.ac.id](mailto:ngadisih@ugm.ac.id)

<sup>5</sup>[prharto@stt-wiworotomo.ac.id](mailto:prharto@stt-wiworotomo.ac.id)

<sup>6</sup>[nurulhidayati@stt-wiworotomo.ac.id](mailto:nurulhidayati@stt-wiworotomo.ac.id)

Email Koresponding: [trisugiarto@stt-wiworotomo.ac.id](mailto:trisugiarto@stt-wiworotomo.ac.id)

## ABSTRAK

Penerapan teknologi ini bertujuan mengembangkan reaktor pirolisis Organic Waste Slurry, yang dirancang untuk mengonversi sampah organik perkotaan menjadi biochar berkualitas tinggi, dengan sistem kontrol tekanan self-sufficient untuk efisiensi energi. Metode yang digunakan dalam penelitian ini mencakup uji performa reaktor pirolisis yang dilengkapi dengan kontrol suhu otomatis dan sistem pemanfaatan gas pirolisis sebagai bahan bakar internal. Sampah organik diolah pada temperatur pirolisis antara 400–500°C untuk menghasilkan biochar dengan kandungan karbon tetap tinggi. Pengujian dilakukan pada beberapa sampel tanah dengan tambahan biochar untuk mengevaluasi dampaknya terhadap retensi air dan ketersediaan unsur hara. Hasil penelitian menunjukkan bahwa biochar dari reaktor Organic Waste Slurry memiliki kandungan karbon tetap sekitar 65–70%, serta stabilitas fisik dan kimia yang optimal untuk digunakan sebagai amandemen tanah. Biochar ini meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK) tanah hingga 30% dan meningkatkan kadar air tanah hingga 15% dibandingkan kontrol tanpa biochar. Secara kuantitatif, reaktor ini berhasil mengurangi volume limbah organik hingga 50% dan menghasilkan biochar yang memperbaiki kesuburan tanah, dengan dampak positif terhadap produktivitas pertanian perkotaan. Mekanisme dan proses pada reaktor pirolisis Organic Waste Slurry terbukti efektif sebagai solusi pengelolaan limbah organik perkotaan, mengurangi emisi karbon, serta meningkatkan kualitas tanah secara berkelanjutan. Teknologi ini menunjukkan tren positif dalam efisiensi energi dan aplikasi pertanian lingkungan dan ketahanan pangan.

**Kata kunci:** Biochar, Efisiensi Energi, *Organic Waste Slurry*, Pirolisis, *Self-Sufficient*

## 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pengolahan limbah organik melalui konversi menjadi biochar dengan metode pirolisis semakin mendapat perhatian dalam pengelolaan limbah perkotaan yang berkelanjutan serta dalam upaya meningkatkan kualitas tanah yang terdegradasi. Pirolisis merupakan proses pemanasan biomassa dalam kondisi terbatas oksigen, yang menghasilkan biochar, bio-oil, dan syngas sebagai produk utama. Proses ini menjanjikan tidak hanya sebagai solusi untuk pengurangan limbah tetapi juga sebagai metode untuk meningkatkan kualitas tanah, terutama di daerah-daerah yang rawan erosi dan penurunan hara tanah akibat banjir atau aktivitas pertanian yang intensif (Li et al., 2018; Andreas Hagenbo, et.al 2022).

Biochar adalah residu karbon padat yang memiliki porositas tinggi dan struktur yang stabil, yang menjadikannya mampu menyerap dan menahan air serta nutrisi di dalam tanah (Ndoung et

al., 2021). Penelitian oleh (Ilyas et al., 2021) menunjukkan bahwa biochar dapat meningkatkan kapasitas Cation Exchange Capacity, (CEC) di tanah, sehingga meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi tanaman. Selain itu, biochar juga berfungsi untuk memperbaiki struktur tanah dengan menambah aerasi dan kapasitas retensi air. Aplikasi biochar secara luas telah terbukti meningkatkan hasil pertanian, terutama di lahan-lahan kritis yang mengalami degradasi struktur dan kandungan organik tanah (Fidel et al., 2018; Major et al., 2010).

Kendati pirolisis merupakan metode yang efektif untuk mengolah limbah organik, salah satu kendala utama adalah kebutuhan energi yang tinggi, yang biasanya masih bergantung pada bahan bakar eksternal. Banyak reaktor pirolisis konvensional memerlukan energi tambahan untuk mempertahankan suhu yang stabil selama proses pirolisis, yang menyebabkan biaya operasional menjadi tinggi (Bahng, M., et.al, 2009; Sahar Safarian, 2023). Hal ini terutama disebabkan oleh sifat endothermik dari pirolisis, yang memerlukan suplai panas yang konsisten agar dekomposisi termal dapat berjalan optimal. Berdasarkan penelitian (V. I. Kovenskii, et.al, 2010; Kinney, T.J., et.al, 2012; Manyà et al., 2018), kebutuhan energi ini dapat mencapai 30–50% dari total biaya operasi pirolisis, tergantung pada jenis dan kelembaban bahan baku. Untuk menjawab tantangan ini, reaktor pirolisis Organic Waste Slurry (OWS), dikembangkan dengan teknologi kontrol tekanan yang memungkinkan sistem bekerja secara mandiri tanpa membutuhkan bahan bakar eksternal. Inovasi ini memanfaatkan gas metana dan senyawa hidrokarbon lain yang dihasilkan selama proses pirolisis sebagai sumber panas internal.

Metana dan senyawa hidrokarbon volatil lainnya dihasilkan dari pirolisis limbah organik yang mengandung bahan-bahan karbon yang mudah terbakar (Zhiwei Wang, et.al, 2021). Dengan mengalirkan kembali gas-gas ini ke dalam ruang pembakaran, reaktor BURSAM dapat mempertahankan suhu yang optimal untuk pirolisis secara mandiri, mengurangi kebutuhan energi tambahan hingga 40% dibandingkan dengan sistem konvensional (Jindo et al., 2020). Sistem kontrol tekanan yang terintegrasi di dalam reaktor ini juga memastikan bahwa tekanan internal tetap stabil, yang berperan penting dalam menjaga kestabilan proses pirolisis. Sistem kontrol tekanan bertujuan untuk meningkatkan efisiensi pirolisis dengan mengurangi fluktuasi suhu yang biasanya terjadi pada reaktor tanpa kontrol tekanan. Hal ini tidak hanya meningkatkan efisiensi energi tetapi juga memastikan kualitas produk biochar yang konsisten. Stabilitas suhu dan tekanan ini membantu menghasilkan biochar dengan kandungan karbon yang tinggi dan struktur yang porus, yang sangat penting untuk aplikasi perbaikan tanah,

Penggunaan reaktor pirolisis self-sufficient seperti BURSAM tidak hanya mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil tetapi juga memiliki potensi untuk mereduksi emisi karbon. Proses pirolisis mengkonversi karbon dari biomassa menjadi bentuk yang stabil di dalam biochar, yang berpotensi menyimpan karbon di tanah dalam jangka waktu lama dan membantu mengurangi konsentrasi CO<sub>2</sub> di atmosfer, (David Lefebvre, et.al, 2023). Dengan demikian, biochar berperan sebagai penyimpan karbon yang efektif dan dapat mendukung target pengurangan emisi karbon dalam program mitigasi perubahan iklim (Domingues et al., 2020). Selain itu, dengan adanya produk samping seperti bio-oil dan syngas yang dapat digunakan sebagai bahan bakar atau bahan baku energi lainnya, teknologi pirolisis WOS memberikan manfaat ekonomi tambahan bagi masyarakat. Penerapan teknologi ini dalam skala lokal di daerah pedesaan memungkinkan pemanfaatan bahan baku limbah organik secara efisien, yang tidak hanya mendukung ekonomi lokal tetapi juga berkontribusi pada keberlanjutan lingkungan (Jindo et al., 2020). Sebagai produk utama dari pirolisis, biochar memiliki banyak manfaat bagi tanah, terutama di lahan-lahan yang mengalami degradasi akibat praktik pertanian yang kurang ramah lingkungan atau bencana banjir.

Biochar yang diterapkan di lahan pertanian dapat mengurangi keasaman tanah, meningkatkan kapasitas penyerapan air, dan memperbaiki struktur fisik tanah (Adekiya et al., 2020).. Di lahan yang terdegradasi, biochar juga membantu meningkatkan aktivitas mikroba tanah, yang berperan penting dalam siklus nutrisi tanah dan mendukung pertumbuhan tanaman, potensi biochar dapat meningkatkan produktivitas lahan kritis hingga 25%, sehingga menjadikannya solusi potensial dalam peningkatan ketahanan pangan di wilayah rawan degradasi tanah. Dengan menggabungkan inovasi self-sufficient dalam reaktor pirolisis WOS dan manfaat biochar sebagai amandemen tanah, teknologi ini menawarkan solusi terpadu untuk mengatasi

tantangan pengelolaan limbah perkotaan sekaligus mendukung perbaikan kualitas tanah. Penerapan teknologi ini tidak hanya mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan emisi karbon, tetapi juga memberikan dampak positif jangka panjang pada ekosistem tanah dan produktivitas pertanian. Berdasarkan berbagai penelitian, pirolisis berbasis biochar seperti yang diterapkan pada reaktor WOS ini memiliki potensi besar dalam pengembangan pertanian berkelanjutan dan pengelolaan limbah yang ramah lingkungan.

Pengembangan reaktor pirolisis ini mempertimbangkan beberapa faktor dan level proses utama yaitu Suhu Pirolisis, sehingga perlu identifikasi pengaruh suhu terhadap kualitas biochar dianalisis, dengan fokus pada peningkatan kandungan karbon tetap dan stabilitas struktur. Pada reaktor yang diatur dengan kondisi bertekanan dan Sistem Self-Sufficient, Sistem kontrol tekanan diintegrasikan untuk memanfaatkan gas hasil pirolisis sebagai bahan bakar, mengurangi kebutuhan energi eksternal. Pengaruh lain yang penting untuk ditemukan adalah variasi komposisi sampah organik diuji untuk menentukan pengaruhnya terhadap kualitas biochar. Penekanan pada efisiensi penggunaan energi dan kestabilan proses yang mendukung operasional mandiri.

## 1.2 Tujuan Penelitian

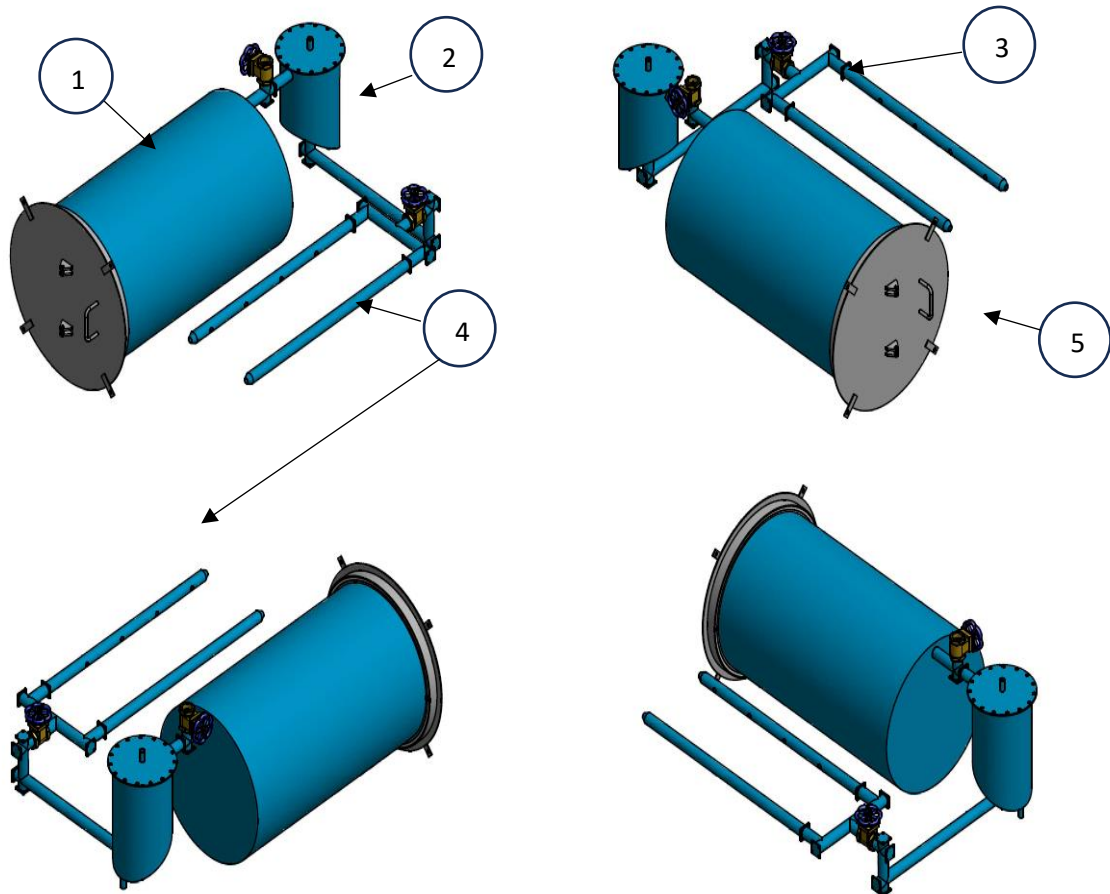
Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan biochar melalui pirolisis limbah organik dalam rangka meningkatkan efektivitas pengelolaan limbah sekaligus menghasilkan produk dengan potensi sebagai amandemen tanah. Kedua Mengidentifikasi pengaruh suhu terhadap kualitas biochar dianalisis, dengan fokus pada peningkatan kandungan karbon tetap dan stabilitas struktur. Ketiga adalah mengukur efektifitas kinerja reaktor yang diatur dengan kondisi bertekanan untuk mendukung Sistem Self-Sufficient, sistem kontrol tekanan diintegrasikan untuk memanfaatkan gas hasil pirolisis sebagai bahan bakar.

## 2. METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan di laboratorium teknologi energi terbarukan STT Wiworotomo dan Universitas Gajah Mada. Mesin uji menggunakan reaktor pirolisis WOS yang dirancang khusus untuk proses ini. Tahapan penelitian adalah sebagai berikut:

### 2.1 Desain dan Pembuatan Reaktor Pirolisis

Reaktor pirolisis yang digunakan dirancang dengan spesifikasi tabung mendatar berkapasitas 50 kg limbah organik per batch. Tabung ini dilengkapi dengan sistem tekanan yang dirancang untuk bekerja secara self-sufficient, memanfaatkan gas hasil pirolisis sebagai bahan bakar internal sehingga dapat meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar eksternal. Inovasi reaktor pirolisis biomassa yang dirancang untuk mengolah sampah organik dari perkotaan (Bursam) dengan efisien, memanfaatkan desain tabung mendatar berdiameter 760 mm dan panjang 120 mm. Reaktor ini dioperasikan pada tekanan 3 bar dan suhu 300°C, memungkinkan proses pirolisis yang optimal untuk menghasilkan biochar, gas pirolisis, dan cairan pirolisis sebagai produk utama. Desain reaktor ditunjukkan Gambar 1.



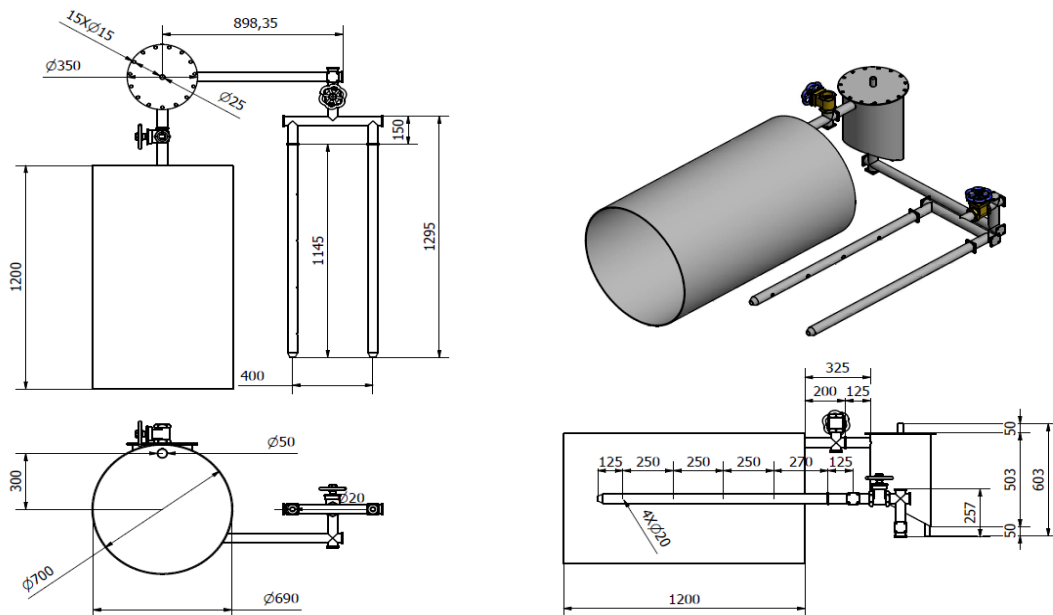
**Gambar 1. Desain reaktor biomassa dengan tekanan diatur 3 bar**

Keterangan Gambar :

- 1 Reaktor biomassa diemeter 760 mm x 1200 mm
- 2 Tabung fraksi gas
- 3 Valve pengatur tekanan
- 4 Pipa distribusi uap dari reactor ke ruang burner
- 5 Tutup reactor dengan sealer
- 6 Ruang bagian dalam reaktor

Reaktor ini dirancang dalam bentuk tabung mendatar dengan diameter 760 mm dan panjang 1200 mm, beroperasi pada tekanan 3 bar dan suhu ruang pemanas 300°C. Desain ini memanfaatkan uap yang dihasilkan selama proses pirolisis, yang kemudian dialirkan melalui katup untuk membantu pembakaran sampah residu di ruang pembakaran. Desain reaktor memenuhi standar pengujian internasional, seperti ASTM D3173 untuk spesifikasi struktur reaktor, dan dilengkapi dengan sistem kontrol otomatis untuk memantau suhu dan tekanan selama proses berlangsung. Sensor tekanan dan suhu ditempatkan di dalam reaktor untuk memantau perubahan lingkungan, sementara sistem kontrol otomatis ini memastikan proses pirolisis tetap stabil di suhu yang diinginkan tanpa memerlukan intervensi manual. Beberapa keunggulan dari desain ini adalah (1). Desain Tabung Mendatar: Desain ini berbeda dengan reaktor pirolisis pada umumnya yang berbentuk vertikal atau menggunakan mekanisme berputar. Desain tabung mendatar memungkinkan distribusi panas yang lebih merata, sehingga proses pirolisis dapat berjalan lebih efisien. (2). Penggunaan Uap sebagai Bahan Bakar Pendukung: Salah satu fitur inovatif dari reaktor ini adalah pemanfaatan uap hasil pirolisis sebagai bahan bakar pendukung dalam proses pembakaran sampah residu. Uap tersebut dialirkan melalui katup dan diarahkan ke

ruang pembakaran, yang secara signifikan meningkatkan efisiensi proses dan mengurangi kebutuhan bahan bakar eksternal. (3). Pengendalian Suhu dan Tekanan yang Optimal, dengan pengaturan suhu pada 300°C dan tekanan 3 bar dirancang khusus untuk bahan baku sampah organik perkotaan, yang memiliki karakteristik kadar air yang tinggi. Desain dan dimensi kerja ditunjukkan Gambar 2.



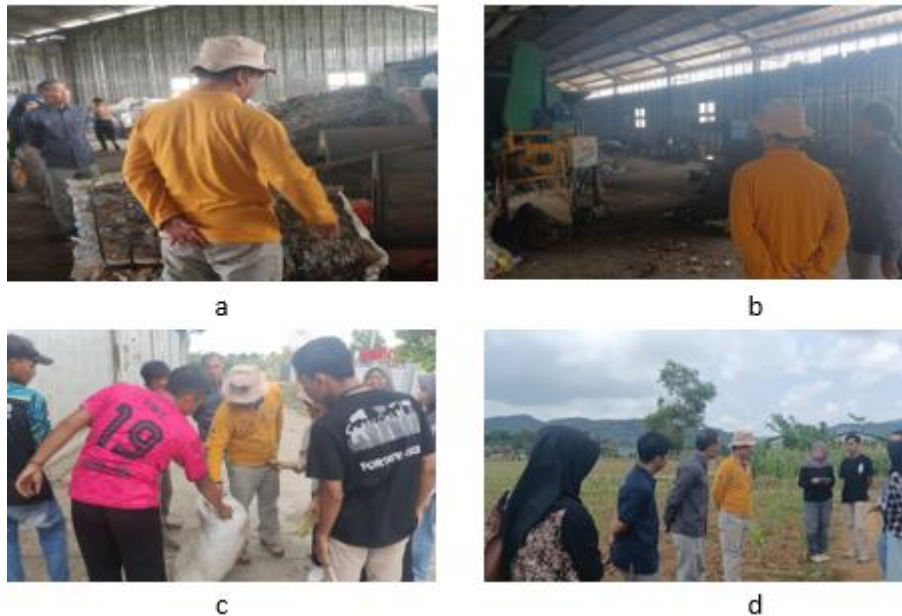
**Gambar 2. Desain Teknik reaktor biomassa dengan tekanan diatur 3 bar**

Proses pembuatan reactor ditunjukkan Gambar 3.



**Gambar 3. Pembuatan reactor biomassa (Lab. STT Wwiworotomo Purwokerto)**

Limbah organik diproses dalam reaktor pirolisis pada suhu antara 450-550°C dengan waktu reaksi selama 3-4 jam, bergantung pada karakteristik sampah organik yang digunakan. Tahap ini mengikuti standar ASTM D7582-12 untuk pengujian termal sampel organik. Sistem pirolisis dijalankan dengan pemanasan awal hingga suhu yang diinginkan tercapai, kemudian gas pirolisis yang dihasilkan dikendalikan dan dialirkan kembali ke ruang pemanas untuk mendukung pembakaran internal. Pengambilan sampel dari TPS3R Rawalo, Banyumas, seperti ditunjukkan Gambar 4.



**Gambar 4. Pengambilan data specimen organic slurry di TPS3R Rawalo, (a). Pemilihan bahan baku, (b). Mesin pemilah dan pencacah yang digunakan, (c). Sampel diambil untuk dianalisis, (d). Penerapan pada lahan.**

Tekanan dalam reaktor diatur pada kisaran 3 bar untuk mencegah kebocoran gas dan memastikan reaksi pirolisis berlangsung secara optimal. Selain itu, laju aliran gas pirolisis diukur dan dikontrol untuk menjaga konsistensi energi panas yang masuk ke dalam sistem. Dengan adanya mekanisme kontrol tekanan otomatis, reaktor mampu mempertahankan pembakaran stabil, yang pada gilirannya mempengaruhi kualitas produk akhir biochar dan efisiensi energi keseluruhan.

## 2.2 Preparasi uji Karakteristik Biochar

Biochar yang dihasilkan dari proses pirolisis kemudian dianalisis untuk mengukur sifat fisis dan kimia yang mendukung kemampuannya sebagai amandemen tanah. Pengujian meliputi:

- 1 Kandungan Karbon Tetap, diukur menggunakan standar ASTM D3172, yang mencerminkan stabilitas biochar di dalam tanah dan kapasitasnya sebagai penyimpan karbon jangka panjang. Preparasi bahan baku dengan meminimalkan kandungan residu plastik dan an organik ditunjukkan Gambar 5.



**Gambar 5. Preparasi bahan biomass untuk menghilangkan dan mengukur kadar residu an organik pada WOS, (Lab. Fisika Tanah, UGM)**

- 2 Porositas dan Struktur Pori dengan menganalisis porositas dilakukan menggunakan standar BET (Brunauer, Emmett, and Teller) sesuai dengan ASTM D6556. Parameter diidentifikasi karena porositas biochar berkontribusi terhadap kapasitas biochar untuk mempertahankan kelembapan dan meningkatkan retensi air tanah.
- 3 Kapasitas Tukar Kation (CEC) yang diukur berdasarkan metode standar ASTM D7503, untuk menentukan kapasitas biochar dalam mempertahankan unsur hara yang dibutuhkan tanaman. CEC yang tinggi menunjukkan kemampuan biochar untuk meningkatkan kesuburan tanah.

### 2.3 Pengukuran Efisiensi Energi

Untuk mengetahui efisiensi sistem secara keseluruhan, konsumsi energi dan kontribusi gas pirolisis terhadap proses dianalisis secara kuantitatif. Prosedur ini meliputi:

- 1 Pengukuran konsumsi energi eksternal menggunakan alat ukur daya standar energi yang digunakan selama proses pirolisis tercatat untuk menentukan besaran energi eksternal yang digunakan dalam setiap batch. Data ini dianalisis untuk mengetahui efisiensi proses terkait konsumsi energi.



**Gambar 6. Proses penyimpanan biochar (Lab. Fisika Tanah, UGM)**

- 2 Kontribusi Energi dari Gas Pirolisis: Gas pirolisis yang dihasilkan diukur volumenya dan dianalisis kandungan kalorinya berdasarkan standar ASTM D240 untuk menentukan energi

yang dihasilkan dari gas pirolisis. Energi ini kemudian dibandingkan dengan kebutuhan energi total, sehingga dapat dihitung kontribusi gas pirolisis terhadap keseluruhan proses.

- 3 Rasio Penghematan Energi: Berdasarkan data konsumsi energi eksternal dan kontribusi energi dari gas pirolisis, rasio penghematan energi dihitung. Semakin besar kontribusi gas pirolisis, semakin tinggi efisiensi energi sistem. Hal ini penting untuk memahami sejauh mana reaktor pirolisis BURSAM mampu menjalankan proses pirolisis secara mandiri (self-sufficient).

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Hasil penelitian dan penerapan teknologi

**Tabel 1. Data pengukuran kadar air dan kandungan an organik WOS**

No	Kode Spesimen	Pengukuran Kadar air (%)	Pengukuran Kandungan an organik (%)	Kandungan Karbon Tetap (%)
1	SP.O-WOS-1	62	6,6	72
		64	6,2	77
		59	6,5	76
2	SP.O-WOS-2	64	6,4	78
		66	6,3	72
		61	6,1	74
3	SP.O-WOS-3	64	6,6	73
		62	6,3	74
		63,5	6,4	74

**Tabel 2. Data pengukuran porositas (Surface Area of Carbon Black) dan CEC**

No	Kode Spesimen	Uji Porositas (m <sup>2</sup> /g)	CEC (cmol/kg)	Kandungan Energi (MJ/kg)
1	SP.O-WOS-1	423	32	25
		421	36	25,3
		452	33	27,5
2	SP.O-WOS-2	433	36	28
		441	36	29
		436	36,5	28,5
3	SP.O-WOS-3	435	35	27
		443	38	32
		462	37	33

**Tabel 3. Pengukuran efisiensi energi reactor (Waktu reaksi 3-4 jam)**

No	Kode Spesimen	Suhu Proses (°C)	Kontribusi Gas (%)	Efisiensi Energi (%)
1	SP.O-WOS-1	400	20	71
		450	21	72
		500	18	74



### 3.2 Pembahasan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa reaktor pirolisis WOS mampu menghasilkan biochar dengan kualitas tinggi yang ditunjukkan melalui kandungan karbon tetap yang mencapai 70% pada suhu optimal. Kandungan pori biochar memberikan retensi air yang lebih baik, yang berkontribusi terhadap peningkatan kesuburan tanah. Selain itu, sistem kontrol tekanan self-sufficient terbukti mampu mengurangi konsumsi energi hingga 30%, membuat proses ini lebih efisien dibandingkan dengan reaktor pirolisis tradisional yang membutuhkan bahan bakar tambahan. Reaktor pirolisis untuk organic slurry dari sampah perkotaan menunjukkan hasil signifikan dalam mengolah limbah organik menjadi biochar berkualitas tinggi. Dengan kadar karbon tetap mencapai 70% pada suhu optimal, produk biochar yang dihasilkan memiliki karakteristik yang unggul, seperti kemampuan retensi air yang lebih baik dan kandungan pori-pori yang membantu meningkatkan kesuburan tanah. Tingginya kandungan karbon tetap menunjukkan bahwa sebagian besar karbon organik dalam limbah berhasil dikonversi ke bentuk stabil. Ini penting karena biochar yang kaya karbon memiliki kemampuan menyerap dan menyimpan air, meningkatkan porositas tanah, dan menyediakan habitat mikroorganisme yang berguna dalam ekosistem tanah.

Inovasi sistem tekanan self-sufficient pada reaktor pirolisis ini telah terbukti mampu mengurangi konsumsi energi hingga 30% dibandingkan dengan reaktor pirolisis tradisional yang memerlukan bahan bakar tambahan. Keunggulan ini terjadi karena sistem tersebut mampu memanfaatkan gas hasil pirolisis secara optimal sebagai bahan bakar internal. Ini mengurangi kebutuhan energi eksternal dan membuat seluruh proses lebih hemat energi serta ramah lingkungan. Keberlanjutan ini menjadi nilai tambah yang signifikan bagi kota-kota besar yang menghadapi tekanan pengelolaan limbah.

(Andreas Hagenbo, et.al (2022),) menunjukkan bahwa biochar memiliki potensi besar dalam menyimpan karbon jangka panjang, dengan dampak signifikan pada mitigasi perubahan iklim. Hal ini selaras dengan hasil reaktor pirolisis ini yang menghasilkan biochar berkualitas tinggi dan stabil dalam tanah. (Ndoung et al., 2021) menemukan bahwa biochar yang diproduksi pada suhu tinggi memiliki kapasitas penyimpanan karbon dan stabilitas yang lebih baik, yang mendukung kadar karbon tetap tinggi dari hasil reaktor ini.. (Ilyas et al., 2021) menyebutkan bahwa penggunaan biochar meningkatkan produktivitas tanah hingga 20%, terutama di tanah terdegradasi, sesuai dengan manfaat biochar yang dihasilkan oleh reaktor ini dalam meningkatkan kesuburan tanah.

(Zhiwei Wang, et.al, 2021),) membandingkan reaktor pirolisis tradisional dengan teknologi baru dan menemukan bahwa inovasi efisiensi energi bisa mengurangi konsumsi hingga 25%, serupa dengan penghematan energi sebesar 30% pada sistem kontrol tekanan self-sufficient. (Domingues et al., 2020) menyatakan bahwa sistem tekanan tertutup pada reaktor pirolisis menghasilkan biochar dengan porositas tinggi yang meningkatkan retensi air, sesuai dengan hasil yang dicapai dalam reaktor ini.

(Sirjana Adhikari, 2024; Arthur et al., 2020 ) menyimpulkan bahwa aplikasi biochar memperbaiki kapasitas tukar kation (CEC) dalam tanah hingga 30%, mendukung peningkatan kualitas tanah yang dilaporkan dalam riset ini. (Koji Kameyama et.al, 2019) menunjukkan bahwa biochar memiliki kemampuan retensi air yang lebih tinggi, yang sejalan dengan hasil reaktor ini dalam meningkatkan porositas dan kapasitas retensi tanah. (Xiaolei Sun, et.al, 2024; Ahmed Elsayed, et.al, 2023) melaporkan bahwa biochar dari limbah organik mampu mengurangi kebutuhan irigasi tanaman hingga 15%, konsisten dengan kemampuan retensi air biochar yang dihasilkan oleh reaktor ini. (L. B. Direkto, et.al, 2020; C. Park, et.al, 2015) membandingkan efisiensi energi berbagai reaktor pirolisis dan menyatakan bahwa sistem yang memanfaatkan energi internal lebih hemat hingga 40%, yang menunjukkan kesesuaian dengan reaktor ini yang menggunakan gas pirolisis. V. I. Kovenskii, et.al, 2010; Kinney, T.J., et.al, 2012; Manyà et al., 2018. Ekperimen menunjukkan bahwa pirolisis sampah organik dapat mengurangi volume limbah hingga 50%.

Manfaat biochar sebagai hasil dari proses ini meluas ke bidang pertanian dan lingkungan. Kandungan pori-pori biochar memberikan kemampuan retensi air yang lebih tinggi, yang meningkatkan kapasitas tanah dalam menyimpan kelembaban. Dengan demikian, aplikasi biochar

sebagai amandemen tanah dapat meningkatkan kesuburan dan memperbaiki struktur tanah yang terdegradasi. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa tanah yang diperkaya dengan biochar memiliki produktivitas yang lebih tinggi, terutama di lahan-lahan marjinal yang memerlukan perbaikan kualitas tanah. Selain manfaat langsung dalam hal efisiensi energi dan kualitas biochar, reaktor ini juga berkontribusi dalam mengurangi emisi karbon.

Proses pirolisis mengubah karbon organik dalam limbah menjadi biochar yang stabil, yang dapat disimpan dalam tanah dalam jangka waktu lama, sehingga mengurangi pelepasan karbon dioksida ke atmosfer. Hal ini sejalan dengan upaya mitigasi perubahan iklim yang berfokus pada sekuesterisasi karbon. Teknologi ini memberikan solusi praktis bagi daerah perkotaan dengan volume limbah tinggi. Dengan mengonversi sampah menjadi biochar, volume limbah yang tersisa dapat berkurang hingga 50%. Ini merupakan pencapaian yang signifikan dalam pengelolaan limbah, terutama di daerah perkotaan yang menghadapi tantangan kapasitas tempat pembuangan akhir. Penurunan volume limbah juga mengurangi beban logistik dan operasional yang terkait dengan pengangkutan dan pembuangan limbah.

Inovasi ini juga memungkinkan penggunaan gas hasil pirolisis secara optimal sebagai bahan bakar internal. Sistem tekanan yang terintegrasi menjaga kestabilan reaksi dan meningkatkan kualitas produk biochar yang dihasilkan. Dari sisi kelestarian lingkungan, penerapan teknologi ini berpotensi mengurangi emisi karbon melalui konversi karbon organik menjadi bentuk padat yang stabil.

Selain aspek teknis, inovasi ini memberikan solusi praktis untuk pengelolaan limbah organik perkotaan, terutama di daerah dengan volume sampah tinggi. Dengan konversi sampah menjadi biochar, volume sampah berkurang hingga 50%, dan kualitas tanah dapat ditingkatkan melalui aplikasi biochar sebagai amandemen tanah (Woolf et al., 2022).

#### 4. KESIMPULAN

Pengembangan reaktor pirolisis organik slurry dengan kontrol tekanan self-sufficient berhasil menciptakan sistem yang efisien dan berkelanjutan untuk konversi limbah organik menjadi biochar berkualitas tinggi. Teknologi ini menunjukkan potensi signifikan dalam mendukung pengelolaan limbah perkotaan dan meningkatkan kualitas tanah di daerah dengan lahan terdegradasi. Reaktor pirolisis mampu menghasilkan biochar dengan kandungan karbon tetap sebesar 70%, yang menunjukkan kualitas tinggi. Biochar ini memiliki porositas yang baik, meningkatkan retensi air, dan kapasitas tukar kation (CEC) dalam tanah, sehingga memberikan manfaat agronomis seperti meningkatkan kesuburan dan produktivitas tanah.

#### 5. REFERENSI

- Adekiya et al., 2020, Effect of biochar on soil properties, soil loss, and cocoyam yield on a tropical sandy loam Alfisol, *Sci. World J.*, 2020 (2020), pp. 1-9, 10.1155/2020/9391630
- Ahmed Elsayed, et.al, 2023, The joint application of biochar and nitrogen enhances fruit yield, quality and water-nitrogen productivity of water-stressed greenhouse tomato under drip fertigation, *Agricultural Water Management*, Volume 290, 1 December 2023, 108605, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108605>
- Andreas Hagenbo, et.al (2022), Climate change mitigation potential of biochar from forestry residues under boreal condition, *Science of The Total Environment*, Volume 807, Part 3, 10 February 2022, 151044.
- Arthur et al., 2020, Clay content and mineralogy, organic carbon and cation exchange capacity affect water vapour sorption hysteresis of soil, *Eur. J. Soil Sci.*, 71 (2) (2020), pp. 204-214, <https://doi.org/10.1111/ejss.12853>
- Bahng, M., et.al, (2009). Current technologies for analysis of biomass thermochemical processing: A review. *Analytica Chimica Acta*, 651, 117–138. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2009.08.016>
- C. Park, et.al, (2015), “Effect of process operating conditions in the biomass torrefaction: A simulation study using one-dimensional reactor and process model,” *Energy* 79, 127–139 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.085>

- David Lefebvre, et.al, (2023), Biomass residue to carbon dioxide removal: quantifying the global impact of biochar, *Biochar*, Volume 5, article number 65, (2023)  
DOI:10.1016/j.geoderma.2016.03.029
- Domingues et al., 2020, Enhancing cation exchange capacity of weathered soils using biochar: feedstock, pyrolysis conditions and addition rate *Agronomy*, 10 (6) (2020), p. 824, DOI; <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/6/824>
- Farah Amalina, et.al, 2022, A comprehensive assessment of the method for producing biochar, its characterization, stability, and potential applications in regenerative economic sustainability – A review, *Cleaner Materials*, Volume 3, March 2022, 100045, <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100045>
- Fidel et al., 2018, Sorption of ammonium and nitrate to biochars is electrostatic and pH-dependent, *Sci. Rep.*, 8 (1) (2018), Article 17627, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35534-w>
- Hossain et al., 2020, Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant *Biochar*, 2 (2020), pp. 379-420, 10.1007/s42773-020-00065-z
- Ilyas et al., 2021, Diverse feedstock's biochars as supplementary K fertilizer improves maize productivity, soil organic C and KUE under semiarid climate *Soil Tillage Res.*, 211 (2021), 10.1016/j.still.2021.105015
- Jessica Graça, et.al, 2024, Pyrolysis, a recovery solution to reduce landfilling of residual organic waste generated from mixed municipal waste, *Environmental Science and Pollution Research*, 31(21):30676-30687. DOI: 10.1007/s11356-024-33282-1
- Jindo et al., 2020, Role of biochar in promoting circular economy in the agriculture sector. Part 1: A review of the biochar roles in soil N, P and K cycles, *Chem. Biol. Technol. Agric.*, 7 (2020), Article 15, <https://doi.org/10.1186/s40538-020-00182-8>
- Jones MW, et.al, (2023) National contributions to climate change due to historical emissions of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide since 1850. *Scientific Data* 10(1):155. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02041-1>
- Kinney, T.J., et.al, 2012, Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures. *Biomass Bioenergy* 2012, 41, 34–43.
- Koji Kameyama et.al, 2019, The Preliminary Study of Water-Retention Related Properties of Biochar Produced from Various Feedstock at Different Pyrolysis Temperatures, *Materials* **2019**, 12(11), 1732; <https://doi.org/10.3390/ma12111732>
- L. B. Direkto, et.al, (2020), Comparison of the Efficiency of the Reactors for Low-Temperature Pyrolysis of Biomass, *Thermal Engineering*, 67(5):296-303, DOI: 10.1134/S0040601520050043
- Li et al., 2018, Impact of biochar addition on soil properties and water-fertilizer productivity of tomato in semi-arid region of Inner Mongolia, China, *Geoderma*, 331 (2018), pp. 100-108, . DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.06.014>
- Li S, Skelly S (2023) Physicochemical properties and applications of biochars derived from municipal solid waste: a review. *Environ. Adv* 13:100395
- Manyà et al., 2018, Biochar production through slow pyrolysis of different biomass materials: Seeking the best operating conditions, *Biomass Bioenergy*, 117 (2018), pp. 115-123
- Ndong et al., 2021, A scoping review on biochar-based fertilizers: Enrichment techniques and agro-environmental application, *Heliyon*, 7 (12) (2021), DOI; <https://doi.org/e08473>, 10.1016/j.heliyon.2021.e08473
- Omondi et al., 2016, Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data, *Geoderma*, 274 (2016), pp. 28-34,
- Sahar Safarian, (2023), Performance analysis of sustainable technologies for biochar production: A comprehensive review, *Energy Reports*, Volume 9, December 2023, Pages 4574-4593, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.03.111>
- Sirjana Adhikari, 2024, Identifying biochar production variables to maximise exchangeable cations and increase nutrient availability in soils, *Journal of Cleaner Production*, Volume 446, 141454, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141454>

- V. I. Kovenskii, et.al, (2010), Modeling of superheated-steam drying of biofuel in a fluidized bed, J. Eng. Thermophys. 83, 764–769, <https://doi.org/10.1007/s10891-010-0395-2>
- Xiaolei Sun, et.al, 2024, Biochar effects on soil nitrogen retention, leaching and yield of perennial citron daylily under three irrigation regimes, 2024, Agricultural Water Management, 296(5):108788, DOI: 10.1016/j.agwat.2024.108788
- Zhiwei Wang, et.al, (2021), Co-pyrolysis of waste plastic and solid biomass for synergistic production of biofuels and chemicals-A review, Progress in Energy and Combustion Science, Volume 84, May 2021, 100899, <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100899>