

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pergeseran yang cepat dalam pertumbuhan populasi dikombinasikan dengan percepatan pembangunan dalam kebiasaan hidup yang cenderung menggunakan secara berlebihan dan menghasilkan banyak sampah, secara signifikan berdampak pada kuantitas dan kualitas timbulan sampah kota atau *Municipal Solid Waste* (MSW) dalam beberapa abad terakhir (Kashani Lotfabadi et al., 2022). Diperkirakan timbulan sampah akan meningkat lebih dari 75% dari tahun 2020 hingga tahun 2050 dengan 3,4 – 3,8 miliar metrik ton per tahun (Bruna Alves, 2024). Selain itu, tingginya tingkat timbulan MSW menimbulkan masalah serius di sebagian besar negara (Goa et al., 2021), sehingga diperlukan pertimbangan metode untuk membuang limbah padat perkotaan, terutama bagian yang tidak dapat didaur ulang. Metode pembuangan sampah yang umum digunakan, seperti penimbunan langsung, tidak ramah lingkungan (Viathasvann et al., 2005). Banyak potensi risiko dan bahaya yang terkait dengan Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) terkait dengan pembusukan sampah yang tidak terkendali, yang menghasilkan polutan berbahaya yang dapat membahayakan lingkungan (Punin et al., 2013). Energi, air, kesehatan, dan lingkungan semuanya dipandang oleh Perserikatan Bangsa - Bangsa (PBB) sebagai tantangan krusial bagi masyarakat di abad ke-21 (Qazi et al., 2019).

Dalam dekade ini, yang menjadi permasalahan dan kekhawatiran global tentang kelangkaan energi, dan banyak negara berkembang mengimpor minyak bumi. Selain itu, efek berbahaya dari bahan bakar fosil telah membuat kebutuhan akan bahan bakar fosil telah membuat kebutuhan akan energi terbarukan menjadi tidak terbantahkan (Pang et al., 2019). Permintaan energi telah meningkat secara signifikan sejak abad ke-20 (Shoaei et al., 2023). Para peneliti telah menunjukkan peningkatan minat dalam memproduksi bahan bakar nabati yang dapat digunakan di berbagai industri, seperti perusahaan semen dan pembangkit listrik, karena meningkatnya permintaan akan pembangkit listrik yang lebih tinggi dan isu-isu yang berkaitan dengan pemanasan global (Peyvandi et al., 2023). Mengubah sampah menjadi energi adalah cara yang efisien untuk memenuhi permintaan energi dunia sekaligus mengatasi masalah sampah perkotaan (Young, 2010)(Kashani Lotfabadi et al., 2022). Selain itu, menimbun limbah padat ini bukanlah metode pembuangan yang efektif karena mengandung banyak bahan berguna yang dapat didaur ulang menjadi *Refused Derived Fuel* (RDF) (Xu et al., 2017).

Sekam padi (*Oryza Sativa*) merupakan hasil limbah pertanian. Sekam dihasilkan dari proses penggilingan padi. Pada proses penggilingan padi didapatkan 3 hasil yaitu dedak, sekam dan beras. Dedak biasanya digunakan sebagai bahan campuran pakan ternak. Beras sebagai bahan pokok makanan bagi manusia dan sekam biasanya dibakar atau digunakan sebagai bahan campuran pupuk organik dan kadang dibiarkan begitu saja oleh masyarakat menjadi sampah (Nornikman 2010, Pranowo Sidi 2017). Sekam padi merupakan limbah organik yang dihasilkan selama proses pemecahan padi. Proses pemecahan padi akan menghasilkan sekam yang telah terpisah dari butiran beras dan menjadi limbah (Ferdiansyah dkk.,2023). Produksi padi di Indonesia yang sangat membuat sekam padi menjadi salah satu limbah yang terus meningkat, Sekam padi merupakan biomassa yang dapat digunakan untuk mengurangi emisi karbon. Biomassa mampu dimanfaatkan menjadi pengembangan metode bersih (*Clean Development Mechanism*) supaya emisi karbon mampu diminimalisir saat berada di atmosfer (Fitriana dan Ferbina, 2021). Sekam padi dapat menjadi alternatif ramah lingkungan pengganti bahan bakar konvensional. Selain itu, sekam padi juga dapat dioptimalkan untuk menghasilkan abu, pakan ternak, bahan bakar pembuatan bata merah dan pupuk (Sundoro,2022). Permasalahan utama terkait limbah sekam padi yang semakin menumpuk adalah kurangnya pengetahuan dan keterampilan petani dalam mengolah limbah tersebut (sulmiyati dan Said, 2017)

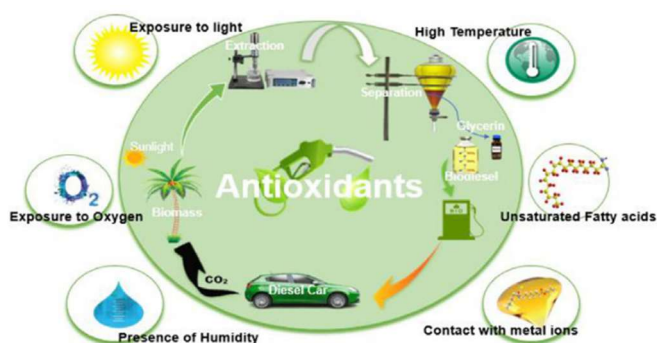
Konsep RDF dikembangkan sekitar awal tahun 1970-an (Sastry & Fuerstenau, 1973). RDF dapat menjadi bahan bakar alternatif yang terkenal (Hajinezhad et al., 2019) yang terbuat dari komponen sampah kota yang mudah terbakar seperti sampah plastik dan bahan lainnya seperti serat dan kayu (Chang et al., 1997). Beberapa teknologi *Waste-To-Energy* (WTE) tersedia untuk mengubah MSW yang mudah terbakar menjadi bahan bakar, panas, dan listrik yang dapat digunakan (Al-Salem et al., 2009). RDF telah mendapatkan perhatian yang cukup besar dalam beberapa tahun terakhir karena sifat-sifatnya yang ramah lingkungan, yang menyediakan cara yang berkelanjutan untuk mengevaluasi MSW (Suryawan et al., 2022). (Punin et al., 2013) mengevaluasi kelayakan penggunaan limbah padat sebagai RDF. Hasilnya, pengembangan bahan bakar nabati padat yang dioptimalkan merupakan salah satu aspek terpenting dalam penerapan bioenergi (Jifara et al., 2022). Peraturan Presiden Nomor 97 Tahun 2017 tentang Strategi dan Kebijakan Nasional Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sejenis Sampah Rumah Tangga telah menetapkan target nasional pengurangan sampah sebesar 30% dan penanganan sampah 70% pada tahun 2025. Sejumlah aksi untuk mencapai target pengelolaan sampah nasional didorong untuk mendukung konsep sampah menjadi energi

(*waste to energy*) sebagai bagian dari aksi mitigasi iklim, salah satunya adalah pengolahan sampah menjadi RDF. (lcdi-indonesia.id).

Di antara berbagai metode perlakuan, torefaksi adalah teknik yang menjanjikan untuk meningkatkan kualitas biomassa padat (Barskov dkk., 2019). Torefaksi merupakan proses termokimia yang melibatkan pemanasan biomassa pada suhu 200–300 °C dalam kondisi sedikit atau tanpa oksigen (Mamvura dan Danha, 2020). Pelet bahan bakar berkualitas tinggi harus memiliki kadar abu kurang dari 1% menurut beratnya dan nilai kalori lebih dari 18,6 GJ per ton bahan bakar. Kadar abu MSW yang dikonversi menjadi RDF berkisar antara 10% dan 22% (Sprenger et al., 2018). Ketika dikombinasikan dengan peletisasi, torefaksi menghasilkan pelet dengan nilai kalor tinggi dan sifat-sifat lain seperti sifat hidrofobik dan peningkatan karakteristik penggilingan (*grindability*) yang lebih baik dibandingkan dengan biomassa yang tidak melalui proses torefaksi (Nunes dkk., 2014). Penelitian ini mengkaji torefaksi sekam padi dengan reaktor Multi Baffle. Reaktor Multi Baffle memiliki kolom reaktor dengan plat pengarah aliran panas yang sederhana dan fleksibel, serta perbedaan suhu yang konstan di sepanjang kolom (Rubiyanti dkk., 2019). Kelebihan utama dari reaktor Multi Baffle adalah dapat melakukan torefaksi biomassa dengan waktu tinggal singkat, sekitar 3-5 menit (Iryani dkk., 2019; Rani dkk., 2020; Sulistio dkk., 2020). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik pelet Sekam padi yang diproduksi melalui proses torefaksi dengan reaktor Multi Baffle.

1.2 Biomassa

Biomassa terdiri dari spesies hidup seperti tumbuhan dan hewan yaitu, segala sesuatu yang saat ini hidup atau pernah hidup dalam waktu singkat. Biomassa terbentuk begitu biji berkecambah atau organisme dilahirkan. Berbeda dengan bahan bakar fosil, biomassa tidak memerlukan jutaan tahun untuk terbentuk. Fotosintesis adalah proses di mana tumbuhan mengolah karbon dioksida atmosfer dan air untuk tumbuh. Hewan tumbuh dengan mengonsumsi biomassa. Berbeda dengan bahan bakar fosil, biomassa dapat beregenerasi, sehingga dianggap sebagai sumber energi atau bahan kimia yang terbarukan. Ini adalah salah satu kualitas paling menariknya sebagai sumber energi atau bahan kimia (Basu, 2013).



Gambar 1. Biomassa (Amran et al., 2022)

1.3 Sekam Padi

Proses penggilingan padi sedikitnya menghasilkan beberapa luaran yaitu proses penggilingan padi menghasilkan 72% beras, 5% - 8% dedak, dan 20% - 22% sekam padi (Warsito & Taslimah, n.d.). Sekam memiliki kerapatan jenis (Bulkdensil) 1125 kg/m³, dengan nilai kalori 1 kg sekam sebesar 3300 k. kalori, serta memiliki bulk density 0,100 g/ml, nilai kalori antara 3.300 – 3.600 kkalori/kg sekam dengan konduktivitas panas 0,271 BTU (Houston,1972). Sekam dikategorikan sebagai biomassa yang dapat digunakan untuk berbagai kebutuhan seperti bahan baku industry, pakan ternak dan energi atau bahan bakar ataupun sebagai adsorpsi pada logam-logam berat. Sekam tersusun dari jaringan serat-serat selulosa yang mengandung banyak silika dalam bentuk serabut-serabut yang sangat keras. Pada keadaan normal, Sekam berperan penting dalam melindungi biji beras dari kerusakan yang disebabkan oleh serangan jamur, dapat mencegah reaksi ketengikan karena dapat melindungi lapisan tipis yang kaya minyak terhadap kerusakan mekanis selama pemanenan, penggilingan dan pengangkutan. (Linda Triviana, Eti Rohaeti, 2015)

Tabel 1. Komposisi Kimia Sekampadi (% berat)

Komponen	% Berat
Kadar air	32,40 - 11,35
Protein kasar	1,70 – 7,26
Lemak	0,38 – 2,98
Ekstrak nitrogen bebas	24,70 – 38,79
Serat	31,37 – 49,92
Abu	13,16 – 29,04
Pentosa	16,94 – 21,95
Sellulosa	34,34 – 43,80
Lignin	21,40 – 46,97

Sumber : Ismunadji, 1988 dalam Sihombing



Gambar 2. Formation RHA from biomass rice husk (Chokkalingam et al., 2024)

1.4 Refuse Derived Fuel (RDF)

Refuse Derived Fuel adalah sampah mudah terbakar yang telah dipisahkan dari limbah atau sampah melalui proses pemilahan, pengayakan, dan proses pra pengolahan (pre treatment) lainnya. Untuk memproduksi RDF dari sampah tercampur, komponen sampah yang memiliki nilai seperti kertas, logam, dan komponen berharga lainnya dipisahkan untuk didaur ulang, sedangkan komponen yang tidak dapat diolah menjadi RDF seperti kaca, kerikil, limbah dari material bangunan disingkirkan. Komposisi dan kualitas RDF dapat bervariasi, meskipun pada umumnya RDF memiliki nilai kalori yang lebih tinggi dan kandungan klorin yang lebih rendah dibandingkan sampah tercampur. RDF dapat digunakan sebagai pengganti bahan bakar fosil pada proses *co-incineration* di pembangkit listrik tenaga batu bara, pabrik semen, unit insenerasi sampah atau unit yang didedikasikan untuk pemulihan energi dari RDF menjadi listrik seperti *power plant* berbahan bakar RDF (Bappenas & GIZ, 2023).



Gambar 3. Proses pembuatan pelet dengan berbagai macam sampah kertas dan sampah kebun (Suryawan et al., 2022)

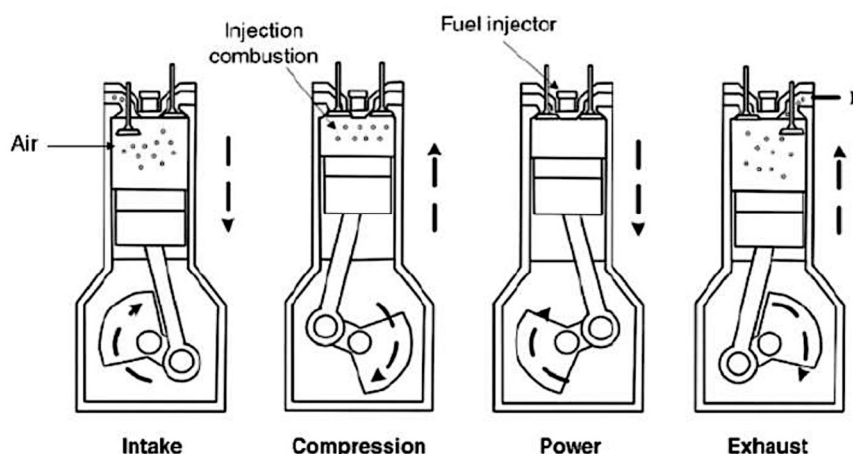
1.5 Compression Ignition Engine (CIE)

Compression Ignition Engine (CIE) atau mesin diesel memiliki prinsip kerja mengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi panas, lalu menjadi kerja mekanis, dan menjadi sumber utama tenaga pada kendaraan serta pembangkit listrik karena memiliki *Brake Thermal Efficiency* (BTE) dan *Brake Power* (BP) yang tinggi (Nanthagopal K, et al., 2020). Mesin diesel merupakan salah satu jenis mesin pembakaran dalam yang beroperasi dengan prinsip *compression ignition*, yaitu proses penyalaan bahan bakar yang terjadi akibat suhu dan tekanan tinggi hasil dari kompresi udara secara penuh tanpa bantuan busi. Mesin ini bekerja dalam siklus empat langkah yaitu *intake*, *compression*, *power*, dan *exhaust* (Aydin et al., 2021) Seperti yang terlihat pada Gambar 1. Pada langkah pertama (*intake*), piston bergerak ke bawah dengan katup masuk terbuka sehingga udara murni masuk ke dalam silinder. Langkah berikutnya (*compression*) terjadi saat piston naik dan kedua katup tertutup, menyebabkan udara dikompresi hingga mencapai suhu sekitar 600–700 °C suhu minimum untuk penyalaan otomatis solar dengan rasio kompresi umumnya berada pada kisaran 14:1 hingga 25:1 (Afzal et al., 2021).

Setelah udara mencapai kondisi termodinamika yang cukup, bahan bakar diesel diinjeksikan tepat sebelum piston mencapai titik mati atas (*Top Dead Center*), memulai pembakaran spontan (*power stroke*) yang menghasilkan tekanan tinggi untuk mendorong piston ke bawah dan menghasilkan energi mekanis. Pada tahap akhir (*exhaust*), piston kembali naik untuk mengeluarkan gas sisa pembakaran melalui katup buang. Dalam mesin diesel modern, pengaturan daya tidak dilakukan dengan mengatur volume udara masuk seperti

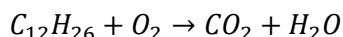
pada mesin bensin, tetapi melalui pengontrolan jumlah bahan bakar yang diinjeksikan dan waktu penyuntikannya (*injection timing*) secara presisi. Hal ini memungkinkan efisiensi termal yang tinggi, yaitu sekitar 43–45% pada kendaraan ringan dan bahkan dapat mencapai 50–55% pada mesin industri berskala besar atau maritim sehingga mesin diesel terus dipilih dalam beragam aplikasi industry dan transportasi (Afzal et al., 2021).

Four-stroke cycle (Diesel)

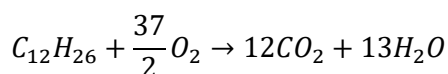


Gambar 4. Siklus Motor Bakar 4 Langkah (4 Stroke)

Pembakaran bahan bakar dalam mesin diesel merupakan proses kimia yang kompleks dan sangat bergantung pada keseimbangan antara jumlah udara dan bahan bakar yang tersedia di ruang bakar. Untuk memahami proses pembakaran yang terjadi pada mesin diesel, diperlukan pemahaman dasar mengenai reaksi stoikiometri. Reaksi ini menggambarkan perbandingan ideal antara bahan bakar dan oksigen yang dibutuhkan agar pembakaran berlangsung sempurna, serta menjadi dasar perhitungan *Air Fuel ratio* (AFR) yang memengaruhi efisiensi dan emisi. Bahan bakar diesel secara kimia dapat diasumsikan sebagai n-dodekana ($C_{12}H_{26}$), hidrokarbon jenuh rantai lurus yang representatif untuk karakteristik pembakaran diesel. Reaksi kimia pembakarannya adalah:



Dengan *balance equation* atau reaksi stoikiometri sebagai berikut:



Artinya satu mol $C_{12}H_{26}$ membutuhkan 18,5 mol O_2 untuk bereaksi sempurna, menghasilkan 12 mol CO_2 , dan 13 mol H_2O atau uap air tanpa sisa bahan bakar maupun oksigen bebas. Karena udara hanya mengandung sekitar 21% oksigen secara molar, maka jumlah udara yang dibutuhkan adalah:

$$15,5 \text{ mol } O_2 \times \frac{100}{21} \approx 88,1 \text{ mol udara}$$

Dengan massa molar diesel ($C_{12}H_{26}$) sekitar 170 g/mol dan massa dan massa molar udara rata-rata 28,97 g/mol sehingga total massa udara:

$$88,1 \text{ mol} \times 28,97 \text{ g/mol} = 2552 \text{ g}$$

Maka, AFR stoikiometri yang diperoleh:

$$AFR_{stoikiometri} = \frac{2552}{170} \approx 15 : 1$$

Dengan demikian, AFR stoikiometri untuk bahan bakar diesel sekitar 15:1. Ini berarti dibutuhkan 15 gram udara untuk membakar 1 gram diesel secara sempurna, tanpa sisa oksigen maupun bahan bakar.

Dalam pengoperasian nyata, mesin diesel tidak selalu bekerja pada AFR stoikiometri. Karena sifat mesin pembakaran kompresi (compression ignition), AFR umumnya berada dalam kondisi **lean** (udara berlebih), misalnya 18:1 hingga 70:1. AFR yang terlalu rendah (kaya) dapat menghasilkan emisi **CO**, **HC**, dan **partikulat** lebih tinggi, sementara AFR yang terlalu tinggi (miskin) berisiko meningkatkan emisi **NO_x** akibat suhu pembakaran yang tinggi. Oleh karena itu, **pengaturan AFR sangat penting** dalam desain dan optimasi pembakaran diesel untuk efisiensi dan emisi minimal (Tüccar et al., 2023; Lee et al., 2024).

Dasar-dasar Perhitungan Kinerja Motor Bakar

Parameter-parameter yang akan dijadikan sebagai perhitungan dalam pengujian ini adalah:

a. Daya Efektif, BP (kW)

Daya Daya efektif adalah daya poros yang digunakan untuk mengangkat beban pada mesin yang diperoleh dari hasil pengukuran torsi dikalikan dengan kecepatan sudut putaran mesin (RPM) dan dapat dihitung menurut persamaan,

$$BP = \frac{T \cdot N}{9549,305}$$

Dimana:

BP = Daya Efektif, (kW)

T = Torsi (N.m)

N = Putaran Poros, (rpm)
 9549,305 = konstanta dynamometer

b. Torsi (Nm)

Torsi adalah gaya putar atau momen puntir yang dihasilkan oleh mesin pada poros engkol sebagai hasil dari tekanan gas pembakaran yang mendorong piston.

$$T = (m \times g) \times r$$

Dimana:

T = Torsi (Nm)
 m = Beban pengujian pada mesin (kg)
 g = Gaya gravitasi (9,81 m/s²)
 r = Panjang lengan dynamometer (m)

c. Konsumsi Bahan Bakar (FC)

Konsumsi bahan bakar menunjukkan jumlah pemakaian bahan bakar yang dihitung dengan jalan mengukur waktu yang diperlukan oleh mesin untuk menghabiskan sejumlah bahan bakar yang terdapat pada gelas ukur, dapat dihitung dari persamaan,

$$FC_s = \frac{VGU \cdot 10^{-3} \cdot \rho_f \cdot 3600}{W} \left(\frac{kg}{h} \right)$$

Dimana:

FC_D = Konsumsi Bahan Bakar Solar (kg/h)
 FC_{DG} = Konsumsi Bahan Bakar Solar dengan penambahan gas (kg/h)
 FC_G = Jumlah penambahan *Liquefied Petroleum Gas*
 VGU = Volume gelas ukur
 ρ_f = Massa jenis bahan bakar, (kg/h)
 10^{-3} = Faktor konversi cc ke dm^3
 3600 = Faktor konversi detik ke jam

d. Konsumsi Bahan Bakar Spesifik, SFC (kg/kW.h)

Konsumsi bahan bakar spesifik menyatakan jumlah bahan bakar untuk menghasilkan suatu kW setiap satu satuan waktu pada beban tertentu. SFC merupakan parameter keekonomisan suatu motor bakar. Parameter ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$SFC = \frac{FC}{BP} \text{ (kg/kW.h)}$$

Dimana:

SFC = Konsumsi bahan bakar spesifik (kg/kW.h)

e. Kalor Total (Q_{tot})

Kalor total adalah total energi yang dibutuhkan atau dilepaskan oleh suatu sistem selama proses tertentu. Ini mencakup perubahan energi internal, kerja yang dilakukan, dan energi yang dipindahkan sebagai panas.

$$Q_{total} = \frac{FC \times HV_{bb}}{3600} (kW)$$

Keterangan:

FC : Konsumsi bahan bakar (kg/h)

LHV_{bb} : nilai kalor bahan bakar untuk diesel atau bensin

f. Efisiensi Thermis (η_{th})

Efisiensi thermis didefinisikan sebagai perbandingan antara besarnya energi kalor yang di ubah menjadi daya efektif dengan jumlah kalor bahan bakar yang disuplai ke dalam selinder. Parameter ini menunjukkan kemampuan suatu mesin untuk mengkonversi energi kalor dari bahan bakar menjadi energi mekanik. η_{th} dapat dihitung dengan rumus berikut,

$$\eta_{th} = \frac{BP}{Q_{tot}} (\%)$$

$$Q_{totD} = \frac{FC.LHV_{bb}}{3600} (kW)$$

$$Q_{totDG} = \frac{(FC.S.LHV_{bb}) + (FC.G.LHV_{bb})}{3600} (kW)$$

Dimana:

Q_{tots} = kalor yang di suplai tanpa penambahan gas (kW)

Q_{totsg} = kalor yang di suplai tanpa penambahan gas (kW)

LHV_{bb} = nilai kalor bahan bakar (kJ/kg)

3600 = faktor konversi jam ke detik

BP = daya efektif (kW)

1.6 Torrefaksi

Torrefaksi adalah proses konversi termal biomassa terlepas dari sumbernya, yang mengurangi kandungan komponen yang mudah menguap dari biomassa, sehingga meningkatkan sifat bahan bakarnya. Torrefaksi adalah pemanasan biomassa secara perlahan pada suhu antara 200 dan 300 °C dalam atmosfer yang lembam atau kekurangan oksigen. Biomassa yang ditorrefaksi kehilangan sekitar 30% massanya sebagai gas volatil sambil mempertahankan 90% energi awalnya. Hemiselulosa, dan penghancuran selulosa parsial,

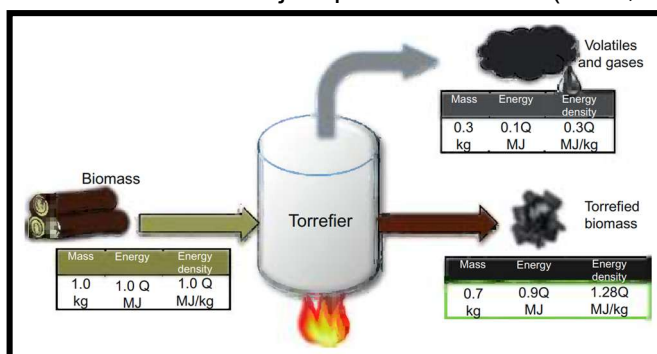
bertanggung jawab atas kehilangan sebagai gas yang mudah menguap, sementara sebagian besar lignin tetap tidak bereaksi. Dalam beberapa tahun terakhir, tor-refaksi telah mendapatkan perhatian untuk mempersiapkan dan meningkatkan kualitas biomassa mentah sebagai umpan untuk pirolisis, gasifikasi, dan pembakaran (Allouzi et al., 2023).

Researchers	Temperature Range (°C)
Arias et al. (2008)	220–300
Chen and Kuo (2010), Prins (2005), Zwart et al. (2006)	225–300
Pimchuai et al. (2010), Prins et al. (2006)	230–300
Bergman et al. (2005), Tumuluru et al. (2011a), Rouset et al. (2011), Sadaka and Negi (2009)	200–300

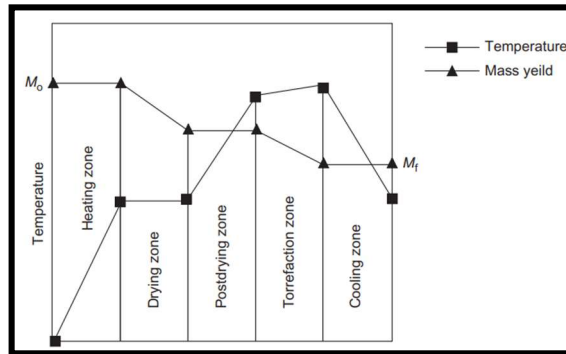
Gambar 5. Kisaran temperatur dari proses torefaksi (Basu, 2013)

Sejak torrefaksi pertama kali dilakukan di Prancis pada tahun 1930-an dan dipelopori oleh Bourgeois dan Dot pada tahun 1980-an, torrefaksi biomassa telah diselidiki secara intensif. Sedangkan torrefaksi masih jauh dari komersialisasi dan terutama dilakukan di alat analisa termogravimetri (TGA) dan tungku tabung skala laboratorium atau bangku serta oven. Perhatian terutama difokuskan pada suhu torrefaksi, durasi torrefaksi, kemampuan menggiling, hidrofobisitas, perilaku pembakaran, dan karakteristik gasifikasi, dll. Selain itu, beberapa peneliti juga memperhatikan keseimbangan massa dan energi, kelembaban, kinetika, dan analisis ekonomi (Niu et al., 2019).

Gambar yang menunjukkan bagaimana kandungan massa dan energi biomassa berubah ketika diubah menjadi produk torefaksi (Basu, 2013).



Gambar 6. Perubahan massa dan energi suatu biomassa pada proses torefaksi (Basu, 2013)



Gambar 7. Temperatur dan riwayat kehilangan massa partikel biomassa yang mengalami proses torefaksi (Basu, 2013)

a. Pra Pengeringan

Ketika biomassa dipanaskan dari ruangan ke suhu pengeringan (100C), suhunya naik terus menerima panas sensibel dari reaktor atau media pemanas.

$$Q_{pd} = \frac{M_f C_{pw} (100 - T_0)}{h_{upd}}$$

b. Pengeringan

Kelembapan dalam biomassa diuapkan selama tahap ini. Tahap ini membuat tulang biomassa menjadi kering.

$$Q_d = \frac{LM_f M}{h_{ud}}$$

c. Pemanasan Pasca Pengeringan

Setelah biomassa dikeringkan, perlu dipanaskan lebih lanjut hingga suhu torefaksi yang dirancang, T_t . Suhu ini umumnya melebihi 200C karena sangat sedikit dekomposisi biomassa yang terjadi di bawah suhu ini.

$$Q_{pd} = \frac{M_f (1 - M) C_{pd} (100 - T_0)}{h_{u,pd}}$$

d. Torefaksi

Tahap torefaksi adalah kunci dari keseluruhan proses karena sebagian besar depolimerisasi biomassa terjadi pada tahap ini. Sejumlah waktu tertentu diperlukan untuk memungkinkan tingkat depolimerisasi biomassa yang diinginkan terjadi. Tingkat torefaksi tergantung pada suhu reaksi serta pada waktu biomassa mengalami torefaksi. Waktu torefaksi harus diukur dari saat

biomassa mencapai suhu awal torefaksi (200C) karena degradasi biomassa di bawah suhu ini dapat diabaikan.

$$Q_{tor} = H_{loss} + M_f(1 - M)X_t$$

e. Pendinginan

Produk hasil torefaksi harus didinginkan dari suhu torefaksi (T_t), hingga suhu akhir (T_p) produk yang dapat diterima untuk pemrosesan atau penyimpanan lebih lanjut.

$$Q_{cool} = M_f(1 - M)MY_{db}C_{pt}(T_t - T_p)$$

1.7 Mekanisme Torefaksi

Perubahan termokimia biomassa selama torefaksi dapat dibagi menjadi lima rezim (Basu, 2013):

a. Rezim A (50-120°C)

Ini adalah rezim pengeringan nonreaktif dimana terjadi hilangnya kelembaban fisik dalam biomassa namun tidak ada perubahan komposisi kimianya. Biomassa menyusut namun dapat memperoleh kembali strukturnya jika dibasahi kembali

b. Rezim B (120-150°C)

Rezim ini dipisahkan hanya jika lignin mengalami pelunakan sehingga berfungsi sebagai pengikat.

c. Rezim C (150-200°C)

Ini disebut rezim “pengeringan reaktif” yang mengakibatkan deformasi struktural biomassa yang tidak dapat diperoleh kembali setelah pembasahan. Tahap ini mengawali pemutusan ikatan hidrogen dan karbon serta depolimerisasi hemiselulosa.

d. Rezim D (200-250°C)

Rezim ini bersama dengan rezim (E) merupakan zona torefaksi hemiselulosa. Rezim ini ditandai dengan devolatilisasi dan karbonisasi terbatas pada struktur padatan yang terbentuk pada rezim (C). Hal ini mengakibatkan pemecahan sebagian besar ikatan hidrogen antar dan intramolekul, CaC dan CaO membentuk cairan yang dapat terkondensasi dan gas yang tidak dapat terkondensasi.

e. Rezim E (250-300°C)

Ini adalah bagian tertinggi dari proses torefaksi. Terjadi penguraian hemiselulosa secara ekstensif menjadi produk yang mudah menguap dan padat. Namun, lignin dan selulosa hanya mengalami devolatilisasi dan karbonisasi dalam jumlah terbatas. Struktur sel biomassa hancur total dalam rezim ini sehingga membuatnya rapuh dan tidak berserat.

1.8 Parameter-Parameter yang Mempengaruhi Proses Torefaksi

Berikut bagaimana beberapa parameter umpan dan operasi mempengaruhi proses torefaksi (Basu, 2013).

a. Temperatur

Suhu torefaksi mempunyai pengaruh paling besar terhadap torefaksi karena tingkat degradasi termal biomassa terutama bergantung pada suhu. Temperatur yang lebih tinggi memberikan hasil massa dan energi yang lebih rendah tetapi kepadatan energi yang lebih tinggi. Fraksi karbon tetap dalam sampel meningkat sedangkan fraksi hidrogen dan oksigen menurun seiring dengan meningkatnya suhu torefaksi.

b. Waktu Tinggal

Waktu tinggal biomassa di dalam torrefier juga mempengaruhi degradasi termal biomassa. Laju pemanasan yang lambat merupakan salah satu ciri khas torefaksi yang membedakannya dengan proses pirolisis yang dipanaskan dengan cepat. Biasanya suhunya kurang dari 50C/menit. Oleh karena itu, waktu tinggal biomassa dalam reaktor torefaksi jauh lebih lama yaitu puluhan menit. Waktu tinggal yang lebih lama memberikan hasil massa yang lebih rendah dan kepadatan energi yang lebih tinggi. Namun pengaruh waktu tinggal terhadap produk torefaksi tidak begitu dominan dibandingkan dengan pengaruh suhu torefaksi.

c. Jenis Biomassa

Jenis biomassa merupakan parameter penting lainnya yang dapat mempengaruhi torefaksi. Karena hemiselulosa paling banyak terdegradasi dalam kisaran suhu torefaksi, maka diperkirakan akan terjadi kehilangan massa yang lebih tinggi pada biomassa dengan kandungan hemiselulosa tinggi.

d. Ukuran Umpan

Ukuran partikel atau potongan biomassa merupakan parameter lain yang dapat mempengaruhi hasil torefaksi. Efek ini mungkin tidak terlihat pada partikel berukuran halus, namun dapat diukur pada partikel berukuran besar.

1.9 Sifat Fisik Biomassa Hasil Torefaksi

Torrefaksi membawa beberapa perubahan penting pada sifat fisik biomassa. Berikut modifikasi beberapa sifat fisik biomassa melalui pretreatment torefaksi (Basu, 2013).

a. Densitas dan Volume

Massa biomassa berkurang selama torefaksi. Perubahan ini sering kali juga menyebabkan pengurangan volume. Akibatnya, perubahan densitas akibat torefaksi tidak dapat ditentukan hanya berdasarkan hasil massa saja. Oleh

karena itu, terdapat pengaruh yang berbeda dari torefaksi terhadap kepadatan biomassa, yaitu pengurangan dengan torefaksi.

b. Hidrofobisitas

Biomassa bersifat higroskopis. Jadi, biomassa menyerap kelembapan meskipun disimpan setelah dikeringkan. Oleh karena itu, penyimpanan biomassa dalam jangka panjang sangat mahal dalam hal energi yang dihabiskan untuk menguapkan uap air selama pembakaran atau gasifikasi. Dalam biomassa, kapasitas penyerapan air dari penyusun hemiselulosanya paling tinggi. Kapasitas selulosa dan lignin pun mengikuti hal tersebut. Karena torefaksi melibatkan penguraian hemiselulosa yang hampir sempurna, proses ini menjadikan biomassa bersifat hidrofobik. Biomassa mentah mudah menyerap kelembapan karena adanya gugus hidroksil (aOH) yang membentuk ikatan hidrogen untuk menahan air tambahan. Proses torefaksi menghancurkan gugus OH dan dengan demikian mengurangi kapasitasnya untuk menyerap air.

c. Klasifikasi Reaktor Torefaksi

Berbagai macam reaktor torefier atau torefaksi sedang digunakan atau sedang dikembangkan. Desain seperti ini sering kali berevolusi dari unit pemrosesan biomassa lain seperti pengering, pirolisis, dan karbonisasi. Namun, reaktor-reaktor ini dapat dibagi menjadi beberapa kelompok umum tertentu berdasarkan dua aspek proses torefaksi: perpindahan panas dan kontak padat.

1) Reaktor yang Dipanaskan Langsung

Dalam reaktor yang dipanaskan secara langsung, biomassa dipanaskan langsung oleh media pembawa panas, dan pertukaran panas terjadi melalui kontak langsung antara biomassa dan pembawa panas. Pembawa panas dapat berupa gas panas tanpa oksigen atau gas dengan jumlah oksigen terbatas. Bisa juga berupa padatan panas yang tidak reaktif atau air bertekanan seperti cairan panas, uap, atau limbah minyak.

2) Reaktor yang tidak Dipanaskan Langsung

Dalam reaktor yang dipanaskan secara tidak langsung, media pembawa panas tidak bersentuhan langsung dengan biomassa. Panas diangkut melintasi dinding atau melalui radiasi elektromagnetik.

1.10 Multi Baffle

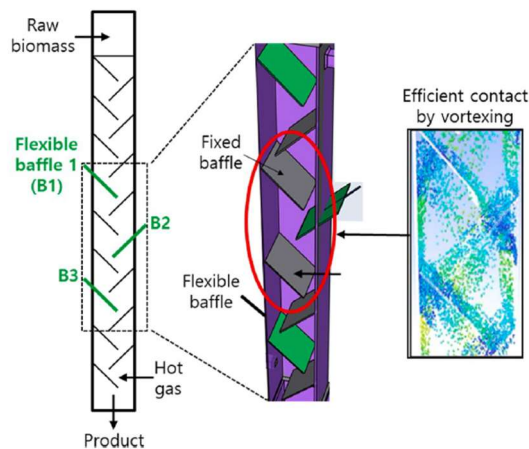
Konsep Reaktor *Flexible Multi Baffle* aliran balik dengan *baffle* tetap (COMB) pertama kali diverifikasi pada skala laboratorium (0,1 ton/d) pada tahun 2012. Setelah itu struktur internal COMB statis di tingkatkan menjadi lebih *Flexible* yaitu F-COMB yang dapat meningkatkan efisiensi energi secara signifikan karena kontak yang lebih baik dan mengurangi rasio gas/ padatan rasio. Kolom

berbentuk persegi Panjang yang memiliki pelat penyekat Zig-zag miring di dalamnya. Terdapat baffle yang bersifat flexible yang dapat mengontrol area yang dilalui gas panas dengan mengubah jarak antara garis ujung bawah *baffle* dan dinding kolom di dalamnya. Dengan cara ini memungkinkan *reactor* F-COMB untuk menyelesaikan proses pemanasan lebih cepat dan menghemat energi yang dikonsumsi untuk menghasilkan energi panas dibandingkan tanur putar konvensional atau *reactor* konveyor sekrup dan memiliki ukuran lebih kecil dari yang sudah ada (Thya et al., 2024).

Kolom berbentuk persegi panjang yang panjang memiliki pelat penyekat zig-zag miring di dalamnya. Tiga dari total baffle bersifat fleksibel (B1, B2, dan B3), yang dapat mengontrol area yang dilalui gas panas dengan mengubah jarak antara garis ujung bawah baffle dan dinding kolom di dalamnya. Bahan baku diumpankan dari bagian atas kolom, sementara gas panas disediakan dari bagian bawah ke atas, sehingga terjadi kontak langsung antara padatan dan gas. Area segitiga yang dibentuk oleh multi-baffle menginduksi pusaran bersama dengan aliran balik bahan baku dan gas panas, yang secara aktual memastikan pencampuran yang memadai. Hal ini memungkinkan reaktor F-COMB untuk menyelesaikan pirolisis dalam waktu 10 menit, yang merupakan waktu tinggal yang jauh lebih singkat, dibandingkan dengan tanur putar konvensional atau reaktor konveyor sekrup. Oleh karena itu, ukuran reaktor F-COMB bisa jauh lebih kecil dari yang sudah ada. Produk pirolisis, biochar, diperoleh di bagian bawah kolom dan gas hasil pirolisis termasuk gas yang mudah terbakar (H_2 , CO, dan CH_4), tar, N_2 , dan CO_2 dilepaskan melalui saluran keluar kolom di bagian atas. Fluks gas per satuan luas yang diperlukan untuk fluidisasi dapat dikurangi (Thya et al., 2024).

Dengan mengurangi area antara ujung penyekat dan dinding reaktor menggunakan penyekat fleksibel, yang dapat menghemat energi yang dikonsumsi untuk menghasilkan gas panas. Namun, area aliran gas yang terlalu kecil dapat menyebabkan penurunan tekanan dan mengganggu perpindahan panas. Fluks gas dan bukaan penyekat fleksibel disesuaikan untuk menentukan kondisi kontak yang optimal untuk dekomposisi termal, tergantung pada kepadatan dan ukuran bahan baku. Produk pirolisis jatuh ketika baffle terbuka karena laju aliran yang lebih rendah per satuan luas. Baffle yang fleksibel dapat ditambahkan dengan mudah, dan yang dapat meningkatkan produktivitas tanpa mengubah ukuran perangkat sebagai akibat dari pengumpanan bahan baku yang lebih sering. Struktur 3 *baffle* yang digunakan dalam penelitian ini mungkin memiliki *throughput* 3 kali lipat dari 1 *baffle*. Produktivitas perangkat F-COMB dapat ditingkatkan lebih lanjut dengan tambahan baffle fleksibel (Thya et al.,

2024).



Gambar 8. Tampilan Skematis dari struktur kolom F-COMB (Thya et al., 2024)

Gambar di atas menunjukkan tampilan skematik dari sistem F-COMB yang terdiri dari kolom *reactor*, *hopper*, *feeder*, tangka penyangga, siklon, *burner* dan *combuster*.

1.11 Rumusan Masalah

1. Bagaimana efek panas gas buang mesin diesel terhadap sekam padi pada multi baffle.
2. Bagaimana Sekam padi menyerap Emisi Carbon dari gas buang mesin diesel.
3. Bagaimana efek multi baffle terhadap hasil torefaksi sekam padi.

1.12 Tujuan Penelitian

1. Menganalisis dampak besar panas gas buang mesin diesel terhadap sekam padi pada multi baffle.
2. Menganalisis pengaruh konsentrasi kadar karbon yang diserap oleh sekam padi pada multi baffle.
3. Menganalisis karakteristik sekam padi pada multi baffle setelah proses torefaksi menggunakan panas buang mesin diesel.

1.13 Batasan Masalah

1. Menggunakan sekam padi sebagai bahan penelitian.
2. Menggunakan gas buang mesin diesel model TV1 sebagai objek penelitian.
3. Menggunakan 3 variasi suhu gas buang berdasarkan tingkatan tingkatan

pada multi baffle.

1.14 Manfaat Penelitian

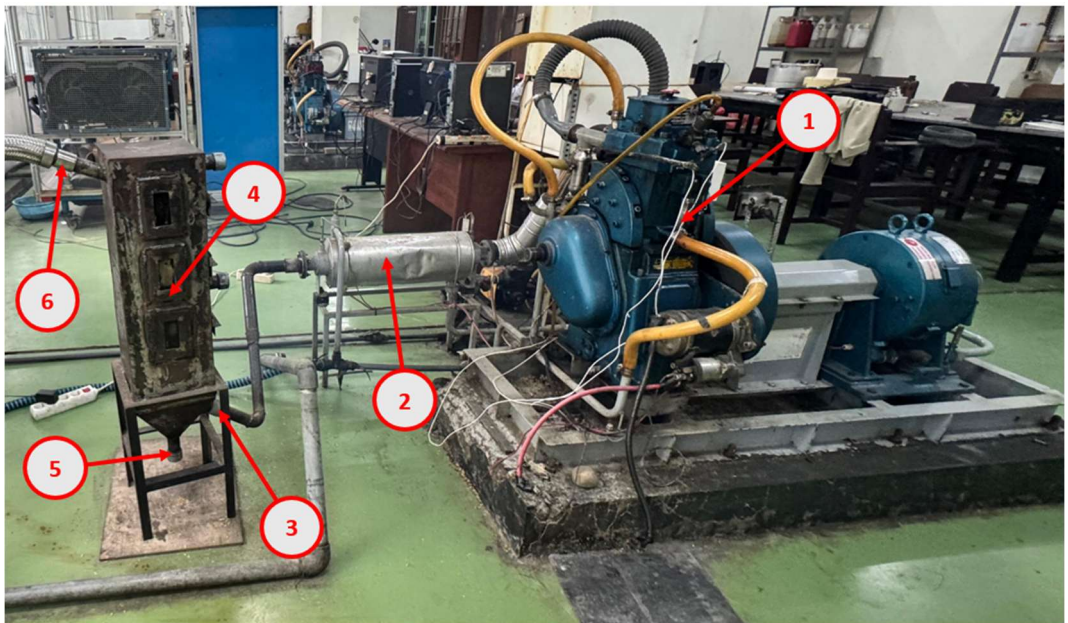
1. Memberikan pengetahuan tentang efisiensi hasil torefaksi dengan memanfaatkan gas buang pada diesel.
2. Dapat menjadi informasi pemanfaatan limbah terkhusus pada bidang energi terbarukan.
3. Sebagai wadah pengaplikasian ilmu pengetahuan bagi penulis, khususnya di bidang energi terbarukan.
4. Sebagai pemenuhan syarat untuk penyelesaian studi S2 pada program studi teknik mesin universitas hasanuddin.

BAB II METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di laboratorium motor bakar, fakultas teknik mesin, universitas hasanuddin. Penelitian ini berlangsung selama 6 bulan, dimulai dengan pra-penelitian, pembuatan proposal, pelaksanaan penelitian, dan penyelesaian laporan.

2.2 Metodologi Penelitian



Gambar 9. Skema Rangkaian Multi Baffle

Keterangan Gambar;

1. Mesin diesel
2. Saluran/ pipa output gas buang mesin diesel
3. Pipa penyambung dari mesin diesel ke multi baffle
4. Multi baffle
5. Saluran output sekam padi
6. Saluran/ pipa output gas buang multi baffle

2.3 Alat dan Bahan

Untuk menunjang pencapaian target sesuai dengan tujuan maka diperlukan berbagai peralatan, instrument dan bahan. Adapun alat, instrument ukur dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

a. VCR Engine Set Up

VCR Engine Set Up adalah alat uji mesin diesel model TV1 yang memiliki fungsi mengukur *performance* dan *combustion* pada mesin diesel model TV1. Alat ini terdiri dari mesin diesel model TV1, komputer, panel mesin, dan pompa.

1) Mesin Diesel TV1



Gambar 10. Mesin Diesel Model TV1

Mesin diesel berfungsi untuk mengubah energi kalor dari bahan bakar menjadi energi mekanik. Spesifikasi mesin diesel terlihat pada Tabel 1. Mesin diesel ini terkopel dengan dengan *electrical dynamometer* sebagai beban dari mesin diesel dengan spesifikasi yang terlihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Spesifikasi Mesin Diesel TV 1

<i>Item</i>	<i>Spesification</i>
<i>Merk</i>	Apex Innovation
<i>Type</i>	TV1
<i>Model</i>	1 Silinder Diesel 4 Langkah
<i>Bore x Stroke</i>	87,5 mm x 110 mm
<i>Capacity</i>	661 cc
<i>Power</i>	3,5 kW
<i>Speed</i>	1500 rpm
<i>Compression Ratio Range</i>	12 : 1 – 18 : 1
<i>Cooling System</i>	Water Cooled
<i>Injection Variation</i>	0 25 Deg BTDC

Tabel 3. Spesifikasi Electrical Dynamometer

<i>Item</i>	<i>Spesification</i>
<i>Type</i>	Eddy Current
<i>End Flanges Both Side</i>	Cardon Shaft Model 1260 Type A
<i>Water Inlet</i>	1.6 Bar
<i>Minimum kPa</i>	160
<i>Pressure lbf/in²</i>	23
<i>Torque Nm</i>	11.5
<i>Hot Coil Voltage Max.</i>	60
<i>Continuous Current Amps</i>	5,0
<i>Cold Resistance Ohms</i>	9,8
<i>Speed Max.</i>	10000 rpm
<i>Load</i>	3,5 kg
<i>Bolt Size</i>	M12 X 1,75
<i>Weight</i>	130

2) Panel Kontrol Mesin



Gambar 11. Control Panel

Control Panel berfungsi untuk mengatur dan mengendalikan beban listrik dengan mengontrol secara manual. Komponen dalam panel kontrol antara lain : tombol tekan *ON (push button on)*, tombol tekan *OFF (push button off)*, dan lampu indikator.

3) Komputer



Gambar 12. Komputer

Komputer berfungsi sebagai perangkat untuk membaca dan mengolah data menggunakan aplikasi *engine soft* yang dirancang untuk memantau kinerja mesin.

4) Pompa



Gambar 13. Pompa

Pompa berfungsi untuk mengalirkan air sebagai pendingin agar mesin tidak mengalami *overheat*. Pompa air pada mesin juga memastikan panas dibawa ke radiator untuk didinginkan sebelum kembali bersirkulasi. Tipe pompa yang digunakan adalah tipe mono blok.

5) Bomb Calorimeter



Gambar 14. Bomb Calorimeter

Bomb Calorimeter berfungsi untuk mengukur Nilai kalor tinggi (HHV) dan Nilai kalor rendah (LHV) untuk setiap bahan baku sesuai dengan EN 14918 menggunakan kalorimeter bom (Parr 6100), dan nilai rata-ratanya dihitung.

6) Leco AF-700



Leco AF-700 merupakan alat ukur menguji Keterlarutan abu diuji menggunakan peralatan pengujian titik *sintering* dengan *imaging*. Sampel abu disiapkan dengan membakar bahan bakar dalam tungku muffle pada suhu 550 °C, kemudian dibentuk menjadi piramida. Pengukuran suhu peleburan abu dilakukan pada suhu maksimum 1500 °C dalam atmosfer oksidatif.

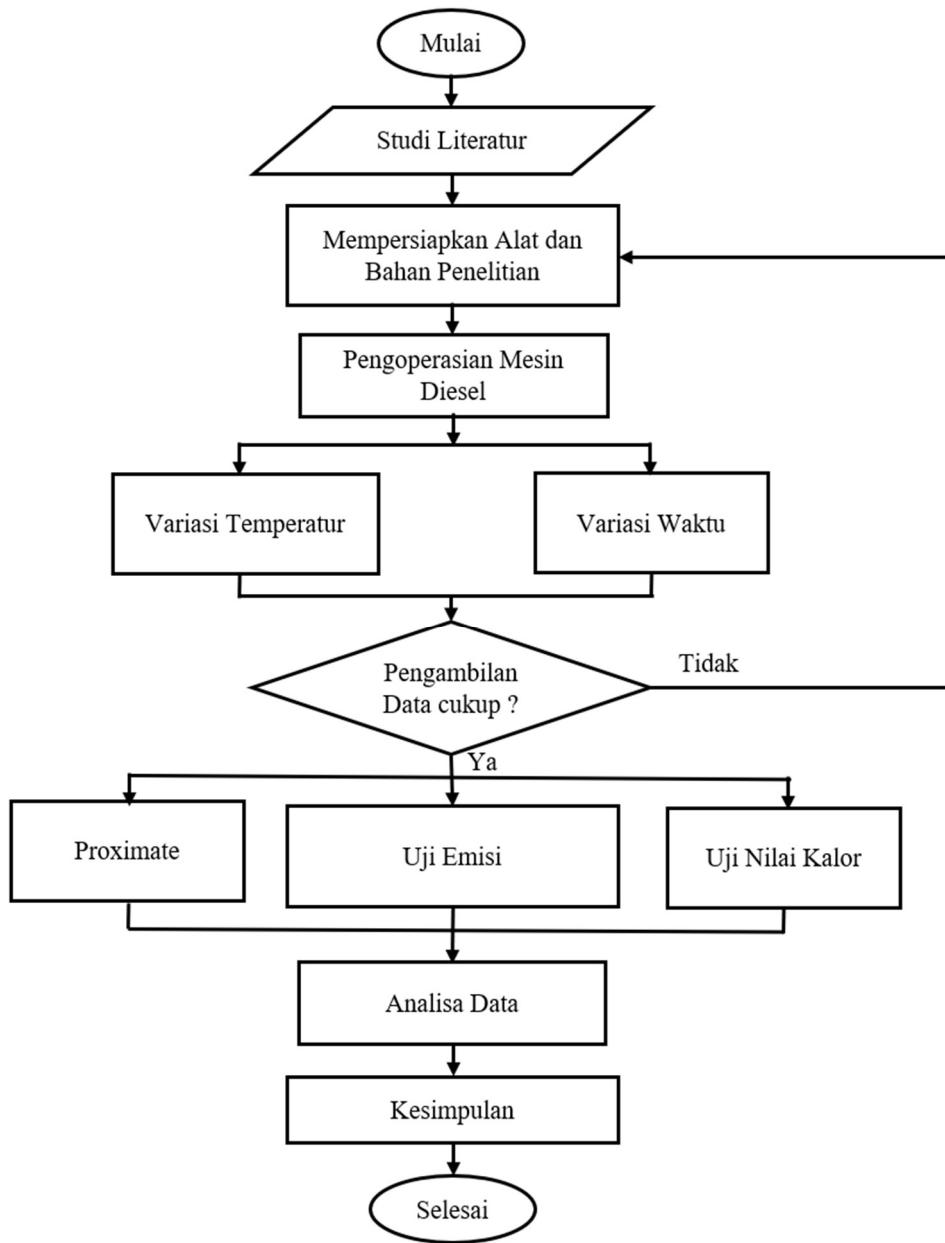
7) Dexlite



Gambar 15. Dexlite

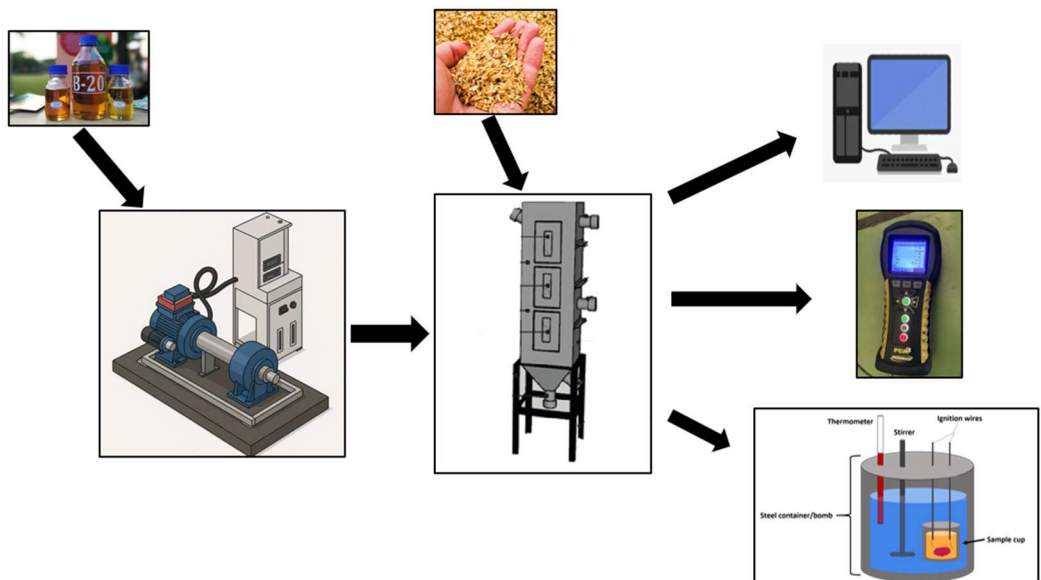
Pada penelitian ini dexlite digunakan sebagai bahan bakar utama pada mesin diesel. Dexlite dipilih sebagai bahan bakar utama dalam sistem dual fuel mesin diesel karena memiliki nilai setana tinggi yang meningkatkan efisiensi pembakaran, kandungan sulfur lebih rendah yang mengurangi emisi dan deposit karbon, serta viskositas optimal yang mendukung atomisasi bahan bakar yang lebih baik. Selain itu, dalam sistem dual fuel, dexlite lebih hemat karena membutuhkan lebih sedikit pilot *fuel* untuk menyalakan campuran gas, sehingga konsumsi bahan bakar lebih efisien dibandingkan biosolar.

2.4 Flowchart Penelitian



Gambar 16. *Flowchart* Penelitian

2.5. Experimental Setup



Gambar 15. Experimental Setup

2.6. Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimental (*experimental research*) untuk memanfaatkan gas buang pada mesin diesel untuk dilakukan pemanasan pada sekam padi yang di isi kedalam alat multibuffle. Adapun Langkah-langkah pelaksanaan penelitian adalah :

2.6. 1 Tahapan Persiapan dan perakitan

- 1) Memastikan kondisi mesin dalam keadaan normal.
- 2) Memastikan saluran bahan bakar berfungsi dengan baik.
- 3) Melakukan pemasangan pipa penyambung dari pipa gas buang mesin diesel ke alat Multi baffle.
- 4) Memasang pipa pembuangan pada output alat multi baffle.
- 5) Mempersiapkan bahan penelitian yaitu sekam padi ke dalam multi baffle.
- 6) Mengecek kondisi sambungan pipa pembuangan pada alat multi baffle.

2.6.2 Tahap Pengambilan Data

- 1) Menyalakan suplai listrik dan pastikan bahwa *PPU (Piezo Powerin Unit)*, *DLU (Unit Pemuatan Dynamometer)*, Indikator beban, dan *voltmeter* dihidupkan.
- 2) Menyalakan Komputer dan buka aplikasi "*EngineSoft*" (klik dua kali ikon "*EngineSoft*" di jendela desktop) Pilih "Model Mesin" buka "*Configure*" di View. Periksa konfigurasi nilai & konstanta sistem dengan nilai yang ditampilkan pada panel pengaturan engine. "Terapkan" perubahan, jika ada. Klik pada tab "*PO-PV Graphs*".
- 3) Menyalakan mesin VCR TV-1 dan di atur beban yang telah di sesuaikan
- 4) Memasukkan sekam sebanyak 1.200 gr ke dalam multibaffle
- 5) Mengatur parameter alat (Beban) untuk mendapatkan temperature gas buang yang sesuai (100,150,200,250) dalam rentang waktu (20 menit dan 60 menit).
- 6) Memperhatikan kondisi sekam padi yang di panaskan berdasarkan waktu dan mengamati gas buang setelah melewati baffle yang berisi sekam padi.
- 7) Lakukan pengukuran gas buang dengan menggunakan alat emisi gas buang.
- 8) Ambil data pada PC sesuai variable waktu yang telah ditentukan.
- 9) Buka katup di bawah baffle untuk mengambil sekam yang telah dipanaskan.
- 10) Sekam yang telah dipanaskan, dilakukan penghalusan dengan grinder, setelah itu di ambil sampel Sebagian untuk di uji menggunakan bomb calorimeter.
- 11) Untuk sekam yang lainnya di kumpul dalam jumlah 400 gr tiap kondisi pemanasan untuk di lakukan pengujian Proximate.
- 12) Ulangi Langkah di atas untuk berbagai kondisi sesuai hasil yang dibutuhkan

2.7. Teknik Analisis Data

2.7. 1 Analisa Uji Nilai Kalor

Nilai kalor tinggi (HHV) ditentukan tiga kali untuk setiap bahan baku sesuai dengan EN 14918 menggunakan kalorimeter bom (Parr 6100), dan nilai rata-ratanya dihitung. Nilai kalor rendah (LHV) dihitung dengan mengoreksi HHV dengan energi panas yang diperlukan untuk menguapkan air akibat hidrogen yang dilepaskan selama pembakaran (Persamaan). Nilai kandungan hidrogen (%H₂) ditentukan melalui analisis unsur (Garcia-Maraver et al., 2015).

$$\text{LHV} = (\text{HHV} \times 4.184 - 206 \times \% \text{H}_2 - 23.05 \times \% \text{H}_2\text{O}) / 4.184$$



Gambar 16. Proses Penggunaan Bomb Calorimeter

2.7. 2 Uji Kadar Abu

Keterlarutan abu diuji menggunakan peralatan pengujian titik *sintering* dengan *imaging* (Leco AF-700). Sampel abu disiapkan dengan membakar bahan bakar dalam tungku muffle pada suhu 550 °C, kemudian dibentuk menjadi piramida. Pengukuran suhu peleburan abu dilakukan pada suhu maksimum 1500 °C dalam atmosfer oksidatif. Pengukuran dilakukan sesuai dengan prosedur standar internasional [20,21]. Selama proses pengujian, suhu deformasi (DT), suhu pelunakan (ST), suhu setengah bola (HT), dan suhu cairan (FT) dicatat sesuai dengan bentuk silinder abu yang spesifik (Garcia-Maraver et al., 2015).



Gambar 14. Alat Uji Kadar Abu

2.7. 3 Kinerja Mesin Diesel Terhadap Proses Torrefaksi

Sebelum menganalisis potensi pemanfaatan panas buang mesin diesel pada proses torrefaksi sekam padi, terlebih dahulu dilakukan evaluasi terhadap kinerja mesin diesel selama proses pengujian. Evaluasi ini bertujuan untuk mengetahui kondisi operasi mesin yang meliputi kemampuan mesin dalam menghasilkan daya, konsumsi bahan bakar, serta karakteristik temperatur gas buang yang dihasilkan. Parameter-parameter tersebut sangat penting karena secara langsung mempengaruhi jumlah energi panas yang tersedia dari gas buang untuk dimanfaatkan dalam proses torrefaksi.

Hasil perhitungan daya efektif mesin diesel menunjukkan bahwa peningkatan beban mesin menyebabkan peningkatan torsi sehingga daya efektif yang dihasilkan mesin juga meningkat. Peningkatan daya ini terjadi karena semakin besar beban mesin maka jumlah bahan bakar yang diinjeksikan ke dalam ruang bakar bertambah sehingga proses pembakaran menghasilkan energi yang lebih besar. Sebagian energi tersebut diubah menjadi energi mekanik pada poros mesin, sedangkan sebagian lainnya dilepaskan dalam bentuk panas melalui gas buang. Penelitian mengenai pemanfaatan panas buang mesin diesel menunjukkan bahwa sekitar 30% energi hasil pembakaran bahan bakar terbuang melalui gas buang, sehingga memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan kembali sebagai sumber energi termal pada berbagai aplikasi seperti sistem pemulihan panas atau proses pemanasan biomassa (Mithilesh, 2022).

Berdasarkan hasil pengukuran temperatur gas buang selama pengujian, terlihat bahwa temperatur gas buang meningkat ketika mesin diberikan beban atau saat mesin ditahan. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya jumlah bahan

bakar yang terbakar di dalam silinder sehingga temperatur pembakaran dan energi panas yang dihasilkan menjadi lebih tinggi. Penelitian lain juga menunjukkan kecenderungan yang sama, dimana temperatur gas buang meningkat seiring dengan peningkatan beban mesin karena laju pelepasan panas di dalam silinder meningkat selama proses pembakaran (Jiang D., 2023). Selain itu, pada kondisi beban rendah temperatur gas buang relatif lebih rendah karena proses pembakaran menghasilkan energi panas yang lebih kecil. Dengan demikian, hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa kondisi operasi mesin diesel, khususnya beban mesin, memiliki pengaruh langsung terhadap temperatur gas buang yang dihasilkan dan potensi energi panas yang dapat dimanfaatkan dari sistem pembuangan mesin (Boriboonsomsin, K., 2018).

2.8. Rencana Penelitian

Tabel 4. Time Schedule

No	Jenis Kegiatan	Bulan / Tahun						
		Jun 2025	Jul 2025	Aug 2025	Sep 2025	Okt 2025	Nov 2025	Des 2025
1	Studi Pustaka							
2	Penyusunan Proposal							
3	Seminar Proposal							
4	Persiapan Alat & Bahan							
5	Penelitian							
6	Penyusunan Tesis							
7	Seminar Hasil							
8	Ujian Tutup							