

STUDI NUMERIK EFEK GEOMETRI *CONE* DAN *INCOMING FLOW* TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN PADA *SPOUTED BED*

* Rendy Augustino Sam¹, Khoiri Rozi²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: rendysammm@gmail.com

Abstrak

Reaktor *spouted bed* merupakan salah satu teknologi yang banyak ditemukan pada proses *Fluidized Bed Chemical Vapor Deposition* (FBCVD). Teknologi ini digunakan untuk pelapisan partikel bahan bakar nuklir TRISO karena mampu menghasilkan sirkulasi partikel yang stabil serta perpindahan panas dan massa yang sangat baik. Karakteristik hidrodinamika reaktor ini sangat dipengaruhi oleh geometri *cone* dan kondisi aliran gas masuk (*incoming flow*) yang digunakan. Studi ini diarahkan untuk menganalisis pengaruh variasi geometri *cone* dan *incoming flow* terhadap karakteristik aliran pada *spouted bed* menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Simulasi dilakukan secara dua dimensi (2D) dengan pendekatan multiphase *Eulerian Two-Fluid Model* (TFM) pada kondisi transien menggunakan udara sebagai fase gas dan partikel padat sebagai fase granular. Hasil simulasi ditemukan bahwa variasi geometri *cone* dan *incoming flow* berpengaruh terhadap pola sirkulasi partikel, kestabilan zona *spout*, pembentukan *fountain*, serta luas *dead zone*. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat menentukan konfigurasi geometri yang memberikan karakteristik hidrodinamika paling stabil dengan *pressure drop* yang rendah sehingga dapat menjadi acuan dalam pengembangan dan optimasi desain reaktor *spouted bed* untuk proses pelapisan partikel TRISO.

Kata kunci: cfd; eulerian two-fluid model; incoming flow; pressure drop; spouted bed

Abstract

A *spouted bed* reactor is widely employed in the *Fluidized Bed Chemical Vapor Deposition* (FBCVD) process for coating TRISO nuclear fuel particles due to its capability to provide stable particle circulation and efficient heat and mass transfer. The hydrodynamic behavior of the reactor is strongly influenced by the cone geometry and incoming gas flow, which determine spouting stability, particle distribution, pressure drop, and dead-zone formation. This study aims to investigate the effects of cone geometry and incoming flow on the flow characteristics of a *spouted bed* using a *Computational Fluid Dynamics* (CFD) approach. The numerical simulation was performed using a two-dimensional transient multiphase model based on the *Eulerian Two-Fluid Model* (TFM), with air as the gas phase and granular particles as the solid phase. The investigated parameters include volume fraction distribution, pressure distribution, gas velocity profile, velocity vectors, streamlines, and pressure drop characteristics to evaluate the hydrodynamic performance of the reactor. The simulation results are expected to demonstrate the influence of cone geometry and incoming flow on particle circulation, spout stability, fountain formation, and dead-zone development. Furthermore, the study is expected to identify the optimum reactor geometry that provides stable hydrodynamic characteristics with low pressure drop, thereby serving as a reference for the design and optimization of *spouted bed* reactors used in the coating process of TRISO fuel particles.

Keywords: cfd; eulerian two-fluid model; incoming flow; pressure drop; spouted bed

1. Pendahuluan

Pengembangan reaktor nuklir generasi maju, khususnya High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR), menuntut bahan bakar dengan standar keselamatan mutlak yang mampu beroperasi pada suhu ekstrem tanpa risiko pelepasan produk fisi. Standar tersebut diwujudkan melalui pengadopsian partikel Tristructural Isotropic (TRISO) [1]. Partikel TRISO terdiri atas kernel uranium yang dibungkus empat lapisan pelindung isotropik, yaitu karbon berpori (buffer), Inner Pyrolytic Carbon (IPyC), Silicon Carbide (SiC), dan Outer Pyrolytic Carbon (OPyC). Lapisan SiC berperan sebagai bejana tekan mikro yang mencegah kebocoran radionuklida ke lingkungan, sehingga keutuhan fisis lapisan penyusun secara langsung mendikte tingkat keselamatan reaktor [2]. Konsekuensinya, fabrikasi partikel TRISO menuntut kepresisian tinggi agar lapisan pelindung tidak mengalami cacat struktural, penipisan lokal, maupun deformasi akibat benturan asimetris selama proses pelapisan. Proses pelapisan partikel TRISO dilakukan melalui metode Fluidized Bed

Chemical Vapor Deposition (FB-CVD) [3]. Kunci keberhasilan FB-CVD terletak pada penguasaan rezim hidrodinamika yang stabil di dalam reaktor. Apabila aliran tidak homogen, waktu kontak antara gas prekursor dan partikel menjadi tidak seragam sehingga memicu pembentukan lapisan cacat atau aglomerasi antarpartikel yang berujung pada kegagalan batch produksi. Untuk mengakomodasi kebutuhan tersebut, reaktor spouted bed terbukti sebagai konfigurasi paling ideal [4]. Reaktor fluidisasi konvensional cenderung mengalami slugging dan channeling ketika memproses padatan berdensitas tinggi dan berukuran kasar kategori Geldart Group D seperti partikel TRISO [5]. Sebaliknya, spouted bed menginjeksikan gas berkecepatan tinggi tepat di pusat dasar kerucut sehingga terbentuk sirkulasi internal teratur yang melintasi tiga zona utama, yaitu zona spout, fountain, dan annulus [6]. Sirkulasi sistematis ini menjamin waktu tinggal yang terkendali dan memastikan setiap partikel memperoleh ketebalan deposit yang seragam.

Kendati menawarkan kinerja terukur pada dimensi laboratorium, peningkatan kapasitas (scale-up) reaktor spouted bed menuju skala industri terbentur pada tantangan hidrodinamika yang kompleks [7]. Peningkatan kapasitas tidak dapat dilakukan melalui pembesaran dimensi secara proporsional, mengingat karakteristik hidrodinamika sangat sensitif terhadap perubahan geometri. Modifikasi sudut kerucut (cone angle) secara langsung mendikte distribusi fraksi volume fase dan profil kecepatan gas [8]. Pelebaran sudut cone yang tidak terukur berpotensi memperluas area stagnan di dekat dinding dasar reaktor (dead zone), tempat partikel tidak ikut tersirkulasi sehingga pelapisan menjadi gagal [9]. Di sisi lain, kecepatan aliran gas masuk (incoming flow) menentukan ambang kecepatan minimum spouting (Ums), yaitu kecepatan kritis yang dibutuhkan untuk memecah tumpukan partikel dan mempertahankan sirkulasi berkelanjutan.

Mengingat pengujian fisis pilot plant memerlukan investasi modal masif dan durasi iterasi yang panjang, pemodelan numerik berbasis komputasi hadir sebagai pendekatan prediktif yang esensial. Dalam simulasi partikel padat, pendekatan Discrete Element Method (DEM) yang melacak setiap individu partikel menjadi tidak relevan untuk muatan ± 1.826 gram karena jumlah partikel yang mencapai ratusan ribu akan membebani perangkat keras komputasi hingga batas maksimalnya [10], [11]. Oleh karena itu, kerangka Eulerian Two-Fluid Model (TFM) yang memperlakukan kedua fase sebagai kontinum saling berinterpenetrasi menjadi solusi paling rasional dan efisien. Studi komparatif Moliner dkk. [12] membuktikan bahwa TFM menghasilkan prediksi struktur aliran yang presisi dengan efisiensi kalkulasi melampaui metode diskrit untuk keperluan komparasi geometris, sehingga menjadikannya standar dalam evaluasi scale-up.

Meskipun fondasi teoretis pemodelan reaktor fluida telah mapan, sebagian besar literatur terdahulu mengevaluasi modifikasi parameter geometri secara parsial atau hanya meninjau reaktor pada skala mikro [13], [14]. Belum terdapat investigasi yang secara sistematis mengkuantifikasi dampak kombinasi variasi sudut cone dan kecepatan aliran gas masuk terhadap viabilitas operasional scale-up reaktor pelapis TRISO pada kapasitas muatan ± 1.826 gram. Oleh karena itu, penelitian ini dilaksanakan untuk menyimulasikan fenomena hidrodinamika tersebut secara numerik menggunakan kerangka CFD berskema TFM dua dimensi, dengan tujuan menetapkan rancang bangun kerucut yang paling stabil, menghasilkan pressure drop terendah, meminimalkan dead zone, serta menentukan ambang kecepatan minimum spouting pada masing-masing konfigurasi sudut cone.

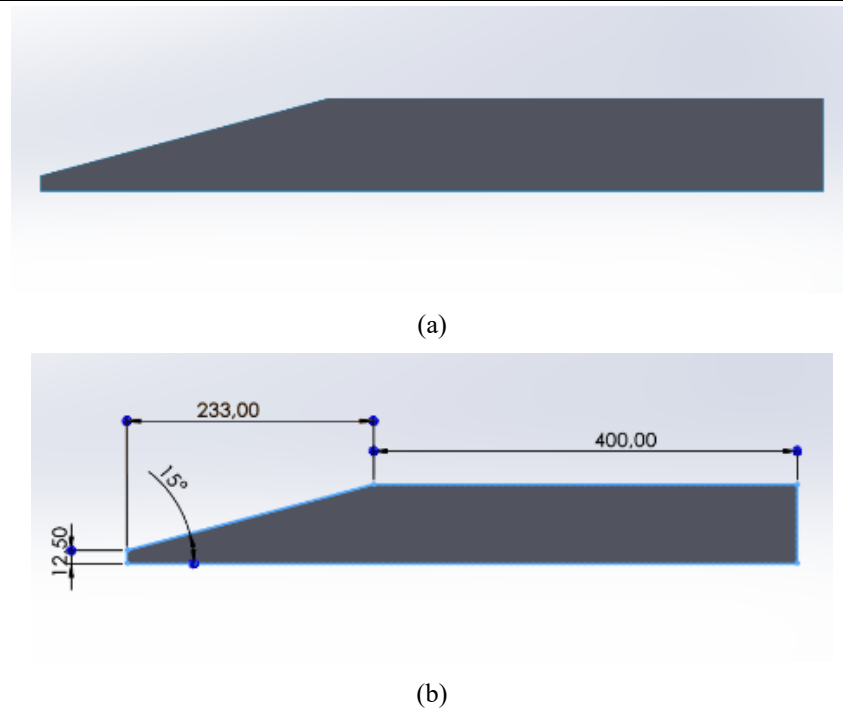
2. Metode Penelitian

2.1 Geometri dan Domain Komputasi

Reaktor *spouted bed* konis dimodelkan sebagai domain dua dimensi aksisimetris. Geometri disusun oleh kolom silinder atas berdiameter 150 mm dengan tinggi 400 mm, bagian konis setinggi 233 mm, dan saluran masuk gas (*orifice*) berdiameter 25 mm. Sudut *cone* pada konfigurasi acuan ditetapkan sebesar 30° . Spesifikasi geometri acuan disajikan pada Tabel 1, sedangkan model padat dan sketsa berdimensi domain komputasi ditunjukkan pada Gambar 1.

Tabel 1. Spesifikasi Geometri Reaktor *Spouted Bed*

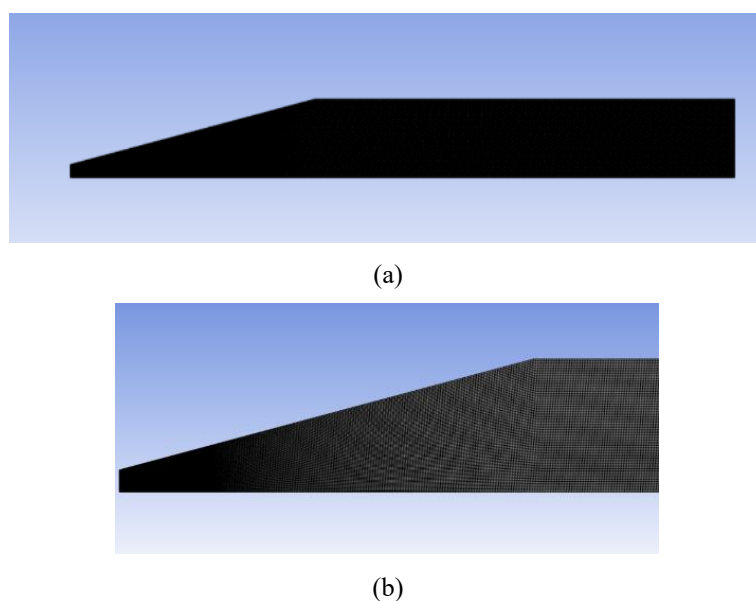
Bagian	Dimensi
Diameter kolom atas	150 mm
Tinggi kolom atas	400 mm
Sudut cone (acuan)	30°
Diameter inlet (D0)	25 mm
Tinggi cone	233 mm



Gambar 1. Geometri Domain Komputasi *Spouted Bed*: (a) Model Padat, (b) Sketsa Berdimensi (mm)

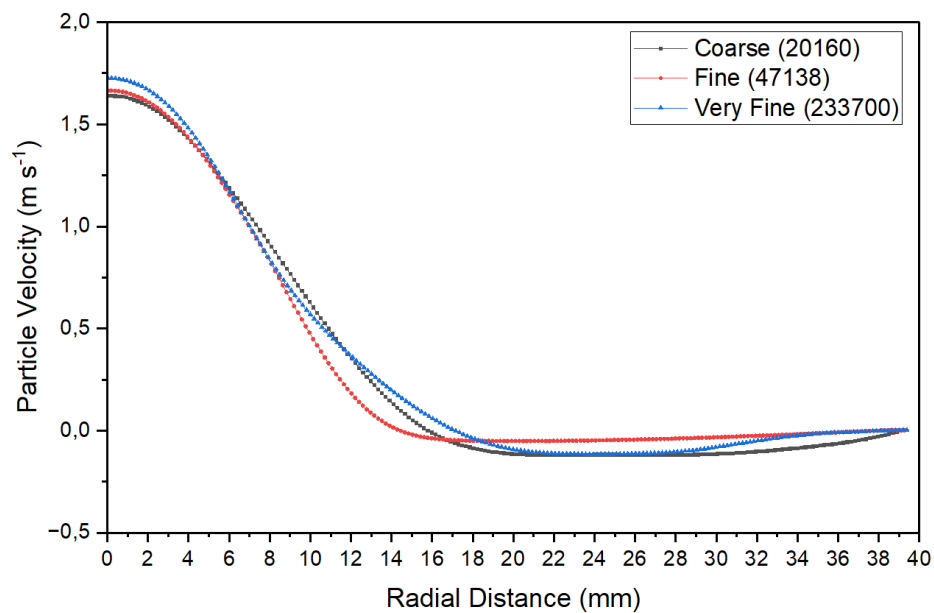
2.2 Meshing dan Uji Independence

Domain komputasi didiskretisasi menggunakan elemen kuadrilateral terstruktur (*Quad 4*) dengan skema *inflation* bertransisi halus di dekat dinding untuk menangkap gradien kecepatan pada lapisan batas. Hasil meshing ditunjukkan pada Gambar 2. Uji independensi grid dilakukan pada tiga tingkat kerapatan, yaitu *coarse* (1,5 mm; 20.160 elemen), *fine* (1 mm; 47.138 elemen), dan *very fine* (0,45 mm; 233.700 elemen), dengan profil kecepatan partikel arah radial sebagai parameter pembanding. Ketiga tingkat kerapatan menghasilkan tren profil yang identik dengan perbedaan tidak signifikan antara mesh *fine* dan *very fine*, khususnya pada zona *spout*. Mengingat peningkatan jumlah elemen dari *fine* ke *very fine* mencapai hampir lima kali lipat tanpa perbaikan akurasi yang berarti, mesh *fine* dipilih sebagai konfigurasi optimal dengan kualitas *maximum skewness* 0,167 dan *minimum orthogonal quality* 0,962 yang keduanya memenuhi standar ANSYS.



Gambar 2. Hasil Meshing Domain Komputasi: (a) Domain Penuh, (b) Perbesaran Pada Area Inlet

Hasil dari *grid independence* dapat dilihat pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3. *Grid Independence Test*

Hasil uji independensi grid ditinjau melalui profil kecepatan partikel arah radial pada penampang melintang unggun, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Parameter ini dipilih karena kecepatan partikel merupakan besaran yang paling sensitif terhadap kerapatan mesh, khususnya di zona spout yang merupakan wilayah paling kritis dalam prediksi hidrodinamika reaktor. Ketiga tingkat kerapatan, yaitu coarse (20.160 elemen), fine (47.138 elemen), dan very fine (233.700 elemen), menghasilkan tren profil yang identik: kecepatan partikel bernilai maksimum di sumbu reaktor (jarak radial 0 mm) dengan magnitudo sekitar 1,65–1,73 m/s, kemudian menurun secara gradual seiring bertambahnya jarak radial hingga menembus nilai nol pada kisaran 18–20 mm. Perubahan tanda dari positif ke negatif ini menandai transisi dari zona spout, tempat partikel terangkat ke atas, menuju zona annulus, tempat partikel bergerak turun dengan magnitudo kecil (sekitar -0,1 hingga -0,15 m/s) sebelum kembali mendekati nol di dekat dinding reaktor pada jarak 40 mm.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Validasi Model

Validasi dilakukan dengan mereplikasi geometri, properti material, dan kondisi batas kasus acuan pada literatur, kemudian membandingkan nilai penurunan tekanan pada kondisi ekuilibrium terhadap data eksperimental Sari dkk. [17] serta luaran simulasi terdahulu Şentürk Lüle dkk. [18]. Hasil komparasi disajikan pada Tabel 2.

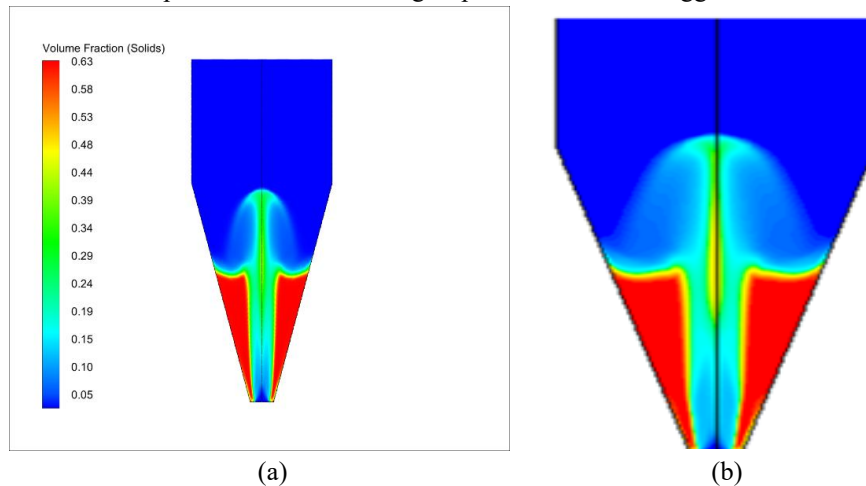
Tabel 2. Hasil Validasi Penurunan Tekanan Terhadap Data Acuan

Sumber data	ΔP (Pa)	Deviasi terhadap eksperimen (%)
Data eksperimental (Sari dkk. [17])	3.764	(acuan)
Simulasi terdahulu (Şentürk Lüle dkk. [18])	3.539	-5,98
Simulasi pada penelitian ini	3.866	+2,71

Berdasarkan Tabel 2, deviasi hasil simulasi terhadap data eksperimental hanya bernilai 2,71% sehingga memenuhi kriteria validasi yang ditetapkan ($< 5\%$), bahkan lebih kecil dibandingkan deviasi simulasi terdahulu. Kecenderungan taksiran berlebih yang bersifat minor tersebut dapat dijelaskan melalui dua faktor. Pertama, reduksi domain menjadi dua dimensi membatasi derajat kebebasan pergerakan partikel pada arah azimuthal sehingga hambatan gesek antarpartikel yang terhitung cenderung lebih tinggi dibandingkan kondisi tiga dimensi aktual. Kedua, model gaya seret Gidaspow secara

karakteristik berpotensi menghasilkan taksiran koefisien seret yang lebih besar pada partikel kasar berdensitas tinggi kategori Geldart D.

Validasi kualitatif dilakukan dengan membandingkan kontur fraksi volume fase padat hasil simulasi terhadap rekaman kamera berkecepatan tinggi dari literatur eksperimental, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4. Tiga zona hidrodinamika fundamental yang menjadi karakteristik *spouted bed* konis, yaitu zona *spout* di poros tengah, zona *annulus* di sepanjang dinding miring, serta zona *fountain* di elevasi atas, terekonstruksi dengan bentuk dan proporsi yang identik terhadap realitas fisisnya. Kesesuaian morfologi ini mengonfirmasi bahwa konfigurasi numerik TFM yang digunakan mampu merepresentasikan dinamika pertukaran momentum gas–padat berdensitas tinggi secara realistis.

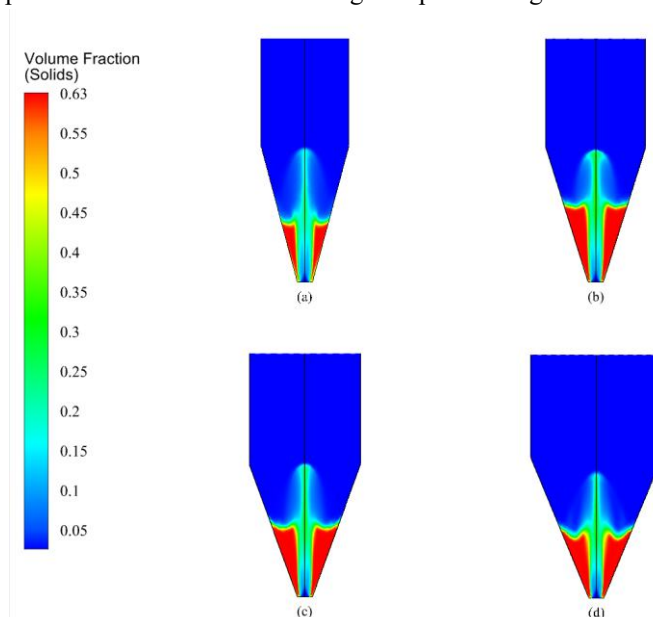


Gambar 4. Validasi Kualitatif Pola *Spouting*: (a) Hasil CFD, (b) Literatur Acuan [17]

3.2 Pengaruh Variasi Sudut Cone

3.2.1 Stabilitas Spouting Dan Dead Zone

Distribusi fraksi volume padatan pada keempat variasi sudut *cone* diplot pada Gambar 5, di mana warna merah merepresentasikan tumpukan terkonsolidasi mendekati batas pengepakan (0,63) dan warna biru merepresentasikan zona terdilusi gas. Data diambil pada kondisi tunak semu setelah pola *spouting* terbentuk penuh. Keempat variasi memperlihatkan struktur tiga zona yang konsisten dengan karakteristik *spouted bed*. Pada sudut 30°, kanal *spout* tampak sempit dan terjepit dengan akumulasi padatan yang terkonsentrasi rapat di sepanjang dinding kerucut sehingga annulus terlihat tebal dan padat. Seiring bertambahnya sudut menuju 35° dan 40°, kanal *spout* menjadi lebih jelas dan memanjang ke atas, sementara distribusi padatan di annulus melebar mengikuti pelebaran geometri dasar.

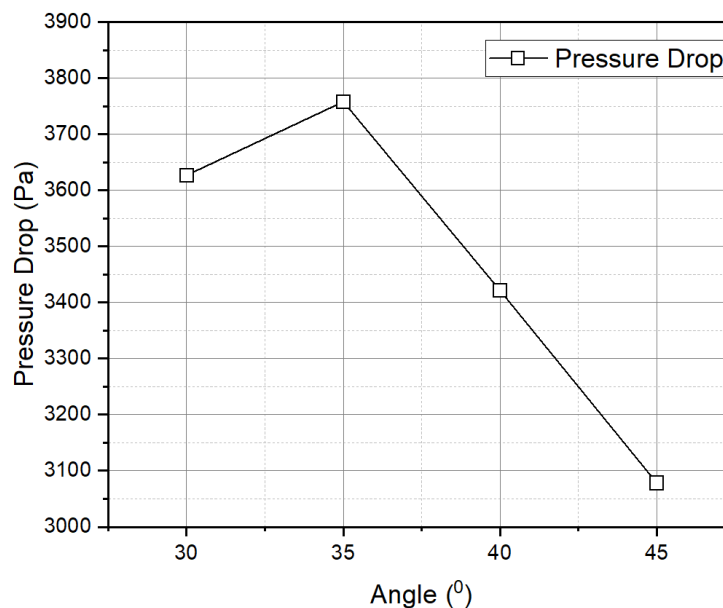


Gambar 5. Kontur Fraksi Volume Fase Padat Pada Variasi Sudut *Cone*: (a) 30°, (b) 35°, (c) 40°, dan (d) 45°

Pada sudut terbesar (45°), zona berfraksi volume rendah di poros tengah tampak menyempit dan memanjang secara vertikal. Penyempitan kanal ini tidak merepresentasikan penetrasi *spout* yang lebih kuat, melainkan mengindikasikan terbentuknya kanal aliran gas terisolasi (*channeling*), yaitu kondisi ketika gas menerobos tumpukan tanpa mengaduk partikel di sekitarnya secara efektif. Indikasi tersebut dikonfirmasi oleh analisis vektor kecepatan fase padat pada Subbab 3.2.3 yang memperlihatkan penurunan drastis kecepatan partikel serta terbentuknya zona stagnan di dasar dinding konis.

3.2.2 Penurunan Tekanan (Pressure Drop)

Penurunan tekanan merupakan parameter kunci karena berkaitan langsung dengan energi yang dibutuhkan gas untuk membuka dan mempertahankan kanal *spout*, sekaligus menentukan kebutuhan daya *blower* pada implementasi aktual. Nilai ΔP diekstraksi dari selisih tekanan statis rata-rata antara sisi masuk dan sisi keluar domain pada kondisi tunak semu, dan hasilnya disajikan pada Gambar 6.



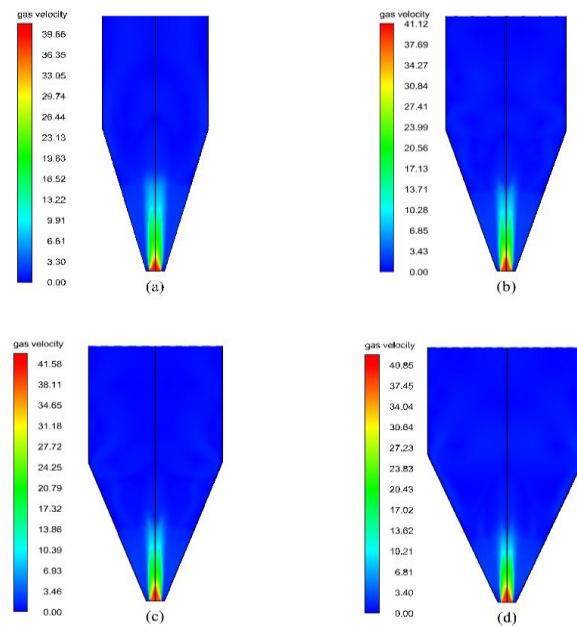
Gambar 6. Penurunan Tekanan Pada Variasi Sudut *Cone* ($U = 38,6$ m/s)

Berdasarkan Gambar 5, penurunan tekanan menunjukkan kecenderungan yang tidak monoton terhadap pembesaran sudut kerucut. Pada sudut 30° diperoleh ΔP sebesar 3.626 Pa, yang meningkat menjadi 3.758 Pa pada sudut 35° sebagai nilai tertinggi di antara seluruh variasi. Hal ini mengindikasikan bahwa konfigurasi 35° menuntut energi tekanan paling besar untuk membuka serta mempertahankan *spout* pada kondisi tunak. Selanjutnya, ketika sudut diperbesar menuju 40° dan 45° , nilai ΔP menurun tajam berturut-turut menjadi 3.422 Pa dan 3.078 Pa.

Secara fisis, kecenderungan tersebut dapat dijelaskan melalui mekanisme penopangan beban unggun. Pada sudut curam (30° dan 35°), luas penampang dinding yang menopang tumpukan relatif kecil sehingga udara kompresi harus menyuplai gaya dorong vertikal secara penuh untuk menahan beban statis partikel. Sebaliknya, pada sudut yang lebih landai (40° dan 45°), sebagian besar gaya berat statis unggun ± 1.826 gram bersandar dan ditopang oleh permukaan dinding *cone*. Pengalihan tumpuan beban statis inilah yang mereduksi gaya dorong vertikal yang harus diatasi fluida, sehingga nilai ΔP total menurun. Ditinjau semata dari konsumsi energi kompresor, desain 40° dan 45° tampak lebih efisien. Kendati demikian, penentuan geometri optimal tidak dapat dilandaskan hanya pada parameter ΔP , melainkan perlu ditinjau melalui evaluasi kualitas sirkulasi partikel sebagaimana dibahas pada subbab berikutnya.

3.2.3 Profil Kecepatan Dan Pola Aliran

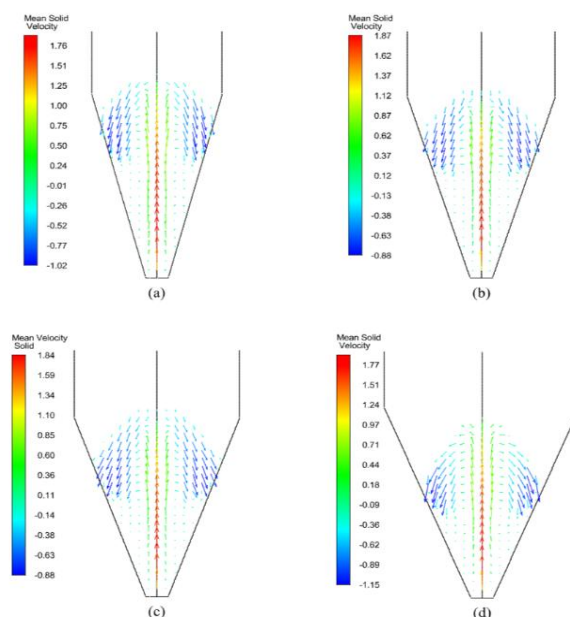
Pada tahap ini kecepatan superfisial udara di saluran masuk ditetapkan konstan pada 38,6 m/s, sehingga seluruh perbedaan profil kecepatan murni merupakan respons hidrodinamika terhadap modifikasi kelandaian sudut *cone*. Kontur kecepatan fase gas disajikan pada Gambar 7. Sesuai prinsip kekekalan massa, percepatan aliran di area inlet pada keempat variasi menghasilkan rentang kecepatan maksimum yang relatif seragam, yakni 40,03 hingga 41,44 m/s. Perbedaan mendasar justru terletak pada kemampuan masing-masing geometri mempertahankan energi kinetik aksial tersebut.



Gambar 7. Kontur Kecepatan Fase Gas Pada Variasi Sudut *Cone*: (a) 30°, (b) 35°, (c) 40°, Dan (d) 45°

Pada sudut 30° dan 35°, dinding konis yang curam berfungsi layaknya selubung yang mengekang aliran udara sehingga profil kecepatan aksial tetap terfokus di poros tengah reaktor. Kondisi ini memungkinkan momentum gas menembus jauh ke atas hingga mencapai puncak *fountain* sebelum energinya terdisipasi secara merata di ruang silinder. Sebaliknya, pada geometri yang lebih landai (40° dan 45°), ruang ekspansi lateral membesar dalam jarak vertikal yang pendek sehingga aliran udara berekspansi ke arah radial terlalu dini. Akibatnya kecepatan aksial anjlok secara radikal sesaat setelah area inlet, dan udara kehilangan daya dorong utamanya secara prematur sebelum mampu menembus hambatan unggun partikel. Fenomena disipasi kecepatan ekstrem inilah yang menjadi penyebab fundamental terjadinya *choking* dan pembentukan *dead zone* lokal pada sudut 45°.

Dampak langsung disipasi energi kinetik fase gas tersebut termanifestasi pada kinematika pergerakan fase padat, sebagaimana dipetakan melalui plot vektor kecepatan partikel pada Gambar 8. Representasi vektor dipilih karena menyajikan dua informasi secara simultan, yaitu gradien warna sebagai besaran skalar kecepatan absolut partikel dan orientasi anak panah sebagai arah trayektori sirkulasi.



Gambar 8. Vektor Kecepatan Fase Padat Pada Variasi Sudut *Cone*: (a) 30°, (b) 35°, (c) 40°, Dan (d) 45°

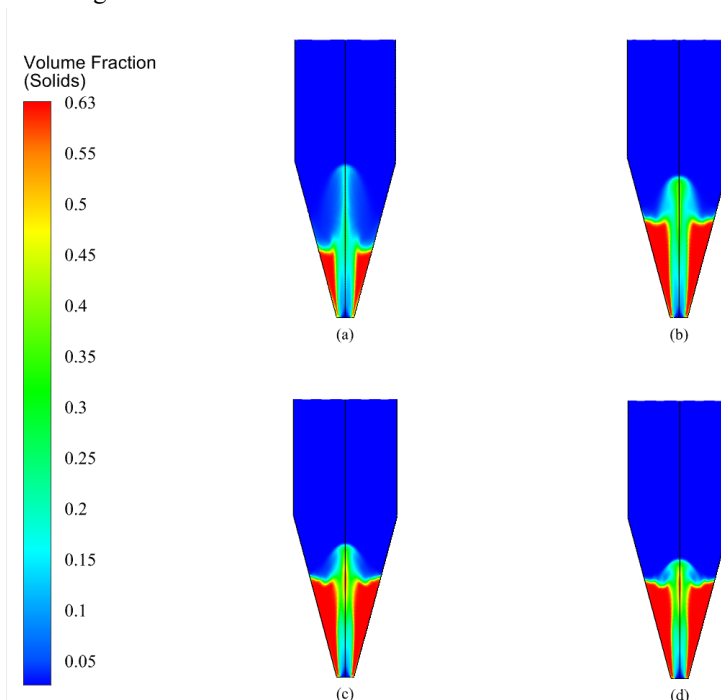
Berdasarkan Gambar 8, kualitas transfer momentum terbukti sangat bergantung pada profil kecepatan gas pendobraknya. Pada sudut 30° dan 35° , kecepatan gas yang tinggi terkonversi menjadi momentum partikel secara maksimal, ditandai oleh vektor di poros tengah yang menunjuk lurus ke atas dengan magnitudo tinggi serta vektor di bagian atas yang menyebar proporsional membentuk zona *fountain*, sebelum partikel meluncur turun di annulus secara kontinu. Sebaliknya, pada sudut 40° dan terutama 45° , pelemahan daya dorong gas menyebabkan partikel tidak mampu terakselerasi hingga elevasi yang diharapkan. Pada dasar dinding konis sudut 45° , vektor mengalami penurunan kecepatan yang drastis dengan arah trayektori menjadi horizontal dan tidak beraturan. Kondisi ini merupakan bukti terbentuknya *dead zone*, yaitu area tempat partikel TRISO terjebak di sudut reaktor dan terisolasi dari siklus resirkulasi. Terhambatnya pergerakan partikel di area tersebut sangat dihindari dalam operasi pelapisan bahan bakar nuklir karena menyebabkan partikel tidak memperoleh pelapisan yang homogen. Berdasarkan sintesis distribusi gas dan kinematika partikel, desain sudut 30° divalidasi secara numerik sebagai geometri paling andal dalam mempertahankan resirkulasi *spouting* yang sempurna.

3.3 Pengaruh Variasi Incoming Flow

Pada tahap ini kecepatan aliran gas masuk diposisikan sebagai variabel bebas yang diturunkan secara bertahap dari kecepatan acuan 38,6 m/s menuju 35 m/s, 30 m/s, dan 25 m/s pada setiap konfigurasi sudut *cone*. Tujuan evaluasi ini adalah mengkaji sensitivitas stabilitas *spouting* terhadap penurunan kecepatan gas sekaligus menentukan ambang kecepatan minimum *spouting* (Ums), yaitu kecepatan kritis terendah yang masih mampu mendobrak tumpukan partikel TRISO dan mempertahankan sirkulasi secara kontinu tanpa mengalami *choking*.

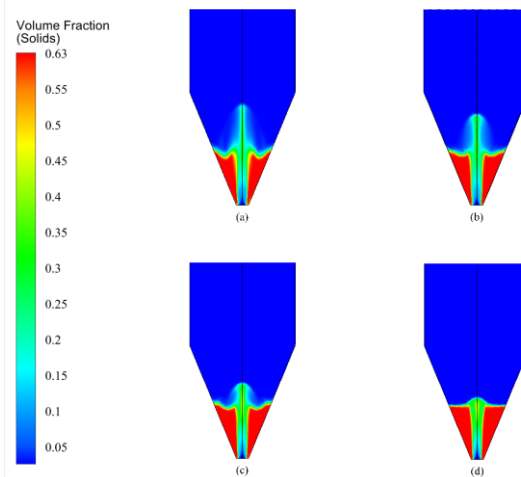
3.3.1 Stabilitas Spouting Dan Ambang Ums

Kontur fraksi volume fase padat pada konfigurasi sudut 30° untuk keempat tingkat *incoming flow* disajikan pada Gambar 9. Keempat variasi kecepatan secara konsisten mempertahankan struktur tiga zona hidrodinamika yang stabil. Kecepatan acuan 38,6 m/s menghasilkan momentum gas yang mendorong kanal *spout* menembus paling tinggi disertai ekspansi unggun maksimal. Seiring penurunan kecepatan menuju 35 m/s dan 30 m/s, daya penetrasi *spout* berangsur melemah yang ditandai menurunnya elevasi puncak *fountain* dan menebalnya kembali tumpukan padat di zona annulus. Pada kecepatan terendah 25 m/s, kanal *spout* tampak paling pendek, namun semburan tetap berhasil menembus permukaan unggun. Kondisi ini mengindikasikan bahwa rezim *spouting* pada sudut 30° masih terjaga hingga 25 m/s, sehingga Ums bernilai sama dengan atau lebih rendah dari 25 m/s.



Gambar 9. Kontur Fraksi Volume Fase Padat Pada Sudut *Cone* 30° Dengan Variasi *Incoming Flow*: (a) 38,6 m/s, (b) 35 m/s, (c) 30 m/s, dan (d) 25 m/s

Pada sudut 35° , rezim *spouting* terbukti stabil hingga kecepatan 30 m/s, ditandai kanal *spout* yang konsisten menembus permukaan unggun dan membentuk kubah *fountain*. Namun, penurunan kecepatan hingga 25 m/s memperlihatkan kondisi transisi, di mana puncak *fountain* nyaris kolaps dan permukaan unggun cenderung merata, sehingga Ums pada sudut 35° berada di sekitar 25 m/s. Selanjutnya pada sudut 40° , rezim *spouting* hanya terjaga stabil hingga 35 m/s. Pada 30 m/s struktur semburan mulai menunjukkan ketidakstabilan berupa kubah *fountain* yang asimetris dan meliuk (*wavy*), sedangkan penurunan menuju 25 m/s mengakibatkan kegagalan semburan (*choking*), yaitu *spout* tidak lagi mampu menembus tumpukan secara penuh sehingga permukaan padatan cenderung merata dan *fountain* praktis tidak terbentuk. Dengan demikian Ums pada sudut 40° meningkat ke kisaran 25–30 m/s.

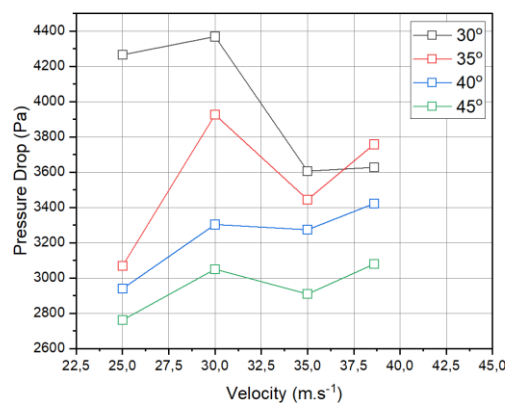


Gambar 10. Kontur Fraksi Volume Fase Padat Pada Sudut *Cone* 45° Dengan Variasi *Incoming Flow*: (a) 38,6 m/s, (b) 35 m/s, (c) 30 m/s, dan (d) 25 m/s

Berdasarkan Gambar 10, degradasi intensitas *spouting* pada sudut 45° teramati secara progresif dan jauh lebih tajam dibandingkan konfigurasi sudut yang lebih kecil. Pada kecepatan 38,6 m/s, saluran *spout* masih menembus unggun secara penuh dan menghasilkan *fountain* dengan ekspansi yang jelas. Penurunan kecepatan menjadi 35 m/s dan 30 m/s secara berturut-turut mereduksi ketinggian *fountain* serta mempersempit lebar zona semburan, yang mengindikasikan menurunnya surplus energi kinetik gas setelah dikonsumsi untuk melawan hambatan tumpukan partikel. Adapun pada 25 m/s, penetrasi *spout* nyaris tidak mampu menembus permukaan unggun dan *fountain* praktis lenyap, sehingga Ums untuk sudut 45° berada di atas 30 m/s. Temuan ini menegaskan konsistensi tren bahwa pelebaran sudut konis mempersempit rentang operasional reaktor.

3.3.2 Penurunan Tekanan (*Pressure Drop*)

Nilai penurunan tekanan pada berbagai tingkat *incoming flow* merepresentasikan peta konsumsi energi operasional reaktor di sepanjang rentang kerjanya, yang pada akhirnya menentukan spesifikasi dan beban kerja kompresor pada implementasi proses pelapisan. Hasil komparasi untuk keempat sudut *cone* disajikan pada Gambar 11.



Gambar 11. Penurunan Tekanan Terhadap Variasi *Incoming Flow* Pada Seluruh Konfigurasi Sudut *Cone*

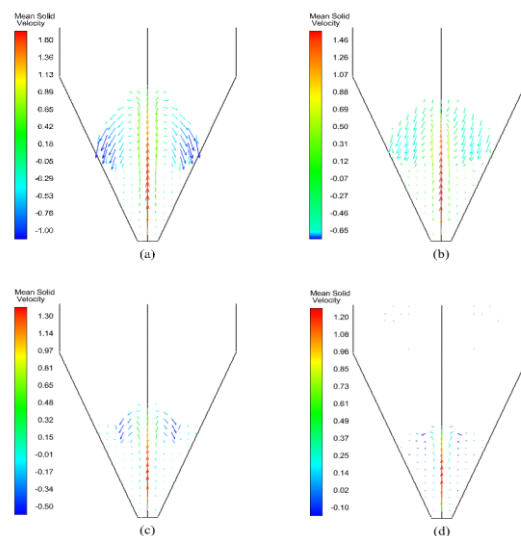
Berdasarkan Gambar 11, penurunan tekanan pada seluruh konfigurasi sudut menunjukkan perilaku non-monoton terhadap kecepatan masuk. Nilai ΔP meningkat menuju puncak lokal pada kecepatan 30 m/s — tertinggi tercatat pada sudut 30° sebesar ± 4.370 Pa — kemudian menurun menuju lembah pada 35 m/s, dan kembali naik secara moderat pada 38,6 m/s. Perilaku ini konsisten dengan karakteristik kurva tekanan *spouted bed* klasik [13]: pada kecepatan rendah hingga menengah, sistem beroperasi di sekitar zona transisi menuju *spouting* penuh, di mana kanal *spout* belum sepenuhnya terbuka sehingga proporsi bobot unggun yang lebih besar harus ditopang langsung oleh aliran gas dan nilai hambatan mendekati tekanan puncaknya. Setelah *spouting* stabil terbentuk pada kecepatan yang lebih tinggi, kanal *spout* yang telah terbuka penuh menjadi jalur berhambatan rendah sehingga ΔP turun ke tingkat operasionalnya; kenaikan tipis pada 38,6 m/s selanjutnya merefleksikan bertambahnya kontribusi hambatan gesek seiring meningkatnya laju alir gas.

Hierarki antar geometri terjaga konsisten pada seluruh rentang kecepatan, yaitu penurunan tekanan tertinggi pada sudut 30° dan terendah pada sudut 45° dengan selisih rata-rata sekitar 600–900 Pa. Temuan ini memperkuat hasil analisis pada Subbab 3.2.2 bahwa penyempitan sudut konis memperbesar hambatan aliran total, sekaligus menunjukkan bahwa tren tersebut bersifat *robust* terhadap perubahan kecepatan operasional. Dikombinasikan dengan hasil analisis stabilitas, terlihat adanya kompromi desain yang jelas: sudut kecil menawarkan rentang operasional yang lebar dengan Ums rendah namun menuntut konsumsi energi tertinggi, sementara sudut besar hemat energi per satuan laju alir tetapi rentan kehilangan stabilitas *spouting* pada kecepatan rendah.

3.3.3 Profil Kecepatan Fase Padat

Evaluasi kinematika fase padat dilakukan untuk mengungkap mekanisme fisis yang mendasari degradasi stabilitas tersebut, mengingat keseragaman ketebalan deposit hanya dapat tercapai apabila setiap partikel memperoleh frekuensi paparan yang setara terhadap zona deposisi melalui siklus *spout–fountain–annulus* yang berulang secara konsisten. Pada konfigurasi sudut 30°, keempat tingkat kecepatan masuk tetap mempertahankan loop resirkulasi partikel yang utuh, meskipun intensitas sirkulasi melemah secara progresif. Kecepatan maksimum fase padat pada sumbu *spout* menurun dari 1,76 m/s pada 38,6 m/s menjadi 1,72 m/s; 1,53 m/s; dan 1,42 m/s pada 25 m/s. Degradasi yang lebih tajam justru teramati pada kecepatan jatuhnya partikel di zona annulus, yang magnitudo maksimumnya menyusut dari 1,02 m/s menjadi hanya 0,31 m/s. Hal ini mengindikasikan bahwa reduksi pasokan energi paling berdampak pada lebar jangkauan lontaran *fountain* dan laju pengembalian partikel ke dasar unggun, bukan pada eksistensi kanal *spout* itu sendiri.

Pola degradasi berubah menjadi bersifat struktural pada sudut yang lebih lebar. Pada sudut 35°, loop resirkulasi masih utuh pada 38,6 m/s dan 35 m/s (kecepatan maksimum 1,80 m/s dan 1,71 m/s), mulai terdegradasi pada 30 m/s (1,51 m/s dengan jatuhnya annulus terpangkas menjadi 0,45 m/s), dan mengalami disintegrasi pada 25 m/s, di mana *fountain* tidak lagi terbentuk dan akselerasi partikel hanya tersisa sebagai segmen pendek di sumbu bagian bawah unggun. Pada sudut 40°, sirkulasi runtuh sepenuhnya pada 25 m/s dengan magnitudo gerak turun partikel di annulus hanya 0,09 m/s, nilai yang secara praktis menandakan unggun telah berhenti bersirkulasi dan berperilaku sebagai tumpukan diam yang hanya ditembus rembesan gas.



Gambar 12. Vektor Kecepatan Fase Padat Pada Sudut *Cone* 45° Dengan Variasi *Incoming Flow*: (a) 38,6 m/s, (b) 35 m/s, (c) 30 m/s, dan (d) 25 m/s

Konfigurasi sudut 45° pada Gambar 12 merepresentasikan kasus batas dari keseluruhan matriks variasi. Bahkan pada kecepatan tertinggi 38,6 m/s, payung *fountain* yang terbentuk teramati lebih rendah dan lebih datar dibandingkan konfigurasi sudut yang lebih kecil pada kecepatan setara. Penurunan menjadi 35 m/s memangkas kecepatan maksimum fase padat menjadi 1,46 m/s dengan magnitudo jatuhan 0,65 m/s. Degradasi berlanjut tajam pada 30 m/s, di mana sirkulasi menyusut menjadi struktur kerdil yang terbenam di tengah unggun, hingga akhirnya pada 25 m/s pola sirkulasi runtuh total dengan gerak turun partikel di annulus yang nyaris lenyap pada 0,10 m/s dan area atas unggun praktis kosong dari aktivitas vektor.

4. Kesimpulan

Simulasi CFD berbasis Eulerian Two-Fluid Model pada reaktor spouted bed konis hasil scale-up berkapasitas ± 1.826 gram partikel TRISO telah dilakukan dan divalidasi terhadap data eksperimental dengan deviasi penurunan tekanan sebesar 2,71%, sehingga model dinyatakan mampu merepresentasikan fenomena hidrodinamika aktual. Berdasarkan hasil analisis, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Variasi sudut cone berpengaruh signifikan terhadap stabilitas sirkulasi partikel. Pelebaran sudut konis dari 30° menuju 45° memperbesar ekspansi lateral aliran sehingga mempercepat disipasi momentum aksial, yang berdampak pada penyusutan fountain dan meningkatnya risiko pembentukan dead zone di dasar kerucut. Ditinjau dari penurunan tekanan, sudut 45° menghasilkan hambatan aliran terendah (3.078 Pa) karena sebagian beban statis unggun ditopang oleh dinding konis yang landai, sedangkan sudut 35° menuntut ΔP tertinggi (3.758 Pa).
2. Ambang kecepatan minimum spouting bergeser secara monoton seiring pelebaran sudut konis, yaitu $U_{ms} \leq 25$ m/s pada sudut 30° , sekitar 25 m/s pada sudut 35° , 25–30 m/s pada sudut 40° , dan di atas 30 m/s pada sudut 45° . Untuk menjamin sirkulasi yang kontinu tanpa choking pada seluruh konfigurasi geometri yang diuji, kecepatan operasional harus dipertahankan di atas 30 m/s, dengan kecepatan acuan 38,6 m/s terbukti memberikan margin keamanan yang memadai.
3. Berdasarkan sintesis ketiga parameter, yaitu stabilitas sirkulasi, minimalisasi dead zone, dan efisiensi energi, konfigurasi sudut cone 30° direkomendasikan sebagai geometri scale-up paling optimal. Meskipun menuntut penalti konsumsi energi yang lebih tinggi, keandalan sirkulasi partikel merupakan prasyarat mutlak bagi keseragaman pelapisan TRISO, sehingga penalti tersebut terkompensasi oleh kualitas produk dan keamanan operasional yang jauh lebih terjamin.

5. Daftar Pustaka

- [1] P. A. Demkowicz, B. Liu, and J. D. Hunn, "Coated particle fuel: Historical perspectives and current progress," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 515, pp. 434–450, 2019, doi: 10.1016/j.jnucmat.2018.09.044.
- [2] K. Verfondern, H. Nabielek, and J. M. Kendall, "Coated particle fuel for high temperature gas cooled reactors," *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 39, no. 5, pp. 603–616, 2007, doi: 10.5516/NET.2007.39.5.603.
- [3] M. Liu, Y. Shao, and B. Liu, "Pressure analysis in the fabrication process of TRISO UO₂-coated fuel particle," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 250, pp. 277–283, 2012, doi: 10.1016/j.nucengdes.2012.05.020.
- [4] K. B. Mathur and N. Epstein, *Spouted Beds*. New York, NY, USA: Academic Press, 1974.
- [5] D. W. Marshall, "Spouted bed design considerations for coated nuclear fuel particles," *Powder Technology*, vol. 316, pp. 421–425, 2017.
- [6] M. Olazar, M. J. San José, A. T. Aguayo, J. M. Arandes, and J. Bilbao, "Stable operation conditions for gas-solid contact regimes in conical spouted beds," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 31, no. 7, pp. 1784–1792, 1992, doi: 10.1021/ie00007a025.
- [7] C. Moliner, Z. Wang, M. Curti, and E. Arato, "Spouted bed reactors: Trends, gaps and possible pathways for scale-up," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 221, pp. 577–587, 2025, doi: 10.1016/j.cherd.2025.08.036.
- [8] N. Setarehshenas, S. H. Hosseini, M. N. Esfahany, and G. Ahmadi, "Three-dimensional CFD study of conical spouted beds containing heavy particles: Design parameters," *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 34, no. 5, pp. 1541–1553, 2017, doi: 10.1007/s11814-017-0024-2.
- [9] M. J. San José, M. Olazar, S. Alvarez, and J. Bilbao, "Local bed voidage in conical spouted beds," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 37, no. 6, pp. 2553–2558, 1998, doi: 10.1021/ie9707681.
- [10] D. Gidaspow, *Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Descriptions*. San Diego, CA, USA: Academic Press, 1994.
- [11] S. Golshan, R. Sotudeh-Gharebagh, R. Zarghami, N. Mostoufi, B. Blais, and J. A. M. Kuipers, "Review and implementation of CFD-DEM applied to chemical process systems," *Chemical Engineering Science*, vol. 221, p. 115646, 2020, doi: 10.1016/j.ces.2020.115646.

- [12] C. Moliner, F. Marchelli, N. Spanachi, A. Martinez-Felipe, B. Bosio, and E. Arato, "CFD simulation of a spouted bed: Comparison between the Discrete Element Method (DEM) and the Two Fluid Model (TFM)," *Chemical Engineering Journal*, vol. 377, p. 120466, 2019.
- [13] M. Olazar, M. J. San José, A. T. Aguayo, J. M. Arandes, and J. Bilbao, "Pressure drop in conical spouted beds," *The Chemical Engineering Journal*, vol. 51, no. 1, pp. 53–60, 1993, doi: 10.1016/0300-9467(93)80008-C.
- [14] S. H. Hosseini et al., "Estimation of the minimum spouting velocity in shallow spouted beds by intelligent approaches: Study of fine and coarse particles," *Powder Technology*, vol. 354, pp. 456–465, 2019, doi: 10.1016/j.powtec.2019.06.025.
- [15] F. Marchelli, Q. Hou, B. Bosio, E. Arato, and A. Yu, "Comparison of different drag models in CFD-DEM simulations of spouted beds," *Powder Technology*, vol. 360, pp. 1253–1270, 2020.
- [16] X. Gao, C. Wu, Y.-W. Cheng, L.-J. Wang, and X. Li, "Experimental and numerical investigation of solid behavior in a gas–solid turbulent fluidized bed," *Powder Technology*, vol. 228, pp. 1–13, 2012, doi: 10.1016/j.powtec.2012.04.025.
- [17] S. Sari, G. Kulah, and M. Koksall, "Characterization of gas–solid flow in conical spouted beds operating with heavy particles," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 40, pp. 132–139, 2012.
- [18] S. Şentürk Lüle, U. Colak, M. Koksall, and G. Kulah, "CFD simulations of hydrodynamics of conical spouted bed nuclear fuel coaters," *Chemical Vapor Deposition*, vol. 21, no. 4–6, pp. 122–132, 2015, doi: 10.1002/cvde.201407150.