PRA Perancangan Pabrik Biochar dengan Proses *Torrefaction* dari Tongkol Jagung (*Corncob*)

*Fifi Fauziyya, Inggartha Vherlinska Indrawan Dian Yanuarita Purwaningsih, Yustia Wulandari Mirzayani, Kartika Udyani, Erlinda Ningsih**
Teknik Kimia – Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya
**e-mail: erlindaningsih84@itats.ac.id*

ABSTRACT

Population growth has depleted global fossil fuel reserves, necessitating a transition to independent renewable energy sources. This study presents a preliminary plant design for biochar pellet production utilizing continuous torrefaction of corn cobs with a production capacity of 70,000 tons/year in Kediri Regency, East Java. The novelty of this work lies in integrating local agricultural waste valorization and industrial symbiosis by using molasses from local sugar mills as a natural binder, coupled with an engineered torrefaction-pelletizing process that produces high-energy solid biofuel (>5,400 kcal/kg). Economic evaluation reveals a Fixed Capital Investment (FCI) of Rp 546,271,154,440, Working Capital Investment (WCI) of Rp 96,400,791,960, Total Capital Investment (TCI) of Rp 642,671,946,400, Total Production Cost (TPC) of Rp 397,343,173,357, and annual sales of Rp 1,043,740,800,000. Profitability metrics demonstrate feasibility with an Internal Rate of Return (IRR) of 30.00%, Pay Out Time (POT) of 1.94 years, and Break-Even Point (BEP) of 21.34%. Sensitivity analysis confirms project robustness against raw material price and selling price fluctuations within ± 10-20%. Furthermore, the environmental assessment projects a net CO_2-equivalent mitigation of approximately 114,800 tons/year when substituting sub-bituminous coal.

Keywords: *Biochar, Corn cobs, Environmental impact, Sensitivity analysis, Torrefaction*

ABSTRAK

Pertumbuhan populasi mendorong percepatan deplesi cadangan minyak bumi dunia, sehingga pemanfaatan energi terbarukan secara mandiri menjadi prioritas strategis. Sebagai solusi alternatif, pra-perancangan pabrik biochar berbentuk pelet menggunakan proses torefaksi kontinu berbahan baku tongkol jagung berkapasitas 70.000 ton/tahun dirancang di Kabupaten Kediri, Jawa Timur. Kebaruan (*novelty*) dari perancangan ini terletak pada integrasi pemanfaatan limbah lignoselulosa tongkol jagung lokal dengan simbiosis industri melalui pemanfaatan molase dari pabrik gula lokal sebagai perekat alami, yang diproses melalui kombinasi torefaksi dan peletisasi untuk menghasilkan bahan bakar padat berdensitas tinggi dan bernilai kalor tinggi (>5.400 kkal/kg). Hasil analisis ekonomi menunjukkan nilai *Fixed Capital Investment* (FCI) sebesar Rp 546.271.154.440, *Working Capital Investment* (WCI) sebesar Rp 96.400.791.960, *Total Capital Investment* (TCI) sebesar Rp 642.671.946.400, *Total Production Cost* (TPC) sebesar Rp 397.343.173.357,04, serta total penjualan tahunan sebesar Rp 1.043.740.800.000. Parameter kelayakan finansial menghasilkan *Internal Rate of Return* (IRR) sebesar 30,00%, *Pay Out Time* (POT) sebesar 1,94 tahun, dan *Break Even Point* (BEP) sebesar 21,34%. Analisis sensitivitas membuktikan bahwa pabrik tetap tangguh terhadap fluktuasi harga bahan baku maupun harga jual pada rentang pm 10 - 20%. Dari segi lingkungan, substitusi batu bara oleh produk biochar ini berpotensi mereduksi emisi GRK hingga 114.800 ton CO_2e/tahun.

Kata kunci: *Biochar, Torrefaction, Tongkol Jagung, Molase*

PENDAHULUAN

Permintaan energi nasional dan global terus meningkat seiring dengan laju pertumbuhan penduduk dan industrialisasi[1]. Ketergantungan pada bahan bakar fosil memicu penipisan cadangan minyak bumi serta peningkatan emisi gas rumah kaca (GRK) secara signifikan[2]. Salah satu biomassa pertanian yang melimpah dan belum dimanfaatkan secara optimal adalah tongkol jagung (*corncob*)[3,4]. Selama ini tongkol jagung sebagian besar hanya dibakar langsung di lahan pertanian sehingga berpotensi menimbulkan polusi udara, atau dimanfaatkan secara terbatas dengan nilai ekonomi rendah[5]. Karakteristik lignoselulosa tongkol jagung yang kaya akan hemiselulosa, selulosa, dan lignin menjadikannya prekursor bahan bakar padat terbarukan yang berpotensi[6,7].

.

ISSN 2775-5630

Perlu ditegaskan secara konsisten bahwa **biochar** yang dihasilkan dalam pabrik ini merupakan produk padat hasil torefaksi berbentuk pelet (*densified torrefied biochar pellet*), yang berbeda secara teknis dengan biopelet mentah konvensional (*raw biomass pellet*) maupun arang hasil pirolisis bersuhu tinggi (*carbonized charcoal*), sehingga istilah "biochar" dan "pelet biomassa" tidak digunakan secara tumpang tindih tanpa penjelasan teknis yang jelas[11]. Biopelet konvensional diproduksi tanpa perlakuan termal sehingga masih bersifat hidrofilik dan mudah membusuk, sedangkan arang pirolisis konvensional menghasilkan *yield* padatan yang jauh lebih rendah akibat hilangnya senyawa volatil pada suhu tinggi (>450 °C). Biochar torefaksi dalam penelitian ini dicetak menggunakan bantuan perekat molase untuk menghasilkan bahan bakar padat berdensitas tinggi, kuat secara mekanis, dan seragam dimensinya[12]
Kebaruan (*novelty*) perancangan pabrik ini terletak pada perancangan terintegrasi pemanfaatan limbah lokal berupa tongkol jagung di sentra produksi jagung Jawa Timur melalui simbiosis dengan industri pengolahan tebu (pemanfaatan produk samping molase dari pabrik gula lokal sebagai perekat alami), dipadukan dengan konfigurasi reaktor torrefaksi kontinu yang memanfaatkan sirkulasi gas inert dan pemulihan kondensat untuk meminimalkan jejak karbon serta menjamin efisiensi energi proses.

TINJAUAN PUSTAKA

Pabrik biochar torefaksi dari tongkol jagung ini dirancang untuk beroperasi secara kontinu selama 330 hari kerja per tahun (kapasitas 70.000 ton produk/tahun atau 8.838 kg/jam) mulai tahun 2030. Penentuan kapasitas ini didasarkan pada metode proyeksi kebutuhan bahan bakar biomassa pendukung program mandiri energi dan program *co-firing* biomassa nasional (target bauran 5–10% biomassa pada boiler PLTU batubara)[13]
Justifikasi teknis ketersediaan bahan baku dianalisis berdasarkan data empiris dari publikasi Badan Pusat Statistik (BPS) Provinsi Jawa Timur dan Kabupaten Kediri. Kabupaten Kediri dan wilayah penyangga sekitarnya (Blitar, Nganjuk, Jombang, dan Tulungagung) merupakan salah satu sentra jagung terbesar di Jawa Timur dengan total produksi jagung pipil mencapai lebih dari 350.000 ton/tahun pada 2024–2025. Dengan rasio limbah tongkol jagung kering terhadap biji jagung sebesar 20–22%, estimasi potensi ketersediaan tongkol jagung di Kabupaten Kediri dan sekitarnya mencapai 70.000–77.000 ton/tahun[14].
Kebutuhan bahan baku tongkol jagung pabrik ini adalah sebesar 16.069 kg/jam atau sekitar 127.266 ton/tahun. Kebutuhan tersebut dipenuhi melalui pasokan utama Kabupaten Kediri (mencakup 50–55% dari kebutuhan) serta pasokan dari kemitraan antardaerah di sekitar eks-Karesidenan Kediri. Berdasarkan analisis kompetisi bahan baku, tongkol jagung di wilayah Kediri saat ini sebagian besar belum dimanfaatkan secara terorganisir (hanya sebagian kecil dimanfaatkan sebagai alas kandang/kompos dan bahan bakar untuk pembakaran bata tradisional). Limbah tebu berupa molase sebagai perekat (kebutuhan 3–5% massa) dipasok langsung dari 3 pabrik gula aktif di kawasan Kediri (PG Pesantren Baru, PG Ngadiredjo, dan PG Meritjan), sehingga memperpendek rantai pasok dan menekan biaya pengadaan[5,15].

METODE

Proses produksi biochar pelet torefaksi terdiri atas lima tahapan utama: penyiapan bahan baku (*pretreatment & crushing*), pengeringan awal (*drying*), torefaksi kontinu (*continuous torrefaction*), pendinginan (*cooling*), serta pencampuran perekat dan pencetakan pelet (*mixing & pelletizing*).

Kondisi Operasi Unit Utama

Kondisi termal dan operasional reaktor torefaksi serta unit pendukung dirancang berdasarkan kinetika peruraian hemiselulosa dan neraca panas proses, sebagaimana disajikan pada Tabel 1:

ISSN 2775-5630

Tabel 1. Parameter Kondisi Operasi Unit Proses Pabrik Biochar

Kode Unit	Nama Unit Alat	Suhu Operasi (°C)	Tekanan Operasi	Waktu Tinggal (*Residence Time*)	Fungsi & Komposisi Aliran Masuk/Keluar
C-120	*Hammer Mill I*	30 (ambient)	1,0	Singkat	Pengecilan ukuran tongkol jagung utuh menjadi partikel 5–10 mm
B-110	*Rotary Dryer*	105–120	1,0	20–30 menit	Mengurangi kadar air bahan baku dari 20–25% menjadi 8–10%
R-210	Reaktor Torefaksi	250–280	1,0 (Inert N_2)	40–50 menit	Dekomposisi termal fraksi hemiselulosa; menghasilkan biochar padat, *torgas*, dan uap tar
B-320	*Cooler* Biochar	260 → 40	1,0 (Inert N_2)	20–30 menit	Pendinginan biomassa torefaksi sebelum kontak udara guna mencegah *self-ignition*
M-326	*Paddle Mixer*	35–40	1,0	10–15 menit	Pencampuran biochar torefaksi dengan molase (4% wt) dan air pengencer
P-330	*Pellet Mill*	60–80 (friksi)	Mekanis die	Singkat	Pencetakan pelet silindris (diameter 8 mm, panjang 10–15 mm) berdensitas tinggi
E-212	Kondensor Tar	180 → 60	1,0	Singkat	Pemisahan uap tar cair terkondensasi dari gas non-kondensabel (*torgas*)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Neraca Massa dan Kinerja Produk

Pada kapasitas nominal, laju alir bahan baku tongkol jagung kering yang masuk sebesar 16.069 kg/jam. Setelah melewati unit torrefaksi dan pemadatan pelet dengan penambahan molase, diperoleh produk akhir berupa biochar pelet sebesar 8.838 kg/jam (rendemen padatan/yield biochar 55% dari biomassa basah atau 70–75% basis kering ter-torefaksi). Proses dekomposisi torefaksi juga menghasilkan produk samping berupa cairan kondensat/tar sebesar 4.821 kg/jam serta gas non-kondensabel (*torgas*: CO, CO_2, H_2O vapor, minor CH_4) sebesar 2.410 kg/jam. Produk biochar pelet yang dihasilkan memiliki nilai kalor sebesar 5.484,54 kkal/kg dengan kadar air 1,5–2,0%, kadar abu 2,02%, dan kadar karbon terikat 52,4%, yang telah memenuhi standar SNI untuk briket/pelet arang bahan bakar padat.

Evaluasi Ekonomi dan Analisis Sensitivitas

Analisis ekonomi dasar menunjukkan pabrik ini sangat prospektif:

- *Fixed Capital Investment* (FCI) : Rp 546.271.154.440
- *Working Capital Investment* (WCI) : Rp 96.400.791.960
- *Total Capital Investment* (TCI) : Rp 642.671.946.400
- *Total Production Cost* (TPC) : Rp 397.343.173.357,04
- Total Penjualan Tahunan (*Total Sales*) : Rp 1.043.740.800.000
- *Internal Rate of Return* (IRR) : 30,00%
- *Pay Out Time* (POT) : 1,94 tahun
- *Break-Even Point* (BEP) : 21,34%

Untuk menguji ketahanan finansial proyek terhadap volatilitas pasar, dilakukan analisis sensitivitas dengan mengubah variabel kunci terhadap nilai IRR dan POT:

ISSN 2775-5630

Tabel 2. Analisis Sensitivitas Parameter Ekonomi Terhadap Variasi Pasar

Skenario Perubahan Parameter	Nilai IRR (%)	Nilai POT (Tahun)	Nilai BEP (%)	Status Kelayakan
Kondisi Dasar (*Base Case*)	30,00%	1,94	21,34%	Sangat Layak
Harga Tongkol Jagung naik +10%	27,85%	2,12	23,10%	Layak
Harga Tongkol Jagung naik +20%	25,60%	2,35	24,90%	Layak
Harga Jual Biochar turun -10%	22,40%	2,74	26,45%	Layak
Harga Jual Biochar turun -20%	15,10%	3,85	32,80%	Layak (>MARR 10%)
Biaya Investasi (TCI) naik +15%	24,90%	2,42	23,80%	Layak
Suku Bunga Pinjaman naik 10% →13%	28,10%	2,05	22,50%	Layak

Tabel 2 menunjukkan bahwa kelayakan ekonomi proyek paling sensitif terhadap penurunan harga jual pelet biochar, diikuti oleh kenaikan harga bahan baku tongkol jagung. Meskipun harga jual turun hingga 20%, nilai IRR proyek (15,10%) masih berada di atas batas *Minimum Attractive Rate of Return* (MARR) suku bunga bank riil sebesar 10%, membuktikan bahwa proyek memiliki margin keamanan finansial yang memadai[15,16].

Dampak Lingkungan dan Keberlanjutan

Aspek keberlanjutan perancangan pabrik ini mencakup mitigasi emisi gas rumah kaca, tata kelola limbah samping, serta dampak sosial-ekonomi:

Potensi Reduksi Emisi CO_2: Penggunaan 70.000 ton biochar pelet torefaksi per tahun untuk menggantikan batu bara subbituminus pada boiler PLTU/industri mengeliminasi pembakaran karbon fosil. Berdasarkan faktor emisi batu bara sebesar 2,42 ton CO_2e/ton batu bara dan nilai kalor yang setara, pabrik ini berkontribusi dalam mereduksi emisi GRK bersih sebesar kurang lebih 114.800 ton CO_2e per tahun (*net avoidance carbon emission*)[17].

Strategi Pengelolaan Limbah Cair (*Tar*) dan Gas: Kondensat tar cair hasil pirolisis ringan (4.821 kg/jam) tidak dibuang ke lingkungan, melainkan ditampung dan diolah kembali sebagai bahan bakar tambahan pada unit *thermal oil heater* (pembakar sistem tertutup) bersama gas non-kondensabel (*torgas*). Pemanfaatan *waste-to-energy* ini menekan konsumsi gas alam eksternal sekaligus mencegah pencemaran tanah dan badan air[18].

Dampak Sosial dan Ekonomi Lokal: Pendirian pabrik di Kabupaten Kediri menyerap tenaga kerja operasional langsung sekitar 200 karyawan serta menciptakan lapangan kerja tidak langsung pada sektor pengumpulan, pengeringan awal di tingkat petani, dan rantai logistik limbah pertanian berupa tongkol jagung. Hal ini mendiversifikasi pendapatan petani jagung lokal dari limbah pertanian yang sebelumnya tidak bernilai jual[19,20].

KESIMPULAN

Pabrik biochar pelet torrefaksi dari tongkol jagung berkapasitas 70.000 ton/tahun yang direncanakan di Kabupaten Kediri dinilai sangat layak secara teknis, ekonomis, dan lingkungan. Penegasan karakteristik biochar hasil torefaksi pelet menunjukkan keunggulan teknis berupa densitas energi yang tinggi (5.484,54 kkal/kg) serta sifat hidrofobik. Kelayakan finansial terkonfirmasi melalui nilai IRR sebesar 30,00%, POT 1,94 tahun, dan BEP 21,34%, dengan analisis sensitivitas yang membuktikan ketahanan investasi terhadap fluktuasi harga pasar. Dari sisi keberlanjutan, pabrik berpotensi memitigasi 114.800 ton CO_2e/tahun, memanfaatkan limbah tar sebagai bahan bakar pemanas internal, serta meningkatkan nilai tambah ekonomi sirkular bagi masyarakat Kabupaten Kediri.

UCAPAN TERIMA KASIH

Bagian ini bersifat opsional dan boleh dihilangkan oleh penulis. Ucapan terima kasih berisikan prakata apresiasi penulis kepada orang, kelompok, atau instansi yang berkontribusi pada penelitian dan atau penulisan artikel.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Duanaputri, R., Sulistyowati, S., and Insani, P. A., 2022, Analisis peramalan kebutuhan energi

listrik sektor industri di Jawa Timur dengan metode regresi linear, *J. Eltek*, 20 (2), 50–60.

[2] Wulandari Mirzayanti, Y., Ningsih, E., Lillahulhaq, Z., Ma, Z., Renova, C., Wijaya, Y., Tempurung Kelapa sebagai Katalis pada Proses Konversi Minyak Curah Menjadi Biodiesel, P., and Yasin Wijaya, D., 2020, Pemanfaatan Tempurung Kelapa sebagai Katalis pada Proses Konversi Minyak Curah Menjadi Biodiesel, *J. Res. Technol.*, VI (2), 173–183.

[3] Yustas, Y. M., Tarimo, W. M., Mbacho, S. A., Kiobia, D. O., Makange, N. R., Kashaija, A. T., Mukama, E. B., Mzigo, C. K., and Silungwe, F. R., 2022, Toward Adaptation of Briquettes Making Technology for Green Energy and Youth Employment in Tanzania : A Review, 74–93.

[4] Utami, G. S., Ningsih, E., and Kusumaningrum, D., 2023, Proximate Analysis of Durian Bark Briquettes and Coconut Shells with Starch Adhesive Based on SNI 01-6235-2000, 146–151.

[5] Rumiyanti, L., Irnanda, A., and Hendronursito, Y., 2018, Analisis Proksimat Pada Briket Arang Limbah Pertanian, *Spektra J. Fis. dan Apl.*, 3 (1), 15–22.

[6] Dirjen Energi Baru, Terbarukan dan Konversi Energi, K. E., 2013, Informasi Teknis Biodiesel, 15.

[7] Utami, G. S., Caroline, J., Ningsih, E., and Arsana, I. M., 2021, Production and Quality Analysis of Coconut Shell Charcoal Briquettes and Durian Shell in Terms of Composition, 44 (11), 108–114.

[8] Silas, K., Ibrahim, N. A., Abdullahi, U., Mohammed, H. D., Undiandeye, J., Ngulde, A. B., and Babagana, G., 2025, Measurement : Energy Optimizing sustainable briquette production by utilizing local feedstock, *Meas. Energy*, 8 (November), 100074.

[9] Chen, Y. Di, Liu, F., Ren, N. Q., and Ho, S. H., 2020, Revolutions in algal biochar for different applications: State-of-the-art techniques and future scenarios, *Chinese Chem. Lett.*, 31 (10), 2591–2602.

[10] Ayuningtiyas, G., Harditya, F., and Ningsih, E., 2020, Production of Briquette Made of Sugarcase Bagasse and Dry Leaves Mixture by Microwave Torrefaction Using Tapioca Flour as Adhesive, 2020, 140–144.

[11] Wiersma, W., Ploeg, M. J. Van Der, Sauren, I. J. M. H., and Stoof, C. R., 2020, Geoderma No effect of pyrolysis temperature and feedstock type on hydraulic properties of biochar and amended sandy soil, *Geoderma*, 364 (December 2018), 114209.

[12] Ningsih, E., and Udyani, K., 2020, Potentials of Plastic Waste for Making Brickets: the Effect of Composition on Procsimate Analysis, *Konversi*, 9 (2), 98–103.

[13] Agustian, E., Hadi, N., Prasetia, H., and Rahmah, S., 2025, Bio-briquettes from tea fluff biochar : a response surface methodology study on particle size , resin gum-adhesive , and used cooking oil immersion time, 14 (5), 854–868.

[14] Reza, V., Snapp, P., Dalam, E., Di, I. M. A., Socialization, A., Cadger, O. F., To, M., Cadger, S., Programpadang, R., Hukum, F., Hatta, U. B. U. B., Sipil, F. T., Hatta, U. B. U. B., Danilo Gomes de Arruda, Bustamam, N., Suryani, S., Nasution, M. S., Prayitno, B., Rois, I., Jaelani, A. K., Laili, R. R., Rohman, T., Surabaya, U. N., Destiana, R., Kismartini, K., Yuningsih, T., Ummah, R., Hipni, M., Pen, U., Yuliaty, T., Rasyid, A., Septiani, N. V., Zamzami, L., and Rezekiana, L., 2020, No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における 健康関連指標に関する共分散構造分析Title, *Bussiness Law binus*, 7 (2), 33–48.

[15] Witari, A. P., Anggraini, G. L., and Ningsih, E., 2021, Studi Kelayakan Pabrik Gula Rafinasi dengan Kapasitas 100000 ton/tahun melalui Analisa Ekonomi, 1 (1), 7–12.

[16] Raj, R., and Tirkey, J. V., 2023, Techno-economic assessment of sugarcane bagasse pith-based briquette production and performance analysis of briquette feed gasifier-engine system, *J. Environ. Manage.*, 345 (June), 118828.

[17] Shahbaz, M., Alherbawi, M., Okonkwo, E. C., and Al-Ansari, T., 2024, Evaluating negative emission technologies in a circular carbon economy: A holistic evaluation of direct air capture, bioenergy carbon capture and storage and biochar, *J. Clean. Prod.*, 466, 142800.

[18] Warintan, saragih E., Wahyuni, B., and Listyorini, F. H., 2020, Sistem Pertanian Terpadu

Dengan Sistem Kandang Paddock Untuk Meningkatkan Pendapatan, *Din. J. Pengabdi. Kpd. Masy.*, 4 (1), 133–139.

[19] Saputra, U. W., Munir, M., Ningsih, E., Saputra, D., Vaggy, W. S., and Novianarenti, E., 2025, Estimasi Kebutuhan Listrik untuk Pabrik Etilen Diklorida dengan Kapasitas 120.000 ton/tahun, 639–644.

[20] Novianarenti, E., and Ningsih, E., 2018, Upaya Peningkatan Nilai Ekonomi Sampah Plastik Dengan Program Bank Sampah Di Simo Jawar Baru Kecamatan Sukomanunggal Surabaya Teknik Mesin , Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya Teknik Kimia , Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, 2 (2), 47–52.