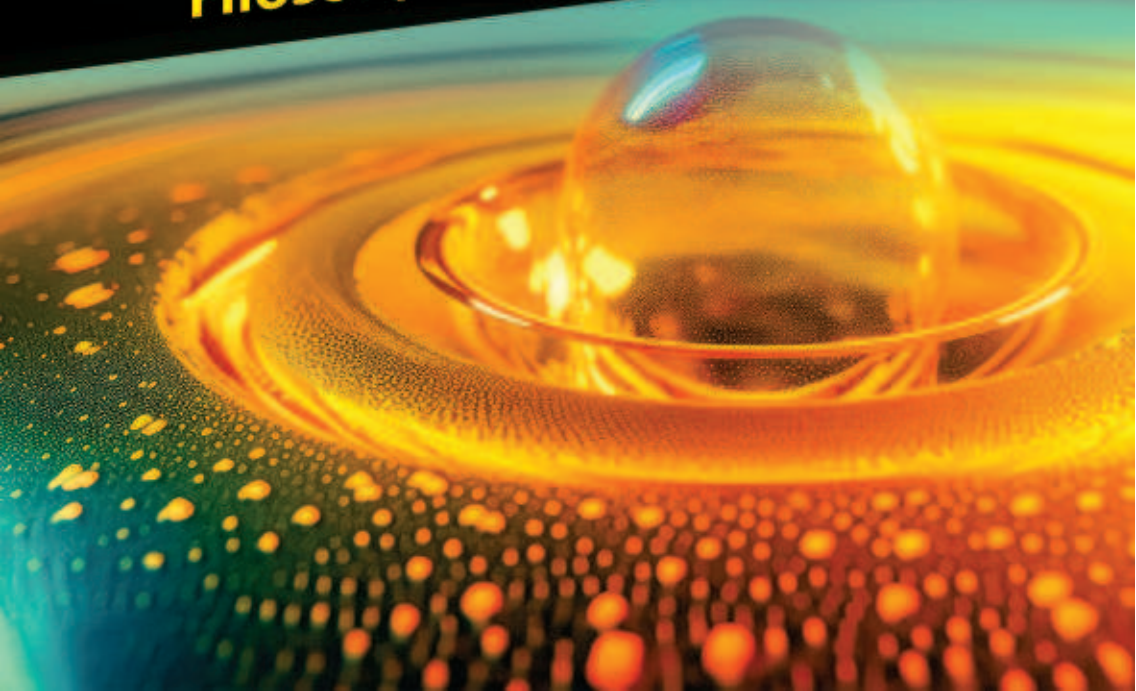


I Nyoman Suprpta Winaya



TEKNIK FLUIDISASI

Filosofi, Teori dan Aplikasi



TEKNIK FLUIDISASI

Filosofi, Teori dan Aplikasi

Empat (4) Bab dari buku ini dapat disarikan sebagai berikut:

Bab 1: Filosofi dan Teori Resim Fluidisasi. Bab pembuka ini mendalami inti dari teknik fluidisasi dengan mengeksplorasi filosofi dasar yang mendasarinya serta teori-teori utama yang mendukung konsep resim fluidisasi. Pembaca akan diperkenalkan dengan sejarah dan pemikiran yang melandasi pengembangan teknik ini, serta dasar-dasar teori yang menjelaskan bagaimana partikel padat berinteraksi dengan fluida dan mengapa fenomena fluidisasi terjadi.

Bab 2: Karakteristik Partikel Padat. Mengerti sifat dan karakteristik partikel padat adalah kunci untuk memahami teknik fluidisasi. Bab ini mengeksplorasi berbagai tipe partikel, ukuran, bentuk, dan sifat fisik-kimianya yang mempengaruhi proses fluidisasi. Analisis mendalam akan memberikan pembaca pemahaman yang jelas tentang bagaimana partikel-padat berperilaku dalam berbagai kondisi fluidisasi.

Bab 3: Perpindahan Panas Hamparan Fluidisasi. Salah satu aspek penting dalam teknik fluidisasi adalah bagaimana panas ditransfer antara partikel dan fluida. Bab ini menyediakan penjelasan komprehensif mengenai mekanisme perpindahan panas dalam hamparan fluidisasi, termasuk faktor-faktor yang mempengaruhinya dan bagaimana hal itu mempengaruhi efisiensi dan kinerja sistem.

Bab 4: Rancangan Reaktor Fluidisasi: Pada bab ini, fokus beralih ke aspek praktis dari teknik fluidisasi: bagaimana mendesain reaktor fluidisasi yang efisien dan efektif. Mulai dari pemilihan material, dimensi reaktor, hingga komponen-komponen utamanya, pembaca akan diperkenalkan dengan dasar-dasar perhitungan yang esensial untuk merancang dan mengoptimalkan reaktor fluidisasi.

Buku "Teknik Fluidisasi: Teori, Filosofi, dan Aplikasi" dirancang untuk menjadi sumber informasi yang mendalam bagi siapa saja yang tertarik dengan teknik fluidisasi, baik dari perspektif teoritis akademis maupun praktis di industri. Dengan pendekatan holistik dan penjelasan yang rinci, buku ini bertujuan untuk memandu pembaca melalui aspek-aspek kunci dari teknik fluidisasi, dari teori dasar hingga aplikasi praktis dalam desain reaktor.



☎ 0858 5343 1992
✉ eurekaediaaksara@gmail.com
📍 Jl. Banjaran RT.20 RW.10
Bojongsari - Purbalingga 53362



TEKNIK FLUIDISASI: FILOSOFI, TEORI DAN APLIKASI

I Nyoman Suprapta Winaya



eureka
media aksara

PENERBIT CV.EUREKA MEDIA AKSARA

TEKNIK FLUIDISASI : FILOSOFI, TEORI DAN APLIKASI

Penulis : I Nyoman Suprapta Winaya

Desain Sampul : Eri Setiawan

Tata Letak : Tukaryanto

ISBN : 978-623-151-429-5

Diterbitkan oleh : **EUREKA MEDIA AKSARA, AGUSTUS 2023**
ANGGOTA IKAPI JAWA TENGAH
NO. 225/JTE/2021

Redaksi:

Jalan Banjaran, Desa Banjaran RT 20 RW 10 Kecamatan Bojongsari
Kabupaten Purbalingga Telp. 0858-5343-1992

Surel : eurekaediaaksara@gmail.com

Cetakan Pertama : 2023

All right reserved

Hak Cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun dan dengan cara apapun, termasuk memfotokopi, merekam, atau dengan teknik perekaman lainnya tanpa seizin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadapan Tuhan Hyang Maha Kuasa karena atas rahmatNya buku yang berjudul “ Teknik Fluidisasi: Filsopi, Teori dan Aplikasi” ini telah terselesaikan sebagai salah satu referensi dalam pengembangan teknologi hamparan (*fluidized bed*).

Ada tantangan khusus dalam menuliskan judul buku ini terutama dalam menterjemahkan *fluidized bed technology* dalam bahasa Indonesia karena ada beberapa ungkapan yang sudah beredar. Akhirnya penulis menyederhanakan frase “teknik hamparan terfluidisasi” menjadi “teknik fluidisasi” agar lebih sederhana dan secara arfiah artinya tidak berubah.

Teknik fluidisasi, meskipun bukan konsep baru, akan tetapi terus mendapatkan momentum dalam berbagai bidang inovasi teknik. Dari industri farmasi hingga produksi energi, teknologi ini telah merevolusi cara kita mendesain proses dan peralatan. Namun, dengan semua perkembangannya, ada kebutuhan mendesak untuk sebuah sumber daya yang mengintegrasikan prinsip dasar dengan aplikasi praktis yang relevan.

Dalam "Teknik Fluidisasi: Filosopi, Teori dan Aplikasi" ini telah diusahakan untuk menyajikan suatu bacaan komprehensif yang mendalam, mulai dari konsep dan filosofi hingga ke dasar-dasar rancangan reaktor sistem fluidisasi. Setiap bab dirancang untuk memberikan pembaca pemahaman yang kuat tentang prinsip dasar, disertai dengan studi kasus dan contoh aplikasi dan perhitungan dari sumber-sumber referensi terkait untuk memperkaya pemahaman.

Buku ini dipersiapkan terutama untuk mahasiswa yang sedang mempelajari mata kuliah Teknik Fluidisasi, karena sepanjang pengalaman penulis mengajar mata kuliah ini ada banyak mahasiswa yang mengeluh kurangnya bacaan dalam bahasa Indonesia. Hal yang sama juga penulis temui ketika menjadi konsultan di industri pembangkit listrik.

Buku ini terdiri dari empat bagian, bab pertama berisi filosofi dan teori terkait resim fluidisasi, bab kedua mengenai karakteristik partikel padat, bab ketiga mengenai perpindahan panas hamparan

fluidisasi dan bab keempat tentang rancangan reaktor yang memuat dasar-dasar perhitungan penting dari komponen-komponen utama reaktor fluidisasi.

Penulisan buku ini diawali sejak tahun 2003 dalam bentuk diktat yang sederhana, kemudian dilakukan perbaikan maupun penyempurnaan berkali-kali sehingga terbentuklah buku ini.

Tujuan saya adalah agar buku ini tidak hanya dijadikan sebagai referensi akademis, tapi juga sebagai kompas bagi para insinyur, peneliti, dan praktisi terkait yang bekerja langsung di lapangan. Dengan pemahaman yang solid tentang teori dan bagaimana mengaplikasikannya, saya berharap para kolega akan lebih siap untuk menerapkan teknik fluidisasi dalam desain dan inovasi.

Penulis mengucapkan terimakasih kepada berbagai pihak yang telah membantu sehingga dapat diterbitkannya buku ini. Kepada grup riset NRCE terutama tim “fluidized bed medical waste” (Aan, Wahyu, Saky, Pasek dan yang lain), kepada Abhijana Prayatha Wistara (ananda sulung) yang berkontribusi merapikan skrip, serta Mamay dan Inces Icca yang selalu setia menunggu sampai larut malam.

Kepada pembaca yang memilih buku ini sebagai sumber belajar, semoga mendapatkan wawasan dan inspirasi yang diperlukan untuk menghadapi tantangan teknik di masa depan dengan pemahaman yang lebih mendalam tentang potensi luar biasa dari teknik *fluidized bed*. Penulis memahami bahwa buku ini jauh dari sempurna, oleh karena itu segala masukan baik berupa saran maupun kritik yang membangun sangat diharapkan.

Selamat belajar dan semoga sukses

Denpasar, Agustus 2023
Penulis

DAFTAR ISI

| | |
|---|------------|
| KATA PENGANTAR | iii |
| DAFTAR ISI | v |
| BAB 1 FILOSOFI FUNDAMENTAL FLUIDISASI | 1 |
| A. Prinsip-Prinsip Fluidisasi | 1 |
| B. Jenis-Jenis Fluidisasi | 2 |
| C. Penurunan Tekanan Sepanjang Hampanan Tetap | 4 |
| D. Proses Fluidisasi: Tahapan dan Karakteristik | 5 |
| E. Aplikasi Teknik Fluidisasi..... | 11 |
| F. Aplikasi Teknik Fluidisasi dalam Pembakaran (<i>Combustion</i>)..... | 13 |
| BAB 2 KARAKTERISTIK PARTIKEL PADAT | 14 |
| A. Sifat Fisik Partikel Padat..... | 14 |
| B. Klasifikasi Partikel Berdasarkan Karakteristik Fluidisasi..... | 19 |
| C. Gaya-Gaya yang Bekerja pada Fluidisasi | 23 |
| D. Klasifikasi Partikel Padat | 26 |
| E. Gelembung (<i>Bubble</i>) dalam Fluidisasi | 28 |
| BAB 3 PERPINDAHAN PANAS HAMPARAN FLUIDISASI .. | 33 |
| A. Jenis Perpindahan Panas | 33 |
| B. Perpindahan Panas dalam <i>Bed Partikel</i> | 38 |
| C. Estimasi Koefisien Perpindahan Panas Bed-to-surface | 54 |
| D. Transfer Panas pada Komponen Lainnya..... | 60 |
| BAB 4 RANCANGAN REAKTOR HAMPARAN FLUIDISASI | 62 |
| A. Reaktor/Kolom | 62 |
| B. Blower | 65 |
| C. Dimensi Bed dan Kecepatan Fluidisasi..... | 66 |
| D. Tinggi Transport Pemisahan (<i>Transport Disengaging Height, TDH</i>)..... | 72 |
| E. Distributor | 74 |
| F. Pengkondisian temperatur hampanan fluidisasi..... | 78 |

| | |
|--|------------|
| G. Ukuran Optimum Reaktor Hampan Fluidisasi..... | 97 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | 99 |
| TENTANG PENULIS..... | 102 |

BAB 1

FILOSOFI FUNDAMENTAL FLUIDISASI

A. Prinsip-Prinsip Fluidisasi

Fluidisasi dapat didefinisikan sebagai proses transformasi butiran partikel padat menjadi bentuk yang memiliki karakteristik seperti fluida saat berinteraksi dengan gas atau cairan. Selama berada dalam kondisi fluidisasi, gaya gravitasi yang bekerja pada partikel-partikel hamparan padat ini akan dinetralkan oleh gaya geser yang dihasilkan oleh interaksi antara fluida dan partikel tersebut. Hamparan fluidisasi atau *fluidized bed* merujuk pada sebuah kondisi di mana partikel padat, seperti pasir atau bubuk lainnya, diperlakukan atau "dijadikan seperti fluida" oleh aliran fluida gas (seperti udara) atau cairan yang mengalir melalui partikel tersebut. Ketika kecepatan gas mencapai titik tertentu, tekanan yang dihasilkan oleh gas mampu menahan beban partikel, membuat partikel bergerak bebas dan menciptakan karakteristik yang mirip dengan fluida cair. Dalam kondisi ini, partikel-padat tersebut berperilaku seperti fluida dan memungkinkan pencampuran homogen serta perpindahan panas dan massa yang efisien. Hamparan fluidisasi sering digunakan dalam berbagai proses industri, seperti pembakaran, gasifikasi, dan proses kimia lainnya.

Sejarah teknologi fluidisasi bermula pada 16 Desember 1921, ketika Fritz Winkler di Jerman melakukan percobaan dengan membiarkan gas hasil pembakaran mengalir ke bawah sebuah wadah yang berisi partikel-partikel batu arang. Pengalaman ini membuka lembaran baru dalam teknologi

BAB 2 | KARAKTERISTIK PARTIKEL PADAT

A. Sifat Fisik Partikel Padat

Dalam konsep fluidisasi, perangkat atau alat yang digunakan biasanya mencakup hamparan partikel padat yang memiliki variasi ukuran dan bentuk. Partikel padat bersifat kaku (*rigid*) dan memiliki bentuk yang kokoh. Bentuk bola adalah pilihan terukur dari definisi sebuah partikel, karena memberikan luasan yang pasti untuk volume tertentu dan dapat didefinisikan hanya dengan satu nilai, yaitu diameter. Sebagian besar partikel alami tidak berbentuk bola. Oleh karena itu, benda-benda alami dicirikan oleh tingkat penyimpangannya dari bentuk bola, faktor kebulatan, “sferisitas” (*sphericity*) dan diameter yang setara.

Dalam praktiknya, diameter efektif hamparan dapat ditentukan melalui analisis *mesh*, sebuah teknik yang memisahkan partikel hamparan ke dalam berbagai ukuran berbeda. Diameter rata-rata ini kemudian dapat dikalkulasi berdasarkan analisis *mesh*, dengan fokus pada rata-rata luasan permukaan partikel yang dihasilkan. Volume permukaan partikel padat (V_s) dapat dihitung sebagai berikut:

$$V_s = \sum \left(n_i \frac{\pi}{6} d_i^3 \right) \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana d adalah diameter rata-rata partikel. Luas permukaan partikel padat (A_s) dapat ditentukan dengan persamaan:

$$A_s = \sum (n_i \pi d_i^2) \dots\dots\dots (2.2)$$

BAB 3

PERPINDAHAN PANAS HAMPARAN FLUIDISASI

A. Jenis Perpindahan Panas

1. Catatan Umum

Perpindahan panas dalam hamparan fluidisasi (*fluidized bed*) adalah proses pertukaran energi termal antara partikel yang terfluidisasi dan fluida yang mengalir melalui hamparan, atau antara partikel dan dinding reaktor. Proses ini dipengaruhi oleh banyak faktor, termasuk sifat fisik partikel dan fluida, kecepatan fluida, dan kondisi operasi lainnya. Ketika membahas fenomena perpindahan panas, tiga jenis utama harus dipertimbangkan, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Semua tiga jenis tersebut memegang peranan penting dalam proses yang berkaitan dengan hamparan partikel. Meskipun relevansi dari tiap jenis bervariasi tergantung konteksnya, umumnya, laju perpindahan panas antara hamparan partikel dengan permukaan yang bersentuhan didominasi oleh karakteristik dan sifat hamparan partikel tersebut. Untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam, akan bermanfaat jika kita melihat kembali hubungan fisik yang mendefinisikan setiap jenis perpindahan panas ini.

2. Konduksi

Konduksi adalah mekanisme perpindahan panas melalui medium padat tanpa adanya perpindahan aktual dari medium tersebut. Dalam konteks hamparan fluidisasi, konduksi terjadi antara partikel-partikel yang saling

BAB 4

RANCANGAN REAKTOR HAMPARAN FLUIDISASI

Reaktor hamparan fluidisasi (*fluidized bed*) adalah sebuah sistem reaktor kompleks yang memerlukan berbagai komponen dan parameter penting untuk operasi yang optimal. Dalam prakteknya, desain reaktor memerlukan iterasi dan modifikasi berdasarkan hasil perhitungan, eksperimen, dan pertimbangan operasional. Berikut adalah beberapa parameter utama yang biasanya diperlukan:

A. Reaktor/Kolom

Reaktor merupakan tempat utama di mana fluidisasi partikel terjadi yang biasanya berbentuk silinder vertikal atau persegi empat. Fungsi dari reaktor hamparan fluidisasi adalah tempat terjadinya:

1. Efisiensi Penukar Panas Tinggi: Hamparan fluidisasi menyediakan kontak yang sangat baik antara fasa padat dan fluida, yang mengarah pada perpindahan panas yang efisien.
2. Reaksi Heterogen: Banyak proses industri yang melibatkan reaksi antara gas dan padatan dilakukan dalam hamparan fluidisasi karena kontak yang baik antara fasa.
3. Daur Ulang Partikel: Dalam beberapa aplikasi, partikel reaktan diinjeksikan ke dalam bed, bereaksi, dan kemudian diambil kembali untuk regenerasi atau daur ulang.
4. Pengeringan: Hamparan fluidisasi sering digunakan untuk mengeringkan padatan, mengingat perpindahan panas dan massa yang sangat baik.

DAFTAR PUSTAKA

1. P. Basu. *Circulating Fluidized Bed Boilers, Design, Operation and Maintenance*. Springer (2015).
2. S. Ergun. Fluid Flow Through Packed Bed Columns. *Chemical Engineering Progress*, 48, 89-94 (1952).
3. W.C. Yang. In *Proceedings Pneumotransport 3*, BHRA Fluid Engineering, Bedford, E5-49 (1976).
4. Stewart, P. S. B., & J. F. Davidson. Slug flow in fluidized beds. *Powder Technology*, 1, 61. (1967).
5. J.R. Grace. Fluidized bed hydrodynamics. In: G. Hestroni (ed.), *Handbook of multiphase systems* Washington: Hemisphere (1982).
6. M. Horio & K. Morishita. Flow regimes of high velocity fluidization. *Japan Journal of Multiphase Flow*, 2(2), 117-136 (1988).
7. J.R. Howard. *Fluidized bed technology : principles and applications*. Taylor & Francis (1989).
8. S. Ergun & A.A Orning. Fluid Flow through Randomly Packed Columns and Fluidized Beds. *Industrial & Engineering Chemistry*, 41(6), 1179-1184. doi:10.1021/ ie50474a011. (1949).
9. D.Geldart. *Gas fluidization technology* (p. 88). Chichester: Wiley (1986).
10. D. Geldart. The effect of particle size and size distribution on the behaviour of gas-fluidized beds. *Powder Technology*, 6, 201-215 (1972).
11. R. D. Toomey and H. F. Johnstone. Gaseous uidization of solid particles. *Chem. Eng.Prog.*, 48(5):220-226, 1952.
12. D. Kunii and O. Levenspiel. *Fluidization Engineering* 2nd Edition. Butterworth-Heinemann seris in Chemical Engineering (1991).

13. J.F. Davidson and Harrison D. Fluidized Particles, 14. Cambridge University (1963)
14. Rowe, P. N., & Partridge, B. A. Gas flow through bubbles in a fluidized bed—I Flow through an ideal bubble. *Chemical Engineering Science*, 18(8), 511–524. doi:10.1016/0009-2509(63)85012-5(1963).
15. G.G. Silva, NP. Jiménez and OB. Salazar *Advanced Fluid Dynamics- Fluid Dynamics of Gas - Solid Fluidized Beds* (2012).
16. P. E. G. Gogolek and J. R. Grace. Fundamental hydrodynamics related to pressurized fluidized bed combustion. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 21(5):419-451 (1995).
17. K. Kato & C.Y. Wen. *Bubble assemblage model for fluidized bed catalytic reactors. Chemical Engineering Science*, 24(8), 1351–1369. doi:10.1016/0009-2509(69)85055-4 (1969).
18. L. Zhang 1, Z. Fu 1, J. Li 1, R. Wang, X. Bi. A review on multi-solids fluidized beds. *Powder Technology*. Vol. 414, 15 <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.118091>(2023).
19. N.A. Decker and L.R. Glicksman. Conduction heat transfer at the surface of bodies immersed in gas fluidized beds of spherical particles. *A.I.Ch.E. Symp. Ser.* 77(208), 341-349 (1981.)
20. J. S. M. Botterill. *Fluid-bed heat transfer*, Academic Press, New York, New York (1975).
21. S. S. Zabrodsky, N. V. Antonishin, A. L. Parnas. On fluidized bed-to-surface heat transfer. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 54 (1-2) 52-54 (1976).
22. A.O.O. Denloye & J.S.M. Botterill, J. S. M. Heat transfer in flowing packed beds. *Chemical Engineering Science*, 32(5), 461–465. doi:10.1016/0009-2509(77)87001-2 (1977)
23. A.P. Baskakov, B.V. Berg, O.K. Vitt, N.F. Filippovsky, V.A. Kirakosyan, J.M. Goldobin, V.K. Maskaev. Heat transfer to objects immersed in fluidized beds. *Powder Technology*. (8) 5–6, 273-282 (1973).

24. V. A. Borodulya, Yu. S. Teplitskii, I. I. Markevich, A. F. Khassan & T. P. Eremenko. Heat transfer between a fluidized bed and the surface. *Journal of engineering physics*, 58, 446–452 (1990).
25. A.P. Kozhan; K.E. Makhorin; S.P. Gorislavets. Electrical resistance of a fluidized bed of graphite particles. *Journal of Engineering Physics*, Volume 15, Issue 4, pp.959-961 (1968).

TENTANG PENULIS



I Nyoman Suprapta Winaya adalah seorang profesor pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik-Universitas Udayana. Winaya menerima gelar Sarjana dari Universitas Udayana tahun 1994, gelar Master dari Dalhousie University Kanada dan gelar Ph.D dari Niigata University Jepang. Penelitian utamanya adalah pada Teknik

Fluidisasi seperti teknik pembakaran/gasifikasi/pirolisis dengan memanfaatkan penggunaan bahan bakar batubara, teknik co-firing pada *circulating fluidized bed* (CFB) boiler, pemakaian sampah/limbah dan biomasa menjadi energi bersih.

Winaya diangkat sebagai Profesor pada tahun 2013 oleh Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Indonesia di bidang sistem Konversi Energi. Saat ini, beliau memimpin sebuah Grup Riset & Proyek Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi (NRCE). Telah ditemukan beberapa inovasi penting diantaranya penangkapan volatil tinggi dari bahan bakar untuk mengurangi dioksin dengan menggunakan partikel padat berpori sebagai bed material. Sebuah metode baru telah dikembangkan untuk mengevaluasi dispersi horisontal dari padatan yang dimuat pada hamparan fluidisasi temperatur tinggi untuk tujuan komersial. Disamping sebagai konsultan di bidang Teknik Fluidisasi dan Energi Terbarukan, ada beberapa mesin termal pemusnah sampah residu dan sampah medis terus dikembangkan untuk ukuran yang lebih besar, di samping juga penelitian-penelitian tentang energi terbarukan.

Prof. Winaya mempunyai keinginan dan komitmen yang besar untuk mentransfer hasil-hasil penelitiannya untuk dapat diterapkan pada dunia industri. Winaya adalah anggota senat Universitas Udayana, Ikatan Ahli Bahan Bakar Indonesia, Asosiasi Teknik Mesin Indonesia, American's Society of Mechanical Engineering dan anggota Japanese's Society of Chemical Engineering