

Pengaruh Variasi Temperatur Operasi Terhadap Sirkulasi Partikel Padat Pada Insinerator Circulating Fluidized Menggunakan CPFD Barracuda

I Kadek Adi Kanadiarta, I Nyoman Suprpta Winaya, dan I Wayan Arya Darma
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Peningkatan limbah padat akibat pertumbuhan penduduk dan industri memerlukan solusi pengolahan yang efisien dan berkelanjutan. Salah satu pendekatan yang berkembang adalah teknologi *waste-to-energy* berbasis RDF (*Refuse Derived Fuel*), dengan reaktor pembakaran *Circulating Fluidized Bed* (CFB) sebagai pilihan karena efisiensi termal dan fleksibilitas bahan bakarnya. Keunggulan CFB terletak pada sirkulasi partikel padat yang menjaga distribusi panas dan pembakaran optimal, meskipun dipengaruhi temperatur operasi. Karena itu, memahami pengaruh suhu terhadap sirkulasi partikel penting untuk efektivitas sistem. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh variasi suhu terhadap sirkulasi partikel dalam reaktor CFB menggunakan simulasi CPFD Barracuda. Simulasi memakai RDF 1,5 kg, pasir silika 5 kg, kecepatan udara 14 m/s, dan suhu 750°C–900°C. Parameter yang diamati meliputi waktu tinggal, fraksi volume, dan massa sirkulasi. Hasil menunjukkan suhu memengaruhi intensitas sirkulasi: massa solid 59% pada 750°C dan 800°C, naik ke 60% di 850°C, dan stabil di 900°C. Waktu tinggal partikel sekitar 10 detik, fraksi volume naik dari 0,589 ke 0,6 dan tetap. Ini menegaskan pentingnya pengaturan suhu untuk efisiensi sirkulasi dan pembakaran pada sistem CFB berbahan RDF.

Kata kunci: Circulating Fluidized Bed, CPFD Barracuda, Refuse Derived Fuel (RDF), Temperatur Operasi, dan Sirkulasi Partikel Padat

Abstract

The increase in solid waste due to population and industrial growth requires efficient and sustainable treatment solutions. One emerging approach is waste-to-energy technology based on RDF (*Refuse Derived Fuel*) combustion, with the *Circulating Fluidized Bed* (CFB) reactor as a preferred option due to its thermal efficiency and fuel flexibility. The advantage of the CFB system lies in the circulation of solid particles, which maintains even heat distribution and optimal combustion, although its performance is influenced by operating temperature. Therefore, understanding the effect of temperature on particle circulation is essential for system effectiveness. This study evaluates the influence of temperature variation on particle circulation in a CFB reactor using CPFD Barracuda simulation. The simulation used 1.5 kg of RDF, 5 kg of silica sand, 14 m/s air velocity, and operating temperatures ranging from 750°C to 900°C. The observed parameters include residence time, volume fraction, and circulation mass. Results show that temperature affects circulation intensity: solid mass remained at 59% at 750°C and 800°C, increased to 60% at 850°C, and stabilized at 900°C. Particle residence time was around 10 seconds, and volume fraction increased from 0.589 to 0.6 and remained constant. These findings confirm that temperature regulation is crucial to optimizing circulation and combustion efficiency in RDF-fueled CFB systems.

Keywords: Circulating Fluidized Bed, CPFD Barracuda, Refuse Derived Fuel (RDF), Operating Temperature, Solid Particle Circulation.

1. Pendahuluan

Pertumbuhan penduduk yang pesat serta peningkatan aktivitas ekonomi telah mendorong lonjakan volume sampah di Indonesia. Situasi ini menekankan pentingnya penerapan teknologi yang dapat memproses limbah dengan cara yang ramah lingkungan, salah satunya melalui pendekatan konversi sampah menjadi energi (*Waste to Energy* atau *WtE*).

Dari berbagai teknologi yang dikembangkan dalam sistem *WtE*, metode pembakaran RDF (*Refuse Derived Fuel*) menjadi salah satu yang paling menjanjikan. RDF memanfaatkan limbah padat sebagai bahan bakar alternatif, yang kemudian dibakar pada temperatur tinggi untuk menghasilkan energi panas [1]. Salah satu teknologi reaktor yang efisien untuk RDF adalah *Circulating Fluidized Bed* (CFB). Sistem CFB menawarkan banyak keunggulan,

antara lain distribusi panas yang seragam, efisiensi pembakaran yang tinggi, dan fleksibilitas terhadap berbagai jenis bahan bakar padat [2].

Keberhasilan sistem CFB tidak terlepas dari mekanisme sirkulasi partikel padat di dalam reaktor. Pergerakan partikel yang berulang dari riser menuju cyclone dan kembali ke reaktor memainkan peran penting dalam meningkatkan efisiensi perpindahan panas dan memperpanjang waktu tinggal partikel dalam sistem [3]. Namun, dinamika sirkulasi ini sangat dipengaruhi oleh temperatur operasi, karena perubahan suhu dapat memengaruhi viskositas fluida, laju aliran, dan stabilitas aliran multiphase [4].

Untuk memahami secara lebih rinci perilaku partikel padat dalam sistem CFB, penelitian ini memanfaatkan simulasi numerik berbasis perangkat lunak *Computational Particle Fluid Dynamics* (CPFD) dengan *Barracuda Virtual Reactor*. Perangkat lunak ini mengombinasikan metode

Eulerian dan Lagrangian dengan model *Multiphase Particle-in-Cell* (MP-PIC), sehingga mampu memetakan interaksi partikel dan fluida dalam sistem fluidisasi secara realistis dan akurat [5] [6].

Penelitian ini secara khusus bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi temperatur operasi 750°C, 800°C, 850°C, dan 900°C terhadap sirkulasi partikel padat dalam insinerator CFB menggunakan simulasi berbasis *CPFD Barracuda*. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap peningkatan efisiensi termal dan operasional sistem insinerator berbasis CFB dalam pengolahan RDF secara berkelanjutan. Bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini adalah RDF dengan jumlah massa yang digunakan sebanyak 1,5 kg. Sedangkan bed material yang digunakan pada penelitian ini berupa pasir silika dengan jumlah massa 5 kg. Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini difokuskan pada:

1. Bagaimana pengaruh variasi temperatur operasi terhadap pola sirkulasi partikel padat dalam reaktor CFB berdasarkan hasil simulasi CPFD Barracuda?
2. Bagaimana perbedaan waktu tinggal dan fraksi volume partikel pada tiap temperatur memengaruhi efisiensi aliran partikel dan performa sistem sirkulasi?

2. Dasar Teori

2.1 Insinerasi

Insinerasi merupakan salah satu metode termal yang digunakan untuk mengelola limbah padat dengan cara membakarnya pada suhu tinggi. Proses ini tidak hanya mengurangi volume limbah secara signifikan, tetapi juga memungkinkan konversi energi dari pembakaran menjadi bentuk lain yang berguna, seperti panas atau listrik. Dalam penerapannya, insinerasi dibagi ke dalam beberapa jenis sistem pembakaran, seperti fixed grate, moving grate, rotary kiln, dan fluidized bed. Teknologi ini telah berkembang untuk menyesuaikan karakteristik sampah, efisiensi termal, dan tingkat emisi yang dihasilkan [7].

2.2 Circulating Fluidized Bed (CFB)

Reaktor *Circulating Fluidized Bed* (CFB) merupakan salah satu tipe insinerator modern yang bekerja dengan prinsip fluidisasi, yaitu mencampurkan partikel padat dengan gas pembakaran untuk menciptakan pergerakan partikel yang menyerupai fluida. Sistem ini memungkinkan sirkulasi partikel secara terus menerus antara riser dan cyclone, sehingga meningkatkan efisiensi pembakaran dan distribusi panas. Keunggulan lain dari CFB adalah kemampuannya untuk menangani berbagai macam bahan bakar padat, termasuk RDF, dengan efisiensi termal yang tinggi dan fleksibilitas operasional yang luas [3].

2.3 Fluidisasi

Fluidisasi adalah fenomena di mana partikel padat berukuran kecil tersuspensi dalam aliran fluida,

membentuk lapisan seperti fluida yang dinamis. Dalam konteks CFB, fluidisasi berperan penting dalam memfasilitasi pembakaran merata dan distribusi panas. Jenis fluidisasi dibagi berdasarkan kecepatan alir, seperti bubbling, turbulent, dan circulating fluidized bed. CFB berada pada kategori terakhir yang menggabungkan prinsip transportasi partikel ke luar bed dan pengembaliannya melalui cyclone [8].

2.4 Computational Particle Fluid Dynamics (CPFD)

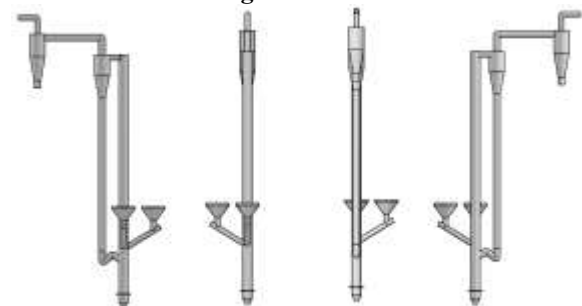
Computational Particle Fluid Dynamics (CPFD) adalah metode numerik yang digunakan untuk memodelkan dan menganalisis sistem aliran fluida-partikel secara simultan. Berbeda dari CFD konvensional, CPFD mengintegrasikan dinamika partikel dengan pendekatan Lagrangian dan dinamika fluida dengan pendekatan Eulerian, sehingga lebih akurat dalam menggambarkan interaksi multiphase. Model yang digunakan dalam CPFD adalah *Multiphase Particle-in-Cell* (MP-PIC), yang cocok untuk simulasi sistem seperti reaktor CFB karena mampu menghitung kecepatan, tekanan, dan distribusi partikel dalam skala waktu nyata [6].

3. Metode Penelitian

3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini disusun untuk melakukan simulasi numerik terhadap dinamika aliran partikel padat dalam reaktor pembakaran CFB pada sistem insinerasi berbasis RDF. Tujuan utamanya adalah mengkaji pengaruh variasi temperatur awal operasi terhadap perilaku sirkulasi partikel. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak CPFD Barracuda Virtual Reactor yang memungkinkan pemodelan tiga dimensi sistem multiphase antara fluida dan padatan secara rinci dan realistis. Pendekatan ini dipilih karena dapat mengurangi ketergantungan pada eksperimen langsung yang mahal dan memakan waktu, serta memperluas pemahaman terhadap fenomena termal dan dinamika partikel dalam sistem CFB.

3.2 Ilustrasi Pandangan Multisudut Reaktor CFB

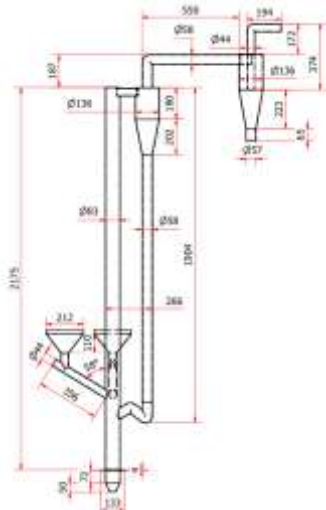


Gambar 1. Proyeksi Ortografis Reaktor CFB

Pada gambar di atas menampilkan representasi visual reaktor Circulating Fluidized Bed (CFB) dari tiga orientasi: samping, depan, dan belakang. Setiap sudut pandang memberikan perspektif teknis untuk memahami konfigurasi sistem, termasuk posisi

pemasukan bahan bakar, sirkulasi partikel, dan saluran gas. Visualisasi ini mendukung proses fabrikasi, perakitan, serta memastikan desain sesuai prinsip kerja dan keselamatan reaktor. Dengan pandangan multiarah, perancangan dan evaluasi desain dapat dilakukan lebih akurat dan sistematis.

3.3 Dimensi Alat



Gambar 2. Dimensi Alat

3.4 Deskripsi Alat CFB

Pada sistem reaktor *Circulating Fluidized Bed* (CFB) yang terdiri dari beberapa bagian utama. Proses pembakaran RDF berlangsung di *Main Reactor*, dengan bahan bakar masuk melalui *Fuel Feeder* dan udara dialirkan lewat *Compressor* menuju *Distributor Plate* untuk menjaga kondisi fluidisasi partikel selama pembakaran. Gas buang dan partikel halus dialirkan ke *Cyclone* untuk pemisahan. Partikel padat dikembalikan ke reaktor melalui *Loop Seal*, sedangkan gas buang dialirkan keluar lewat *Flue Pipe*. Kandungan emisi gas seperti CO_2 , CO , dan NO_x dipantau oleh *Gas Analyzer* yang terpasang pada jalur pembuangan gas. Stabilitas temperatur dijaga oleh *Heater*, sementara *Thermocouple* mencatat suhu pada titik-titik tertentu. Semua perangkat terhubung ke *Control Panel* yang mengatur dan merekam parameter sistem secara otomatis. *Motor Feeding* berfungsi mengatur laju RDF agar pasokan bahan bakar tetap stabil. Sinergi komponen-komponen ini menjadikan reaktor CFB efisien, terkontrol, dan sesuai sebagai teknologi konversi energi dari limbah padat.

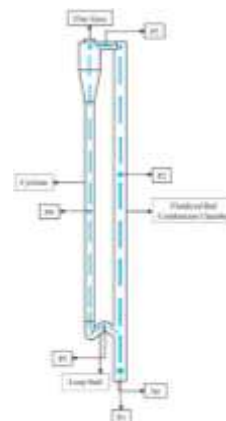
3.5 Langkah-Langkah Simulasi

Simulasi diawali dengan pembuatan desain geometri tiga dimensi reaktor CFB yang meliputi main reactor, cyclone, dan loop seal, dilanjutkan dengan proses gridding untuk membentuk mesh sebagai dasar area simulasi. Parameter material dimasukkan, seperti massa RDF sebesar 1,5 kg, pasir silika 5 kg, dan kecepatan udara 14 m/s, sementara variabel utama berupa temperatur awal divariasikan antara 750°C hingga 900°C dengan waktu simulasi 10 detik. Uji awal satu langkah dilakukan terlebih dahulu untuk memastikan seluruh input valid sebelum

simulasi dijalankan secara menyeluruh dan hasilnya diekspor dalam bentuk grafik serta visualisasi partikel. Analisis dilakukan terhadap parameter fraksi volume (VolFrac), waktu tinggal, dan laju massa sirkulasi pada tiap variasi suhu, guna mengetahui secara numerik pengaruh temperatur terhadap perilaku sirkulasi partikel di dalam reaktor CFB.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Skema Aliran Udara



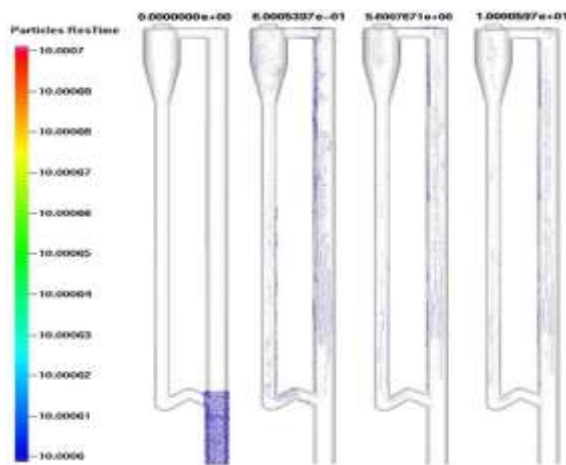
Gambar 3. Skema Aliran Udara

Gambar di atas memperlihatkan skema aliran udara dalam reaktor *Circulating Fluidized Bed* (CFB) yang menunjukkan bahwa tekanan tertinggi berada di titik P1, diikuti oleh tekanan yang menurun secara bertahap dari P2, P3, P4, hingga titik P5 yang memiliki tekanan paling rendah namun tetap berada dalam sistem yang sama. Pola penurunan tekanan ini berperan penting dalam menjaga kelancaran aliran udara dan sirkulasi partikel, di mana tekanan tinggi di P1 memberikan dorongan awal untuk memfluidisasi partikel seperti pasir silika dan bahan bakar RDF, sementara penurunan tekanan ke arah atas menciptakan kondisi aliran yang stabil, dan tekanan rendah di P4 dan P5 memungkinkan partikel turun kembali tanpa hambatan, sehingga sirkulasi partikel terus berlangsung dan mendukung pembakaran yang efisien serta distribusi suhu yang merata.

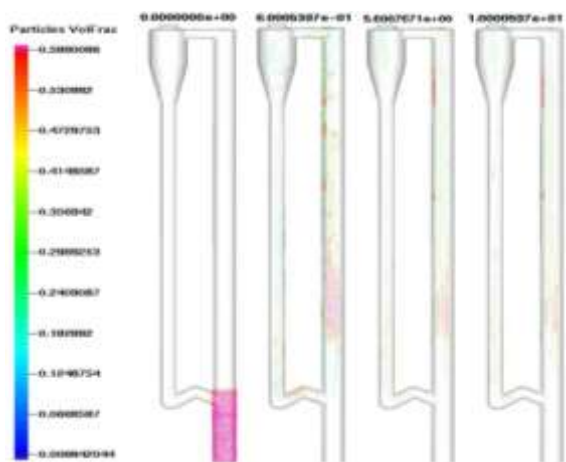
4.2 Hasil Simulasi

Berdasarkan hasil simulasi *CPFD Barracuda*, peningkatan suhu dari 750°C hingga 900°C tidak memberikan perubahan berarti terhadap nilai waktu tinggal partikel yang tetap stabil di kisaran 10 detik, menunjukkan bahwa suhu tidak memengaruhi lamanya partikel berada dalam sistem. Namun, fraksi volume partikel mengalami kenaikan dari 0.5890 pada 750°C menjadi 0.5900 di 800°C , lalu mencapai 0.6000 pada 850°C dan bertahan hingga 900°C . Kenaikan ini menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu, semakin besar jumlah partikel yang bersirkulasi dalam sistem, yang mengindikasikan peningkatan densitas partikel dan berpotensi meningkatkan efisiensi pencampuran, pembakaran, serta transfer panas dalam reaktor *Circulating Fluidized Bed*. Di bawah ini merupakan salah satu contoh hasil simulasi

pada temperatur operasi sebesar 750°C, pada parameter *Particle Residence Time* dan *Particle Volume Fraction*.



Gambar 4. Particle ResTime



Gambar 5. Particle VolFrac

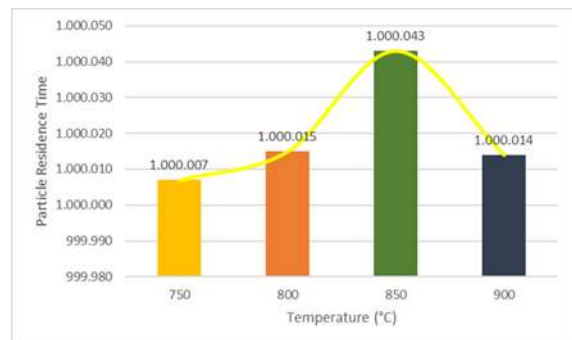
Berikut ini merupakan hasil keseluruhan dalam simulasi *CPFD Barracuda* pada parameter *Particle Residence Time* dan *Particle Volume Fraction*. Yang hasilnya dapat dilihat pada tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Data Hasil Particle ResTime dan VolFrac

Temperatur °C	Particle Residence Time (s)	Particle Volume Fraction
750°C	10.0007	0.5890
800°C	10.00015	0.5900
850°C	10.00043	0.6
900°C	10.00014	0.6

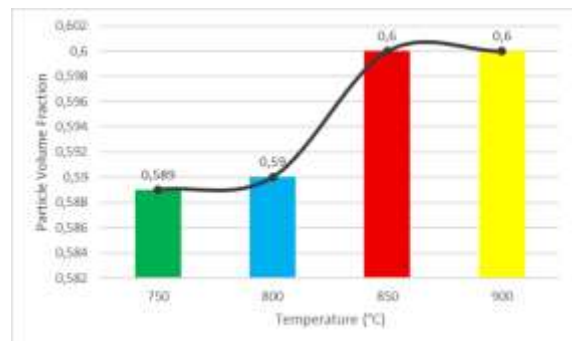
Di bawah ini menunjukkan grafik hubungan antara temperatur operasi dan waktu tinggal partikel dalam reaktor CFB, di mana nilai waktu tinggal meningkat dari 1.000.007 detik pada 750°C hingga puncaknya 1.000.043 detik di 850°C, lalu menurun menjadi 1.000.014 detik pada 900°C. Kenaikan nilai hingga 850°C menunjukkan intensitas sirkulasi partikel yang meningkat, sementara penurunan di 900°C menandakan sistem mulai stabil dengan

partikel mencapai keseimbangan antara gaya dorong fluida dan gravitasi, serta menunjukkan bahwa suhu memengaruhi dinamika partikel meskipun perubahan berlangsung kecil karena kestabilan aliran tetap terjaga. Grafik dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 6. Grafik Particle ResTime

Gambar di bawah ini memperlihatkan grafik perubahan fraksi volume partikel terhadap variasi suhu dalam sistem CFB, di mana nilai fraksi volume sebesar 0,589 pada 750°C meningkat menjadi 0,59 pada 800°C, lalu naik signifikan menjadi 0,6 pada 850°C dan tetap stabil pada 900°C. Kenaikan ini menunjukkan bahwa suhu tinggi meningkatkan kerapatan partikel yang tersirkulasi, sedangkan kestabilan nilai pada 850°C dan 900°C mencerminkan kondisi operasi optimal yang mendukung efisiensi sirkulasi dan distribusi partikel secara efektif.



Gambar 7. Grafik Particle VolFrac

Tabel 2. Data Hasil Persentase Solid

Temperatur °C	Particle Volume Fraction	Persentase Solid
750°C	0.5890	59%
800°C	0.5900	59%
850°C	0.6	60%
900°C	0.6	60%

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian simulasi *CPFD Barracuda*, variasi temperatur operasi memengaruhi sirkulasi partikel dalam reaktor CFB, di mana pada 750°C dan 800°C persentase massa solid tetap 59%, meningkat menjadi 60% pada 850°C, dan stabil hingga 900°C, menandakan aktivitas sirkulasi meningkat dan sistem mencapai kondisi termal optimum. Waktu tinggal partikel tetap sekitar 10 detik di semua suhu, menunjukkan suhu tidak memengaruhi

lama partikel berada dalam sistem. Namun, fraksi volume partikel meningkat dari 0,589 menjadi 0,6 dan stabil, yang menunjukkan peningkatan densitas partikel dan distribusi padatan yang lebih merata. Hasil ini menegaskan pentingnya pengaturan suhu untuk mengoptimalkan efisiensi sirkulasi dan pembakaran pada reaktor CFB berbahan RDF.

Daftar Pustaka

- [1] B. Z. Jawahar, V. Naresh, R. Prithiviraj, C. Vignesh, and J. Sugumaran, 2019, Design and fabrication of fluidized bed incinerator, *IEEE Int. Conf. Syst. Comput. Autom. Networking, ICSCAN*, pp. 1–10.
- [2] B. Leckner and F. Lind, 2020, Combustion of municipal solid waste in fluidized bed or on grate – A comparison, *Waste Manag.*, vol. 109, pp. 94–108.
- [3] B. Leckner, 2024, From bubbling to circulating fluidized bed combustion—development and comparison, *Heliyon*, vol. 10, no. 13, p.
- [4] S. Ibrahim and T. A. Rohmat, 2021, Pengaruh Udara Lebih Dan Udara Sekunder Terhadap Karakteristik Pembakaran Pada Circulating Fluidized Bed Combustor, *Media Mesin Maj. Tek. Mesin*, vol. 22, no. 2, pp. 64–75.
- [5] V. Verma and J. T. Padding, 2020, A novel approach to MP-PIC: Continuum particle model for dense particle flows in fluidized beds, *Chem. Eng. Sci. X*, vol. 6, p. 100053
- [6] W. K. H. Ariyaratne, E. V. P. J. Manjula, C. Ratnayake, and M. C. Melaaen, 2018, CFD Approaches for Modeling Gas-Solids Multiphase Flows - A Review, *EUROSIM 2016 SIMS 2016 Gasif.*, vol. 142, no. September 2016, pp. 680–686.
- [7] M. Idris, M. Setyawan, and Z. Mufrodi, 2024, Teknologi Insinerasi Sebagai Solusi Pengolahan Sampah Perkotaan dan Pemulihan Energi : A Review,” *Semin. Nas. Sains dan Teknol.* 2024, no. April.
- [8] K. Y. Kwong and E. J. Marek, 2015, Combustion of biomass in fluidized beds. A review of key phenomena and future perspectives,” p. 6.



I Kadek Adi Kanadiarta

Telah menyelesaikan studi SMA di SMAN 7 Luwu Timur, pada tahun 2021. Selanjutnya, melanjutkan studi program sarjana di Program Studi Teknik Mesin, Universitas Udayana pada tahun 2021 dan berhasil menyelesaikannya pada tahun 2025.