

Rancang Bangun Kiln Pirolisis Tempurung Kelapa Tipe Batch dengan Mekanisme Poros Pemutar dan Sistem Ventilasi Terbatas

Design of a Batch-Type Coconut Shell Pyrolysis Kiln with Tilting Mechanism and Controlled Air Ventilation

Vonny Setiaries Johan¹, Bintang Sipartogi Panjaitan^{1*}, Faizah Hamzah¹, Yossie Kharisma Dewi¹, Imelda Yunita¹, Chandra Gunawan¹, Addiena S. Nasution¹, Nadya Novianti D.P.¹, Arum Rovarti Ningsih¹, Jeany Ristia¹

¹ Teknologi Industri Pertanian, Jurusan Teknologi Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Riau, Pekanbaru, Indonesia

* Email: bintang.sipartogi@lecturer.unri.ac.id

DOI: <http://dx.doi.org/10.20884/1.jaber.2026.7.1.18509>

Naskah ini diterima pada 22 Desember 2025; revisi pada 24 April 2026; disetujui untuk dipublikasikan pada 12 Mei 2026

ABSTRAK

Pirolisis tempurung kelapa menggunakan tungku terbuka atau kiln sederhana masih menghadapi kendala berupa suplai oksigen yang tidak terkendali, suhu karbonisasi yang kurang stabil, rendemen arang yang rendah, serta proses pembongkaran produk yang kurang ergonomis. Penelitian ini bertujuan merancang dan memfabrikasi kiln pirolisis tempurung kelapa tipe batch dengan mekanisme poros pemutar dan ventilasi udara terbatas untuk mendukung proses karbonisasi yang lebih terkendali dan mudah dioperasikan. Perancangan dilakukan melalui pendekatan rekayasa yang mencakup penentuan kapasitas bahan 20 kg, volume ruang pengarangan, kebutuhan energi pemanasan awal, debit udara pembakaran parsial sebesar 0,00456 m³/s, konfigurasi lubang udara, serta sistem cerobong natural draft berdiameter 3 inci yang direduksi menjadi 1 inci. Hasil fabrikasi menghasilkan prototipe kiln berbentuk silinder vertikal berdiameter 37 cm yang dipasang pada rangka penyangga berbentuk A dengan poros horizontal, sehingga badan kiln dapat dimiringkan secara manual untuk memudahkan pengeluaran arang tanpa pintu samping. Inspeksi dimensional dan fungsional menunjukkan bahwa ruang pengarangan, ventilasi, cerobong, rangka penyangga, dan mekanisme pemutar telah terpasang sesuai rancangan. Prototipe ini menjadi dasar untuk pengujian kinerja termal, distribusi suhu, rendemen arang, dan kualitas produk pada tahap berikutnya. Rancangan ini berpotensi diterapkan pada skala UMKM sebagai kiln pirolisis yang lebih operasional, terkendali, dan mudah direplikasi.

Kata kunci: Tempurung kelapa, kiln pirolisis batch, karbonisasi, ventilasi udara terbatas, mekanisme poros pemutar.

ABSTRACT

Conventional coconut shell pyrolysis using open kilns has limitations in terms of temperature stability, oxygen control, and low charcoal yield. This research aims to design and fabricate a batch-type pyrolysis kiln equipped with a controlled-airflow system and tilting unloading mechanism for efficient carbonization. The design process applies engineering calculations involving biomass capacity (20 kg), cylinder dimensions (37 cm diameter), combustion air requirements (0.00456 m³/s), and a natural-draft chimney configuration using a 3-inch pipe reduced to 1 inch. The fabricated prototype consists of a vertical cylinder placed on an A-frame support equipped with a horizontal pivot shaft, allowing manual tilting for unloading charcoal without opening side doors. Visual inspection confirmed structural accuracy, airtightness, and operational feasibility of mechanical tilting. The prototype is ready for thermal performance testing including temperature stability, combustion rate, charcoal yield, and thermal distribution analysis. This study demonstrates that integrating mechanical design with airflow control enables an efficient, scalable, and operable pyrolysis kiln suitable for small industries and technical applications.

Keywords: Coconut shell, batch pyrolysis kiln, tilting mechanism, controlled airflow, charcoal production.

PENDAHULUAN

Penggunaan biomassa sebagai sumber energi alternatif berbasis karbon terbarukan semakin berkembang, terutama pada skala UMKM dan industri rumah tangga. Tempurung kelapa merupakan salah satu biomassa padat dengan kandungan karbon tinggi (69–80%), struktur selulosa-lignin yang mudah terkarbonisasi, serta ketersediaan lokal yang melimpah di wilayah agraris tropis (Amoako *et al.*, 2018). Kandungan karbon yang tinggi pada tempurung kelapa menjadi potensi untuk mengolahnya menjadi arang dan biochar bernilai tambah (Sari *et al.*, 2020). Namun, proses konversi tempurung kelapa menjadi arang umumnya masih dilakukan melalui pembakaran terbuka, drum kiln sederhana, atau tungku tradisional yang tidak terkontrol, yang sering menghasilkan rendemen rendah, emisi tinggi, dan kualitas produk yang tidak konsisten (Putra *et al.*, 2023). Suplai oksigen yang tidak terkendali menyebabkan temperatur pirolisis yang sulit dijaga, emisi asap tinggi, serta rendemen arang relatif rendah (Mail *et al.*, 2015).

Teknologi kiln batch tertutup dengan suplai oksigen terbatas (*limited-oxygen pyrolysis*) menjadi salah satu alternatif yang dapat meningkatkan efisiensi pirolisis dan kualitas karbon padat (Basu, 2018). Desain kiln biochar skala kecil terus dikembangkan, mulai dari retort kiln, drum kiln horizontal, hingga kombinasi reaktor tetap dengan sistem aliran gas terarah (Ungureanu *et al.*, 2025). Pada sisi lain, aspek ergonomi dan kemudahan operasi, seperti mekanisme pembongkaran arang dan pengaturan udara masuk, sering kali kurang diperhatikan dalam rancangan kiln skala UMKM (Pongsa *et al.*, 2023). Kiln yang tidak memiliki mekanisme pengeluaran arang yang baik menyebabkan proses unloading memerlukan pembongkaran sebagian struktur atau membuka tutup kiln dalam kondisi masih panas, yang berisiko memicu pembakaran ulang arang dan menurunkan kualitas produk. Keterbatasan desain tersebut menyebabkan beberapa masalah rekayasa, seperti: (1) suhu pirolisis sulit dipertahankan stabil pada rentang 280–350 °C, (2) distribusi panas tidak seragam pada ruang karbonisasi, (3) pengeluaran arang sulit dilakukan karena kiln bersifat permanen, (4) sulit dilakukan pemantauan kinerja kiln secara kuantitatif (*thermally unmonitored*).

Oleh karena itu, diperlukan rancangan kiln pirolisis yang tidak hanya mempertahankan prinsip kerja tertutup dan tekanan rendah, tetapi juga memiliki mekanisme poros pemutar untuk unloading, dan struktur cerobong yang efektif dalam mendukung draft alami. Penyediaan mekanisme pemutar dinilai lebih praktis dibanding pintu samping, karena tidak mengganggu struktur kiln dan tidak meningkatkan potensi kebocoran udara. Penelitian sebelumnya oleh Hasan & Ghofur (2019) menunjukkan bahwa mekanisme tilting lebih unggul untuk unloading kiln batch dibandingkan dengan *opening side door mechanism*. Desain disusun berdasarkan perhitungan kapasitas bahan baku, volume ruang pirolisis, kebutuhan debit udara pembakaran parsial, serta konfigurasi cerobong untuk menghasilkan tarikan alami (natural draft) yang memadai. Prototipe kiln kemudian difabrikasi dan divalidasi secara dimensional dan fungsional sebagai langkah awal sebelum uji kinerja termal. Kontribusi utama penelitian ini adalah menghadirkan desain kiln tertutup yang mudah dioperasikan pada skala UMKM, dengan dasar perhitungan rekayasa yang eksplisit sehingga dapat direplikasi dan dikembangkan lebih lanjut.

METODE PENELITIAN

Rancangan Fungsional

Dalam perancangan kiln perlu dipertimbangkan jumlah udara yang diperlukan dalam pembakaran, sistem pembakaran awal, jumlah batok kelapa yang akan diarangkan,

kemudahan proses *loading* dan *unloading* bahan baku kiln tersebut dan pengelolaan asap yang dihasilkan oleh pembakaran lebih lanjut. Pada prinsipnya model kiln berbahan baku batok kelapa yang dirancang ini terbagi menjadi 7 bagian yaitu, ruang pengarangan, pintu *loading* dan *unloading*, kasa pemerata api, cerobong asap, lubang udara, dan kaki penyangga. Penjelasan fungsi bagian-bagian *kiln* dapat dilihat pada tabel 1.

Rancangan fungsional dihasilkan dari beberapa pertimbangan yaitu fungsi utama dari *kiln* sebagai media pengarangan, yang membutuhkan ruang pengarangan sebagai tempat dimana proses pirolisis terjadi. Proses pirolisis yang berlangsung di dalam ruang pengarangan membutuhkan pemerataan aliran udara yang baik yang dapat disokong oleh penyediaan rongga udara yang diberikan oleh kassa pemerata. Bahan baku batok kelapa yang digunakan akan dimasukkan melalui sebuah pintu yaitu pintu *loading*, dan produk hasil pengarangan berupa arang harus dapat dibongkar muat melalui sebuah pintu yaitu pintu *unloading*. Pemanfaatan lebih lanjut asap hasil proses pirolisis pada ruang pengarangan agar tidak mencemari lingkungan.

Tabel 1 Rancangan fungsional

No.	Nama Bagian	Fungsi
1	Ruang Pengarangan	Ruang pengarangan berfungsi sebagai tempat terjadinya pembakaran. Tempat dimana bahan baku batok kelapa akan mengalami proses pirolisis lambat (karbonisasi) dan menjadi arang. Di sekitar dinding ruang pengarangan di lengkapi dengan lubang – lubang udara yang berfungsi memasukkan udara pasokan kebutuhan oksigen yang dibutuhkan selama pengarangan. Lantai ruang pengarangan terbuat dari plat besi dengan lubang – lubang yang tersebar merata dan berfungsi meratakan udara yang berasal dari kolom udara.
2	Pintu <i>loading</i>	Berfungsi untuk memasukkan bahan baku batok kelapa yang akan di arangkan, pada bagian atas kiln. Pintu <i>loading</i> dibuat terpisah dari badan kiln dengan konsep seperti tutup drum yang memiliki 2 lapisan sisi bagian dalam dan luar serta terdapat pengencang pada kedua sisinya. Konsep ini memudahkan proses pemasangan dan pembongkaran yang dibantu <i>handle</i> untuk mengangkatnya.
3	Pintu <i>unloading</i>	Sebagai pintu proses pengeluaran produk akhir yang telah mengalami proses karbonisasi dan berupa arang. Merupakan pintu yang sama dengan pintu <i>loading</i> kiln, namun memiliki bantuan kinerja dari kaki penyanggah untuk menjungkitkan posisi kiln sehingga bagian saluran pintu terbalik ke arah bawah melalui bantuan engsel fleksibel.
4	Kasa Pemerata	Merupakan tempat untuk starter pada proses pyrolisis di dalam ruang pengarangan, menyebarkan api pada bahan baku batok kelapa yang berada di dalam ruang pengarangan, meratakan panas api hasil pembakaran

No.	Nama Bagian	Fungsi
5	Lubang udara	bahan bakar awal. Kasa ini berada di tengah ruang pembakaran. Berfungsi sebagai tempat masuknya udara ke dalam ruang pengarangan. Lubang udara terletak pada dinding kiln dan pada bagian bawah. Lubang udara dapat dibuka dan ditutup secara manual, untuk memudahkan pengguna dalam mengatur udara yang masuk ke dalam ruang pengarangan. Selain itu juga terdapat lubang udara disekeliling dinding kiln yang dilengkapi dengan komponen penutup untuk memudahkan mengatur suplai udara.
6	Cerobong asap	Berfungsi untuk mengeluarkan gas buang hasil proses pirolisis. Dibuat pada bagian atas kiln dengan bagian alas yang datar (tidak kerucut mengikuti bentuk tutup kiln), diharapkan dapat menyebabkan turbulensi panas dan asap terlebih dahulu di dalam ruang pengarangan sehingga asap yang dikeluarkan tidak terlalu tebal dan dengan suhu yang tidak terlalu tinggi. Cerobong asap dapat dihubungkan langsung dengan <i>smoke utilization unit</i> berupa saluran pipa kondensor untuk pengolahan asap selanjutnya.
7	Kaki Penyangga	Sebagai pondasi yang menyangga seluruh tubuh kiln dan menjadi sistem <i>unloading</i> arang yang dihasilkan. Kaki penyangga juga dilengkapi dengan komponen <i>clamp</i> penjepit disisi kira dan kanan kiln untuk menjaga posisi tubuh kiln tetap tegak saat proses pirolisis berlangsung.

Ruang Pengarangan

Ruang pengarangan sebagai tempat dimana batok kelapa akan mengalami proses karbonisasi (pirolisis rambat) berupa proses pembakaran dengan asupan oksigen minimum. Kassa pemerata api akan diletakkan sebagai pemerata api pantikan awal. Penentuan dimensi dari ruang pengarangan didapatkan dari hasil pehitungan seperti dijelaskan di bawah ini.

Volume Ruang Pengarangan

Massa dan *bulk density* dari batok kelapa digunakan untuk menentukan volume ruang pengarangan. Massa batok kelapa yang akan diarangkan adalah sebanyak 10 kg dan *bulk density* yang digunakan dalam proses perancangan adalah 100 kg/m³ sehingga volume dari ruang pengarangan:

$$\text{Bulk density} = \text{massa} / (\text{volume ruang pengarangan})$$

$$\text{Volume ruang pengarangan} = \text{massa} / (\text{bulk density})$$

Dibutuhkan 2/3 ruang kosong pada ruang pengarangan untuk cadangan oksigen yang akan dibutuhkan guna tercapai pengarangan optimum, maka total volume ruang pengarangan adalah:

$$\text{Volume ruang pengarangan (m}^3\text{)} \times 1.67 = \text{m}^3$$

Kebutuhan Bahan Bakar Awal

Energi yang dibutuhkan untuk mengarangkan batok kelapa sebanyak 10 kg diperhitungkan dengan mempertimbangkan nilai kalor jenis batok yang berkisar antara 2.259-2.712 J/kg.K dan suhu lingkungan yang berkisar antara 27-30°C, pada laju pemanasan pirolisis lambat pada suhu 150-300°C, adalah:

$$q = m \times C_p \times \Delta T$$

Energi yang dibutuhkan ini dijadikan acuan perhitungan untuk menentukan kebutuhan energi pada awal proses dengan mengasumsikan efisiensi dari kiln hasil rancangan sekitar 30% maka perhitungan kebutuhan energi. Mengasumsikan bahwa kandungan nilai kalor dari batok kelapa adalah 17.387,40 kJ/kg dan efisiensi ruang pengarangkan bagian kerucut bawah sebagai tungku, kebutuhan massa dari bahan bakar awal adalah:

$$112500 \text{ kJ} = \text{massa} \times 17387.40 \text{ kJ/kg}$$

Guna mencapai pembakaran optimum bagi bahan bakar awal, perlu ditambahkan 2/3 bagian dari ruang pembakaran, maka:

$$V = \text{Volume teoritis (m}^3) \times 1.67 = \text{cm}^3$$

Total dari volume ruang pengarangkan dan ruang pembakaran awal akan menghasilkan volume total dari *kiln*. Maka volume total dari *kiln* untuk mengarangkan sebanyak 10 kg bahan baku batok kelapa adalah sebagai berikut:

$$\text{Volume total} = \text{Volume ruang pengarangkan} + \text{Volume bahan bakar}$$

Perhitungan Dimensi *Kiln*

Dari volume tersebut maka dimensi kiln adalah :

Diameter *kiln* rancangan = 0.37 m

Tebal dinding ruang pengarangkan = 0.004 m

Tinggi total dari *kiln* mulai dari kaki penyangga, ruang pengarangkan, hingga tutup kiln adalah 100 cm, dengan pertimbangan bahwa operator yang ditujukan adalah masyarakat Indonesia, dengan ketinggian tubuh rata-rata 160-175 cm.

Pembakaran Biomassa

Mempertimbangkan bahwa batok kelapa adalah biomassa dengan kandungan hidrokarbon yang tinggi yaitu 53,8% C dan 7,2% H, dan kebutuhan udara minimum untuk proses pembakaran dapat dihitung melalui persamaan berikut:

$$W_{\min} = 100/21 \times ((1.96 \times C) + (5.85 \times H))$$

$W_{\min}$ = Kebutuhan udara minimum (m³/kg bahan bakar)

C = Kandungan karbon dalam bahan bakar (%)

H = Kandungan hidrogen dalam bahan bakar (%)

Maka kebutuhan udara minimum untuk pembakaran batok kelapa, dalam hal ini untuk proses pirolisis:

$$W_{\min} = 100/21 \times ((1.96 \times C) + (5.85 \times H))$$

Laju pembakaran (Bbt) dapat dihitung melalui perhitungan bobot bahan bakar yang akan dibakar (m) dengan waktu pembakaran (t)

$$Bbt = m/t$$

Debit udara yang dibutuhkan untuk pembakaran didapat dari perkalian kebutuhan udara minimum (Wmin) dengan laju pembakaran (Bbt)

$$Qud = Wmin \times Bbt$$

Debit udara pada proses perancangan untuk pembakaran perlu ditambahkan kelebihan udara sebesar 40% dari total debit udara yang dibutuhkan secara teoritis. Maka kebutuhan input udara:

$$Q = Qud \times 1.4$$

Dengan mengetahui kecepatan udara melalui pengukuran suhu di dalam dan luar cerobong, maka dapat diketahui kebutuhan luasan lubang. Kecepatan udara yang dibutuhkan sebesar 1.105 m/detik.

$$A = Q/V$$

Dengan mempertimbangkan banyaknya kebutuhan udara untuk terjadinya proses pengarangan, maka pada perancangan ini lubang udara buat sebanyak 10 buah dengan diameter lubang 0.02 m diletakkan secara tersebar di sekeliling dinding ruang pengarangan, yaitu ruang pengarangan bawah, tenggorokan, dan juga ruang pengarangan atas. Serta ditambahkan lubang-lubang kecil pada bagian dasar sebanyak 60 buah dengan diameter 0.01 m mekanisme buka tutup melalui putaran *disk* untuk membantu proses pengaturan suplai udara.

$$\text{Pembuktian} = (A_{\text{lubang udara bawah}} \times \text{jumlah}) + (A_{\text{lubang udara atas}} \times \text{jumlah})$$

Kassa Pemerata

Kassa pemerata api berfungsi untuk meratakan panas api dari hasil pembakaran bahan bakar pemantik. Kassa pemerata diletakkan sebelum bahan baku batok kelapa dimasukkan ke dalam ruang pengarangan melalui pintu *unloading*. Kassa berlubang ini berbentuk tabung dan diletakkan di tengah-tengah ruang pengarangan dengan diameter 0.15 m dan tinggi 0.8 m. Rongga udara dengan volume tersebut yang disediakan oleh kassa pemerata akan menjadi pasokan cadangan oksigen yang dapat membantu pemerataan proses yang berlangsung di dalam ruang pengarangan. Hal tersebut diharapkan dapat menyebabkan penyebaran panas yang merata di setiap bagian dari ruang pembakaran. Kassa yang digunakan adalah kassa baja agar tidak mudah rusak pada suhu tinggi selama pembakaran.

Pintu *unloading* dan *loading*

Proses *loading* pemasukan batok kelapa dan *unloading* dari arang batok kelapa yang telah selesai diarangkan di dalam ruang pengarangan akan dikeluarkan melalui pintu yang sama dari atas, dilengkapi dengan gagang penarik untuk membantu membuka tutup kiln (pintu *unloading* dan *loading*). Bagian dasar dan tutup kiln dibuat dari plat besi dengan ketebalan 3 mm. Pemilihan bahan dan ukuran dari plat besi ini didasarkan dari pertimbangan bahwa bagian tersebut dari ruang pengarangan akan mendapatkan beban panas serta massa yang cukup tinggi, terhitung mulai dari proses pembakaran awal hingga akhir proses pengarangan. Bagian bawah ruang pengarangan akan menopang beban

bahan baku batok kelapa yang diarangkan serta kasa pemerata dengan seluruh sebaran panas yang dihasilkan selama proses pengarangan.

Kaki Penyangga

Kaki penyangga *kiln* memiliki fungsi utama sebagai penyangga kokoh ruang pengarangan dan seluruh badan *kiln* saat *kiln* beroperasi dan juga maupun saat tidak dioperasikan. Kiln ditaruh pada kaki penyangga dan dengan poros engkol yang terdapat pada badan kiln memudahkan pada saat proses unloading arang yang telah dihasilkan. Batang kaki dan alas penyangga di buat dari besi siku dengan ketebalan 0,004 m dan lebar 0,04 m, untuk memperkuat struktur ditambahkan besi behel ukuran diameter 10 mm. Panjang kaki penyangga dirancang dengan ukuran 0,15 m dan diatas ruang lepas untuk menaruh kiln dengan diameter 0,37 m saat dijatuhkan pada proses *unloading*.

Cerobong Asap

Cerobong asap pada *kiln* ini berfungsi untuk mengeluarkan gas buang hasil sampingan dari proses pirolisis yang terjadi. Gas buang dari proses pirolisis mengandung zat-zat volatil yang teruapkan dari bahan baku yang terpirolisis. Diakibatkan suhu tinggi pada bagian dalam ruang pengarangan, suhu gas buang secara langsung juga akan tinggi, dan panas hasil proses pirolisis tersebut dapat digunakan apabila gas-gas tersebut tertahankan sehingga terjadi turbulensi di dalam ruang pengarangan. Cerobong asap memiliki penyempitan area yang secara tiba-tiba (*vena contracta*) dari diameter ruang pengarangan, sehingga akan menyebabkan turbulensi gas di dalam ruang pengarangan. Penahanan panas dan turbulensi gas pada ruang pengarangan diharapkan dapat membantu pemerataan suhu dan kematangan dari pengarangan batok kelapa. Bagian atas dari *kiln*, yang terhubung dengan pintu *loading* dan cerobong asap. Tekanan dan suhu yang mengalir menuju cerobong asap melalui kemiringan dari sisi atas *kiln* diharapkan telah mengalami penurunan, sehingga gas buang atau asap yang keluar melalui cerobong asap tidak begitu menimbulkan pencemaran udara lingkungan yang begitu signifikan. Rumus desain cerobong,

$$A = Qc / V$$

Untuk mengurangi tekanan asap yang keluar dari cerobong, maka akan ditingkatkan kecepatan aliran asap keluar dengan mengecilkan ukuran diameter cerobong (memberikan perubahan permukaan aliran secara mendadak).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis perhitungan Teknik menjadi dasar utama dalam merumuskan rancangan kiln pirolisis tipe batch untuk mengolah 20 kg tempurung kelapa. Seluruh parameter desain dihitung dan dianalisis secara sistematis untuk memastikan bahwa kiln yang dikembangkan memenuhi persyaratan proses pirolisis lambat, stabilitas termal, efisiensi energi, dan keamanan operasional.

Perhitungan dimulai dari penentuan karakteristik bahan baku termasuk densitas curah, kapasitas panas jenis, nilai kalor, serta komposisi unsur tempurung kelapa yang kemudian digunakan sebagai dasar untuk menentukan volume bahan, kebutuhan ruang pengarangan, serta energi pemanasan awal. Tahapan berikutnya melibatkan analisis kebutuhan udara pembakaran, perancangan luas lubang udara, dan dimensi cerobong yang diperlukan untuk menjaga aliran gas selama proses berlangsung. Seluruh

perhitungan ini dirangkaikan untuk menurunkan ukuran geometris kiln, seperti tinggi ruang silinder, konfigurasi ventilasi, dan kapasitas pembakaran awal. Penjabaran berikut menyajikan seluruh proses perhitungan secara berurutan sebagai dasar dalam menetapkan spesifikasi desain kiln.

Volume bahan dan ruang pengarangan tempurung kelapa pecah dengan bulk density $\rho_b = 520 \text{ kg/m}^3$ menghasilkan volume bahan sebesar $0,03846 \text{ m}^3$ untuk kapasitas 20 kg. Karena pirolisis lambat membutuhkan ruang ekspansi gas dan ruang sirkulasi panas, digunakan faktor 1,67 untuk memberikan ruang kosong di dalam kiln (Ajien *et al.*, 2022). Dengan demikian, volume efektif ruang pengarangan menjadi $0,06423 \text{ m}^3$.

$$V_{\text{bahan}} = \frac{m_b}{\rho_b} = \frac{20 \text{ kg}}{520 \text{ kg/m}^3} = 0,03846 \text{ m}^3$$

Pirolisis lambat memerlukan ruang kosong $\pm 2/3$ volume bahan untuk memungkinkan aliran gas dan ekspansi termal (Ajien *et al.*, 2022)., maka volume ruang pengarangan ;

$$V_{\text{ruang}} = 1,67 \times 0,03846 = 0,06423 \text{ m}^3$$

Komposisi unsur (Ultimate Analysis) tempurung kelapa: C = 47–50%, H = 6–7% (Dhaundiyal dan Tewari, 2015) (Inayat *et al.*, 2022). Proses perhitungan menggunakan komposisi C = 0,50, H = 0,06 dengan kondisi operasi pirolisis lambat: 300–400°C (Ajien *et al.*, 2022). Kebutuhan energi pemanasan awal untuk menaikkan suhu bahan dari 30°C ke 300°C maka diperoleh kenaikan suhu sebesar 270°C, Kapasitas panas jenis (C_p) tempurung kelapa kering berada di sekitar 1,7–2,0 kJ/kg·K menurut pengujian sifat termal biomassa lignoselulosa (Oka dan Watanabe, 2017). Untuk keamanan desain digunakan nilai atas rentang: C_p : 2,5 kJ/kg·K, maka energi pemanasan bahan;

$$q = m_b C_p \Delta T = 20 \times 2,5 \times 270 = 13,500 \text{ kJ}$$

Efisiensi kiln diperkirakan 30% (Ajien *et al.*, 2022), maka energi input aktual menjadi 45.000 kJ.

$$q_{\text{input}} = \frac{13,500 \text{ kJ}}{0,3} = 45,000 \text{ kJ}$$

Berdasarkan nilai kalor (HHV) tempurung kelapa berkisar 17,0–18,0 MJ/kg dalam pengujian kalorimeter bom (Amoako *et al.*, 2018), maka digunakan 17,387 kJ/kg, massa bahan bakar awal ;

$$m_{bb} = \frac{45,000 \text{ kJ}}{17,387 \text{ kJ/kg}} = 2,59 \text{ kg}$$

Ruang pembakaran awal membutuhkan volume efektif sekitar $0,00831 \text{ m}^3$, diperoleh dari volume bahan bakar pemantik yang diberi faktor ruang kosong yang sama (1,67). Nilai ini penting untuk memastikan pembakaran awal berlangsung stabil sebelum memasuki fase pirolisis.

$$V_{\text{bakar,min}} = \frac{2,59 \text{ kg}}{520 \text{ kg/m}^3} = 0,00498 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{bakar}} = 1,67 \times 0,00498 \text{ m}^3 = 0,00831 \text{ m}^3$$

Volume total ruang internal kiln adalah 0,07254 m³. Dengan diameter dalam 37 cm, tinggi ruang silinder dihitung sebesar sekitar 0,6747 m atau 67,5 cm. Untuk keperluan struktural, ruang untuk tutup, poros, dan dasar kiln memperpanjang tinggi total menjadi sekitar 95–100 cm.

$$V_{\text{total}} = 0,06423 + 0,00831 = 0,07254 \text{ m}^3$$

Dengan diameter kiln $D = 0,37 \text{ m}$:

$$H = \frac{4V}{\pi D^2} = \frac{4 \times 0,07254}{\pi \times 0,37^2} = 0,6747 \text{ m} \approx 67,5 \text{ cm}$$

Perhitungan kebutuhan udara pembakaran menggunakan komposisi unsur C = 0,50 dan H = 0,06 (5,6), kebutuhan udara minimum biomassa dihitung mendekati $W_{\text{min}} \approx 7,03 \text{ m}^3/\text{kg}$ (Ajien *et al.*, 2022). Desain ini menggunakan asumsi 25% dari total massa yaitu sebesar 5 kg sebagai massa yang mengalami pembakaran oksidatif, Dengan laju pembakaran rata-rata 1,67 kg/jam, debit udara teoretis adalah 11.73 m³/jam atau 0,00244 m³/s. Penambahan kelebihan udara 40% membuat debit operasional mencapai 0.00456 m³/s, nilai yang cukup untuk mendukung pembakaran yang stabil dan mencegah pembentukan asap berlebih.

$$B_{bt} = \frac{5}{3} = 1.67 \text{ kg/jam}$$

$$Q_{ud} = 7,03 \times 1.67 = 11.73 \text{ m}^3/\text{jam}$$

$$Q_{ud} = \frac{11.73}{3,600} = 0.00326 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tambahan kelebihan udara 40% untuk pirolisis batch yang umumnya memakai 30–50% excess air (Ajien *et al.*, 2022).

$$Q = 1,4 \times 0.00326 = 0.00456 \text{ m}^3/\text{s}$$

Berdasarkan debit udara aktual yang dibutuhkan untuk pembakaran biomassa pemantik, yaitu $Q = 0.00456 \text{ m}^3/\text{s}$, kecepatan udara masuk melalui lubang udara pada kiln ini diasumsikan sebesar 1,1 m/s, mengacu pada rentang kecepatan udara optimum (0,8–1,5 m/s) untuk pembakaran biomassa lambat (slow combustion) pada tungku tipe fixed-bed dan pirolisis tempurung kelapa (Sharma *et al.*, 2020), luas penampang total lubang udara yang diperlukan dapat dihitung sebagai berikut:

$$A = \frac{Q}{v} = \frac{0,00456}{1,1} \approx 0,00413 \text{ m}^2$$

Nilai ini merepresentasikan luas minimum yang harus tersedia agar udara dapat masuk ke dalam kiln dengan debit yang memadai untuk menunjang pembakaran biomassa pemantik dan menjaga proses pirolisis tetap berlangsung pada suhu sekitar 300°C selama kurang lebih tiga jam. Dalam rancangan awal, konfigurasi lubang udara yang digunakan terdiri atas 8 lubang besar berdiameter 1,6 cm dan 40 lubang kecil berdiameter 1,0 cm. Secara teoritis, kombinasi ini menghasilkan total luas penampang:

Luas 1 lubang besar ($\varnothing$ 1,6 cm):

$$A_{1b} = \pi(0,008)^2 \approx 2,01 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Sehingga untuk 8 lubang besar:

$$A_{\text{besar}} \approx 8 \times 2,01 \times 10^{-4} \approx 0,00161 \text{ m}^2$$

Luas 1 lubang kecil ($\varnothing$ 1,0 cm):

$$A_{1k} = \pi(0,005)^2 \approx 7,85 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

Sehingga untuk 40 lubang kecil:

$$A_{\text{kecil}} \approx 40 \times 7,85 \times 10^{-5} \approx 0,00314 \text{ m}^2$$

Total luas penampang lubang udara desain:

$$A_{\text{total}} = A_{\text{besar}} + A_{\text{kecil}} \approx 0,00161 + 0,00314 \approx 0,00475 \text{ m}^2$$

Jika dibandingkan dengan luas minimum yang dibutuhkan hasil perhitungan ($0,00413 \text{ m}^2$), terlihat bahwa luas aktual yang disediakan oleh desain lubang udara sedikit lebih besar dari kebutuhan teoritis. Kondisi ini justru menguntungkan, karena memberikan fleksibilitas bagi operator untuk mengatur suplai udara melalui mekanisme buka–tutup sebagian lubang atau penambahan pelat pengatur (damper). Dengan kata lain, konfigurasi lubang udara awal tetap valid dan tidak memerlukan perubahan, meskipun waktu proses disesuaikan menjadi tiga jam, selama pengaturan bukaan udara dilakukan secara terkendali.

Pada rancangan akhir, cerobong kiln terdiri atas dua bagian yaitu, pipa vertikal pendek berdiameter 3-inch dengan panjang 10 cm yang langsung terhubung dengan tutup kiln, dan reduksi ke pipa 1-inch sebagai saluran keluaran gas berikutnya. Desain ini secara fungsional membentuk ruang penenang (plenum) di bagian awal, kemudian mempercepat aliran gas pada bagian akhir.

Diameter dalam pipa 3-inch dihitung

$$d_{3''} = 3 \text{ inch} = 3 \times 2,54 \text{ cm} = 7,62 \text{ cm} = 0,0762 \text{ m}$$
$$A_{3''} = \frac{\pi d_{3''}^2}{4} = \frac{\pi \times (0,0762)^2}{4} \approx 0,00456 \text{ m}^2$$

Dari hasil perhitungan kebutuhan udara pembakaran, debit gas yang harus dikeluarkan cerobong sebesar $Q \approx 0,00456 \text{ m}^3/\text{s}$, sehingga kecepatan gas di bagian cerobong 3 inch:

$$v_{3''} = \frac{Q}{A_{3''}} \approx \frac{0,00456}{0,00456} \approx 1,0 \text{ m/s}$$

Kecepatan sekitar 1 m/s pada segmen pendek 3-inch ini termasuk moderat, sehingga bagian ini berperan sebagai ruang transisi yang relatif tenang sebelum gas dialirkan ke pipa yang lebih kecil. Sedangkan luas penampang pipa 1 inch:

$$d_{1''} = 1 \text{ inch} = 2,54 \text{ cm} = 0,0254 \text{ m}$$
$$A_{1''} = \frac{\pi d_{1''}^2}{4} = \frac{\pi \times (0,0254)^2}{4} \approx 0,000507 \text{ m}^2$$

Dengan debit gas yang sama:

$$v_{1''} = \frac{Q}{A_{1''}} \approx \frac{0,00456}{0,000507} \approx 9,0 \text{ m/s}$$

Maka, saat gas melewati reduksi dari 3-inch ke 1 inch, kecepatan aliran meningkat dari sekitar 1 m/s menjadi ± 9 m/s. Secara prinsip kontinuitas, hal ini masih dapat diterima pada sistem cerobong pendek skala kecil. Kecepatan yang lebih tinggi ini akan memperkuat tarikan (draft) cerobong, membantu menarik gas pirolisis keluar lebih cepat, mengurangi risiko aliran balik asap ke ruang kiln. Hubungan antara pressure drop dan draft reduksi diameter akan meningkatkan kehilangan tekanan (pressure drop) akibat gesekan dan perubahan arah aliran, tetapi karena panjang pipa 1-inch pada kiln ini relatif pendek, efeknya tidak terlalu signifikan.

Secara keseluruhan, hasil perhitungan teknik menunjukkan bahwa rancangan kiln pirolisis tipe batch dengan kapasitas 20 kg tempurung kelapa telah memenuhi persyaratan ruang pengarangan, kebutuhan energi pemanasan, suplai udara, dan sistem pembuangan gas berdasarkan parameter fisik dan termal biomassa. Dimensi ruang silinder, konfigurasi lubang udara, serta rancangan cerobong terbukti masih berada dalam rentang fungsional untuk mendukung proses pirolisis tanpa menyebabkan pembakaran berlebih atau kehilangan panas yang signifikan. Nilai debit udara dan kecepatan aliran gas yang diperoleh dari perhitungan juga menunjukkan bahwa desain ini memungkinkan terjadinya keseimbangan antara suplai oksigen minimal dan pembentukan draft alami, yang esensial untuk menjaga proses pirolisis tetap stabil. Dengan demikian, hasil perhitungan ini dapat dijadikan dasar rekayasa desain untuk memasuki tahap fabrikasi.

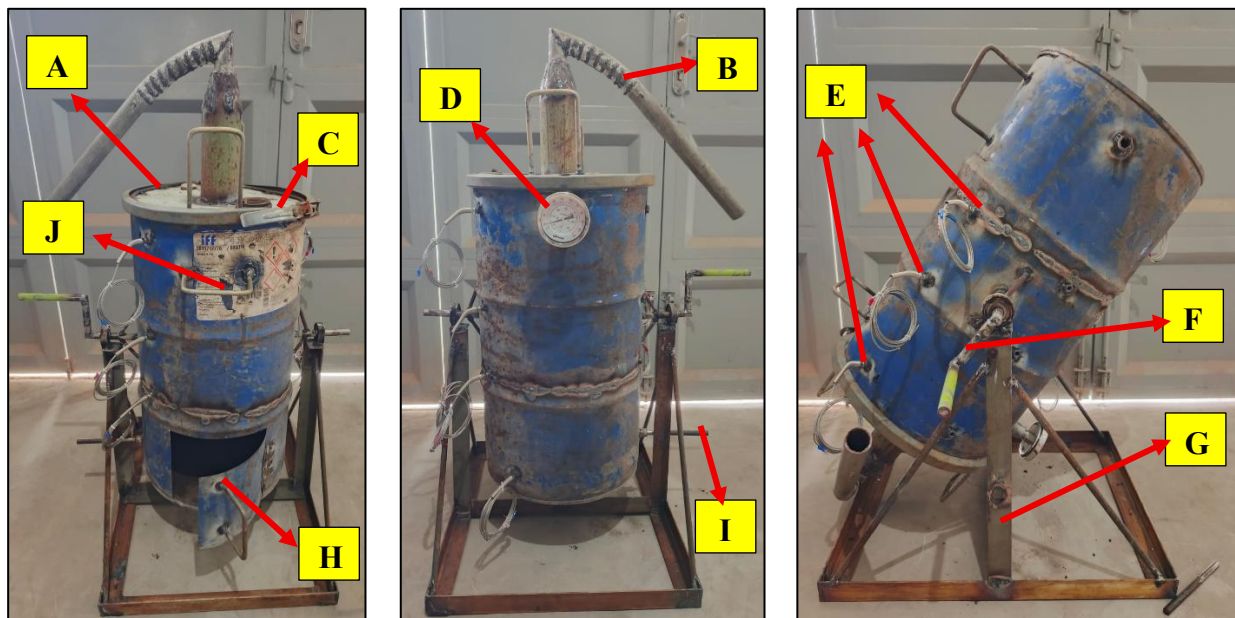
Berdasarkan hasil kajian dan perhitungan teknis, tim kemudian melanjutkan pabrikan rancangan kiln. Tahap pabrikan prototipe telah selesai dikerjakan oleh tim. Proses pembuatan perangkat dimulai dari pemotongan dan pembentukan plat besi untuk ruang pengarangan, pengelasan struktur utama kiln, pemasangan pintu *loading-unloading*, hingga perakitan kaki penyangga dengan mekanisme engkol untuk memudahkan proses pengeluaran arang setelah pirolisis selesai. Kasa pemerata api ditempatkan pada posisi tengah ruang pengarangan sesuai rancangan, sementara lubang-lubang udara pada dinding dan dasar kiln telah dibuat sesuai perhitungan kebutuhan debit udara. Cerobong asap dipasang lengkap dengan saluran menuju *smoke utilization* unit.

Secara keseluruhan, prototipe kiln pirolisis tipe batch telah selesai dirancang dan dipabrikan, dan siap untuk memasuki tahap pengujian kinerja pada periode selanjutnya. Pengujian tersebut direncanakan akan mencakup evaluasi distribusi suhu, kestabilan proses pirolisis, rendemen arang yang dihasilkan, kualitas arang, serta volume dan karakteristik asap cair yang diperoleh. Pada fase ini mahasiswa telah dilibatkan secara aktif dalam kegiatan perancangan, fabrikasi, dan perakitan alat sebagai bagian dari implementasi Indikator Kinerja Utama (IKU 5). Dengan demikian, meskipun proses uji performa belum dilaksanakan, capaian utama berupa penyelesaian rancangan dan pembangunan prototipe kiln telah dicapai sesuai rencana penelitian dan menjadi dasar penting bagi fase pengujian dan analisis lebih lanjut.

Berdasarkan hasil kajian dan perhitungan teknis, proses pabrikan prototipe kiln telah diselesaikan sesuai rancangan desain seperti yang terlihat pada Gambar 1. Tahap pabrikan dimulai dari pemotongan dan pembentukan plat baja untuk ruang silinder pengarangan, dilanjutkan dengan pengelasan struktur kiln dan perakitan rangka penopang, pemasangan poros pemutar, serta instalasi cerobong dan termometer. Seluruh

komponen utama, termasuk badan kiln, sistem ventilasi udara, dudukan berporos, dan cerobong telah melalui tahapan inspeksi dimensional.

Kiln tersusun atas silinder logam vertikal yang dipasang pada rangka penopang berbentuk segitiga (A-frame) dan digantung pada poros horizontal, sehingga mampu diputar secara manual (*tilting mechanism*) untuk memudahkan proses unloading hasil pirolisis tanpa memerlukan pintu samping maupun bongkar struktur. Bagian atas kiln dilengkapi tutup datar dengan dua handle simetris sebagai jalur utama pemasukan bahan baku dan pelepasan arang selesai proses. Pada tutup ini juga dipasang cerobong berdiameter 3-inch setinggi 10 cm yang kemudian direduksi menjadi pipa 1-inch menggunakan reducer sebagai saluran keluaran gas pirolitik. Konfigurasi cerobong ini menghasilkan dua fungsi simultan: mempertahankan tekanan internal yang stabil dan mendukung proses draft alami untuk mengarahkan aliran gas ke luar kiln. Termometer bimetal diposisikan pada bagian belakang kiln untuk memantau suhu dari proses pengarangan. Lubang-lubang udara primer dibuat pada bagian dasar dan pipa pemerata api sesuai dengan hasil perhitungan kebutuhan debit udara pembakaran biomassa.



- | | |
|---|---|
| A. Tutup Kiln (jalur <i>loading-unloading</i>) | F. Tuas engkol (<i>tilting mechanism</i>) |
| B. Saluran gas pirolitik | G. Rangka penyanggah |
| C. Clamp (pengunci) tutup kiln | H. Pintu ruang bakar |
| D. Termometer | I. Poros pengunci kiln |
| E. Titik pengukuran suhu (termokopel) | J. Pegangan tangan |

Gambar 1 Kiln hasil proses pabrikasi

KESIMPULAN

Penelitian ini telah menghasilkan rancang bangun kiln pirolisis tempurung kelapa tipe batch dengan kapasitas 20 kg yang dilengkapi mekanisme poros pemutar dan sistem ventilasi udara terukur. Desain kiln disusun berdasarkan perhitungan volume ruang pirolisis, kebutuhan debit udara pembakaran parsial, dan konfigurasi cerobong 3 inch–1 inch untuk mendukung natural draft. Prototipe yang dihasilkan memenuhi kriteria struktural dan fungsional, yakni mampu

diputar untuk memudahkan pengosongan arang, memiliki ventilasi udara yang dapat diatur, serta siap diintegrasikan dengan sistem pemantauan suhu multikanal. Hasil ini memberikan landasan bagi pengujian kinerja termal dan analisis efisiensi proses pada penelitian lanjutan, serta berpotensi diaplikasikan pada skala UMKM sebagai teknologi kiln pirolisis yang lebih efisien dan mudah dioperasikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ajien, A., Saputro, M. A., & Wijayanti, N. (2022). Coconut shell and husk biochar: Production and slow pyrolysis parameters. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(3), 1–25. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01129-0>
- Amoako, G., Darkwa, J., & Addo, A. (2018). Calorific value determination of coconut biomass residues. *Journal of the Ghana Science Association*, 20(2), 1–8.
- Bellow, S. A., Oyejide, O. J., & Jimoh, A. O. (2016). Physical properties of coconut shell nanoparticles. *Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology*, 12(2), 26–35. <https://doi.org/10.3126/kuset.v12i2.21549>
- Dhaundiyal, A., & Tewari, P. C. (2015). Analytical pyrolysis and ultimate analysis of coconut shell. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 307329. <https://doi.org/10.1155/2015/307329>
- Inayat, M., Azhar, M., Bhopal, M. F., & Khan, S. A. (2018). Thermochemical characterization of coconut shell. *MATEC Web of Conferences*, 152, 01008. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815201008>
- Mail, M. F., Hanafiah, D., & Sulistyowati, E. (2015). Local practices for production of rice husk biochar and coconut shell biochar using conventional kilns. *Journal of Environmental Management*, 38(1), 12–19.
- Oka, M., & Watanabe, T. (2017). Specific heat of lignocellulosic biomass. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 128(2), 753–760. <https://doi.org/10.1007/s10973-016-5928-3>
- Pongsa, U., Prasertsan, P., & Leevijit, T. (2023). Feasibility study of coconut shell biochar production using community-scale biochar kiln. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 33(3), 1–9. <https://doi.org/10.14456/jmmm.2023.45>
- Putrawan, I. M. A., Wijaya, T., & Prabowo, R. (2023). Performance of automatic temperature control system in a biomass pyrolysis reactor. *INVOTEK: Jurnal Inovasi Vokasional dan Teknologi*, 23(1), 11–20. <https://doi.org/10.24036/invotek.v23i1.1285>
- Sari, R. M., Gea, S., Wirjosentono, B., Hendrana, S., & Hutapea, Y. A. (2020). Improving quality and yield production of coconut shell charcoal through a modified pyrolysis reactor with tar scrubber to reduce smoke pollution. *Polish Journal of Environmental Studies*, 29(2), 1815–1824. <https://doi.org/10.15244/pjoes/112721>
- Sharma, S. K., Karmakar, S., & Channiwala, S. A. (2020). Investigation of flow and combustion characteristics of biomass in a fixed bed furnace. *Energy*, 198, 117305. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117305>

- Ungureanu, N., Gupta, S., & Patel, R. (2025). Biomass pyrolysis pathways for renewable energy and bio-based products. *Sustainability*, 17(17), 7806. <https://doi.org/10.3390/su17177806>
- Basu, P. (2018). *Biomass gasification, pyrolysis, and torrefaction: Practical design and theory* (3rd ed.). Academic Press.
- Hasan, I., & Ghofur, A. (2019). Karakteristik briket limbah tongkol jagung dengan perekat tepung biji nangka sebagai bahan bakar alternatif. *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, 4(1), 27–36.
- Amoako, G., Darkwa, J., & Addo, A. (2018). Calorific value determination of coconut biomass residues. *Journal of the Ghana Science Association*, 20(2), 1–8.