



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Profesor Mubiar Purwasasmita

**TRANSPORT PHENOMENA :
DARI MODEL REAKTOR GAS-CAIR
HINGGA BIOREAKTOR TANAMAN**

24 Februari 2017
Balai Pertemuan Ilmiah ITB

**Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung**
24 Februari 2017

Profesor Mubiar Purwasasmita

**TRANSPORT PHENOMENA :
DARI MODEL REAKTOR GAS-CAIR
HINGGA BIOREAKTOR TANAMAN**



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Hak cipta ada pada penulis

Judul: TRANSPORT PHENOMENA :
DARI MODEL REAKTOR GAS-CAIR HINGGA BIOREAKTOR TANAMAN
Disampaikan pada sidang terbuka Forum Guru Besar ITB,
tanggal 24 Februari 2017.

Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

UNDANG-UNDANG NOMOR 19 TAHUN 2002 TENTANG HAK CIPTA

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama **7 (tujuh) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah)**.
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama **5 (lima) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)**.

Hak Cipta ada pada penulis
Data katalog dalam terbitan

Mubiar Purwasasmita
TRANSPORT PHENOMENA :
DARI MODEL REAKTOR GAS-CAIR HINGGA BIOREAKTOR TANAMAN
Disunting oleh Mubiar Purwasasmita

Bandung: Forum Guru Besar ITB, 2017
vi+54 h., 17,5 x 25 cm
ISBN 978-602-8468-99-2
1. Teknik Kimia 1. Mubiar Purwasasmita

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, yang atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan naskah orasi ilmiah ini. Penghargaan dan rasa hormat serta terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pimpinan dan anggota Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung, atas perkenannya saya menyampaikan orasi ilmiah ini pada Sidang Terbuka Forum Guru Besar. Sebagaimana diamanatkan dalam PP 155/2000, Majelis Guru Besar (MGB) adalah unsur ITB yang berfungsi melakukan pembinaan kehidupan akademik dan integritas moral serta etika dalam lingkungan sivitas akademika ITB.

Judul pidato ilmiah “**Transport Phenomena: Dari Model Reaktor Gas-Cair Hingga Bioreaktor Tanaman**” ini dimaksudkan untuk merekam perjalanan keilmuan seorang dosen dalam meraih keunggulan, dan manfaat ilmu yang menjadi tanggungjawabnya dalam pendidikan, penelitian dan pengabdian kepada masyarakat untuk terus maju, berkembang dan bermanfaat dalam rangka menegakkan integritas moral dan etika professional sivitas akademika Institut Teknologi Bandung dan atas kukuhnya keserjanaan di lingkungan Institut Teknologi Bandung.

Semoga tulisan ini dapat memberikan wawasan, dan inspirasi yang bermanfaat bagi para pembaca.

Bandung, 24 Pebruari 2017

Profesor Mubiar Purwasasmita

DAFTAR ISI

| | |
|--|-----|
| KATA PENGANTAR | iii |
| DAFTAR ISI | v |
| 1. PENDAHULUAN | 1 |
| 2. PENGEMBANGAN MODEL REAKTOR GAS-CAIR | 6 |
| 2.1 Reaktor Gas-Cair dengan Aliran Kecepatan Tinggi | 8 |
| 2.1.1 Hidrodinamika Aliran Gas-Cair Kecepatan Tinggi dalam Unggun Tetap dan Butiran Kecil | 9 |
| 2.1.2 Metode Kimia Pengukuran Koefisien Perpindahan Massa (a dan kLa) | 11 |
| 2.1.3 Pengukuran Koefisien Perpindahan Panas (h) | 13 |
| 2.2 Aneka Model Reaktor Gas-Cair dan Simulasinya | 14 |
| 3. FENOMENA PEMBUSAAN DAN PEMBENTUKAN GELEMBUNG MIKRO | 17 |
| 4. FENOMENA SEDIMENTASI DIPERCEPAT DAN ALIRAN LUMPUR DALAM PIPA SPIRAL | 21 |
| 5. PENGEMBANGAN BIOREAKTOR TANAMAN | 23 |
| 5.1 Hidrodinamika Bioreaktor Tanaman | 25 |
| 5.2 Intensifikasi Proses | 28 |
| 5.3 Meningkatkan Produktivitas Tanaman | 31 |
| 5.4 Integrasi Industri Kimia dan Industri Agro | 35 |
| 6. PENUTUP | 41 |
| 7. UCAPAN TERIMA KASIH | 44 |
| 8. DAFTAR PUSTAKA | 45 |
| CURRICULUM VITAE | 47 |

TRANSPORT PHENOMENA : DARI MODEL REAKTOR GAS-CAIR HINGGA BIOREAKTOR TANAMAN

1. PENDAHULUAN

Terdapat 5 pilar keilmuan Teknik Kimia yang penulis anggap perlu kuasai secara mendasar dan menyeluruh untuk mampu meraih keunggulan dan manfaat dari perubahan dalam suatu proses kimiawi, hayati, maupun sosial. Dalam bahasan ini penulis batasi pada tantangan pemrosesan secara kimiawi atau hayati untuk memajukan dan mensejahterakan peradaban kemanusiaannya.

Pilar pertama adalah termodinamika yang hendaknya diartikan sebagai ilmu untuk menganalisis suatu keadaan dan keterhubungan diantara berbagai keadaan tersebut. Termodinamika mengidentifikasi suatu keadaan secara objektif sesuai dengan fenomenanya dan dengan berbagai tingkatan nilainya. Penamaan termodinamika sendiri adalah salah kaprah yang dipertahankan, karena menyetarakan dengan ilmu hidrodinamika atau aliran fluida yang lebih dahulu dikenal, Ketika mampu mengukur temperatur dengan menggunakan termometer menduga menemukan peristiwa perpindahan panas atau termodinamika, padahal yang dibahas baru keadaan panasnya bukan peristiwa perpindahan panas. Kelarutan gas dalam suatu cairan misalnya adalah besaran termodinamika yang diperlukan dalam bahasan proses sistem gas-cair. Informasi tentang keadaan dapat diberikan untuk bisa

menetapkan suatu proses terjadi atau tidak terjadi, spontan atau tidak spontan kejadiannya. Posisi energetik dan exergetiknya dapat ditentukan dalam kerangka sistem keberlangsungan prosesnya

Pilar kedua adalah analisis kinetika kimia dan katalisa yang harus memberikan pemahaman secara utuh mekanisme keterikatan kimiawi dan arah dari suatu proses perobahan kimiawi yang berlangsung. Koefisien laju reaksi, orde reaksi, dan selektivitas adalah besaran-besaran kinetika kimia (*microkinetics*) yang diperlukan dalam pembahasan proses sistem gas-cair.

Pilar ketiga adalah kinetika fisika atau transport phenomena yang sering dialih bahasakan kedalam Bahasa Indonesia sebagai peristiwa perpindahan atau kinetika makro. Teknik kimia mengenal peristiwa perpindahan gerak, massa dan panas dan tentunya seperti perpindahan elektron dalam bidang elektro. Secara berurutan jumlah gerak (momentum), jumlah panas (kalor) dan jumlah massa (konsentrasi) mengalami perpindahan karena perbedaan kualitas gerak (kecepatan), kualitas panas (temperatur) dan kualitas massa (konsentrasi). Bahasan model reaktor gas-cair akan memerlukan besaran perpindahan gerak (hidrodinamika) seperti rejim aliran, hilang tekan, dan waktu tinggal; besaran perpindahan massa seperti koefisien perpindahan massa dan luas permukaan perpindahan, serta besaran perpindahan panas seperti koefisien perpindahan panas.

Pilar keempat adalah teknik reaktor kimia sebagai tempat yang akan mewadahi peristiwa pemrosesan. Persamaan-persamaan reaktor pada

dasarnya merupakan gabungan besaran-besaran kinetika kimia (*microkinetics*) dan besaran-besaran model reaktor (*macrokinetics*), dan besaran-besaran termodinamika. Wadah memerlukan penetapan ukuran dan bentuk serta material konstruksinya yang tentunya terkait pada besaran-besaran terukur yang dilibatkan dalam perancangannya.

Pilar kelima adalah dinamika proses dan sistem pengendaliannya yang biasanya harus dilakukan secara otomatis. Hal ini perlu dilakukan agar proses berlangsung pada selang harga besaran-besaran dan parameter-parameter yang telah ditentukan agar proses berlangsung sesuai dengan yang diinginkan.

Dengan demikian kelima pilar ini harus dirujuk secara utuh dan menyeluruh dengan keterukuran yang cermat dan seksama. Perbaikan atau pemahaman baru pada satu besaran dari satu pilar sudah akan memberikan peluang perbaikan atau pembaharuan pada keseluruhan kinerja sistem dan efieinsinya. Berarti pilar yang memiliki banyak besaran yang dikelolanya dan mampu meningkatkan pemahaman serta keseksamaannya secara kreatif, maka bidang studi itu benar-benar akan menjadi ladang inovasi bagi pengembangan proses, peralatan dan produk baru.

Penelitian dan penyusunan disertasi doktoral merupakan awal dari penekunan keahlian dan pengembangan kepakaran penulis secara mendalam, konsisten, dan berkelanjutan. Pengembangan model reaktor berunggun tetap dengan butiran katalis berukuran kecil dan beraliran gas-cair searah kebawah dengan kecepatan sangat tinggi dilangsungkan dengan menggunakan cairan organik atau air yang memiliki selang nilai

densitas, viskositas dan tegangan permukaan yang sangat lebar. Kerja akademik ini bukan saja memberikan kemampuan dan keseksamaan riset lanjut yang lengkap namun juga membuka peluang memecahkan permasalahan nyata industri kimia secara inovatif dengan penerapan pemahaman keilmuan yang unggul dan mendasar.

Hasil riset hidrodinamika, perpindahan massa dan panas yang dilakukan dalam pengembangan model reaktor baru ini berhasil memetakan rejim aliran yang terjadi, mengembangkan persamaan semiempirik hilang tekan, *hold up* cairan, luas permukaan kontak dan koefisien perpindahan massa, serta koefisien perpindahan panas. Berhasil diterapkan di industri perminyakan dan petrokimia dalam perancangan alat proses hidro desulfurisasi dan perengkah hidro yang baru untuk pengolahan *crude oil* dunia yang semakin berat dan semakin viskus.

Lebih lanjut hasil dan pengalaman penelitian ini juga berhasil dijadikan materi perkuliahan dan metoda laboratorium yang lengkap dan seksama untuk penguasaan ilmu dan teknik pengembangan aneka model reaktor gas-cair yang mencakup lebih dari 80% proses teknik kimia.

Riset hidrodinamika yang dilakukan penulis pasca-doktoral berhasil mengidentifikasi fenomena pengendapan partikel lumpur yang dipercepat dalam pipa air baku PT Pupuk Kujang di Dawuan Cikampek sehingga mampu memecahkan permasalahan pada pengaliran dan penyediaan air baku untuk suatu pabrik berskala besar dengan teknik yang sangat bisa diandalkan.

Riset hidrodinamika serupa penulis lakukan pada pengembangan

model aliran dalam pipa yang dibentuk spiral untuk memisahkan partikel padatan secara bertahap dari cairannya. Diterapkan untuk pemisahan butiran pasir besi dari butiran padat lainnya.

Riset transport phenomena yang seksama juga penulis lakukan untuk memahami teknik pembentukan gelembung mikro. Gelembung mikro berukuran sekitar 50 mikrometer yang kaku berhasil dibuat secara praktis dengan menggunakan aliran pada pipa yang dilengkapi bentukan venturi. Umpan udara atau oksigen dilakukan melalui lubang mikro pada bagian penyempitan venturi. Kehadiran gelembung mikro udara atau oksigen dalam cairan menjamin ketersediaan udara yang lebih banyak untuk proses oksidasi atau metabolisme dalam cairan tersebut. Tentunya sangat bermanfaat untuk pengembangan proses pengolahan limbah atau proses fermentasi aerobik dalam cairan.

Seiring dengan berkembangnya waktu, aplikasi Teknik Kimia semakin meluas dan beraneka serta bersifat multidisiplin. Riset transport phenomena kemudian penulis terapkan juga pada sistem hayati berupa tanaman. Penulis berhasil mengidentifikasi, mendiskripsikan, bahkan merancang keberadaan bioreaktor tanaman pada skala mikro, yang menjamin tanaman mendapatkan nutrisinya secara mandiri dan berkelanjutan dengan prinsip intensifikasi proses dan *production on demand*. Model matematika hidrodinamika pada bioreaktor tanaman yang dikembangkan bisa menunjukkan bahwa dengan rancangan bioreaktor tanaman yang sangat alami/hayati dapat memaksimumkan masukan aliran fluida ke dalam tanaman yang akan meningkatkan produktivitas

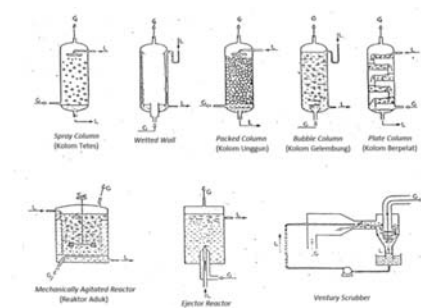
tanaman secara sangat signifikan. Penerapan riset transport phenomena pada sistem hayati tanaman ini akan membuka babak baru teknik pertanian berupa peningkatan produktivitas tanaman tanpa perluasan lahan, dan membuka peluang pengintegrasian secara utuh dari hulu sampai ke hilir industri agro dan kimia yang sangat sinergis pada suatu luasan lahan tertentu, yang pada akhirnya akan menjadi pilihan terbaik untuk merealisasikan pemenuhan kebutuhan pangan dan energi umat manusia yang senantiasa meningkat.

Riset transport phenomena juga sangat diperlukan untuk pengembangan proses hilir seperti penggunaan teknologi membran untuk aneka ragam penerapannya yang sangat prospektif, seperti untuk pemisahan hasil pemrosesan produk agro maupun produk lokal lainnya. Riset transport phenomena seperti ini perlu dilakukan untuk penguatan dasar-dasar penguasaan keunggulan ilmu maupun untuk pengembangan inovasi teknik-teknik penerapannya.

2. PENGEMBANGAN MODEL REAKTOR GAS-CAIR

Tidak kurang dari 80% proses teknik kimia berlangsung dalam reaktor gas-cair, seperti dalam bidang aplikasi industri berikut:

Pencucian gas yang



Gambar 2.1: Berbagai bentuk model reaktor Gas - Cair

bersifat asam seperti CO_2 , H_2S , SO_2 , N_xO_y , SiF_4 , uap-uap organik, terutama dalam rangka mengatasi pencemaran udara; Pembuatan produk murni seperti H_2SO_4 , HNO_3 , BaCO_3 , Asam Adipat, dst.; Proses biologis seperti fermentasi, oksidasi lumpur, oksidasi biologis, dst.: Proses dalam fasa cair seperti oksidasi, hidrogenasi, sulfonasi, nitrasi, halogenasi, alkilasi, polimerisasi, dst. Model reaktor yang digunakan mempunyai bentuk yang berbeda-beda antara lain reaktor berupa kolom dengan gelembung, tetesan, film cairan, butir pengisi, pelat dst.; reaktor berupa bejana aduk secara mekanis; dan reaktor jet atau venturi.

Berbagai bentuk geometri yang berbeda ini disebabkan oleh kompetisi peristiwa berikut: Termodinamika kimia (kelarutan gas, difusivitas reaktif, dst.); Hidrodinamika (pola aliran, hilang tekan); Peristiwa perpindahan massa dan panas pada setiap sisi antar-muka kontak gas-cair (koefisien perpindahan, luas permukaan kontak); dan Kinetika kimia (konstanta kinetika, orde reaksi, dan selektivitas).

Pemilihan reaktor untuk bekerja dalam suatu kondisi hidrodinamika dan energetika yang optimal ditentukan oleh pengetahuan yang lengkap atas berbagai parameter yang mensifatkan fenomena-fenomena diatas. Suatu model matematika diperlukan untuk menetapkan ukuran dan ekstrapolasi yang didasarkan pada teori absorpsi disertai reaksi dibandingkan dengan kenyataan dan sasaran yang diinginkan. Penulis akan mengemukakan penerapan teori absorpsi disertai reaksi untuk menetapkan model reaktor dan teknik pengukuran parameter fisika kimia dan peristiwa perpindahan massa dan panas yang bersangkutan.

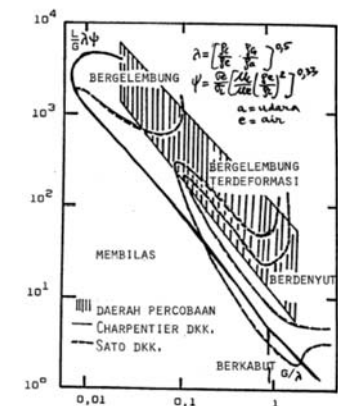
2.1 REAKTOR GAS-CAIR DENGAN ALIRAN KECEPATAN TINGGI

Sebagian besar reaksi gas-cair katalitik dilangsungkan dalam reaktor unggun tetap (*fixed bed*) terutama dalam reaktor yang berfungsi dengan aliran searah ke bawah (*trickle flow*). Pada dasawarsa 1970-1980 penggunaan jenis reaktor ini berkembang sangat cepat terutama dalam proses hidrodesulfurisasi minyak bumi (nafta, kerosin, gasoil dan fraksi berat lainnya), proses hidrocracking gasoil dan residu atmosferik, serta proses hidrogenasi. Dalam industri kimia dasar digunakan untuk proses metanasi, dalam industri petrokimia untuk hidrodealkilasi. Umumnya menggunakan butiran katalis dengan ukuran kecil (1-3mm), laju alir rendah ($L < 4 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $G < 0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), sehingga kondisi operasinya sangat berbeda dengan proses operasi dalam kolom absorpsi yang telah lama dikenal. Kolom absorpsi biasanya menggunakan butir pengisi berbentuk cembung-cekung seperti *Cincin Raschig*, dan cairan yang digunakan berupa air. Sementara pada reaktor gas-cair butiran katalis yang digunakan berukuran kecil dan menggunakan cairan organik, sehingga korelasi yang bersifat umum untuk parameter yang diperlukan menjadi tidak berlaku lagi. Maka perlu dilakukan pengukuran hidrodinamika dan peristiwa perpindahan massa dan panas pada penggunaan berbagai jenis butiran cembung dan berbagai jenis pasangan gas-cair. Dengan kemajuan yang dicapai dalam konsepsi katalisis baik dari segi aktivitas, selektivitas, maupun ketahanan mekaniknya, ditambah dengan inovasi teknologi baru serta peralatan pembantu baru, dimungkinkan menggunakan reaktor untuk reaksi yang sangat

eksotermik dengan menggunakan laju alir fluida gas dan cairan yang jauh lebih tinggi. Penulis melakukan studi dan penelitian yang diperlukan untuk membuka keterangan tentang fungsi hidrodinamik aliran, kinetika fisika perpindahan masa dan panas pada reaktor unggun tetap butiran katalis (bentuk silindrik atau bola) dan berukuran kecil ($d_p : 1,4 \text{ s/d } 3 \text{ mm}$), luas permukaan spesifik ($a : 4170 \text{ s/d } 1905 \text{ m}^2/\text{m}^3$), porositas unggun ($\epsilon : 0,4 \text{ s/d } 0,5$), dengan aliran sangat cepat searah ke bawah ($L : 10 \text{ s/d } 105 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $G : 0,01 \text{ s/d } 5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) terutama dengan cairan organik (densitas $\rho_L : 700 \text{ s/d } 1200 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$, viskositas $\mu_L : 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ s/d } 6,6 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, dan tegangan permukaan $\sigma_L : 25 \cdot 10^{-3} \text{ s/d } 49 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$).

2.1.1 HIDRODINAMIKA ALIRAN GAS-CAIR KECEPATAN TINGGI DALAM UNGGUN TETAP DENGAN BUTIRAN KECIL

Secara hidrodinamika penulis mengamati jenis aliran yang terjadi adalah jenis aliran gelembung terdeformasi sampai aliran berdenyut (pulsasi) seperti dapat ditunjukkan dalam peta aliran yang dikemukakan Charpentier dkk. (1975). Diagram aliran tersebut telah mempertimbangkan sifat fisik fluida (parameter λ dan ψ tetapi belum mempertimbangkan sifat unggun yang digunakan (ϵ , d_p , dst.) sehingga validitasnya masih bersifat relatif. Pengaluran data pada peta aliran tersebut sudah bisa melokalisasi daerah

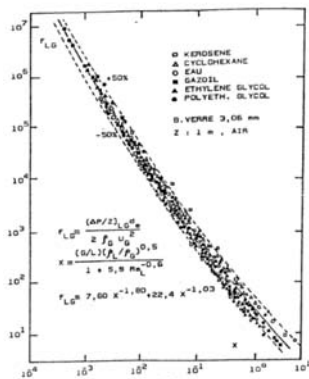


Gambar 2.2: Peta rejim aliran Gas - Cair dalam unggun tetap

transisi antara aliran interaksi lemah (aliran *trickle*) dengan aliran interaksi kuat (aliran berdenyut dan aliran gelembung terdeformasi) pada reaktor yang menggunakan butiran katalis berukuran kecil. Daerah transisi sekunder interaksi kuat antara aliran berdenyut dan gelembung terdeformasi secara visual tidak terlihat jelas karena perubahannya terjadi secara berangsur dan menerus.

Pengamatan hilang tekan menunjukkan bahwa pada kecepatan aliran yang tinggi gaya inersia dan viskositas cairan sangat menentukan. Pengaruh tegangan permukaan dan viskositas gas dapat diabaikan sebagaimana juga dengan pengaruh tinggi tekan.

Penulis dapat menunjukkan korelasi empirik antara bilangan tak berdimensi faktor gesekan $f_{LG} = (\Delta P/Z)_{LG} \cdot d_p / (2\rho_G \cdot u_G^2)$ terhadap bilangan



Gambar 2.3: Korelasi hilang tekan aliran Gas - Cair kecepatan tinggi dalam unggun tetap

Reynolds Cairan $Re_L = (L \cdot d_p) / \mu_L$ dan bilangan perbandingan antara gaya inersia dalam fasa gas terhadap fasa cairan $(\rho_L / \rho_G)(G/L)^2$ sebagai berikut dengan kedekatan +/- 50% :

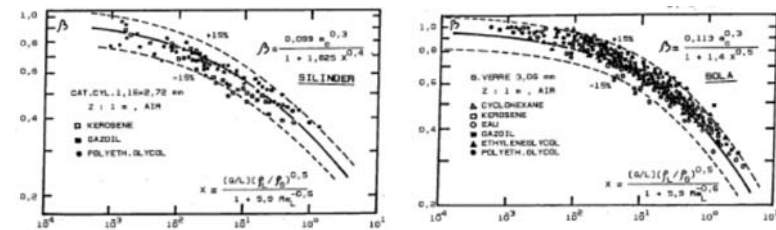
$f_{LG} = 7,60 X^{-1,80} + 22,43 X^{-1,03}$ dengan $X = (\rho_L / \rho_G)(G/L)^2 / (1 + 5,9 Re_L^{-0,9})$ untuk selang harga $5 \cdot 10^{-4} < X < 10$, dan untuk berbagai jenis cairan dan butiran katalis yang digunakan.

Secara semiempirik korelasi yang lebih seksama dapat diperoleh dengan menggunakan variabel yang diturunkan dari neraca energetik.

Dengan cara serupa bagian cairan yang tertahan (*hold up* cairan β_L) dapat dikorelasikan sebagai fungsi X dan besaran luas permukaan spesifik a_c , sehingga korelasi menjadi dimensional dan berbeda menurut butiran unggun yang digunakan, butiran bola atau silinder. Korelasi dapat dikemukakan dengan kedekatan +/- 15% sebagai berikut :

untuk butiran berbentuk bola $\beta_L = 0,113 a_c^{0,3} / (1 + 1,4 X^{0,5})$

untuk butiran berbentuk silindris $\beta_L = 0,099 a_c^{0,3} / (1 + 1,825 X^{0,5})$



Gambar 2.4: Korelasi Hold Up cairan model reaktor Gas - Cair kecepatan tinggi dalam unggun tetap

2.1.2 METODE KIMIA PENGUKURAN KOEFISIEN PERPINDAHAN MASSA (a DAN $k_L a$)

Luas permukaan kontak Gas-Cair (a) dan koefisien perpindahan massa volumik gas-cair sisi cairan ($k_L a$) diukur dengan menggunakan metoda kimia yang didasari oleh teori absorpsi disertai reaksi, yaitu sistem absorpsi gas CO_2 dalam larutan amina (MEA atau DEA) dengan pelarut air atau cairan organik, dan sistem oksidasi larutan sulfid yang dikatalisa oleh ion cobalt. Untuk menentukan koefisien perpindahan $k_L a$ oksidasi larutan sulfid dilangsungkan pada rejim reaksi lambat dengan kondisi eksperimental $[sulfid] = 0,2 \text{ kmol/m}^3$ dan $[Co^{++}] = 10^{-6} \text{ kmol/m}^3$, sementara untuk menentukan luas permukaan a oksidasi larutan sulfid

dilangsungkan pada rejim reaksi cepat dengan kondisi eksperimental [sulfit] = 0,8 kmol/m³ dan [Co⁺⁺] = 3,56.10⁻⁴ kmol/m³. Kedua kondisi eksperimental diatas dijaga pada kondisi tetap temperatur 25°C dan pH larutan 8.

Pengamatan menunjukkan luas permukaan kontak gas-cair a naik pada daerah aliran gelembung terdeformasi. Meningkatnya harga viskositas cairan memudahkan tercapainya aliran tersebut sehingga meningkatkan luas permukaan kontak gas-cair, sementara pada laju alir yang tetap meningkatnya viskositas cairan menyebabkan turunnya harga k_L, sesuai dengan turunnya harga difusivitas D_A karena viskositas cairan. Data pengamatan dapat dikorelasikan sebagai fungsi dari energi spesifik yang digunakan E_{L'} atau fungsi dari faktor gesekan padat-cair τ_{LS} dengan kedekatan +/- 50%.

Sebagai fungsi dari energi spesifik E_{L'} yang digunakan dapat dikemukakan korelasi berikut :

$$k_{LA}/(\epsilon D_A^{0.5}) = 90,4 E_L'^{0.5}; a/\epsilon = 57,8 E_L'^{0.37}; k_L = 1,56 E_L'^{0.23} D_A^{0.5}$$

untuk 1 < E_{L'} < 106 Watt/m³ dengan E_{L'} = E_L/εβ dan E_L = (ΔP/Z)_{L.G.}L/f_{L.G.}

Sebagai fungsi dari faktor gesekan padat cair τ_{LS} dapat dikemukakan korelasi berikut :

$$k_{LA}/(\epsilon D_A^{0.5}) = 8,45.10^6 \tau_{LS}^{0.49}; a/\epsilon = 7,95.10^4 \tau_{LS}^{0.62}; k_L = 106 \tau_{LS}^{0.37} D_A^{0.5}$$

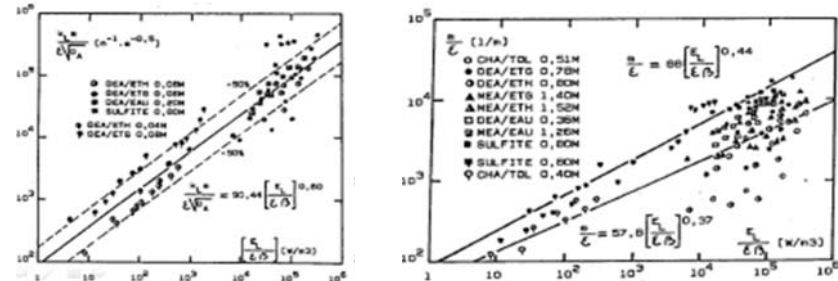
untuk 10⁻⁵ < τ_{LS} < 10⁻¹ mkolom air dengan τ_{LS} = ε2ξ_{LG}/a_c (1/(L/ρ_L+G/ρ_G)).

Pada aliran interaksi lemah telah dikemukakan korelasi berikut :

$$k_{LA}/(\epsilon.D_A^{0.5}) = 7,22.10^7 \tau_{LS}^{1.23}; a/\epsilon = 1,47.10^5 \tau_{LS}^{0.65}$$

untuk 10⁻⁵ < τ_{LS} < 10⁻³ mkolom air.

Pada aliran interaksi kuat daerah aliran gelembung terdeformasi dan k_{LA} harus dikorelasikan dengan bilangan lain yang memperhitungkan mekanisme pembentukan gelembung terdeformasi.



Gambar 2.5: Korelasi parameter perpindahan massa k_{LA} dan a model reaktor Gas - Cair kecepatan tinggi dalam unggun tetap

2.1.3 PENGUKURAN KOEFISIEN PERPINDAHAN PANAS (h)

Penulis juga melakukan penelitian terhadap koefisien perpindahan panas kearah dinding kolom (h) pada aliran kecepatan tinggi, suatu karya yang sangat orisinal. Pengukuran secara eksperimental hanya dengan memanfaatkan perbedaan temperatur 2 - 4°C sehingga pengukuran dapat dilakukan dengan seksama. Data hasil pengamatan dapat dikorelasikan dalam bentuk bilangan tidak berdimensi sebagai berikut :

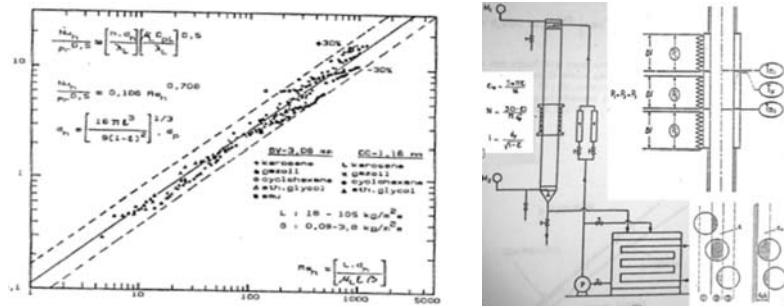
$$Nu_{ih}/Pr^{0.5} = 0,20 (Re_h(1+Re_h/36))^{0.5} atau Nu_{ih}/Pr^{0.5} = 0,106 Re_h^{0.708}$$

Dengan 3 < Re_h < 3000 dan 7 < Pr < 149

$$dimana Re_h = L.d_h/\mu L \epsilon \beta; Pr = \mu L C_{pL}/\lambda_L; Nu_{ih} = h d_h/\lambda_L$$

$$d_h = d_p [(16/9).\epsilon_3/(1-\epsilon)]^{1/3}.$$

Pengukuran dilakukan untuk berbagai jenis cairan, terutama cairan organik, dan ukuran butiran katalis yang kecil.



Gambar 2.6: Korelasi parameter perpindahan panas h model reaktor Gas - Cair kecepatan tinggi unggun tetap dan perangkat pengukurannya.

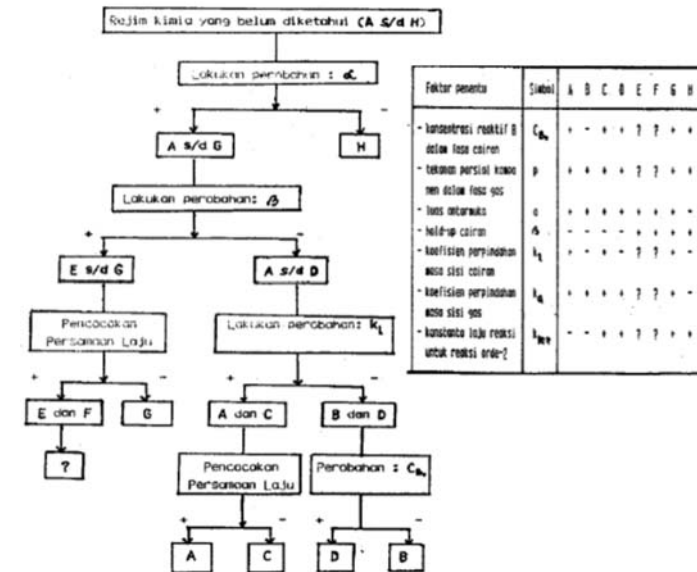
2.2 ANEKA MODEL REAKTOR GAS-CAIR DAN SIMULASINYA

Sistem kimia yang banyak dibahas adalah reaksi antara komponen A gas terlarut yang berlangsung secara irreversibel orde-2 dengan reaktif B yang terlarut dalam cairan menjadi produk P. Persamaan stoikiometri: $A + z B \rightarrow \text{Produk}$, dengan laju reaksi $r_A = k_2 C_A C_B$ dan $r_B = z r_A$, misalnya untuk oksidasi cairan organik oleh udara. Secara skematik profil konsentrasi gas terlarut A dan reaktif cairan B pada antar muka sistem reaksi gas-cair irreversibel orde-2 menurut teori dua film dapat dikemukakan dalam tabel diatas. Terdapat 8 jenis rejim kinetik perpindahan massa yang disertai reaksi

| Rejim Reaksi | Profil konsentrasi | Persamaan laju | Simbol |
|--|--------------------|--|--------|
| kinetika | | $\psi = \frac{k_2 C_B^0}{k_1 + k_2 C_B^0}$ | A |
| kinetika gas permukaan | | $\psi = k_1 z$ | B |
| caipat | | $\psi = \frac{k_1}{k_1 + k_2 C_B^0}$ | C |
| caipat berorde pseudo-1/pseudo-2 | | $\psi = \frac{k_1}{k_1 + k_2 C_B^0}$ | D |
| kecepatan antara | | tidak ada persamaan laju | E |
| kecepatan antara | | tidak ada persamaan laju | F |
| lambat proses di fluid | | $\psi = \frac{k_1}{k_1 + k_2 C_B^0}$ | G |
| lambat lambat proses kimia dalam fase cairan | | $\psi = \frac{k_1}{k_1 + k_2 C_B^0}$ | H |

Tabel 2.1: Profil konsentrasi pada Antar - Muka untuk 8 Rejim Kinetik Absorpsi disertai Reaksi

kimia. Kedelapan rejim kinetika reaksi tersebut dapat ditunjukkan oleh perbedaan harga dari berbagai faktor yang mempengaruhi laju absorpsi-reaksi, yaitu : konsentrasi reaktif B dalam fasa cair (C_{B0}); tekanan parsial komponen dalam fasa gas (p); luas antarmuka (a); hold up cairan (β); koefisien perpindahan massa sisi cairan (k_L); koefisien perpindahan massa sisi gas (k_G); dan konstanta laju reaksi untuk reaksi orde-2 (k_{mn}). Diperlukan juga data tentang : kinetik sistem reaksi gas-cair yang dipilih, difusivitas gas terlarut dan reaktif cairan, kelarutan gas, dan pengelompokan matematis praktis dari parameter diatas seperti $C_A^*(D_A)^{0.5}$ dan $((2/(m+1) k_{mn} C_{B0}^n C_A^{*n+1})^{0.5})$. Organigram identifikasi rejim reaksi kimia dapat dikemukakan sbb.:



Tabel 2.2: Organigram Identifikasi Rejim Kinetik Absorpsi disertai Reaksi dan faktor-faktor yang mempengaruhinya.

Parameter diatas ditentukan dengan berbagai model peralatan skala laboratorium yang mempunyai waktu kontak dan luas permukaan tertentu dengan pengendalian laju alir fluida yang dilakukan secara seksama. Hasil penentuan dalam berbagai peralatan tersebut dapat dikemukakan sbb:

| Jenis alat | Jet laminar | film jatun | film jatuh | film jatuh | untalan piring | drum putar | bejana aduk | bejana aduk |
|----------------------------------|----------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|------------------|----------------|-------------------|
| Skema alat | | | | | | | | |
| Re (100-ca/s) | 1,6-16 | 0,36-1,6 | 0,5-1,1 | 0,5-1,6 | 0,36-1,6 | 1,6-26 | 1,6-2 | 0,2-2 |
| waktu kontak (s) | 0,001-0,1 | 0,01-2 | 0,2-1 | 0,1-1 | 0,1-2 | 0,004-10 | 0,06-10 | 0,03-10 |
| luas permukaan(cm ²) | 0,3-10 | 10-100 | 80 | 10-40 | 30-360 | D=10cm L=12cm | 80 | D=10cm L=15cm |
| kondisi | P.tinggi | P.tinggi | P.tinggi | P.tinggi | P.sedang | P.tinggi | Presisi | 2-30 % terbuka |

Tabel 2.2: Berbagai model Reaktor Gas - Cair Skala Laboratorium untuk menentukan Kinetika Reaksi dan Parameter Fisika Kimia

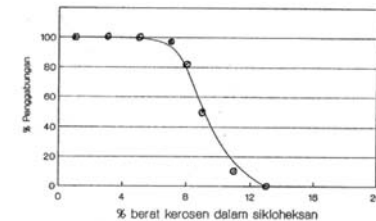
Hasil model skala lab ini kemudian digunakan untuk memperkirakan luas permukaan kontak dan koefisien perpindahan pada skala yang sebenarnya untuk model reaktor gas cair yang bersesuaian.

| Jenis Reaktor Gas-cair | hold-up cairan, % | a (cm ² /cm ³) | $k_L a$ 100 (1/s) | k_L 100 (1/cm/s) |
|---------------------------|-------------------|---|-------------------|--------------------|
| Kolom Unggun | | | | |
| - aliran berlawanan | 2-25 | 0,1 - 3,5 | 0,04 - 7 | 0,4 - 2 |
| - aliran searah | 2-95 | 0,1 - 17 | 0,04 - 102 | 0,4 - 6 |
| Kolom Pelat | | | | |
| - Bubble cap | 10-95 | 1 - 4 | 1 - 20 | 1 - 5 |
| - Sieves plates | 10-95 | 1 - 2 | 1 - 40 | 1 - 20 |
| Kolom Gelembung | 60-98 | 0,5 - 6 | 0,5 - 24 | 1 - 4 |
| Kolom Gelembung berunggun | 60-98 | 0,5 - 3 | 0,5 - 12 | 1 - 4 |
| Reaktor Tabung | | | | |
| - horizontal/kalil | 5-95 | 0,5 - 7 | 0,5 - 70 | 1 - 10 |
| - vertikal | 5-95 | 1 - 20 | 2 - 100 | 2 - 5 |
| Kolom Siram | 2-20 | 0,1 - 1 | 0,07 - 1,5 | 0,7 - 1,5 |
| Bejana Aduk | | | | |
| - reaktor gelembung | 20-95 | 1 - 20 | 0,3 - 80 | 0,3 - 4 |
| Jet tercelup | 94-99 | 0,2 - 1,2 | 0,03 - 0,6 | 0,15 - 0,5 |
| hidraktan | 70-93 | 0,2 - 0,5 | 2 - 15 | 10 - 30 |
| venturi | 5-30 | 1,6 - 25 | 3 - 25 | 5 - 10 |

Tabel 2.4: Hasil Pengukuran Parameter perpindahan massa a dan k_L dalam berbagai model Reaktor Gas - Cair

3. FENOMENA PEMBUSAAN DAN PEMBENTUKAN GELEMBUNG MIKRO

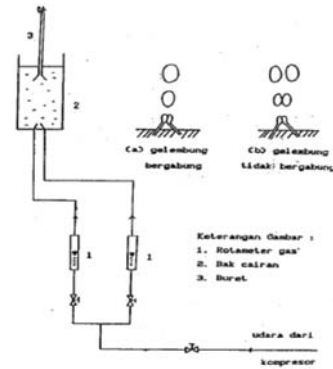
Berbeda dengan sifat cairan seperti viskositas atau densitas yang telah difahami dengan baik, pengetahuan tentang kemampuan membusanya suatu cairan karena kontak dengan fasa gas secara apriori belum dapat diperkirakan dengan sifat-sifat fisika-kimianya tegangan permukaan.



Gambar 3.1: % Penggabungan Gelembung pada sistem Campuran Cairan Sikloheksan dan Kerosin

Sikloheksan dan kerosin secara praktis mempunyai harga densitas ρ_L , viskositas μ_L , dan tegangan permukaan σ_L yang sama, akan tetapi dengan adanya laju alir gas dan untuk suatu laju

alir cairan tertentu akan menunjukkan bahwa kerosin akan membusa dan memberikan hilang tekan sepuluh kali lebih besar dari pada sikloheksan yang tidak membusa. Dengan percobaan dapat ditunjukkan sikloheksan murni dalam suatu wadah kemudian dicampur secara bertahap dengan kerosin kedalamnya dan diinjeksikan



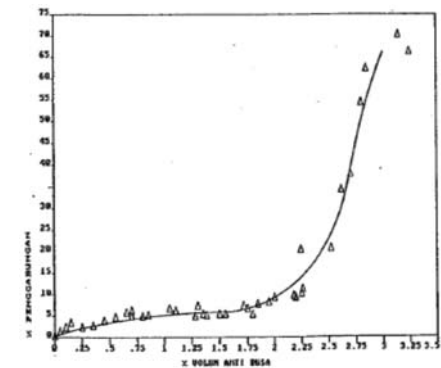
Gambar 3.2: Peralatan untuk mengukur kemampuan Membusa suatu Cairan.

gas dengan kecepatan $8 \text{ cm}^3/\text{menit}$, terlihat untuk sikloheksan murni atau campuran sikloheksan dengan sedikit kerosin terjadi 100% penggabungan pasangan gelembung yang diinjeksikan, cairan demikian disebut tidak berbusa. Lalu dengan penambahan kerosin 6-14% terjadi penurunan % penggabungan gelembung dari 100% menjadi 0%, sementara harga tegangan permukaan, viskositas dan densitas cairannya hanya berubah sedikit saja ($\sigma_L = 25,55\text{-}26 \text{ dyn/cm}$, $\mu_L = 0,95\text{-}1,105 \text{ Cp}$), dalam hal ini cairan tersebut disebut mempunyai potensi pembusaan tertentu. Tingkat kebusaan cairan dengan adanya fasa gas disebabkan oleh menurunnya jumlah penggabungan gelembung gas yang tertahan di dalam cairan tersebut. Penulis merancang pengukuran kemampuan pembusaan suatu cairan baik cairan organik atau non-organik dalam suatu peralatan skala laboratorium yang kedalam cairan yang akan diuji dalam alat tersebut diinjeksikan dan disentuhkan pasangan dua buah gelembung gas. Prosentase penggabungan pasangan gelembung gas tersebut diamati dan dicatat. Penghitungan pasangan gelembung yang

disentuhkan dapat dilakukan secara manual atau secara fotografi dengan menggunakan kamera video. Gelembung gas nitrogen sebanyak 200-250 pasangan dibuat dan diinjeksikan kedalam tangki cairan yang akan diuji, dengan laju injeksi sepasang-sepasang untuk cara manual atau dengan laju $0,07 - 17 \text{ cm}^3/\text{menit}$ untuk cara fotografi. Derajat penggabungan pasangan gelembung gas dinyatakan sebagai % penggabungan dengan membagi jumlah pasangan yang bergabung oleh jumlah total pasangan gelembung yang diinjeksikan. Ternyata reproduktibilitas pengukuran ini cukup seksama dengan penyimpangan $< 4\%$.

Perangkat percobaan digunakan untuk menentukan berapa banyak jumlah bahan anti busa harus ditambahkan agar cairan yang semula berpotensi membentuk busa menjadi tidak membusa. Campuran cairan

berupa 50% volum etanol dan 50% etilenglikol mempunyai sifat akan membusa (% penggabungan gelembung 0%). Ingin diketahui berapa banyak bahan anti busa alkilalkohol yang harus ditambahkan agar sifat membusanya hilang. Hasil percobaan menunjukkan bahwa penambahan alkilalkohol



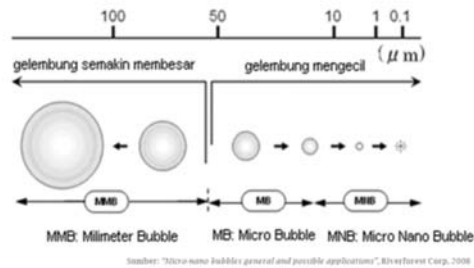
Gambar 3.3: Penggabungan Gelembung Campuran Cairan Etanol pada Etilin Glikol dengan penambahan anti busa Alkil Alkohol.

sebanyak 3% volum meningkatkan persen penggabungan gelembung dari 0% hingga 70% , cairan cenderung untuk tidak membusa. Metoda pengukuran persen penggabungan gelembung tersebut bukan saja

bersifat kualitatif tetapi juga dapat menunjukkan kemampuan berbusa suatu cairan tertentu secara kuantitatif. Sehingga dengan cara eksperimental yang sederhana ini permasalahan fundamental tentang pembentukan busa atau karakteristik pembentukan gelembung dalam cairan dapat dilakukan lebih lanjut.

Hal penting lainnya adalah pembentukan gelembung mikro, gelembung yang sangat kecil dengan diameter 10-50 μm , dan telah diteliti untuk berbagai penerapan, terkait potensinya untuk meningkatkan perpindahan massa gas-cair dan penghilangan kontaminan dalam pengolahan air limbah. Selain digunakan dibidang industri gelembung mikro telah banyak dite-

rapkan di bidang medis, seperti *ultrasound contrast agent*, penghancur tumor, dan *targeted drug delivery*. Sifat transfer massanya yang lebih efektif dan



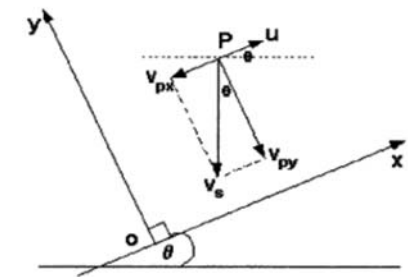
Gambar 3.3: Sketsa perilaku Gelembung Mikro

efisien juga dapat meningkatkan efisiensi dan performansi kontaktor gas-cair seperti kolom gelembung, reaktor gas-cair dan fermentor. Perpindahan massa dengan disolusi gelembung secara luas diterapkan di bidang biologi, kimia dan lingkungan. Gelembung mikro mempunyai nilai lebih karena memiliki luas permukaan kontak yang lebih besar dan waktu tinggal dalam cairan yang lebih lama. Berbagai metode telah diteliti untuk menghasilkan gelembung mikro, yang menunjukkan bahwa dengan menggunakan alat sederhana dengan lubang berukuran mikro dan

pendorongan dengan tekanan yang tinggi tidak memberikan hasil yang diharapkan. Kondisi optimal pembentukan gelembung mikro dapat penulis lakukan dengan menggunakan alat venturi berlubang kecil pada bagian tenggorokannya yang menghisap udara luar melalui lubang tersebut. Gelembung udara yang muncul dipermukaan lubang bagian dalam tersayat oleh lapis fluida yang mengalir menjadi ukuran kecil (micrometer). Ukuran lubang tidak harus sekecil-kecilnya ($<50\mu\text{m}$), tetapi cukup memberikan bentuk gelembung kaku yang tidak akan bergabung dengan gelembung lainnya dan mengecil ukurannya dengan sendirinya. Venturi superintensif ini telah penulis terapkan dalam penanganan air baku atau daur ulang air dipertambahan udang pantai utara pulau Jawa (Jejara).

4. FENOMENA SEDIMENTASI DIPERCEPAT DAN ALIRAN LUMPUR DALAM PIPA SPIRAL

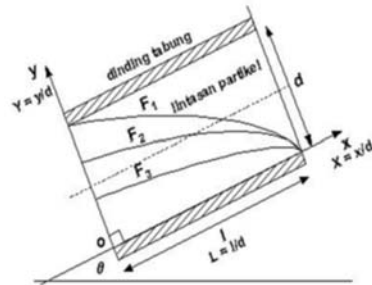
Sedimentasi adalah salah satu fenomena perpindahan gerak yang paling sederhana dan telah lama menjadi bahan kajian para peneliti. Satu partikel padat yang dilepas tanpa kecepatan dalam suatu media cairan diam akan jatuh bebas dengan kecepatan tetap v_s menurut keseimbangan gaya berat dan gaya apungnya tanpa gesekan: $v_s = ((\rho_p - \rho_f) V g) / 3 \pi \mu d_p$, dimana V adalah volume partikel).



Fenomena sedimentasi

Gambar 4.1: Sketsa Pengendap Bidang Miring.

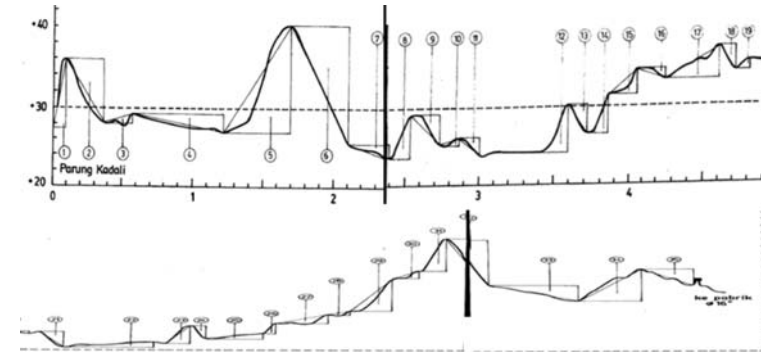
dipercepat dalam pipa dapat ditunjukkan dalam skema berikut. Bidang potongan yang terlihat dibuat melalui sumbu pipa. Sumbu x berimpit dengan dasar pipa, d dan l adalah diameter dan panjang pipa. Lintasan partikel



Gambar 4.2: Sketsa pengendap pipa miring

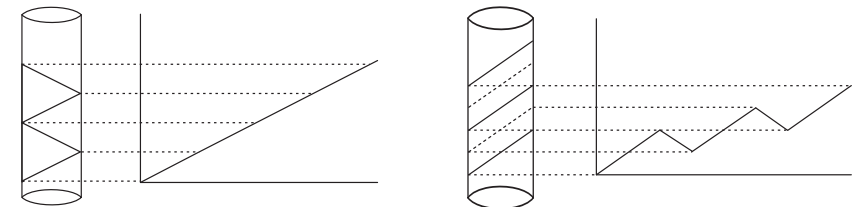
$$8(Y^2/2 - Y^3/3) - (v_s/v_0) Y \sin \theta + (v_s/v_0)(X-L) \cos \theta = 0.$$

Berarti lintasan nyata yang terjadi untuk setiap partikel bergantung pada besarnya (v_s/v_0) untuk suatu partikel. Lintasan batas pada keadaan awal di titik teratas pipa pada ujung masuk merupakan lintasan teratas dari kelompok partikel yang dapat mendefinisikan kecepatan jatuh kritik di titik partikel dalam sistem tersebut: $(v_{sc}/v_0)(\sin \theta + L \cos \theta) = 4/3$. Partikel tersuspensi dengan kecepatan jatuh jauh lebih besar dari kecepatan jatuh kritik ini sepenuhnya akan diendapkan. Berarti sedimentasi yang dipercepat bukan karena partikelnya menjadi lebih berat melainkan karena dipotong lintasannya. Pemecahan ini dapat diterapkan ketika menentukan lokasi bocoran pipa karena korosi sumuran yang disebabkan oleh pengendapan yang terjadi pada sejumlah titik tertentu sepanjang pipa yang mengalirkan air baku.



Gambar 4.3: Pengendapan Sepanjang Jalur Pemipaan Air Baku

Teori ini juga bisa diterapkan pada saat merancang bentuk pipa spiral yang akan digunakan untuk pemisahan padatan dari suspensinya. Bentuk spiral memberikan peluang pengendapan yang lebih besar dengan adanya arah aliran yang tangensial dan kemiringan pemipaannya sesuai dengan pola pembentukan spiralnya.

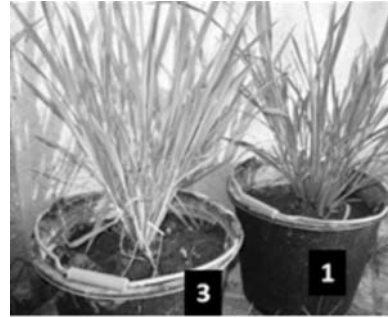


Gambar 4.4: Sketsa Babaran Bentuk Pipa Spiral

5. PENGEMBANGAN BIOREAKTOR TANAMAN

Kearifan Budaya Lokal Sunda sejak lama membedakan adanya *makhluk cicing* (tanaman), *makhluk ulin* (binatang) dan *makhluk eling* (manusia). Tanaman sekalipun selalu diam ditempat ternyata mampu

menyiapkan nutrisinya sendiri dengan bahan setempat. Tanaman berinteraksi kuat dengan lingkungan hidup disekitarnya terutama untuk mendapatkan pasokan makanannya. Bagian lingkungan yang berinteraksi kuat tersebut secara sistematis diakuisisi menjadi bagian dari dirinya yang akan disebut sebagai

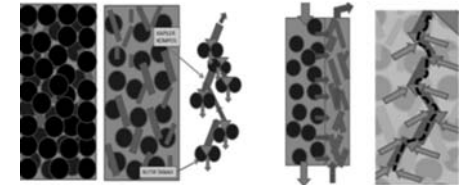


Gambar 5.1: Keberadaan Model Bioreaktor Tanaman (MBRT), Tanam 1 bibit vs Tanam 3 bibit.

bioreaktor tanaman, merupakan bagian dari tanaman yang menyiapkan pasokan nutrisi yang diperlukannya. Tanaman mengambil nutrisi yang diperlukan dari bioreaktornya sendiri yang dibangun secara sistematis, hayati dan mengendalikannya secara *production on demand*. Keberadaan tanaman dengan bioreaktornya dapat ditunjukkan dengan pengamatan berikut. Pada hari ke-40 setelah tanam di pot dengan isian kompos serta tanah pada komposisi yang sama dan ukuran yang sama, rumpun padi yang berasal dari tanam satu bibit beranak 43 dan yang ditanam tiga bibit beranak 45. Pada saat tersebut yang ditanam satu bibit daunnya masih berwarna hijau dan yang ditanam tiga bibit menguning yang berarti tanaman mengalami kekurangan nutrisi. Rumpun dari satu bibit hanya membuat satu bioreaktor sehingga terbangun secara sempurna, sementara yang ditanam tiga bibit membuat tiga bioreaktor yang kurang sempurna karena keterbatasan ruang, akhirnya berimplikasi pada kurangnya ketersediaan nutrisi bagi tanaman tersebut. Tanaman nampaknya mengambil nutrisi dari bioreaktornya.

5.1 HIDRODINAMIKA BIOREAKTOR TANAMAN

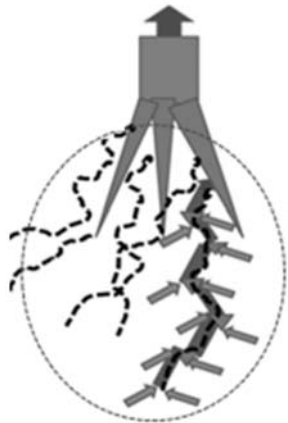
Bahan utama pembentuk ruang bioreaktor tanaman adalah biomassa bekas tanaman yang didalamnya mengandung banyak pembuluh mikro dengan struktur ruang yang relatif stabil. Ujung potongan pembuluh mikro ini dapat saling bertemu dengan ujung pembuluh mikro lainnya, yang



Gambar 5.2: Struktur ruang dan pola Aliran dalam Model Bioreaktor Tanaman (MBRT)

pada akhirnya cenderung menyentuh permukaan akar tanaman atau ujung akar bulu tanaman. Saluran yang terbangun dari banyak pembuluh mikro ini menyerap air dan udara yang berada dalam ruang antar butiran-butiran tanah dan mengalirkannya ke arah permukaan akar tanaman melalui mekanisme gaya tegangan permukaan air dan daya isap tanaman karena evapotranspirasi tanaman, sehingga mampu menjaga permukaan akar senantiasa terbasahi lapisan (film) cairan. Ruang antar butiran tanah harus cukup besar dan leluasa untuk diisi udara. Adanya fasa udara dalam ruang antar butiran tanah ini berfungsi untuk menjamin berlangsungnya mekanisme kenaikan air pada kapiler karena efek tegangan permukaannya. Kearifan lokal mengidentifikasi hal ini dengan menyebutkan tanah subur adalah tanah yang gembur.

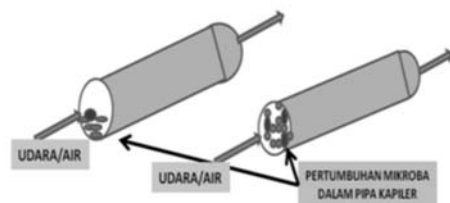
Susunan ruang antar butiran tanah dan ruang kapiler dalam kompos dengan perbandingan volume tertentu mampu mengalirkan air melalui pipa-pipa kapiler ini secara estafet ke permukaan akar menggantikan lapisan film cairan yang membasahi akar ketika film cairan tersebut terserap mengalir ke dalam tanaman. Struktur utuh ruang tersebut yang



Gambar 5.3: Struktur Utuh Batas Ruang MBRT, (bentuk seperti bola simetri)

berinteraksi kuat dengan tanaman inilah yang disebut dengan bioreaktor tanaman. Dengan ketersediaan air, udara dan mineral yang cukup dalam ruang pembuluh mikro dalam kompos bekas tanaman ini akan mendukung berkembangnya kehidupan mikro organisme, membangun siklus hidup dan matinya. Cairan keluaran mikroorganisme atau bekas tubuh mikroorganisme yang terlarut dalam air terbawa aliran ke dalam tanaman

melalui sistem perakaran menjadi pasokan kontinu nutrisi lengkap bagi tanaman. Jumlah, jenis dan aneka ragam bahan yang diperlukan tanaman dipenuhi secara berkesesuaian dan dikendalikan oleh interaksi kimiawi antara bahan kimia aktif pembawa pesan dari tanaman dengan mikroorganisme dalam bioreaktor tanaman melalui mekanisme eksudasi tanaman. Penggunaan bahan kimia aktif dari luar tanaman seperti pupuk kimia dan pestisida buatan dapat mengikat bahan aktif pembawa pesan ini sehingga mekanisme hayati yang diinginkan tidak terjadi. Hal ini bisa menjelaskan mengapa cara tani organik tertentu bisa meningkatkan produksi tanaman secara berlipatan bahkan tanpa dipupuk sekalipun. Laju proses yang berlangsung di dalam pembuluh hanya



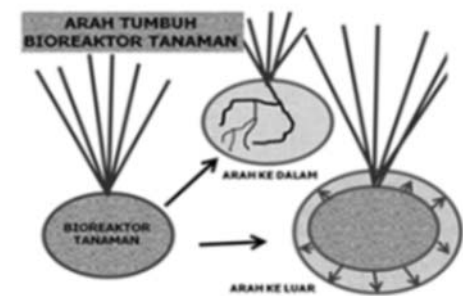
Gambar 5.4: Siklus Hidup Mikroorganisme Dalam Pembuluh MBRT

ditentukan oleh panjang pembuluh. Proses yang berlangsung dengan cepat akan memerlukan waktu tinggal yang singkat, sehingga dipenuhi oleh pipa berukuran



Gambar 5.5: pengaruh Panjang Kapiler MBRT vs Waktu Tinggal dan Laju Proses

pendek. Sementara proses yang berlangsung lambat akan memerlukan waktu tinggal yang lebih lama sehingga memerlukan ukuran pipa yang lebih panjang. Karena banyak jenis proses yang harus berlangsung baik lambat maupun cepat maka bioreaktor tanaman harus terbentuk oleh berbagai ukuran panjang pembuluh kapiler. Penerapannya di lapangan cukup dengan rutin mengembalikan kompos bekas tanaman secara teratur ke dalam tanah, yang dimasukkan terdahulu akan memberikan ukuran pipa yang lebih pendek hasil degradasi, sementara yang baru memberikan ukuran yang relatif masih panjang. Keanekaragaman hayati terjadi karena didukung oleh adanya keanekaragaman ruang dalam bioreaktor tanaman. Dengan berjalannya waktu jumlah ruang dan aneka ragam ukuran pembuluh mikro dalam bioreaktor tanaman akan selalu meningkat dan tentunya akan selalu meningkatkan kapasitas produksi tanaman. Peningkatan kapasitas produksi bioreaktor tanaman ini juga akan terjadi karena dua hal lain yang memungkinkan



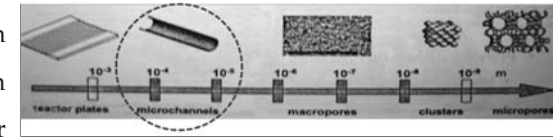
Gambar 5.6: Arah Pertumbuhan Kapasitas Produksi MBRT

peningkatan produksi hampir tidak terbatas. Pertama adalah tumbuhnya batas ruang bioreaktor yang terjadi karena bertambahnya ukuran jejari bola bioreaktor tanaman akibat akar yang bertambah panjang. Kedua adalah perkembangan khas sistem perakaran. Akar akan tumbuh bercabang dan bercabang lagi sedemikian sehingga memberikan ukuran akar bulu yang semakin kecil, dan membuka peluang untuk mengaktifkan ukuran ruang yang lebih kecil lagi dalam bioreaktor sehingga meningkatkan kapasitas produksi bioreaktor yang bersangkutan. Produksi tanaman bisa ditingkatkan sesuai dengan ukuran dan jumlah ruang efektif pembuluh mikro bioreaktor yang berhasil difungsikannya untuk mengalirkan air dan nutrisi lengkap yang dikandungnya kedalam tanaman. Sangat mencengangkan karena peningkatan produksi tanaman tidak selalu harus bersamaan dengan peningkatan luas tanah garapan, tetapi cukup melalui upaya peningkatan kapasitas bioreaktor tanaman yang jauh lebih dapat diandalkan.

5.2 INTENSIFIKASI PROSES DALAM BIOREAKTOR TANAMAN

Secara teknik kimia semua peristiwa diatas yang terjadi dalam ruang mikro bekas kapiler tanaman bisa disebut sebagai penerapan teknologi intensifikasi proses. Intensifikasi proses terjadi dalam ruang yang diperkecil sehingga bisa melakukan berbagai fungsi proses sekaligus. Kapiler-kapiler bekas tanaman bukan saja berfungsi sebagai pipa yang mengalirkan fluida, namun juga bisa berfungsi sebagai perangkat pencampur, tempat reaksi, alat pemisahan, dan penyimpanan dengan unjuk kerja dan efisiensi proses yang lebih baik. Seperti peristiwa makin

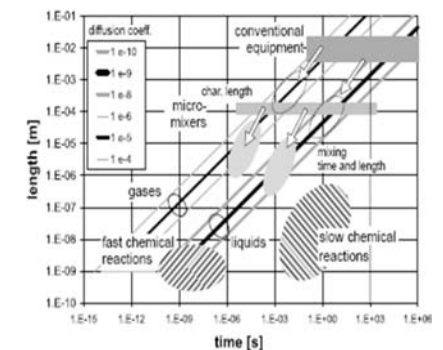
baiknya efisiensi dan performansi dalam perangkat komputer karena menggunakan



Gambar 5.7: Skala Ruang Pembuluh MBRT untuk Intensifikasi Proses

prosesor yang lebih kecil dan lebih handal. Ruang mikro berupa pembuluh kapiler bekas tanaman dalam bahan kompos dapat dipandang sebagai mikrobioreaktor karena menyediakan ruang bagi terjadinya peristiwa fisika, reaksi kimia maupun biokimia oleh mikroba yang hidup di dalamnya. Letak ruang skala mikro ukuran pipa kapiler bekas tanaman ini dapat ditunjukkan pada daerah *microchannels*, dibandingkan dengan ruang skala nano untuk material yang digunakan untuk perangkat teknologi informasi pada umumnya di daerah *micropores*. Aliran pada *microprocessor* komputer adalah elektron sehingga tidak memerlukan ruang, tetapi bioreaktor tanaman harus memfasilitasi aliran berupa udara dan air sehingga akan memerlukan ruang. Ruang mikro dari bekas pipa kapiler tanaman ini akan memperpendek jarak peristiwa perpindahan yang terjadi dan memberikan laju perpindahan yang lebih cepat. Menurut

rumus Einstein dan Smoluchovski relasi antara koefisien difusi terhadap jarak perpindahan dapat dinyatakan sebagai $x^2 = 2 D t$ (1,1) dengan D sebagai difusivitas udara 10^{-5} - 10^{-6} m²/s, atau difusivitas air 10^{-9} - 10^{-10} m²/s. Dengan ukuran ruang



Gambar 5.8: Ukuran Mikro Pembuluh MBRT Memperpendek Jarak Perpindahan

dalam sentimeter terdapat struktur fluida 100 mikrometer hingga 1 milimeter, berarti waktu difusi udara dan air akan lebih singkat yaitu pada selang 1 milidetik hingga 1 detik. Dengan ukuran ruang dalam mikrometer dengan ukuran panjang 100 mikrometer hingga 1 mm akan memberikan struktur fluida 1 mikrometer berarti akan didapat waktu pencampuran lebih singkat, untuk gas 100 mikrodetik dan untuk air 1 mikrodetik. Fenomena inilah yang menyebabkan *high yield* dan *high selectivity* dalam bioreaktor mikro, yang akan berdampak langsung pada tanaman menjadi peningkatan produktivitas secara berkelipatan dan kualitas produk yang lebih baik sesuai dengan ukuran ruang yang difungsikannya dalam tanaman maupun bioreaktornya. Dalam ilmu teknik kimia yang menjadi sumber gagasan di atas, intensifikasi proses memberikan arah pengembangan peralatan di pabrik kimia dari bentuk bejana dan kolom berskala makro bergeser menjadi skala meso bahkan menjadi skala mikro, seperti pada reaktor mikro atau struktur ruang intensif seperti membran dan unggun tetap berbutiran kecil. Skala ruang ini setara dengan material pipa-pipa kapiler bekas tanaman (kompos) yang digunakan sebagai bahan bioreaktor alami bagi tanaman. Perkembangan dalam tampilan dan ukuran pabrik pun akan sangat mencengangkan. Kalau dalam kurun waktu dari abad ke-16 sampai abad ke-20 pabrik kimia hanya berganti material konstruksinya saja dari kayu menjadi metal, maka dengan intensifikasi proses hanya dalam hitungan tahun pada awal abad ke-21 ini, tampilan pabrik besar seperti sebuah pabrik pupuk saat ini bisa berubah menjadi sekelompok pabrik berukuran mikro, seperti kebun dengan aneka ragam tanamannya sebagai pabrik mikro alami.

5.3 MENINGKATKAN PRODUKTIVITAS TANAMAN

Tani berbasis konsepsi bioreaktor tanaman ini dikembangkan dan diterapkan sebagai bagian dari *action reseach* di lapangan yang mencakup seluruh wilayah Indonesia, diawali dengan program tani hemat air Kementerian PUPR dan dikembangkan melalui program CSR-CD PT Medco Energy. Saat ini di Seluruh Indonesia ada 16.440 hektar sawah dan 42.279 petani terlatih yang menerapkan teknologi baru ini yang diperkenalkan sebagai SRI Organik Indonesia, yaitu metoda tani organik *system of rice intensification* (SRI) yang semula berkembang di Madagaskar dan dikembangkan di Indonesia dengan kawalan konsepsi bioreaktor tanaman. Dalam kurun waktu tahun 2001-2016 upaya swadaya masyarakat yang dikawal oleh beberapa LSM dan para tokoh masyarakat termasuk penulis, mampu meningkatkan produktivitas tanaman padi secara berkelipatan dengan nyata di lapangan. Produktivitas pertanian padi dari 2-4 ton/hektar meningkat menjadi 9-12 ton/hektar secara menerus selama 26 musim berturut-turut dengan hanya menggunakan bahan setempat, tanpa menggunakan pupuk dan bahan kimia apapun. Saat ini diharapkan produksi bisa mencapai 15 ton perhektar di lapangan, dan pencapaian hingga 30 ton per hektar bisa menjadi kenyataan dalam waktu yang tidak lama lagi. Uji potensi bioreaktor tanaman padi bisa mencapai 0,3-0,5 kg padi per rumpun tanaman yang setara dengan produktivitas padi 30-50 ton perhektar di lapangan. Metoda tani berbasis konsepsi bioreaktor tanaman ini ternyata bisa diterapkan pula untuk tanaman selain padi seperti sayuran, singkong, tanaman keras seperti buah-buahan, karet, kelapa sawit, dst, sama memberikan kenaikan



Gambar 5.9: Action Researh Penerapan Tani Berbasis MBRT

produksi hingga 3–5 kali. Keberhasilan di lapangan pada penanaman tanaman keras untuk penghutan kembali mencapai 97% sementara yang dilakukan secara tidak seksama hanya 30%.

Beberapa perubahan yang perlu diantisipasi pada implementasi lompatan teknologi ini antara lain: Upaya tani akan lebih mandiri sehingga tidak lagi memerlukan input eksternal baik berupa pupuk maupun bibit karena dapat dikembangkan secara setempat. Penggunaan bahan kimia aktif terhadap tanaman akan dihindari karena dapat mengganggu komunikasi antara tanaman dengan sistem kehidupan dalam bioreaktor tanaman. Tani berbasis keseksamaan bioreaktor tanaman bersifat tani organik namun peningkatan produksinya tidak perlu menunggu waktu penyesuaian dan akan berlangsung secara bersamaan dengan peningkatan kualitas produk tanaman yang dipanen dan jumlah biomassa yang dapat dicadangkan untuk pasokan upaya tani berikutnya. Peningkatan produktivitas biomassa (bunga, buah, akar, batang, dan daun) dapat dilakukan secara sangat berarti (berkelipatan) dengan menerapkan intensifikasi proses menggunakan bahan kompos sebagai generator siklus ruang dan mikroorganisme lokal (MOL) sebagai generator siklus hidup pada interaksi ekosistem tanaman dengan bioreaktornya.

Tingkat produktivitas tanaman sangat ditentukan oleh jaminan pasokan biomassa bekas tanaman, air dan udara bukan oleh pasokan eksternal berbagai jenis pupuk. Daur ulang biomassa bekas tanaman menjadi sumber paling tepat untuk memenuhi unsur makro atau mikro bagi tanaman, karena bahan yang diperlukan tanaman sudah tersimpan dalam biomassa limbah bekas tanaman. Peran biomassa bekas tanaman terutama sebagai sumber penyedia



Gambar 5.10: Pertumbuhan Vegetatip dan Generatip Tani berbasis MBRT

pembuluh mikro untuk membentuk ruang mikro bioreaktor tanaman. Pada dasarnya bekas tanaman yang stabil stuktur ruangnya yang diperlukan pertanian, bukan dalam pengertian kompos selama ini yang memerlukan proses khusus untuk mencapai komposisi bahan tertentu. Penyiapan lahan bisa diawali dengan olah lahan untuk memaksimalkan tumbuhnya tanaman lain atau gulma untuk dipanen sebagai pasokan awal biomassa. Kompos sebagai pembangkit siklus ruang dalam tanah mampu memperbaiki dan mengubah struktur ruang dalam tanah menjadi lebih baik, menjadikan kompos sebagai kebutuhan utama untuk keperluan intensifikasi proses dalam bidang pertanian. Faktor yang mendefinisikan bioreaktor tanaman adalah keberadaan ruang untuk

berlangsungnya reaksi, perpindahan massa, dan pertumbuhan. Hanya bahan kompos yang dapat mendukung peran ini dengan karakteristik yang bersesuaian.

Peran hutan dan semak belukar sebagai infrastruktur alam sangat menentukan dan tidak tergantikan sebagai generator siklus oksigen, siklus air, dan siklus karbon atau biomassa yang akan menjadi sumber bahan kompos dalam jumlah yang senantiasa tersedia dalam ketersebaran yang meluas, yang menjamin pembangkitan siklus ruang dan siklus kehidupan untuk kegiatan pertanian dan turunannya. Percepatan produksi biomassa dan keaneka ragamannya merupakan salah satu keunggulan hayati alam Indonesia yang harus direspon secara cerdas dengan penuh kearifan untuk membangun kesejahteraan kemanusiaan, memenuhi kebutuhan pangan dan sumberdaya terbarukan lainnya. Memulihkan infrastruktur alam untuk menjamin kesinambungan, ketersediaan dan kemanfaatan daur alami air, udara dan biomassa agar siklus ruang dan siklus kehidupan berlangsung menunjang keandalan kinerja pertanian. Menggunakan potensi keaneka ragaman hayati untuk meraih keandalan ketersediaan, manfaat dan kesinambungan.

Keuntungan penerapan tani berbasis bioreaktor tanaman bisa diperoleh untuk *planet* (ekologi), *profit* (sosial ekonomi), maupun *people* (sosial budaya). Implementasi tani padi berbasis bioreaktor memungkinkan petani produsen memperoleh tambahan pendapatan dan penghematan dari biaya pupuk, bibit dan pestisida sebesar 45 trilyun rupiah setiap musim tanam atau setara 90 trilyun rupiah dalam 1 tahun. Implementasi tani padi berbasis bioreaktor tanaman dapat

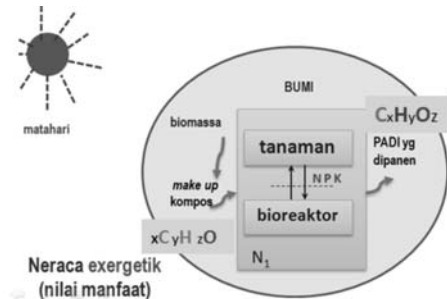
menguntungkan negara sebesar 9 trilyun rupiah untuk pengalihan subsidi pupuk bagi petani padi. Implementasi tani padi berbasis bioreaktor dapat meraih keuntungan lingkungan berupa penghematan penggunaan air sebesar 65 trilyun liter air per musim tanam, dan eliminasi emisi gas rumah kaca sebesar 86 juta ton metana atau setara 1,8 milyar ton CO₂ atau setara 1,814 milyar Kredit Karbon atau sebesar 145 trilyun rupiah setiap musim tanam.

Data statistik Indonesia menunjukkan luas panen sawah sekitar 12 juta hektar, sehingga paling tidak harus ada 6 juta hektar sawah di Indonesia yang berpengairan baik. Sistem pasokan air bagi tanaman dapat dikembangkan dengan lebih seksama karena sistem ruang mikro bekas tanaman pada ketebalan 40 cm akan mampu menyimpan air lebih dari kebutuhan untuk 2 tahun sehingga tani berbasis musim hujan sebetulnya sangat bisa diandalkan sepanjang tahun. Implementasi tani padi berbasis bioreaktor tanaman pada luas lahan sawah yang ada dapat mempertahankan surplus beras lebih dari 10 juta ton hingga tahun 2035 pada tingkat produktivitas padi hanya 6 ton/hektar.

5.4 INTEGRASI INDUSTRI KIMIA DAN INDUSTRI AGRO

Secara termodinamika kriteria yang bisa diukur dalam sistem (semi)tertutup tidak hanya *nilai tambah* (energetik) melainkan juga *nilai manfaat* (exergetik) yang didasarkan pada pertukaran aliran di dalam sistem. Ekosistem elementer tanaman mencakup interaksi kuat antara tanaman dengan bioreaktornya. Pemaksimalan keluaran produk panen

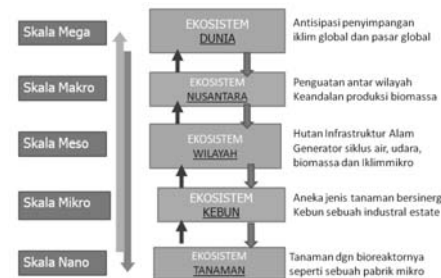
senyawa $C_xH_yO_z$ berupa pati atau gula atau selulosa dan sebangsanya, akan didasarkan pada pemaksimalan masukan berupa penambahan unsur setara $C_xH_yO_z$ juga, yaitu berupa penambahan unsur C sebagai bahan organik bekas tanaman, yang juga menghadirkan pipa-pipa kapiler bekas tanaman, yang berfungsi ganda membangun ruang mikro sebagai bentukan bioreaktor tanaman. Penambahan unsur H diberikan berupa air (H_2O) yang tersimpan dan terkendali dalam ruang mikro kapiler



Gambar 5.11 Multiskala Sistem (Semi) Tertutup Tanaman - BRT dan Bumi - Matahari

bekas tanaman (kompos), dan penambahan unsur O berasal dari udara yang bisa leluasa masuk dan mengisi ruang besar diantara butir-butir tanah yang gembur. Tanaman dengan bioreaktornya dapat dianggap sebagai satu kesatuan pabrik mikro, sehingga defisit pada neraca umpannya dapat dipenuhi oleh pasokan dari pabrik mikro yang lain, artinya dari tanaman lain. Dengan demikian budidaya tanaman harus dilakukan secara multikultur. Rancangan kebun merupakan skala ekosistem dari berbagai jenis tanaman atau pabrik mikro, seperti layaknya suatu *industrial estate* dalam sistem industri kimia. Pada skala ekosistem di atasnya dapat diidentifikasi suatu wilayah pertanian. Dalam skala ini kehadiran infrastruktur alam seperti hutan dan semak belukar menjadi sangat diperlukan untuk menjamin terpeliharanya siklus air, udara dan biomassa bagi peningkatan produktivitas kebun-kebun yang berada di

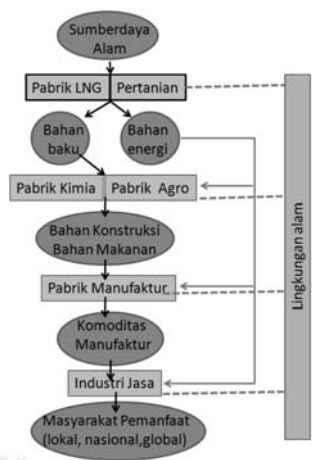
dalamnya. Skala ekosistem di atasnya lagi adalah ekosistem skala Nusantara yang mencakup ribuan pulau yang unik serta aliran fluida diantaranya dan antar benua. Ekosistem skala ini seharusnya memberi peluang untuk bertahan pada kondisi alam paling kritis berskala nasional sekalipun seperti ancaman kekeringan karena terjadinya peristiwa El-Nino. Dapat difahami pengembangan lahan pertanian di Merauke pada dasarnya bukan sekedar untuk menambah luas lahan garapan, melainkan lebih memanfaatkan peluang infrastruktur alam Merauke yang masih



Gambar 5.12: Multiskala Model Pertanian Terpadu di Indonesia

dapat menangkap uap air dari aliran udara yang tersedot ke kutub panas di lautan Pasifik mengalir ke arah timur Indonesia pada saat terjadinya El Nino. Hal ini berarti Indonesia masih akan memiliki lahan pertanian yang produktif pada saat dilanda gelombang kekeringan yang meluas sekalipun. Lebih lanjut ekosistem skala paling besar mencakup bumi dan cahaya matahari yang masuk ke dalam atmosfer bumi, juga merupakan sebuah sistem semiterutup. Masukan cahaya matahari ini memungkinkan sumber biomassa berupa hutan dan semak-belukar tumbuh dan berkembang sebagai sumber bahan untuk menciptakan siklus ruang di dalam tanah, yang pada gilirannya akan memfasilitasi berkembangbiaknya siklus kehidupan, untuk mengimbangi kebutuhan nutrisi dan energi yang diperlukan umat manusia, yang juga selalu tumbuh. Skala ekosistem ini adalah ekosistem

global yang tengah mengalami penyimpangan iklim dan penyimpangan pasar yang serius sehingga menjadi ancaman yang nyata bagi ekosistem nasional Indonesia berupa tekanan monopoli ekonomi dan monokultur pengelolaan kebun dan perkebunannya. Penataan kembali ekosistem Nusantara, wilayah pertanian, kebun-kebun, dan budidaya tanaman secara benar akan menjadi pilihan utama untuk menyelamatkan ekosistem dunia. Artinya pertanian di Indonesia harus meninggalkan

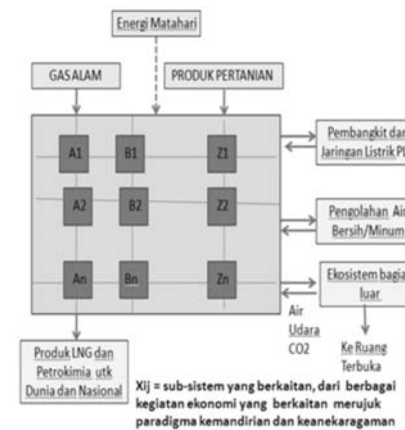


Gambar 5.13 Alur Pemrosesan Sumberdaya Alam Terbarukan dan Tidak Terbarukan

benchmark pertanian dari negara lain, menghindari monokultur dan praktek monopoli, kembali memanfaatkan peluang keanekaragaman, sesuai dengan Konsep Alam Cerdas Indonesia dan Kearifan Budaya Nusantara. Dari kenyataan di atas dapat dilihat bahwa pemecahan masalah dengan memperhatikan keterkaitan multiskala antara pabrik mikro dengan pabrik makro dan skala-skala produksi lain di atasnya akan menjadi garapan penting ilmu teknik

kimia mendatang. Kegiatan produktif masyarakat seharusnya merupakan produk keterpaduan kegiatan industri dan pertanian. Industri dalam arti manufaktur atau pabrik kimia berbasis proses fisika kimia dan industri pertanian yang mencakup integrasi tanaman, kebun dan pengolahan hasilnya tentunya berbasis proses hayati. Perkembangan peradaban dari pertanian ke industri seharusnya tidak dijadikan

pembenaran upaya pengindustrian pertanian dengan meninggalkan prinsip proses hayatinya, karena basis hayati ini sudah mencapai bentuk optimalnya secara evolutif. Dalam perkembangan industri mulai dirasakan perlunya mengadopsi prinsip hayati untuk menekan beban biaya investasi yang selalu meningkat serta untuk menjamin kesinambungan secara alami dan hayati. Mulai disadari untuk tidak melulu menggunakan sumberdaya yang tidak terbarukan sampai habis, melainkan harus mengintegrasikan penggunaan kedua bahan tersebut secara cerdas. Merangkai proses pengelolaan sumberdaya alam secara utuh dan berimbang antara bahan terbarukan dan yang tidak terbarukan. Langkah awal dari gagasan tersebut adalah mengintegrasikan seluruh kegiatan usaha industri di wilayah tertentu ke dalam suatu sistem (semi)



Gambar 5.14: Model utuh Integrasi Industri Kimia dan Industri Argo

tertutup dalam kegiatan industrial di ekosistem wilayah tersebut. Keberadaan sumberdaya alam tidak terbarukan berupa gas alam dan yang terbarukan berupa aneka produk tanaman di suatu wilayah sungguh merupakan anugrah tak ternilai yang keduanya harus dikelola secara benar dan bijak agar bisa memberikan kesejahteraan sebesar-besarnya bagi masyarakat di wilayah tersebut maupun wilayah lainnya.

Pengelolaan kedua bahan alam ini dapat disusun dalam suatu kesetaraan

membentuk banyak sub-sistem yang masing-masing dapat menunjukkan kekhasan prosesnya sehingga berkinerja dan memproduksi secara berkelanjutan. Model integrasi seluruh usaha industrial di suatu wilayah dapat dikemukakan dalam skema diatas. Keterkaitan dalam industri agro perlu mendapat perhatian khusus karena selama ini dijalankan tanpa memperhatikan karakteristik proses hayati yang seharusnya. Industri agro harus dirancang secara utuh mencakup multiskala ekosistem yang terlibat, yaitu ekosistem tanaman, ekosistem kebun, ekosistem kebun dan pabriknya itu sendiri. Keutuhan perancangannya akan meningkatkan kelayakan teknis, ekonomis, maupun sosialnya. Dalam rancangan industri agro ini paradigma kemandirian dan keanekaragaman merupakan kriteria

yang harus dipenuhi dengan seksama. Skema keterkaitan aneka industri agro berikut menunjukkan keseksamaan yang harus dibangun pada setiap subsistemnya.



Gambar 5.15 Model Utuh dalam Industri Argo menuju Zero Waste

Pabrik agro seharusnya bisa *zero-waste* bila terintegrasi dengan kebun dan tanaman-nya. Keterkaitan Pabrik Agro, Kebun, dan Tanaman dengan Bioreaktornya ditunjukkan dalam skema diatas. Ekosistem tanaman dibangun oleh keterkaitan tanaman dengan bioreaktornya. Bioreaktor tanaman merupakan alat proses pada tanaman yang berfungsi

memproduksi nutrisi tanaman secara mandiri menurut mekanisme *product on demand*. Struktur ruang bioreaktor tanaman dibangun oleh bahan bekas tanaman yang stabil yang memiliki bekas pipa kapiler tanaman yang akan berfungsi sebagai mikrobioreaktor tanaman. Struktur ruang *microbioreactor* tanaman akan memfasilitasi ruang untuk keberadaan aneka mikroorganisme, air dan udara yang sangat diperlukan untuk memproduksi buah, getah, bunga, bahan kimia hayati tertentu atau aneka produk biomassa lainnya yang bermanfaat bagi manusia dan bernilai ekonomis. Produktivitas tanaman sangat ditentukan oleh rekayasa ruang bioreaktornya, kemampuan mengaktifkan ruang yang empat kali lebih kecil akan menjanjikan produktivitas tanaman yang empat kali lebih besar pada potensi genetika yang dimilikinya.

6. PENUTUP

Pada tahap awal untuk perorangan sekalipun, penguasaan keunggulan keilmuan memerlukan investasi dan biaya tinggi, oleh karena itu peran institusi dan kerjasama antar institusi sangat menentukan. Kolaborasi antara institusi akademik, pemerintah, dan industri harus mampu meraih pencapaian keunggulan keilmuan yang terukur dan berkualitas, seperti peraih diploma doctoral bagi pelaku akademik, dan secara bersamaan berorientasi pada pemanfaatan sumberdaya lokal atau penciptaan lapangan kerja untuk penguatan program pemerintah, dan pengembangan proses, peralatan dan produk baru bagi industri. Oleh karena itu keikutsertaan seorang dosen dalam suatu program studi

doktoral di dalam maupun di luar negeri harus tetap merupakan bagian dari perencanaan peraih keunggulan keilmuan secara institusi.

Keberlanjutan penguasaan keunggulan keilmuan harus merupakan bagian dari pengembangan secara institusional: merupakan bagian dari kegiatan bisnis industri atau usaha; atau merupakan bagian dari pelaksanaan program pemerintah. Jaminan keberlanjutan pengembangan keunggulan keilmuan sangat berkaitan dengan raih manfaat yang dapat diciptakannya. Keterlibatan industri atau pengusaha dalam pemanfaatan hasil riset yang mantap dan matang harus didorong dan difasilitasi dengan program formal dari pemerintahan. Ketimpangan pada salah satu dari institusi pemeran kolaborasi secara langsung akan menurunkan tingkat ketercapaian dari tiga sasaran yang seharusnya dicapai. Pencapaian kualitas akademik tidak unggul, pengelolaan sumber daya alam secara mandiri tidak terjadi, dan peraih manfaatnya secara ekonomi tidak tercapai.

Kerjasama antar bidang keilmuan untuk meraih keunggulan keilmuan secara bersama harus segera dimulai. Kelinieran bidang keilmuan tidak boleh menutup peluang keanekaragaman dalam pemanfatannya. Unsur inovatif dalam penguasaan keunggulan keilmuan harus dikelola sampai tingkat kelompok penelitian.

Pengembangan program pendidikan, penelitian, dan pengabdian tidak dilakukan secara parsial dan terpisah apalagi selalu searah dari program pendidikan ke arah penelitian dan pengabdian. Keterkaitan yang kuat justru harus dilakukan dengan arah yang terbalik. Perhatian

yang kuat untuk pemecahan masalah di lapangan yang memerlukan pemecahan dari unsur keunggulan keilmuan harus digarap secara seksama sehingga lebih menyederhanakan dan memudahkan penyelenggaraan penelitian dan pendidikan di dalam institusi sehingga mencapai tingkat performansi dan efisiensi yang lebih tinggi.

Program-program kerakyatan pada tingkat paling bawah harus bisa dipenetrasi oleh hasil riset dan perencanaan dengan keunggulan keilmuan, serta dengan dorongan dan jaminan program kerja dari institusi pemerintah dan sumberdaya manusia yang berkualitas dari institusi akademik. Dengan demikian keunggulan keilmuan akan mampu mendapatkan peluang pemanfatannya secara cepat dan tepat.

Penerapan keunggulan keilmuan tidak harus selalu kearah hilir baik berupa pengembangan proses, perangkat peralatan, maupun produk baru karena menjanjikan peningkatan nilai tambah, melainkan juga harus dilakukan kearah hulu untuk menjamin kesinambungan dan peningkatan nilai manfaat. Ketersediaan dan keanekaragaman yang dimiliki sumber di hulu adalah investasi infrastruktur yang paling murah.

Bagi pengembang keunggulan keilmuan, pertanian adalah bidang penerapan. Tuntutan kemandirian pangan dan kemandirian energi solusinya ada dalam bidang pertanian, sejalan dengan potensi keanekaragaman hayati yang dimiliki alam Indonesia. Tuntutan pengelolaan pertanian yang lebih cermat dan seksama memerlukan keunggulan keilmuan yang nyata. Teknik penanaman dan teknik pemanenan tidak hanya memerlukan mekanisasi tetapi juga robotik.

Revitalisasi di perkebunan dan kebun rakyat perlu segera dilakukan karena tuntutan kemandirian pangan, energi dan produk unggulan industri. Produktivitas yang berkelipatan hanya bisa dicapai dengan perubahan paradigmatik pertanian. Akhirnya keterpaduan industri kimia dan pertanian sesuai dengan keseimbangan ekosistem multiskala akan merupakan perangkat produktivitas yang paling bisa diandalkan.

7. UCAPAN TERIMA KASIH

Pertama-tama saya memanjatkan puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala karunia-Nya yang telah dilimpahkan hingga saat ini. Pada hari yang berbahagia ini, perkenankanlah saya menyampaikan kepada yang terhormat Rektor dan Pimpinan ITB, Pimpinan dan seluruh Anggota Forum Guru Besar ITB, atas kesempatan yang diberikan kepada saya untuk menyampaikan orasi ilmiah di hadapan para hadirin sekalian pada forum yang terhormat ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada seluruh sivitas akademika Institut Teknologi Bandung yang telah membesarkan dan membangun karakter penulis serta selalu memberikan inspirasi kepada penulis untuk terus maju, berkembang dan bermanfaat.

8. DAFTAR PUSTAKA

- Mubiar PURWASASMITA, Contribution a l'etude des Reacteurs gaz-liquid a lit fixe fonctionnant a co-courant vers le bas a fortes vitesses du gaz et du liquid – Hydrodynamique, transfert de matiere et de chaleur pour des liquides aqueux et organiques, These pour obtenir le

Diplome de Doctorat Specialite Genie des Procedes a L'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy – France, le 21 Janvier 1985.

- N. Midoux · B. I. Morsi · M. Purwasasmita · A. Laurent · J.C. Charpentier, Interfacial Area and Liquid-Side Mass Transfer Coefficient in Trickle-Bed Reactors Operating With Organic Liquids, Chemical Engineering Science, 39, Dec 1984, 781-794.
- Gabriel Wild, Mubiar Purwasasmita, Jean-Claude Charpentier, Holger Martin, Zum Flussigkeitsinhalt und zum Wärmeübergang in Rieselbettreaktoren bei hoher Wechselwirkung des Gases und der Flussigkeit, Chemie Ingenieur Technik, Jan 1986, 142-143.
- Mubiar Purwasasmita dan Khairul Hadi, Model Hidrodinamika Bioreaktor Tanaman: Konsep Permeabilitas, JurnalReaktor Vol. 15 No. 3, April 2015, Hal. 154-164, <http://ejournal.undip.ac.id>, (terakreditasi Dikti No. 66b/DIKTI/Kep/2011)
- Mubiar Purwasasmita, Penerapan Intensifikasi Proses pada Olah Lahan Membuka Peluang Baru Peningkatan Produktivitas Pertanian: Studi kasus SRI-System of Rice Intensification, Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia, 2006, Palembang, 19-20 Juli 2006 ISBN 979-97893-0-3
- Mubiar Purwasasmita, Kabelan Kunia, Mikroorganisme Lokal Sebagai Pemicu Siklus Kehidupan Dalam Bioreaktor Tanaman, Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia, 2009, Bandung, 19-20 Oktober 2009, ISBN 978-979-983300-1-2

- Mubiar Purwasasmita, Fenomena Pembusaaan dalam Bioreaktor, Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia 2015 Sustainable Energy and Mineral Processing for National Competitiveness, Yogyakarta, 12-13 Oktober 2015 ISSN
- Mubiar Purwasasmita, Pembentukan Gelembung Mikro dan Karakteristiknya, Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia 2015 Sustainable Energy and Mineral Processing for National Competitiveness, Yogyakarta, 12-13 Oktober 2015 ISSN

CURRICULUM VITAE



Nama : **Prof. Mubiar PURWASASMITA**
 Tanggal Lahir : Sumedang, 27 Desember 1951
 Kel. Keilmuan : Perencanaan dan Pengembangan Proses Teknik Kimia
 Alamat kantor : Jl. Ganesa 10 Bandung- 40132
 Nama Istri : Mintarsih binti IYON
 NIP/NIDN : 195112271978021.001/0027125101

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

- Diplome de Doctorat du Genie Chimique, Specialite Genie des Procedes, Ecole Nationale Superieure des Industries Chimiques, Institut Nationale Polytechnique de Lorraine ENSIC/INPL, Nancy, Prancis, 21-01-1985.
- Diplome d'Etudes Approfondies, Specialite Genie Chimique, Ecole Nationale Superieure des Industries Chimiques, Institut Nationale Polytechnique de Lorraine ENSIC/INPL, Nancy, Prancis, 23-11-1982.
- Sarjana Teknik Kimia (Ir), Institut Teknologi Bandung (ITB), 1975

II. RIWAYAT KERJA di ITB

- Staf Pengajar Fakultas Teknologi Industri ITB, 1978-Sekarang.
- Pembantu Dekan III Fakultas Teknologi Industri ITB (1992)
- Pembantu Rektor Bidang Perencanaan, Pengembangan, dan Pengawasan Institut Teknologi Bandung, ITB (1992-1997)

- Ketua Lembaga Pengabdian kepada Masyarakat Institut Teknologi Bandung, LPM-ITB (1997-2000).

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

- CPNS, III/A, 01/02/1978
- Penata Muda, III/A, 01/08/1979
- Penata Muda TK 1, III/B, 01/10/1980
- Penata, III/C, 01/10/1985
- Penata TK I, III/D, 01/10/1987
- Pembina, IV/A, 01/04/1990
- Pembina TKI, IV/B, 01/10/1995
- Pembina Utama Muda, IV/C, 01/10/2016

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

- Asisten Ahli Madya, 1 Pebruari 1978
- Asisten Ahli, 1 Oktober 1980
- Lektor Muda, 1 Oktober 1985
- Lektor Madya, 1 Oktober 1987
- Lektor, 1 April 1990
- Lektor Kepala Madya, 1 Mei 1995
- Lektor Kepala, 1 Januari 2001
- Profesor/Guru Besar, 1 Oktober 2016

V. KEGIATAN PENELITIAN

- Mengembangkan bahan tahan api (refraktori) asal lokal untuk

membuat reaktor gasifikasi (1975-1978)

- Mengembangkan model reaktor kimia baru : Reaktor unggun tetap dengan aliran gas dan cairan yang sangat cepat searah ke bawah dengan butir katalis kecil untuk cairan organic maupun air (Disertasi Doktor 1980-1985)
- Studi Penyediaan Air Baku Skala Industri PT Pupuk Kujang (1979 dan 1985)
- Mengembangkan Sistem Pengolah Sampah Terpadu dengan berbagai alat yang dikembangkan sendiri (1987-1992).
- Mengembangkan dan merancang alat ekstraksi bahan alam hayati untuk minyak atsiri, pestisida alami, dan minyak nabati (1988-1990)
- Mengembangkan Teknologi Bersih (Ecotechnology) untuk tambak udang superintensif, dan usaha pertanian terpadu (1997-2000)
- Mengembangkan Sistem Pabrik Skala Kecil dengan penerapan tersebar berbasis komunitas : Pabrik gula mini, Pabrik air minum, dan Pabrik pengolahan ikan (1999-2000)
- Merancang dan melaksanakan penghutanan kembali lahan kritis berbasis masyarakat setempat (2003-2005)
- Menerapkan olah lahan pertanian sebagai bioreaktor tanaman, *System of Rice Intensification* (2005-2007)
- Menerapkan Intensifikasi Proses dalam bidang pertanian : SRI Organik Indonesia, Tani dalam Pot atau Polibag, Tani Kota, Revitalisasi Perkebunan, Percepatan pertumbuhan tanaman keras, Meningkatkan produktivitas tanaman padi, dan

Meningkatkan produktivitas tanaman Singkong (2007-2012)

- Mengembangkan industri agro berbasis pemberdayaan masyarakat (2010-2014)
- Integrasi dalam suatu sistem semitertutup industri kimia dan industri agro (2010-2014)
- Kajian Fenomenologi Nilai untuk membangun kepekaan aspirasi guna meningkatkan potensi manfaat iptek (1983-2003)
- Pengembangan Model Utuh Kemanusiaan Multiskala untuk Skala Individu, Skala Komunitas Kebangsaan, dan Skala Peradaban Manusia (2005-2015)

VI. PUBLIKASI

- Bahrumisyah, M. Purwasasmita, I G. Wenten, Ultrafiltrasi untuk Klarifikasi Nira Tebu: Transmisi Sukrosa pada Berbagai Kondisi Operasi, Seminar Teknik Kimia Soehadi Reksowardojo 1999, Bandung, Indonesia, 19-20 Oktober; 10/1999
- M.Purwasasmita, D.Kurnia, F.C.Mandias, Khoiruddin, I. G. Wenten, Beer dealcoholization using non-porous membrane distillation, Food and Bioproducts Processing 04/2015; 94:180-186. DOI:10.1016/j.fbp.2015.03.001
- Mubiar Purwasasmita, Petrus Benny Juwono, Aysha Mareta Karlina, Khoiruddin, I Gede Wenten, Non-dissolved Solids Removal during Palm Kernel Ultrafiltration, 12/2014;14(4). DOI:10.14710/reaktor.14.4.284-290
- Mubiar Purwasasmita, I Gede Wenten, Non Dispersive Chemical Deacidification of Crude Palm Oil in Hollow Fiber Membrane

Contactora, Journal of Engineering and Technological Sciences 05/2015;47(4):426-446. DOI:10.5614/j.eng.technol.sci.2015.47.4.6

- Mubiar Purwasasmita, Petrus Benny Juwono, Aysha Mareta Karlina, Khoiruddin, and I Gede Wenten, Non-Dissolved Solids Removal During Palm Kernel Oil Ultrafiltration, Jurnal Reaktor, Vol. 14 No. 4, Oktober 2013, ISSN: 0852-0798, <http://ejournal.undip.ac.id>, (terakreditasi Dikti No. 66b/DIKTI/Kep/2011)"
- Mubiar Purwasasmita, Konsep Satuan Hilang Energi Dalam Aliran Fluida, Seminar Nasional Instrumentasi, Kontrol dan Otomasi (SINKO) 2015, Bandung, 10-11 Desember 2015
- Mubiar Purwasasmita, Aliran Fluida Lewat Partikel Tunggal dan Unggun Diam (Mekanika Fluida, Perpindahan Massa dan Panas), Seminar Nasional Instrumentasi, Kontrol dan Otomasi (SINKO) 2015, Bandung, 10-11 Desember 2015
- Mubiar Purwasasmita, Danu Ariono, Dwiwahju Sasongko, dan Priyono Kusumo, Pembentukan Tetesan Pada Kontak Cair-Cair Dalam Kolom Isian, Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia, 2009, Bandung, 19-20 Oktober 2009, ISBN 978-979-983300-1-2
- Mubiar Purwasasmita, Membangun Kemandirian Pangan Berbasis Sumberdaya Lokal, Seminar Teknik Kimia Soehadi Reksowardojo, Aula Barat ITB, 17-18 Desember 2007, ISSN 0854-7769
- Mubiar Purwasasmita, Okky Indra Putra dan E. Hafez Hossen, Kompos Generator Siklus Ruang Bioreaktor Tanaman, Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia, 2009, Bandung, 19-20 Oktober 2009, ISBN 978-979-983300-1-2

- Mubiar Purwasasmita, Aspek Lingkungan dalam Pengembangan Industri Kimia Berbasis Agro, Seminar Nasional Industri Kimia Berbasis Agro, Pekabaru, Riau, 21 Juli 2011
- Mubiar Purwasasmitra, Intensifikasi Proses Tanaman Meningkatkan Produktivitas dan Kualitas Produk Tanaman dengan Pengembangan Bioreaktor Tanaman, International Seminar on Chemical Engineering Soehadi Reksowardojo, 2011, Aula Barat & Aula Timur ITB, Bandung, Indonesia 5-7 October 2011, ISBN 978-979-98300-1-2
- Mubiar Purwasasmita, Alik Sutaryat, Padi SRI Organik Indonesia, Penerbit Penebar Swadaya, Jakarta, 2014 (Buku edisi revisi)
- Mubiar Purwasasmita, Yth. Bapak Presiden, Revolusi Pertanian, dalam buku Yth. Bapak Presiden, Pesan untuk Indonesia Sejahtera dan Berkelanjutan, Juni 2014, Penerbit PT. Gramedia, Jakarta

VII. PENGHARGAAN

- Satyalancana Karya Satya 10 Tahun, 1996
- Satyalancana Karya Satya 20 Tahun, 2000
- Satyalancana Karya Satya ITB 25 Tahun, 2006
- Satyalancana Karya Satya 30 Tahun, 2009

VIII. SERTIFIKASI

- Sertifikasi Dosen, 2010, Kementerian Pendidikan Nasional Republik Indonesia, Sertifikat Dosen No. 08104903918.

