

POTENSI KONVERSI ENERGI PIROLISIS DALAM PENGOLAHAN LIMBAH TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT DI SUMATERA UTARA

Rizki Pangidoan Lubis¹, Zulfan Zulfan²

rizkilubis.mesin@gmail.com¹, zulfanmorgan@gmail.com²

Universitas Alwasliyah Medan

ABSTRAK

Indonesia merupakan salah satu penghasil kelapa sawit terbesar di dunia, dengan limbah utama berupa tandan kosong kelapa sawit (TKKS). Limbah ini belum dimanfaatkan secara optimal dan dapat menyebabkan pencemaran lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. Salah satu solusi potensial dalam pengolahan limbah TKKS adalah teknologi pirolisis, yaitu proses dekomposisi termal bahan organik tanpa atau dengan sedikit oksigen. Proses ini menghasilkan produk utama berupa bio-oil, syngas, dan bio-char yang memiliki potensi sebagai sumber energi terbarukan. Kajian ini bertujuan untuk menganalisis potensi teknologi pirolisis dalam mengonversi limbah TKKS menjadi energi berbasis biofuel melalui pendekatan literatur review. Hasil kajian menunjukkan bahwa pirolisis dapat dilakukan melalui metode simulasi dan eksperimen, dengan efisiensi konversi yang bergantung pada parameter seperti suhu reaksi, jenis bahan baku, dan desain reaktor. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa peningkatan suhu pirolisis dapat meningkatkan yield bio-oil, sementara yield bio-char dan gas bervariasi tergantung pada suhu operasi. Selain itu, terdapat perbedaan hasil antara simulasi dan eksperimen akibat kehilangan bio-oil dalam sistem distribusi. Berdasarkan hasil kajian, teknologi pirolisis memiliki potensi besar dalam mendukung pengelolaan limbah TKKS sebagai sumber energi alternatif. Pengembangan lebih lanjut diperlukan untuk meningkatkan efisiensi proses, optimalisasi suhu operasi, serta penerapan teknologi ini dalam skala industri guna mendukung keberlanjutan energi dan mitigasi dampak lingkungan.

Kata Kunci: Pirolisis, Tandan Kosong Kelapa Sawit, Energi Terbarukan, Pengelolaan Limbah.

ABSTRACT

Indonesia is one of the largest palm oil producers in the world, with the main waste in the form of empty oil palm bunches (EOPB). This waste has not been optimally utilized and can cause environmental pollution if not managed properly. One potential solution in processing EOPB waste is pyrolysis technology, which is the process of thermal decomposition of organic materials without or with little oxygen. This process produces main products in the form of bio-oil, syngas, and biochar which have the potential as renewable energy sources. This study aims to analyze the potential of pyrolysis technology in converting EOPB waste into biofuel-based energy through a literature review approach. The results of the study show that pyrolysis can be carried out through simulation and experimental methods, with conversion efficiency depending on parameters such as reaction temperature, type of raw material, and reactor design. The experimental results show that increasing the pyrolysis temperature can increase the bio-oil yield, while the bio-char and gas yields vary depending on the operating temperature. In addition, there are differences in results between simulation and experiment due to the loss of bio-oil in the distribution system. Based on the results of the study, pyrolysis technology has great potential in supporting the management of EOPB waste as an alternative energy source. Further development is needed to improve process efficiency, optimize operating temperatures, and implement this technology on an industrial scale to support energy sustainability and mitigate environmental impacts.

Keywords: Pyrolysis, Empty Oil Palm Bunches, Renewable Energy, Waste Management.

PENDAHULUAN

Negara Indonesia merupakan penghasil kelapa sawit terkemuka di dunia. Kelapa sawit menghasilkan limbah yang disebut dengan tandan kosong kelapa sawit merupakan bentuk sisa produksi dari industri kelapa sawit. Limbah TKKS umumnya tidak dimanfaatkan secara efektif yang mengakibatkan dampak negatif terhadap lingkungan jika dibiarkan terdegradasi. Oleh sebab itu, penting untuk menjelajahi potensi pemanfaatan limbah TKKS sebagai bentuk sumber energi. (Hasibuan, et al., 2023)

Sumatera utara merupakan provinsi bagian dari Negara Indonesia. Berdasarkan laporan badan pusat statistik wilayah Sumatera Utara mencakup total luas 72.460,74 Km² pada tahun 2022, seperti yang dilaporkan oleh sumut.bps.go.id. luas tanaman kelapa sawit produksi perkebunan di Kabupaten/Kota mencapai 442.072,76 hektar, dengan produksi kelapa sawit sebanyak 7.451.890,91 ton pada tahun 2021. Produksi kelapa Sawit kemudian diolah oleh Perusahaan Kelapa Sawit (PKS), Berdasarkan hasil laporan direktori perusahaan perkebunan kelapa sawit Provinsi Sumatera Utara didapatkan sejumlah 327 perusahaan perkebunan kelapa sawit yang berstatus aktif. (BPS, 2022).

Seiring dengan peningkatan produksi kelapa sawit dari tahun ke tahun, akan terjadi peningkatan volume limbah yang dihasilkan. Umumnya, limbah padat dari industri kelapa sawit memiliki kandungan bahan organik yang tinggi, yang berpotensi menyebabkan pencemaran lingkungan. Jika penanganan limbah dilakukan secara tidak tepat, dapat menyebabkan pencemaran lingkungan. Upaya telah dilakukan untuk mengolah limbah padat kelapa sawit dan meningkatkan nilai ekonominya. Limbah kelapa sawit merujuk pada sisa-sisa hasil produksi kelapa sawit yang tidak termasuk dalam produk utama atau merupakan hasil sampingan dari proses tersebut (Haryanti, et al., 2014).

Pada prosesnya, pengolahan kelapa sawit tidak hanya menghasilkan Crude Palm oil (CPO), melainkan juga menghasilkan limbah dalam jumlah yang besar. Jika PKS melakukan proses pengolahan 1 ton Tandan Buah Segar (TBS) kelapa sawit, maka akan menghasilkan TKKS (Tandan Kosong Kelapa Sawit) sebesar 22-23% TKKS atau sebesar 220 – 230 kg TKKS. Tandan kosong kelapa sawit merupakan limbah yang belum termamfaatkan secara optimal. Selama ini pemanfaatan tandan kosong hanya sebagai bahan bakar boiler, kompos dan juga sebagai pengeras jalan di perkebunan kelapa sawit. Padahal tandan kosong kelapa sawit berpotensi untuk dikonversi menjadi energi terbarukan (Fuadi & Pranoto, 2016).

Kebanyakan pabrik kelapa sawit masih membakar di insinerator, padahal cara ini sudah dilarang oleh pemerintah Indonesia, menimbunnya, menggunakannya sebagai mulsa di perkebunan kelapa sawit atau mengubahnya menjadi kompos. Seringkali penumpukan TKKS dapat menyebabkan pencemaran lingkungan sehingga mengganggu kesehatan manusia. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dibutuhkan solusi lain dengan mengolah limbah TKKS guna menurunkan tingkat pencemaran lingkungan dan meningkatkan nilai keekonomian dari TKKS itu sendiri (Mujiarto, et al., 2014).

Selain dengan insinerator, limbah tandan kosong kelapa sawit dapat diolah dengan berbagai teknologi, salah satunya adalah dengan menggunakan teknologi pirolisis. Teknologi pirolisis menggunakan metode pirolisis untuk mengolah limbah, dengan menerapkan konsep ‘waste to energy’ sehingga hasil akhir dari proses pengolahan limbah dapat dijadikan sebagai bahan bakar. Pirolisis adalah suatu teknologi dekomposisi kimia bahan organik dengan suatu proses pemanasan tanpa atau dengan sedikit oksigen atau reagen lainnya. Pirolisis dilakukan di dalam sebuah reaktor pada temperature hingga 800°C dengan pengurangan atmosfer (hampa udara) (Isykapurnama, et al., 2021).

Proses dekomposisi pada pirolisis ini juga sering disebut dengan devolatilisasi. Produk utama yang dihasilkan dari pirolisis adalah minyak (Bio-Oil), arang (char) dan gas (Synthetic gas). Bio oil yang dihasilkan dapat digunakan sebagai zat additif atau campuran dalam bahan bakar. Synthetic gas (Syngas) yang terbentuk dapat dibakar secara langsung. Pirolisis dari biomassa akan menghasilkan zat baru seperti gas dan arang. Gas dari pirolisis dapat dibedakan menjadi gas yang tidak dapat dikondensasi (CO, CO₂, CH₄, dll) dan gas yang dapat dikondensasi (tar). Minyak akan terjadi pada proses kondensasi dari gas yang terbentuk, disebut juga bio-oil. Sedangkan Arang yang terbentuk dapat digunakan untuk bahan bakar ataupun digunakan sebagai karbon aktif (Mujiarto, et al., 2014).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan kajian literatur terhadap definisi, prinsip, komponen teknologi, mekanisme atau cara kerja teknologi, hasil akhir setelah penggunaan, ilustrasi alat, dan pengaruh jenis bahan pada proses pirolisis Tandan Kosong Kelapa Sawit. Sumber kajian ini adalah data sekunder yang digunakan termasuk internet, laporan penelitian, prosiding, dan artikel jurnal nasional maupun internasional yang membahas mengenai pemanfaatan teknologi pirolisis dalam mengolah limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Literature review ini dilakukan untuk mengetahui definisi, prinsip, komponen teknologi, mekanisme atau cara kerja teknologi, hasil akhir setelah penggunaan, ilustrasi alat, dan pengaruh jenis bahan pada proses pirolisis sampah sehingga dapat diketahui potensi teknologi pirolisis dalam mengolah limbah APD yang menumpuk saat pandemi. Literatur yang terkumpul dianalisis dengan tabel critical appraisal untuk menjawab tujuan penulisan.

Analisis Critical Appraisal

Terdapat 7 literatur yang membahas tentang definisi, prinsip, komponen teknologi, mekanisme atau cara kerja teknologi, hasil akhir setelah penggunaan, ilustrasi alat, dan pengaruh jenis bahan pada proses pirolisis TKKS baik secara simulasi ataupun proses eksperimental. Semua jurnal tersebut adalah jurnal nasional yang dilakukan pencarian melalui portal Google Scholar dengan mengetikkan kata kunci “Teknologi Pirolisis”, “Pengolahan Tandan Kosong kelapa Sawit dengan Teknologi Pirolisis”, dan “Penerapan Teknologi Pirolisis di Indonesia” yang kemudian dianalisis dengan menggunakan critical appraisal untuk mengetahui persamaan dan perbedaan yang terdapat dari masing-masing jurnal. Tabel 1 menunjukkan hasil yang bervariasi terhadap definisi, prinsip, komponen teknologi, mekanisme atau cara kerja teknologi, hasil akhir setelah penggunaan, ilustrasi alat, dan pengaruh jenis bahan pada proses pirolisis TKKS.

PEMBAHASAN

Pirolisis

Pirolisis adalah suatu proses dekomposisi kimia bahan organik melalui proses pemanasan tanpa atau sedikit oksigen atau bahan lain yang dikonsumsi saat terjadi reaksi kimia tersebut. Pirolisis biomassa merupakan metode konversi energi alternatif yang menjanjikan dalam memproduksi padatan (arang), cairan (tar dan organik lainnya), dan syngas. Bergantung pada kondisi operasi proses pirolisis, pirolisis dapat dibagi menjadi tiga sub-kelas yaitu pirolisis konvensional (lambat), pirolisis cepat, dan pirolisis kilat. Pirolisis biomassa lambat dikaitkan dengan arang kontinental tinggi, tetapi pirolisis cepat

dikaitkan dengan tar, pada suhu rendah (675-775 K), dan/atau gas, pada suhu tinggi. Saat ini, teknologi yang disukai adalah pirolisis cepat atau kilat pada suhu tinggi dengan waktu tinggal singkat (Sinaga, et al., 2019). Skema set up eksperimen terdiri atas 5 komponen utama yaitu reaktor pirolisis, kondensor, separator, gas burner, dan tungku pembakaran (Setiawan, et al., 2022).

Mekanisme

Eksperimen proses pirolisis produksi Bio-Oil terdiri dari proses Pretreatment, Heat Supply, Pirolisis, dan Kondensasi. Tahapan proses pretreatment dilakukan dengan memotong sampel TKKS menjadi potongan-potongan kecil kemudian dikeringkan selama tiga hari. Proses pembakaran adalah untuk menyediakan panas bagi reaktor pirolisis. Material yang digunakan dalam proses pembakaran adalah serpihan kayu, yang dibantu oleh udara dengan nilai excess-nya. Suhu kerja pirolisis mencapai maksimum 500°C dan dipertahankan pada nilai tersebut hingga proses selesai. Syngas tersebut kemudian masuk ke proses kondensasi yang bertujuan untuk menurunkan suhu syngas sehingga terjadi proses kondensasi dan menghasilkan bio-oil. Proses pendinginan dilakukan dengan cara melewati syngas melalui saluran koil di dalam tangki berisi air dengan suhu 27°C (Nur, et al., 2021).

Sebelum melakukan eksperimen, proses pirolisis kerap dilakukan metode simulasi komputasional. Sistem ini terdiri dari bagian pembakaran untuk memasok panas, bagian pirolisis, dan bagian kondensasi. Simulasi dimulai dengan mencampur kedua TKKS dengan serat yang telah dimasukkan ke AspenPlus dengan menggunakan reaktor. Kemudian campuran tersebut dipanaskan dalam reaktor hingga mencapai suhu yang diinginkan. Panas yang dibutuhkan untuk proses tersebut dipasok dari bagian pembakaran. Syngas yang dihasilkan kemudian didinginkan menggunakan kondensor model berpendingin udara dengan udara sebagai fluida pendingin untuk menghasilkan bio-oil. Tahap pembakaran merupakan tahap pertama yang digunakan untuk menyediakan panas bagi reaktor pirolisis pada tahap kedua. TKKS dan serat dari limbah kelapa sawit digunakan sebagai bahan baku pirolisis biomassa dalam simulasi komputasional ini dengan memasukkan Analisis Proksimat dan Ultimate. Terakhir, pada bagian kondensasi, syngas akan didinginkan, sehingga terjadi pemisahan syngas panas menjadi syngas dingin dan bioliquid (Nur & Kongnardi, 2021).

Sampel TKKS sebanyak 300g dimasukkan kedalam reaktor pirolisis dilengkapi dengan pemanas listrik, thermocouple didalam reaktor dan pengendali temperatur untuk mengatur temperatur yang diinginkan. Rangkaian reaktor dilengkapi dengan satu set kondensor untuk menampung gas/ bio-oil yang terkondensasi. Proses pirolisis menghasilkan produk berupa liquid, gas, dan bio-char. Produk liquid adalah gas terkondensasi yang melewati rangkaian kondensor dengan memanfaatkan air es sebagai media pendingin. Total cairan yang diperoleh dari kondensasi kemudian di pisahkan antara bio-oil dan asap cair menggunakan corong pisah serta bio-char yang berada didalam reaktor juga ditimbang. Selanjutnya, gas non-condensable ditentukan berdasarkan perbedaan antara bahan baku hasil biooil dan yield bio-char (Isykapurnama, et al., 2021).

Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) yang telah diperkecil ukurannya dikeringkan di bawah sinar matahari hingga kering, setelah kering di karbonisasi di dalam reaktor pirolisis dengan variasi suhu 350°C, 400°C, 450°C dan 500°C selama waktu 2 jam 30 menit. Arang yang di dapat dari hasil pirolisis kemudian di ayak menggunakan siever dengan ukuran 250 mesh untuk menyeragamkan ukuran arang sebelum dicampur perekat. Arang hasil pirolisis dicampur dengan perekat sesuai dengan variasi perekat yang akan digunakan dalam pembuatan briket yaitu 95%:5%; 90%:10% dan 85%:15%. Untuk setiap

variasi suhu yang dilakukan akan dicampur dengan 95% arang: 5% perekat kanji; 90% arang: 10% perekat kanji; dan 85% arang : 15% perekat kanji. Arang yang telah tercampur dengan perekat sesuai dengan variasi selanjutnya dicetak dengan alat pencetak briket (Ristianingsih, et al., 2015).

Tandan kosong kelapa sawit yang berupa tandan besar dihancurkan hingga bentuknya menjadi serabut supaya hasil yang didapatkan maksimal. Kemudian Rangkaian alat yang telah ada disiapkan dengan memastikan semuanya telah terpasang dengan baik. Tempat pembakaran diisi arang dan ditambah minyak tanah sebagai bahan bakar. Serabut tandan kosong kelapa sawit dimasukkan kedalam silinder/ reaktor pirolisis. Dinyalakan blower saat bahan bakar mulai terbakar. Setelah terjadi pembakaran, blower dimatikan dan ditutup tempat pembakaran hingga suhu meningkat. Kemudian dibiarkan hingga dingin (Febriyanti, et al., 2019).

Komponen Pirolisis

Berdasarkan 7 jurnal yang di kaji baik secara simulasi maupun eksperimental, dapat disimpulkan bahwa komponen utama yang digunakan untuk membuat alat pirolisis adalah reaktor, kondensor, furnace, tar separator dan gas burner. Komponen pendukung lain yang digunakan dalam proses pirolisis adalah thermocouple, blower, pompa air, selang, penampung Bio-Oil, Liquified Petroleum Gas (LPG), stopwatch, pengukur tekanan, pipa, water gas shift, drum bekas, lubang bahan bakar, lubang udara. (Setiawan, et al., 2022) (Mujiarto, et al., 2014) (Ristianingsih, et al., 2015) (Febriyanti, et al., 2019) (Idris & Idris, 2016)

Reaktor berfungsi sebagai alat pengarangan bahan baku berupa TKKS (Ristianingsih, et al., 2015). Manufaktur pembuatan reaktor pirolisis terbuat dari bahan satinless steel. Reaktor pirolisis berbentuk pipa dengan bagian atas reaktor diikatkan dengan baut dan merupakan tempat input bahan bakar. Pada saat proses pirolisis berlangsung, bagian atas reaktor harus ditutup dengan rapat untuk menghindari kebocoran karena pirolisis bekerja pada suhu tinggi dan hampa udara (Isykapurnama, et al., 2021).

Kondensor digunakan untuk mendinginkan syngas seingga terjadi pemisahan syngas panas menjadi syngas dingin dan bioliquid. Selama proses pirolisis berlangsung akan menghasilkan syngas. Syngas panas akan dihasilkan selama proses pirolisis. Syngas panas kemudian akan masuk ke bagian kondensasi dan memisahkan gas yang dapat dikondensasi dari yang tidak dapat dikondensasi. Gas yang tidak dapat dikondensasi kemudian akan memiliki suhu rendah sebagai syngas dingin (Nur & Kongnardi, 2021).

Di sisi lain, setelah melalui bagian kondensasi, syngas akan masuk ke tar separator untuk memisahkan Bio-Oil dari syngas yang tidak dapat terkondensasi (Setiawan, et al., 2022). Proses pendinginan dilakukan dengan cara mengalirkan syngas melalui saluran koil di dalam tangki drum berisi air sebanyak 200 liter dengan suhu 27°C. Kemudian Bio-Oil hasil kondensasi akan di tampung pada botol kaca (Nur, et al., 2021). Komponen kondensor lainnya seperti pompa air berfungsi untuk memompakan air (Isykapurnama, et al., 2021).

Furnace atau tungku pembakaran adalah alat yang digunakan untuk pemanasan pada suhu tinggi. Untuk memanaskan reaktor, pembakar LPG dinyalakan dari bagian bawah reaktor dan menghasilkan laju pemanasan (Setiawan, et al., 2022). Laju pemanasan sekitar 3 °C/menit selama 100 menit pertama. Stopwatch digunakan untuk memastikan konsistensi waktu pengukuran. Selain pembakaran LPG, tungku pembakaran atau tempat pembakaran diisi arang dan ditambah minyak tanah sebagai bahan bakar. Blower dinyalakan saat bahan bakar mulai terbakar. Setelah terjadi pembakaran, blower dimatikan dan ditutup tempat pembakaran hingga suhu meningkat (Febriyanti, et al., 2019),

kemudian termokopel yang digunakan untuk mengatur suhu operasi (Mujiarto, et al., 2014). Pengukur tekanan berfungsi untuk mengontrol dan deteksi tekanan pada proses pirolisis.

Hasil Akhir Proses

Proses pirolisis pada kajian literatur ini disajikan dengan metode simulasi dan eksperimental. Penelitian (Nur & Kongnardi, 2021). Terdapat perbedaan yang signifikan dalam nilai kalor antara syngas panas dan syngas dingin. Dengan suhu pirolisis yang bervariasi dari 450 °C hingga 650 °C, nilai kalor syngas panas terus meningkat. Sebaliknya, nilai kalor syngas dingin menurun pada suhu 450 °C – 550 °C dan mulai meningkat hingga suhu naik 650 °C.

Dalam produksi bio-oil penelitian (Nur, et al., 2021) melaporkan perbandingan proses pirolisis menghasilkan bio-oil berdasarkan analisis simulasi dengan eksperimental. Simulasi kuantitas pirolisis dengan memanfaatkan biomassa TKKS sebagai bahan baku pada suhu 500°C menghasilkan sebanyak 0,921 liter. Sementara itu, bio-oil hasil percobaan menghasilkan sebanyak 0,561 liter. Selisih yang terjadi antara simulasi dan eksperimen disebabkan oleh masih adanya sisa bio-oil di tangki penyimpanan dan pipa distribusi. Ketika tekanan kerja dari reaktor pirolisis sama dengan lingkungan, sisa bio-oil di dalam pipa tidak terdorong keluar, sehingga tetap berada di dalam pipa distribusi. Jumlah bio-oil yang diproduksi secara massal pada simulasi lebih tinggi 39,08% dibandingkan dengan yield pada percobaan karena masih terdapat bio-liquid yang tersimpan di dasar penyimpanan syngas.

Dalam penelitian lain, proses pirolisis menggunakan variabel suhu pirolisis yaitu 500°C, 550°C dan 600°C. Hasil dari penelitian ini didapatkan yield Bio-oil terbesar 45% pada suhu 600°C, yield gas terbesar 29,86% pada suhu 500°C dan yield bio-char terbesar 32,71% pada suhu 550°C. Pengaruh suhu terhadap produk hasil pirolisis menunjukkan bahwa yield bio-oil meningkat seiring naiknya suhu, yield bio-char fluktuatif, dan yield gas meningkat saat suhu turun. Suhu yang lebih tinggi menyebabkan densitas dan viskositas semakin rendah. Komposisi bio-oil didominasi oleh senyawa oksigenat seperti fenol, karboksil, dan karbonil (Febriyanti, et al., 2019).

KESIMPULAN

Berdasarkan kajian literatur yang dilakukan mengenai teknologi pirolisis dalam pengolahan limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS), dapat disimpulkan bahwa:

1. Pirolisis sebagai Metode Konversi Energi

Pirolisis merupakan metode dekomposisi termal bahan organik yang menjanjikan dalam menghasilkan bio-oil, gas, dan bio-char sebagai sumber energi alternatif.

2. Mekanisme dan Komponen Pirolisis

Proses pirolisis melibatkan tahap pretreatment, pemanasan, pirolisis, dan kondensasi, dengan komponen utama seperti reaktor pirolisis, kondensor, tar separator, dan furnace.

3. Perbandingan Simulasi dan Eksperimental

Hasil bio-oil dari metode simulasi lebih tinggi dibandingkan eksperimen, karena adanya sisa bio-oil yang tersimpan dalam tangki penyimpanan dan pipa distribusi.

4. Pengaruh Suhu terhadap Hasil Pirolisis

Peningkatan suhu pirolisis meningkatkan yield bio-oil, sedangkan yield bio-char dan gas menunjukkan pola yang bervariasi tergantung pada suhu operasi.

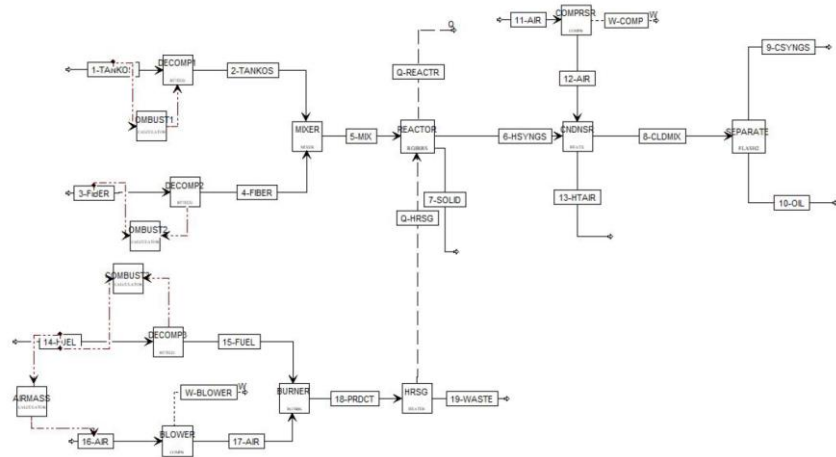
Tabel 1. Analisis Critical Appraisal terhadap Ilustrasi Alat.

Pustaka	Komponen teknologi pirolisis	Skema/ilustrasi alat
(Setiawan, et al., 2022)	Reactor, Furnace, Tar Separator, Condenser, Liquified Petroleum Gas	1. Reactor 2. Furnace 3. Tar Separator 4. Condenser 5. Liquified Petroleum Gas
(Ristianin gsih, et al., 2015)	reaktor pirolisis sebagai alat pengarangan, korek api, ayakan 250 mesh, gelas arloji, gelas ukur, gelas bekker, kompor listrik, oven, neraca analitik, pengaduk, sudip dan stopwatch.	
(Nur, et al., 2021)	Blower, ruang bakar (combust), input bahan bakar, pembakaran (furnace), reaktor pirolisis, pompa air, kondensor, separator	



(Nur &
Kongnardi, 2021)

Air massflow,
blower,
burner,
decomposer,
combustion,
hrsg, reactor,
condenser,
compressor,
separate



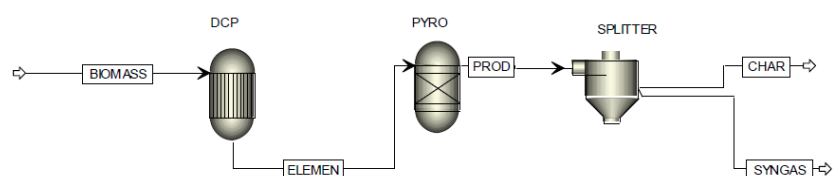
(Febriyanti, et al., 2019)

alat pirolisis,
blower,
piknometer,
viskometer,
Thermocouple,
pompa, selang,
neraca analitik
dan
penampung
Bio-oil.



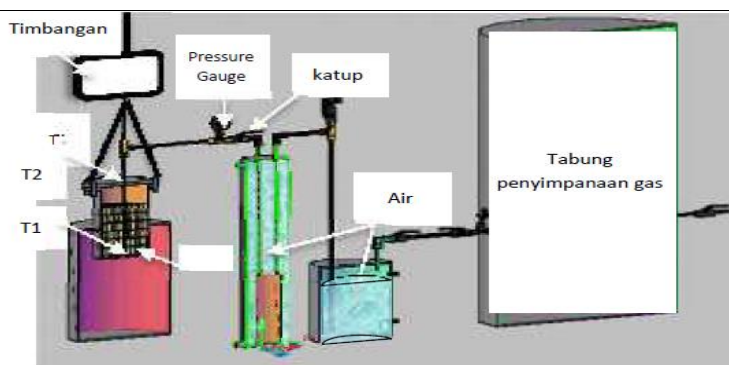
(Sinaga,
et al.,
2019)

Decomposer
(R-yield),
Pyrolysis (R-
Gibbs), Splitter
(SS-Split)

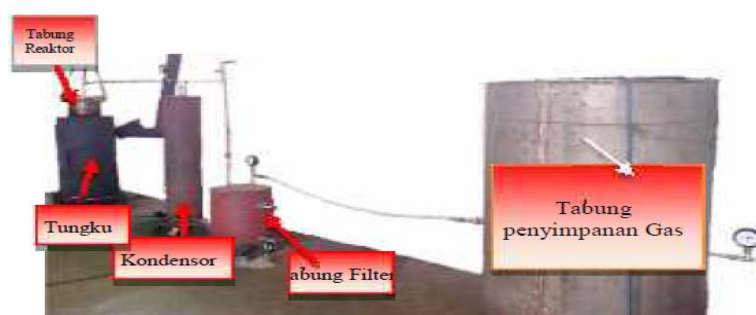


(Idris &
Idris,
2016)

Tabung
reaktor,
tungku,
kondensor,
tabung filter,
tabung
penyimpanan
gas, pressure
gauge, katup,
dan air.



Desain sistem alat pengujian



DAFTAR PUSTAKA

- Isykapurnama, S., Sarastri, D. & Mahardika, H. . ‘., 2021. Potensi Teknologi Pengolahan Berbasis Pirolisis dalam Penanganan Limbah Alat Pelindung Diri yang Menumpuk di Masa Pandemi Covid-19. *Generics : Journal of Research in Pharmacy*, Edisi 1, Volume 1, pp. 34-43.
- Mujiarto, S., Ristianingsih, Y., Amrullah, A. & Khalid, A., 2014. STUDI PROSES PIROLISIS TANDAN KOSONG SAWIT MENJADI BIO OIL SEBAGAI ENERGI ALTERNATIF. *PolhaSains*, Volume 02, Nomor 2,, pp. 21-25.
- BPS, 2022. DIREKTORI PERUSAHAAN PERKEBUNAN KELAPA SAWIT PROVINSI SUMATERA UTARA. Sumatera Utara: BPS Provinsi Sumatera Utara , Hal 6-8.
- Febriyanti, F. et al., 2019. PEMANFAATAN LIMBAH TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT MENJADI BIO-CHAR, BIO-OIL DAN GAS DENGAN METODE PIROLISIS. *Jurnal Chemurgy*, Vol. 03, No.2,, pp. 12-17.
- Fuadi, A. M. & Pranoto, H., 2016. Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Bahan Baku Pembuatan Glukosa. *Chemica*, Volume 3, Nomor 1, pp. 1-5, ISSN: 2355-8776.
- Haryanti, A., N., Sholiha, P. S. F. & Putri, N. P., 2014. STUDI PEMANFAATAN LIMBAH PADAT KELAPA SAWIT. *Konversi*, Volume 3 No. 2, pp. 57-66, e- ISSN: 2541-3481.
- Hasibuan, A. et al., 2023. PEMANFAATAN LIMBAH KELAPA SAWIT (TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT) SEBAGAI PUPUK ORGANIK YANG RAMAH LINGKUNGAN DI KABUPATEN LABUHAN BATU UTARA. *ZAHRA: JOURNAL OF HEALTH AND MEDICAL RESEARCH*, pp. 312-319.
- Nur, T. . B. & Kongnardi, J., 2021. Simulation Analysis of the Pyrolysis Process for the Production of Syngas from Oil Palm Empty Fruit Bunch and Fiber. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, pp. 1-7, doi:10.1088/1755-1315/927/1/012033.
- Nur, T. B., Yansen, V. & Wibowo, R. P., 2021. Simulation analysis of bio-oil from slow pyrolysis using palm empty fruit bunch. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, pp. 1-8, doi:10.1088/1757-899X/1122/1/012113.
- Ristianingsih, Y., Ulfa, A. & K.S, R. S., 2015. PENGARUH SUHU DAN KONSENTRASI PEREKAT TERHADAP KARAKTERISTIK BRIKET BIOARANG BERBAHAN BAKU TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT DENGAN PROSES PIROLISIS. *Konversi*,

Volume 4 No. 2,, pp. 45 – 51, e- ISSN: 2541-3481.

- Setiawan, A., Zakarya, M., A. & Nur, T. B., 2022. Experimental Investigation and Simulation of Slow Pyrolysis Process of Arabica Coffee Agroindustry Residues in a Pilot-Scale Reactor. *Journal of Ecological Engineering* 2022, 23(8), pp. 260–269, doi.org/10.12911/22998993/150693.
- Sinaga, F. T. H., Napitupulu, F. H. & Nur, T. B., 2019. Hydrogen Gas Production Simulation Utilizing Empty Fruit Bunch of Oil Palm Pyrolysis Unit by Steam Methane Reforming Process. IOP Publishing, *Journal of Physics: Conference Series*, pp. 1-6, doi:10.1088/1742-6596/1566/1/012125.
- UTARA, B. P. S. P. S., 2022. DIREKTORI PERUSAHAAN PERKEBUNAN KELAPA SAWIT PROVINSI SUMATERA UTARA. Katalog: 1305072. 12, pp. 6-8.
- Y. & Idris, M., 2016. PENGUJIAN PIROLISIS KAYU DENGAN METODE HAMPA UDARA UNTUK MEMPRODUKSI BAHAN BAKAR GAS. *Jurnal Inotera* Vol. 1, No. 1, pp. 57-63.