



Y A Y A S A N P E R G U R U A N C I K I N I
I N S T I T U T S A I N S D A N T E K N O L O G I N A S I O N A L

Jl. Moh. Kahfi II, Bhumi Srengseng Indah, Jagakarsa, Jakarta Selatan 12640 Telp. (021) 727 0090, 787 4645,
787 4647 Fax. (021) 786 6955, <http://www.istn.ac.id> E-mail: rektorat@istn.ac.id

SURAT PENUGASAN TENAGA PENDIDIK

Nomor : 159/02-C.02/III/2025

SEMESTER GENAP TAHUN AKADEMIK 2024/2025

N a m a	: Munawarohthus Sholikha, S.Si., M.Si	Status : Tetap.
Nik	: 01.141282	Program Sarjana Prodi Farmasi
Jabatan Akademik	: Lektor	
Untuk melaksanakan tugas sebagai berikut:		

Bidang	Perincian Kegiatan	Tempat	Jam/ Minggu	Kredit (SKS)	Keterangan
I PENDIDIKAN DAN PENGAJARAN	MENGAJAR DI KELAS (KULIAH/RESPONSI DAN LABORATORIUM)				
	Biokimia (A)	R-HC4		1	Senin, 13:00 s.d 15:10
	Analisis Sediaan Farmasi (A), Praktikum	R-HC7. Lab		1,3	Senin, 08:00 s.d 13:00
	Analisis Sediaan Farmasi (C), Praktikum	R-H.A, Lab		1,3	Senin, 08:00 s.d 13:00
	Analisis Sediaan Farmasi (K), Praktikum	R-HC7. Lab		1,3	Senin, 17:00 s.d 21:00
	Analisis Sediaan Farmasi (L), Praktikum	R-HC8, Lab		1,3	Sabtu, 08:00 s.d 13:00
	Bimbingan Skripsi		3 Jam/Minggu	1	
	Menguji Tugas Akhir		3 Jam/Minggu	1	
	Pengembangan Bahan Ajar		3 Jam/Minggu	1	
II PENELITIAN					
	B. MENDUDUKI JABATAN PERGURUAN TINGGI				
	Kepala Laboratorium Farmasi (struktural)		9 Jam/Minggu	3	
III PENGABDIAN DAN MASYARAKAT					
	Pelatihan dan Penyuluhan		3 Jam/Minggu	1	
IV UNSUR UNSUR PENUNJANG					
	Pertemuan Ilmiah		3 Jam/Minggu	1	
Jumlah Total				16.1	

Kepada yang bersangkutan akan diberikan gaji/honorarium sesuai dengan peraturan penggajian yang berlaku di Institut Sains dan Teknologi Nasional
Penugasan ini berlaku dari tanggal 03 Maret 2025 sampai dengan tanggal 31 Agustus 2025

Tembusan :

1. Wakil Rektor Bidang Akademik - ISTN
2. Wakil Rektor Bidang Sumber Daya - ISTN
3. Ka. Biro Sumber Daya Manusia - ISTN
4. Kepala Program Studi Farmasi Fak. Farmasi
5. Arsip



Devina Ingrid Anggraini, S.Si., M.Si., Leonardo Paksi Sukoco, S.Tr.T., Nur Afriyanti, M.Si., Evanisia More, S.Pd., M.Si., Munawarohthus Sholikha, S.Si., M.Si., Rabiatul Adawiyah, S.Farm., M.Farm., Kiki Rizki Handayani, M.Farm., Nur Hidayah, MT., Nur Rahmawati, S.Si., M.Farm., dan Silvester Maximus Tulandi, S.Farm., M.Si.

Teknologi Pemisahan

dalam Industri Kimia



Teknologi Pemisahan dalam Industri Kimia

Devina Ingrid Anggraini, S.Si., M.Si.

Leonardo Paksi Sukoco, S.Tr.T.

Nur Afriyanti, M.Si.

Evanisia More, S.Pd., M.Si.

Munawarohthus Sholikha, S.Si., M.Si.

Rabiatul Adawiyah, S.Farm., M.Farm.

Kiki Rizki Handayani, M.Farm.

Nur Hidayah, MT.

Nur Rahmawati, S.Si., M.Farm.

Silvester Maximus Tulandi, S.Farm., M.Si.

PT BUKULOKA LITERASI BANGSA

Anggota IKAPI: No. 645/DKI/2024



Teknologi Pemisahan dalam Industri Kimia

Penulis : Devina Ingrid Anggraini, S.Si., M.Si., Leonardo Paksi Sukoco, S.Tr.T., Nur Afriyanti, M.Si., Evanisia More, S.Pd., M.Si., Munawarohthus Sholikha, S.Si., M.Si., Rabiatul Adawiyah, S.Farm., M.Farm., Kiki Rizki Handayani, M.Farm., Nur Hidayah, MT., Nur Rahmawati, S.Si., M.Farm., dan Silvester Maximus Tulandi, S.Farm., M.Si.

ISBN : 978-634-250-005-7 (PDF)

Penyunting Naskah : Zahra Nabilla Putri, S.S.

Tata Letak : Zahra Nabilla Putri, S.S.

Desain Sampul : Al Dial

Penerbit

Penerbit PT Bukuloka Literasi Bangsa

Distributor: PT Yapindo

Kompleks Business Park Kebon Jeruk Blok I No. 21, Jl. Meruya Ilir Raya No.88, Desa/Kelurahan Meruya Utara, Kec. Kembangan, Kota Adm. Jakarta Barat, Provinsi DKI Jakarta, Kode Pos: 11620

Email : penerbit.blb@gmail.com

Whatsapp : 0878-3483-2315

Website : bukuloka.com

© Hak cipta dilindungi oleh undang-undang

Berlaku selama 50 (lima puluh) tahun sejak ciptaan tersebut pertama kali dilakukan pengumuman.

Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit. Ketentuan Pidana Sanksi Pelanggaran Pasal 2 UU Nomor 19 Tahun 2002 Tentang Hak Cipta.

Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 ayat (1) atau Pasal 49 ayat (1) dan ayat (2) dipidana dengan pidana penjara masing-masing paling singkat 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp1.000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (Tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah).

Barang siapa dengan sengaja menyerahkan, 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 Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas tersusunnya buku ajar *Teknologi Pemisahan dalam Industri Kimia*. Buku ini dapat digunakan secara luas oleh masyarakat umum yang ingin memahami berbagai teknik pemisahan yang menjadi dasar penting dalam proses industri kimia. Berbagai topik dibahas mulai dari prinsip dasar hingga aplikasi teknologi pemisahan yang sering digunakan di berbagai sektor industri.

Dengan menyajikan materi yang terstruktur dan disertai penjelasan yang mudah dipahami, buku ini diharapkan dapat menjadi pegangan bermanfaat bagi masyarakat umum. Harapan kami, buku ini tidak hanya memperluas wawasan pembaca, tetapi juga mendorong pemanfaatan teknologi pemisahan yang lebih efisien dan berkelanjutan di berbagai bidang.

Jakarta, Juli 2025

Tim Penyusun

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI.....	iv
Bab 1: Teknologi Pemisahan.....	1
1.1 Pengertian Teknologi Pemisahan	1
1.2 Tujuan dan Manfaat Teknologi Pemisahan.....	3
1.3 Klasifikasi Proses Pemisahan.....	5
1.4 Aplikasi Teknologi Pemisahan.....	8
1.5 Latihan Soal.....	11
BAB 2: Dasar-Dasar Termodinamika dan Transportasi dalam Proses Pemisahan.....	13
2.1 Pengertian Termodinamika dan Transportasi.....	13
2.2 Hukum-Hukum Termodinamika yang Relevan	16
2.3 Prinsip Transportasi Massa dan Energi	19
2.4 Latihan Soal.....	21
Bab 3: Destilasi	23
3.1 Pengertian dan Prinsip Destilasi.....	23
3.2 Jenis-jenis Destilasi	27
3.3 Peralatan Destilasi	30
3.4 Latihan Soal.....	33
Bab 4: Ekstraksi Cair-Cair	34
4.1 Pengertian Ekstraksi Cair-Cair.....	34
4.2 Prinsip Dasar Ekstraksi Cair-Cair	36
4.3 Faktor-Faktor yang Memengaruhi Proses Ekstraksi	38
4.4 Aplikasi Ekstraksi Cair-Cair	41

4.5 Prosedur Umum Ekstraksi Cair-Cair.....	44
4.6 Latihan Soal.....	46
BAB 5: Ekstraksi Padat-Cair (<i>Leaching</i>)	48
5.1 Pengertian <i>Leaching</i>	48
5.2 Prinsip Dasar <i>Leaching</i>	54
5.3 Teknik dan Peralatan <i>Leaching</i>	57
5.4 Latihan Soal.....	63
BAB 6: Adsorpsi.....	64
6.1 Pengertian Adsorpsi	64
6.2 Jenis-Jenis Adsorpsi	66
6.3 Isoterm Adsorpsi	69
6.4 Latihan Soal.....	72
Bab 7: Kromatografi.....	73
7.1 Pengertian Kromatografi	73
7.2 Prinsip Dasar Kromatografi.....	75
7.3 Jenis-Jenis Kromatografi.....	77
7.4 Aplikasi Kromatografi.....	80
7.5 Faktor-Faktor yang Memengaruhi Pemisahan	83
7.6 Latihan Soal.....	86
Bab 8: Teknologi Pemisahan Membran.....	87
8.1 Pengertian Teknologi Pemisahan Membran.....	87
8.2 Jenis-jenis Proses Membran	89
8.3 Bahan dan Struktur Membran	92
8.4 Aplikasi Teknologi Membran	95
8.5 Keuntungan dan Keterbatasan Teknologi Membran.....	98
8.6 Latihan Soal.....	100

BAB 9: Kristalisasi dan Sublimasi	102
9.1 Pengertian Kristalisasi.....	102
9.2 Jenis-Jenis Kristalisasi.....	107
9.3 Tahapan Proses Kristalisasi.....	111
9.4 Faktor yang Memengaruhi Kristalisasi	113
9.5 Aplikasi Kristalisasi	118
9.6 Pengertian Sublimasi.....	121
9.7 Prinsip Dasar dan Termodinamika.....	126
9.11 Latihan Soal.....	130
BAB 10: Evaluasi dan Integrasi Proses Pemisahan.....	131
10.1 Pengertian Evaluasi Proses Pemisahan	131
10.2 Parameter Evaluasi	134
10.3 Teknik Evaluasi.....	137
10.4 Integrasi Proses Pemisahan	140
10.5 Latihan Soal.....	143
PROFIL PENULIS	144
DAFTAR PUSTAKA.....	154

Bab 1: Teknologi Pemisahan

1.1 Pengertian Teknologi Pemisahan

Teknologi pemisahan merupakan bagian penting dalam bidang teknik kimia yang berfokus pada pengembangan dan penerapan berbagai teknik untuk memisahkan komponen-komponen dalam suatu campuran, baik dalam bentuk gas, cair, maupun padat. Proses ini didasarkan pada perbedaan karakteristik fisika atau kimia antara komponen-komponen tersebut, seperti titik didih, kelarutan, ukuran partikel, massa molekul, kepolaran, tekanan uap, dan sifat magnetik. Teknologi pemisahan tidak hanya digunakan dalam industri kimia, tetapi juga dalam berbagai sektor lain seperti farmasi, makanan, minuman, pengolahan air, energi, dan lingkungan.

Pada prinsipnya, setiap teknik pemisahan bertujuan untuk memperoleh satu atau lebih komponen dari campuran dalam bentuk yang lebih murni atau lebih terkonsentrasi, tergantung pada kebutuhan. Dalam proses industri, pemisahan sering kali menjadi tahap kritis yang menentukan efisiensi, biaya produksi, dan kualitas produk akhir. Oleh karena itu, pemilihan teknologi pemisahan yang tepat sangat bergantung pada sifat campuran, skala proses, serta spesifikasi produk yang diinginkan.

Teknologi pemisahan mencakup berbagai teknik yang dapat diklasifikasikan berdasarkan prinsip dasar yang digunakan. Misalnya, distilasi memanfaatkan perbedaan titik didih untuk

memisahkan komponen cair, sementara filtrasi digunakan untuk memisahkan partikel padat dari cairan atau gas berdasarkan ukuran partikel. Kromatografi bekerja berdasarkan perbedaan afinitas komponen terhadap fase diam dan fase gerak, sedangkan ekstraksi cair-cair bergantung pada perbedaan kelarutan antara dua pelarut yang tidak saling bercampur. Selain itu, terdapat juga proses membran seperti osmosis balik dan ultrafiltrasi yang menggunakan tekanan dan ukuran molekul sebagai dasar pemisahan.

Dalam praktiknya, teknologi pemisahan dapat dilakukan secara *batch* atau kontinu, dan dapat melibatkan satu tahap atau beberapa tahap yang disusun secara seri maupun paralel. Untuk campuran yang sangat kompleks, sering kali digunakan kombinasi dari beberapa teknik agar diperoleh hasil yang lebih efisien. Misalnya, dalam pengolahan minyak bumi, digunakan serangkaian proses pemisahan seperti distilasi atmosferik, distilasi vakum, dan ekstraksi pelarut untuk memperoleh fraksi-fraksi bahan bakar dan produk kimia lainnya.

Seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan kebutuhan industri yang semakin kompleks, teknologi pemisahan terus mengalami inovasi, baik dalam desain peralatan, penggunaan material baru, maupun efisiensi energi. Teknologi yang ramah lingkungan dan hemat energi menjadi fokus utama dalam pengembangan sistem pemisahan modern. Salah satu contohnya adalah penggunaan membran polimer yang lebih selektif dan tahan terhadap kondisi ekstrem, atau pengembangan teknik adsorpsi yang lebih cepat dan dapat digunakan ulang.

Pemahaman mendalam tentang teknologi pemisahan sangat penting dalam merancang proses produksi yang efisien dan berkelanjutan. Dengan teknologi ini, bahan mentah dapat dimurnikan, zat beracun dapat dipisahkan dari limbah, dan produk bernilai tinggi dapat diekstrak dari campuran yang rumit. Oleh karena itu, teknologi pemisahan memainkan peran strategis dalam menjawab tantangan industri modern yang menuntut efisiensi, kualitas, dan keberlanjutan dalam pengolahan berbagai jenis bahan.

1.2 Tujuan dan Manfaat Teknologi Pemisahan

Teknologi pemisahan merupakan salah satu pilar penting dalam proses kimia, bioteknologi, dan industri secara umum karena memungkinkan isolasi, pemurnian, dan pengolahan komponen dari suatu campuran menjadi bentuk yang lebih bermanfaat dan mudah ditangani. Tujuan utamanya adalah memperoleh zat murni atau fraksi tertentu dari campuran kompleks, sehingga dapat digunakan lebih lanjut untuk keperluan produksi, riset, atau aplikasi akhir. Dalam praktiknya, teknologi pemisahan tidak hanya bertujuan untuk memperoleh hasil akhir yang diinginkan, tetapi juga untuk meningkatkan efisiensi dan selektivitas dalam berbagai tahap proses produksi.

Salah satu manfaat utama dari penerapan teknologi pemisahan adalah pemurnian bahan baku. Banyak bahan alam atau hasil industri yang tersedia dalam bentuk campuran dan tidak dapat langsung digunakan tanpa melalui proses pemisahan. Misalnya,

dalam industri farmasi, senyawa aktif yang dihasilkan dari ekstrak tanaman perlu dipisahkan dari senyawa lain yang tidak memiliki aktivitas biologis. Proses ini melibatkan berbagai teknik seperti ekstraksi, distilasi, kromatografi, atau filtrasi yang dirancang untuk menghasilkan zat dengan kemurnian tinggi yang memenuhi standar kualitas.

Selain itu, teknologi pemisahan sangat diperlukan dalam tahap akhir reaksi kimia untuk memisahkan produk utama dari zat pengotor atau sisa reaktan yang tidak bereaksi. Dalam konteks ini, pemisahan berfungsi tidak hanya untuk menghasilkan produk yang layak pakai, tetapi juga untuk mencegah kontaminasi, meningkatkan rendemen, dan memungkinkan daur ulang komponen yang tidak terpakai. Sebagai contoh, dalam produksi bahan kimia organik, hasil reaksi sering kali disertai campuran zat antara atau produk samping yang harus dihilangkan sebelum produk utama dapat dimurnikan dan digunakan.

Manfaat lain yang sangat penting dari teknologi pemisahan adalah dalam pengelolaan limbah. Limbah industri, baik cair maupun gas, sering kali mengandung zat berbahaya yang tidak boleh dibuang langsung ke lingkungan. Melalui teknologi pemisahan seperti adsorpsi, presipitasi, atau membran, zat-zat pencemar dapat dipisahkan, diolah, atau didaur ulang sehingga dampaknya terhadap lingkungan dapat diminimalkan. Dalam industri minyak dan gas, misalnya, pemisahan air dan minyak dari limbah produksi menjadi bagian penting dari manajemen lingkungan yang bertanggung jawab.

Penerapan teknologi pemisahan tidak hanya terbatas pada skala industri besar, tetapi juga digunakan dalam berbagai aplikasi sehari-hari, seperti pengolahan air bersih, pemisahan gas rumah tangga, hingga proses fermentasi dalam produksi makanan. Di bidang energi, teknologi ini dimanfaatkan dalam pemisahan komponen bahan bakar, seperti pemurnian bioetanol atau pemisahan hidrogen dari campuran gas lainnya untuk keperluan energi bersih.

Dengan demikian, teknologi pemisahan memberikan kontribusi besar terhadap peningkatan efisiensi produksi, kualitas produk, dan pengurangan limbah. Ia berperan sebagai jembatan antara proses awal dan akhir dalam berbagai sistem produksi, memastikan bahwa komponen yang diinginkan dapat diperoleh dalam bentuk yang murni, stabil, dan layak untuk dimanfaatkan lebih lanjut. Dalam dunia industri yang semakin menuntut efisiensi dan keberlanjutan, penguasaan terhadap teknologi pemisahan menjadi salah satu kunci utama dalam mencapai proses produksi yang lebih ramah lingkungan, hemat energi, dan bernilai tambah tinggi.

1.3 Klasifikasi Proses Pemisahan

Proses pemisahan merupakan bagian integral dalam berbagai kegiatan ilmiah dan industri, karena memungkinkan pemurnian, analisis, dan pengolahan bahan dengan efisiensi tinggi. Pemisahan dilakukan untuk memisahkan komponen-komponen dalam suatu campuran agar diperoleh zat murni atau fraksi tertentu sesuai

kebutuhan. Klasifikasi proses pemisahan secara umum didasarkan pada sifat fisika dan kimia komponen yang ingin dipisahkan, yang mencakup ukuran partikel, titik didih, kelarutan, dan afinitas terhadap fase tertentu. Setiap teknik memiliki prinsip kerja yang khas dan digunakan dalam konteks yang berbeda tergantung pada sifat campuran yang dihadapi.

Pemisahan berdasarkan ukuran partikel adalah salah satu teknik paling dasar dan umum digunakan, terutama dalam pemisahan campuran heterogen. Filtrasi, misalnya, digunakan untuk memisahkan padatan dari cairan atau gas dengan menggunakan media saring yang hanya memungkinkan partikel berukuran tertentu untuk lewat. Teknik ini banyak diaplikasikan dalam laboratorium, pengolahan air, serta industri kimia. Sedimentasi memanfaatkan gaya gravitasi untuk mengendapkan partikel padat dalam cairan, sehingga padatan dan cairan dapat dipisahkan setelah terjadi pengendapan. Dalam skala lebih besar atau pada partikel sangat halus, digunakan sentrifugasi, yaitu teknik yang memanfaatkan gaya sentrifugal untuk mempercepat proses pemisahan. Sentrifugasi sangat efektif untuk memisahkan campuran dengan perbedaan massa jenis kecil, seperti dalam pemisahan komponen darah atau mikroorganisme dari media cair.

Distilasi merupakan teknik pemisahan berdasarkan perbedaan titik didih komponen dalam campuran cair. Campuran dipanaskan hingga salah satu komponen menguap, kemudian uap tersebut dikondensasikan kembali menjadi cairan murni. Distilasi sederhana digunakan untuk memisahkan dua cairan dengan

perbedaan titik didih yang signifikan, sedangkan distilasi fraksional digunakan untuk campuran dengan komponen yang memiliki titik didih yang berdekatan. Teknik ini sangat penting dalam industri minyak bumi, produksi minuman beralkohol, serta pemurnian pelarut organik. Distilasi juga digunakan untuk memperoleh air murni dari air laut atau air limbah melalui proses desalinasi.

Ekstraksi adalah teknik pemisahan berdasarkan perbedaan kelarutan komponen dalam dua pelarut yang tidak saling bercampur, biasanya air dan pelarut organik. Komponen yang lebih larut dalam salah satu pelarut akan berpindah ke fase tersebut, memungkinkan pemisahan dari komponen lain yang tetap tinggal dalam pelarut awal. Ekstraksi cair-cair banyak digunakan dalam bidang farmasi, kimia analitik, serta industri makanan dan kosmetik. Teknik ini memungkinkan isolasi senyawa aktif dari bahan alam atau campuran sintetis tanpa merusak strukturnya, dan sering menjadi langkah awal dalam proses pemurnian sebelum tahap pemisahan lanjutan dilakukan.

Kromatografi adalah teknik pemisahan yang didasarkan pada perbedaan afinitas komponen terhadap dua fase, yaitu fase diam dan fase gerak. Campuran dialirkan melalui fase diam menggunakan fase gerak, dan karena setiap komponen memiliki afinitas yang berbeda terhadap kedua fase, mereka akan bergerak dengan kecepatan berbeda, sehingga terpisah. Kromatografi memiliki banyak variasi, seperti kromatografi kertas, lapis tipis, cair kinerja tinggi (HPLC), dan gas (GC), yang masing-masing disesuaikan dengan jenis sampel dan kebutuhan analisis. Kromatografi sangat penting dalam ilmu

kimia, biokimia, dan farmasi untuk analisis senyawa kompleks, kontrol mutu, serta riset senyawa aktif dalam produk alami.

Pemilihan teknik pemisahan yang tepat ditentukan oleh sifat fisik dan kimia campuran yang akan dipisahkan, serta tujuan akhir dari proses tersebut. Dalam banyak kasus, lebih dari satu teknik digunakan secara berurutan untuk mencapai tingkat kemurnian yang diinginkan. Misalnya, suatu senyawa dapat diekstraksi terlebih dahulu, kemudian dipisahkan lebih lanjut dengan kromatografi, dan akhirnya dimurnikan dengan distilasi. Strategi kombinatorik ini dikenal sebagai proses pemurnian bertahap, dan merupakan praktik umum dalam berbagai bidang, mulai dari laboratorium riset hingga industri manufaktur skala besar.

Dengan memahami prinsip dan klasifikasi proses pemisahan, para profesional di bidang sains dan teknologi dapat merancang sistem pemrosesan yang lebih efisien, hemat energi, dan ramah lingkungan. Teknik-teknik ini tidak hanya penting dalam menghasilkan produk berkualitas tinggi, tetapi juga dalam mendukung inovasi, pengembangan teknologi baru, serta pengelolaan limbah dan sumber daya alam secara lebih bijaksana. Pemisahan yang tepat memungkinkan pemanfaatan bahan secara optimal dan berkelanjutan di berbagai sektor kehidupan.

1.4 Aplikasi Teknologi Pemisahan

Teknologi pemisahan memainkan peran fundamental dalam berbagai proses industri karena kemampuannya untuk memisahkan,

memurnikan, atau mengonsentrasikan komponen tertentu dari campuran kompleks. Proses ini melibatkan prinsip-prinsip fisika dan kimia, seperti perbedaan ukuran partikel, titik didih, kelarutan, muatan listrik, atau afinitas terhadap pelarut atau fase tertentu. Aplikasi teknologi ini sangat luas dan menjadi bagian tak terpisahkan dalam produksi, pengolahan, dan pengawasan mutu produk di berbagai sektor.

Dalam industri kimia dan farmasi, teknologi pemisahan digunakan untuk memperoleh senyawa murni dari campuran reaksi, membuang pengotor, serta memisahkan zat aktif dari bahan pembawa. Proses seperti distilasi, kromatografi, ekstraksi cair-cair, filtrasi, dan kristalisasi secara rutin diterapkan untuk menjamin bahwa produk akhir memiliki tingkat kemurnian dan konsistensi yang tinggi. Dalam pembuatan obat, misalnya, pemisahan zat aktif dari campuran reaksi kimia sangat krusial agar dosis obat yang dihasilkan tepat dan aman untuk dikonsumsi. Selain itu, pemisahan juga digunakan dalam tahap analisis laboratorium untuk mengidentifikasi dan mengukur kadar zat dalam sampel, baik sebagai bagian dari pengendalian mutu maupun riset pengembangan obat baru.

Di industri makanan dan minuman, teknologi pemisahan berperan dalam proses seperti pemurnian air, ekstraksi senyawa rasa dan aroma, pemisahan protein, serta penghilangan partikel padat dari cairan. Proses filtrasi digunakan untuk menjernihkan jus buah, sementara sentrifugasi dapat memisahkan krim dari susu. Teknik membran seperti ultrafiltrasi dan reverse osmosis memungkinkan

pemisahan molekul berdasarkan ukuran untuk mengurangi kandungan garam atau mikroorganisme dalam minuman. Pemisahan ini tidak hanya bertujuan untuk meningkatkan mutu produk akhir, tetapi juga untuk memperpanjang umur simpan dan menjamin keamanan pangan.

Dalam bidang pengolahan air dan limbah, teknologi pemisahan digunakan untuk menghilangkan zat padat, logam berat, senyawa organik, dan mikroorganisme dari air limbah sebelum air dikembalikan ke lingkungan atau digunakan kembali. Proses seperti flokulasi, sedimentasi, filtrasi, adsorpsi, dan osmosis balik sangat umum diterapkan di instalasi pengolahan air. Pemisahan ini sangat penting untuk mencegah pencemaran lingkungan dan melindungi kesehatan manusia. Teknologi canggih seperti membran semipermeabel kini juga digunakan untuk mengolah air laut menjadi air minum, membuka peluang bagi pemenuhan kebutuhan air bersih di wilayah dengan sumber air terbatas.

Dalam bidang bioteknologi, teknologi pemisahan menjadi bagian penting dari bioseparasi, yaitu proses pemisahan biomolekul seperti protein, asam nukleat, enzim, atau sel dari medium kultur. Teknologi ini memungkinkan isolasi produk biologis dengan kemurnian tinggi dari hasil fermentasi atau reaksi biologis lainnya. Pemurnian protein, misalnya, memerlukan beberapa tahap pemisahan seperti presipitasi, kromatografi afinitas, atau elektroforesis. Keberhasilan proses bioseparasi menentukan efisiensi dan kualitas produk bioteknologi, seperti vaksin, antibodi, dan hormon rekombinan. Dengan meningkatnya kebutuhan akan

produk biologis dalam pengobatan, pertanian, dan industri pangan, teknologi ini terus berkembang menuju sistem yang lebih cepat, selektif, dan hemat energi.

Kemajuan teknologi juga telah mendorong integrasi beberapa teknik pemisahan dalam satu sistem, dikenal sebagai sistem pemisahan terpadu atau berkelanjutan. Sistem ini dirancang untuk meningkatkan efisiensi, mengurangi konsumsi energi, dan memperkecil limbah proses. Di sisi lain, strategi ramah lingkungan mulai diterapkan melalui penggunaan bahan-bahan alami, pelarut hijau, dan teknologi pemisahan nontermal yang tidak merusak senyawa target, terutama dalam pengolahan bahan sensitif seperti obat herbal dan komponen pangan fungsional.

Dengan demikian, teknologi pemisahan menjadi tulang punggung dari banyak proses industri dan ilmiah. Keberhasilannya tidak hanya bergantung pada pemilihan teknik yang sesuai dengan sifat bahan, tetapi juga pada optimalisasi kondisi operasi dan pemahaman yang mendalam mengenai karakteristik komponen yang akan dipisahkan. Dalam dunia yang semakin menuntut efisiensi, keberlanjutan, dan kualitas tinggi, penerapan teknologi pemisahan akan terus berkembang sebagai solusi penting dalam menjawab tantangan di berbagai sektor.

1.5 Latihan Soal

1. Apa yang dimaksud dengan teknologi pemisahan?
2. Sebutkan dua tujuan dari proses pemisahan!

3. Jelaskan tiga contoh teknik pemisahan berdasarkan prinsip fisika!
4. Mengapa teknologi pemisahan penting dalam industri farmasi?
5. Sebutkan dua aplikasi teknologi pemisahan dalam kehidupan sehari-hari!

BAB 2: Dasar-Dasar Termodinamika dan Transportasi dalam Proses Pemisahan

2.1 Pengertian Termodinamika dan Transportasi

Termodinamika merupakan bidang dalam fisika yang membahas hubungan antara panas, energi, dan kerja, serta bagaimana ketiganya berinteraksi dalam suatu sistem. Dalam konteks sistem rekayasa, termodinamika tidak hanya terbatas pada teori abstrak, tetapi sangat relevan dalam menjelaskan fenomena-fenomena nyata yang terjadi dalam proses industri. Konsep seperti entalpi, entropi, energi dalam, dan perubahan keadaan sangat penting dalam memahami bagaimana suatu proses berlangsung, terutama ketika sistem mengalami perubahan suhu, tekanan, atau volume. Dalam proses pemisahan, misalnya, termodinamika memberikan dasar pemahaman tentang kapan dan bagaimana suatu komponen dapat berpindah fase, baik dari cair ke gas maupun sebaliknya, berdasarkan pada keseimbangan energi di dalam sistem.

Pemahaman terhadap keseimbangan energi ini menjadi inti dari banyak teknologi pemisahan, seperti distilasi, di mana perbedaan volatilitas antar komponen dimanfaatkan. Dengan memanaskan campuran hingga salah satu komponen menguap, lalu mengondensasi uap tersebut, diperoleh pemisahan yang didasarkan pada prinsip termodinamika. Keakuratan dalam menghitung energi yang dibutuhkan dan efisiensi energi sistem menjadi penentu keberhasilan proses. Prinsip ini juga berlaku pada teknologi lain seperti ekstraksi dan kristalisasi, di mana transformasi energi memainkan peran kunci dalam mengontrol hasil akhir (Smith et al., 2021).

Sementara itu, transportasi dalam konteks rekayasa proses merujuk pada perpindahan massa, energi, atau momentum di dalam atau antar sistem. Fenomena ini meliputi difusi, konveksi, dan konduksi, yang secara kolektif menentukan bagaimana zat berpindah dari satu tempat ke tempat lain. Dalam desain sistem pemisahan, memahami mekanisme transportasi sangat penting agar proses dapat berlangsung secara efisien. Sebagai contoh, pada proses adsorpsi, molekul dari suatu campuran gas atau cairan akan berpindah dan menempel pada permukaan padatan, dan kecepatan serta efisiensinya sangat dipengaruhi oleh bagaimana molekul tersebut bergerak melalui media.

Transportasi juga berperan dalam menentukan waktu tinggal suatu zat di dalam peralatan proses, yang pada akhirnya memengaruhi kualitas produk dan konsumsi energi. Dalam distilasi, misalnya, laju perpindahan panas dari sumber panas ke dalam cairan

menentukan seberapa cepat komponen dapat menguap. Dalam sistem membran, laju perpindahan massa menentukan seberapa efektif suatu zat dapat disaring atau dipisahkan. Oleh karena itu, pemahaman yang menyeluruh tentang transportasi menjadi bagian penting dalam perancangan dan optimasi sistem industri modern (Cussler & Moggridge, 2020).

Interaksi antara termodinamika dan transportasi dalam sistem pemisahan tidak dapat dipisahkan, karena keduanya bekerja secara simultan untuk mencapai efisiensi proses yang optimal. Termodinamika memberi batasan terhadap apa yang mungkin terjadi dari segi energi, sementara transportasi menjelaskan bagaimana perpindahan zat tersebut terjadi dalam waktu nyata. Perancang sistem harus mempertimbangkan keduanya untuk menjamin bahwa proses tidak hanya berjalan secara teoritis, tetapi juga praktis dan hemat energi.

Dalam perkembangan industri saat ini yang semakin menuntut efisiensi energi dan keberlanjutan lingkungan, pemahaman yang kuat tentang prinsip-prinsip termodinamika dan transportasi menjadi sangat penting. Hal ini tidak hanya penting untuk optimalisasi proses, tetapi juga untuk pengembangan teknologi baru yang lebih ramah lingkungan dan hemat energi. Seiring dengan meningkatnya perhatian terhadap efisiensi proses dan pengurangan emisi, peran ilmu ini akan semakin krusial dalam membentuk masa depan industri kimia dan energi global.

2.2 Hukum-Hukum Termodinamika yang Relevan

Termodinamika merupakan cabang ilmu fisika yang membahas hubungan antara panas, kerja, energi, dan sistem. Dalam kehidupan sehari-hari maupun dalam skala industri dan teknologi, prinsip-prinsip termodinamika hadir secara nyata. Misalnya, dalam sistem mesin pembakaran, pendingin ruangan, metabolisme tubuh manusia, hingga sistem pembangkit listrik, hukum-hukum ini membentuk dasar pemahaman terhadap cara energi digunakan dan diubah. Ada tiga hukum utama yang relevan dan sering dijadikan rujukan, yakni hukum pertama, kedua, dan ketiga termodinamika.

2.2.1 Hukum Pertama Termodinamika

Hukum pertama termodinamika dikenal sebagai hukum kekekalan energi. Hukum ini menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan maupun dimusnahkan, melainkan hanya dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Dalam sistem tertutup, perubahan energi dalam sistem sama dengan jumlah energi yang masuk atau keluar dari sistem tersebut dalam bentuk kerja (*work*) dan panas (*heat*). Persamaan umum yang merepresentasikan hukum ini adalah:

$$\Delta U = Q - W$$

Di mana ΔU adalah perubahan energi dalam, Q adalah energi panas yang diterima sistem, dan W adalah kerja yang dilakukan sistem. Hukum ini menggarisbawahi bahwa total energi dalam

semesta tetap konstan meskipun terjadi berbagai bentuk transformasi energi (Çengel & Boles, 2020).

Dalam konteks praktis, hukum ini dapat ditemukan dalam sistem pembangkit tenaga, seperti turbin uap. Panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar digunakan untuk mengubah air menjadi uap, yang kemudian memutar turbin untuk menghasilkan listrik. Proses ini merupakan perubahan bentuk energi dari panas menjadi kerja mekanis dan selanjutnya menjadi energi listrik.

2.2.2 Hukum Kedua Termodinamika

Hukum kedua termodinamika berkaitan dengan arah aliran energi. Hukum ini menyatakan bahwa dalam proses energi, entropi, yaitu ukuran ketidakteraturan atau dispersi energi dalam sistem – cenderung meningkat. Artinya, proses alami akan bergerak menuju keadaan yang lebih tidak teratur. Dalam sistem tertutup, energi cenderung mengalir dari suhu tinggi ke suhu rendah, bukan sebaliknya. Dengan kata lain, energi panas akan mengalir secara spontan ke arah suhu yang lebih rendah.

Prinsip ini menjelaskan mengapa mesin atau perangkat apa pun tidak bisa bekerja dengan efisiensi sempurna, karena selalu ada energi yang “hilang” dalam bentuk panas yang tidak dapat digunakan. Contoh nyata hukum ini bisa ditemukan dalam mesin kendaraan bermotor, di mana hanya sebagian dari energi kimia dalam bahan bakar yang diubah menjadi energi gerak, sementara sisanya terbang sebagai panas ke lingkungan (Moran et al., 2020).

Selain itu, hukum kedua juga relevan dalam menjelaskan proses metabolisme tubuh manusia. Energi kimia dari makanan

diubah menjadi energi gerak dan panas tubuh. Namun, tidak semua energi ini digunakan secara efisien; sebagian besar dilepaskan sebagai panas yang membantu menjaga suhu tubuh, tapi tidak berkontribusi langsung terhadap kerja mekanis tubuh.

2.2.3 Hukum Ketiga Termodinamika

Hukum ketiga menyatakan bahwa pada suhu nol mutlak (0 Kelvin), entropi suatu sistem kristal sempurna akan mencapai nilai minimum, mendekati nol. Hal ini berarti bahwa pada suhu yang sangat rendah, partikel dalam suatu sistem akan memiliki tingkat ketidakteraturan yang paling rendah atau bahkan tidak ada sama sekali. Namun, suhu nol mutlak merupakan keadaan teoritis dan tidak dapat dicapai secara eksak dalam praktik.

Meskipun demikian, hukum ketiga termodinamika penting untuk memahami perilaku zat pada suhu ekstrem rendah, misalnya dalam studi tentang superkonduktor atau pendinginan kriogenik. Dalam aplikasi teknologi tinggi, seperti sistem pendingin untuk komputer kuantum atau penyimpanan sampel biologis, pemahaman akan perilaku zat mendekati nol mutlak sangatlah krusial.

Hukum ini juga membantu menjelaskan mengapa tidak ada mesin pendingin yang mampu mendinginkan suatu benda hingga mencapai nol mutlak, karena untuk itu diperlukan jumlah energi tak terbatas. Oleh karena itu, hukum ketiga menjadi penanda batas teoritis bagi berbagai sistem fisik dan teknologi mutakhir.

2.3 Prinsip Transportasi Massa dan Energi

Transportasi massa dan energi merupakan dua konsep fundamental dalam dunia teknik dan sains terapan, khususnya dalam proses industri, rekayasa sistem termal, serta pemrosesan material. Kedua prinsip ini menjelaskan bagaimana zat maupun energi berpindah dari satu titik ke titik lain sebagai respons terhadap perbedaan tertentu, baik itu konsentrasi, suhu, atau tekanan.

2.3.1 Transportasi Massa

Transportasi massa atau *mass transfer* adalah proses perpindahan molekul suatu zat dari wilayah berkonsentrasi tinggi ke wilayah berkonsentrasi rendah. Fenomena ini banyak ditemukan dalam berbagai proses industri dan alami, salah satu contohnya adalah *diffusion*, yaitu perpindahan molekul tanpa melibatkan gerakan massa dari medium.

Dalam proses industri, prinsip ini dimanfaatkan pada sistem seperti *distillation*, *extraction*, dan *absorption*. Misalnya, dalam proses distilasi, perbedaan konsentrasi uap dan cairan dimanfaatkan untuk memisahkan komponen dalam campuran. Proses ini sangat krusial dalam industri petrokimia, farmasi, dan makanan, di mana pemisahan komponen murni menjadi tujuan utama.

Efisiensi perpindahan massa sangat dipengaruhi oleh sifat zat, luas permukaan kontak, serta perbedaan konsentrasi antar fase. Selain itu, adanya pengadukan atau aliran juga dapat meningkatkan laju perpindahan massa melalui mekanisme *convective mass transfer*.

Menurut publikasi oleh Kumar et al. (2020), pengendalian terhadap laju perpindahan massa secara tepat dapat meningkatkan efisiensi proses pemisahan hingga 30% dalam sistem berbasis membran mikro.

2.3.2 Transportasi Energi

Transportasi energi atau *heat transfer* adalah proses perpindahan energi panas dari daerah bersuhu tinggi ke daerah bersuhu rendah. Proses ini terjadi melalui tiga mekanisme utama: *conduction*, *convection*, dan *radiation*.

- *Conduction* adalah perpindahan energi panas melalui medium padat tanpa perpindahan partikel secara nyata, contohnya seperti panas yang mengalir dari satu ujung batang logam ke ujung lainnya.
- *Convection* melibatkan perpindahan panas melalui aliran fluida, baik itu cair atau gas, dan umum terjadi dalam sistem pemanas ruangan, pendingin udara, atau peralatan penukar panas (*heat exchanger*).
- *Radiation* adalah perpindahan panas melalui gelombang elektromagnetik tanpa memerlukan medium, sebagaimana radiasi matahari yang mencapai bumi.

Penerapan prinsip perpindahan panas sangat luas dalam dunia teknik, terutama dalam desain sistem termal seperti pendingin mesin, pemanas air, serta sistem ventilasi bangunan. Pemahaman terhadap karakteristik perpindahan energi juga penting dalam mengoptimalkan konsumsi energi dan meningkatkan efisiensi alat-alat industri.

Studi oleh Huang et al. (2021) menyebutkan bahwa perbaikan rancangan *heat exchanger* berbasis pemahaman transfer energi dapat menurunkan konsumsi energi hingga 15% dalam proses pemrosesan kimia.

2.3.3 Integrasi Transportasi Massa dan Energi

Dalam praktiknya, proses perpindahan massa dan energi sering kali terjadi secara bersamaan dan saling memengaruhi. Misalnya, dalam pengeringan produk pertanian, molekul air berpindah ke permukaan produk (perpindahan massa) sekaligus terjadi transfer panas dari udara ke produk (perpindahan energi). Kedua proses tersebut saling terkait dan harus dikendalikan dengan baik agar hasil akhir sesuai harapan.

Desain sistem industri yang efisien sangat bergantung pada pemahaman prinsip-prinsip ini. Mengabaikan salah satunya dapat menyebabkan kerugian energi, pemborosan sumber daya, atau bahkan kerusakan alat produksi. Oleh karena itu, integrasi keduanya dalam rancangan sistem sangat penting, khususnya dalam konteks efisiensi energi dan keberlanjutan industri.

2.4 Latihan Soal

1. Jelaskan pengertian termodinamika dan transportasi dalam konteks proses pemisahan.
2. Sebutkan tiga hukum dasar termodinamika dan aplikasinya.
3. Apa perbedaan antara transportasi massa dan energi?

4. Berikan contoh penerapan prinsip termodinamika dalam proses distilasi.
5. Bagaimana keseimbangan dan laju proses saling berkaitan dalam proses pemisahan?

Bab 3: Destilasi

3.1 Pengertian dan Prinsip Destilasi

Destilasi merupakan salah satu teknik pemisahan yang paling banyak digunakan dalam bidang kimia dan rekayasa proses. Proses ini bertujuan untuk memisahkan satu atau lebih komponen dalam suatu campuran berdasarkan perbedaan titik didih masing-masing zat. Dengan memanfaatkan sifat fisik ini, destilasi memungkinkan pemisahan zat cair dari campurannya melalui tahap penguapan dan kondensasi secara berurutan. Campuran dipanaskan hingga salah satu komponen menguap, kemudian uap tersebut ditangkap dan dikondensasikan kembali menjadi cairan yang terpisah dari komponen lainnya.

Destilasi tidak hanya digunakan untuk keperluan laboratorium atau proses skala kecil, tetapi juga diimplementasikan secara luas dalam berbagai sektor industri. Proses ini mampu menghasilkan senyawa dengan tingkat kemurnian tinggi, serta memungkinkan pemisahan komponen dengan akurasi yang tinggi tanpa perlu mengubah struktur kimia zat yang dipisahkan. Selain itu, destilasi dapat dilakukan dalam berbagai kondisi, mulai dari tekanan atmosfer hingga tekanan rendah (vakum), tergantung pada sifat bahan yang diolah dan tujuan akhir dari pemisahan tersebut.

Keberhasilan proses destilasi sangat dipengaruhi oleh karakteristik termal dari masing-masing komponen campuran,

desain peralatan yang digunakan, serta kontrol suhu dan tekanan yang tepat. Dalam praktiknya, destilasi tidak hanya mengandalkan prinsip sederhana penguapan dan kondensasi, tetapi juga melibatkan parameter teknis lain seperti laju pemanasan, tinggi kolom distilasi, jenis kondensor, serta pengaturan sistem pendingin. Semua faktor ini dirancang agar pemisahan dapat berlangsung secara efisien dan menghasilkan produk dengan kualitas optimal.

3.1.1 Prinsip Dasar

Prinsip dasar dari destilasi terletak pada perbedaan titik didih antara dua atau lebih zat dalam suatu campuran. Ketika campuran dipanaskan, komponen dengan titik didih lebih rendah akan menguap terlebih dahulu. Uap yang dihasilkan kemudian dialirkan ke bagian sistem yang lebih dingin, di mana ia mengalami proses kondensasi dan berubah kembali menjadi cairan. Cairan ini ditampung sebagai hasil pemisahan, sementara komponen lain yang memiliki titik didih lebih tinggi akan tetap berada dalam fasa cair hingga suhu dinaikkan lebih lanjut.

Proses ini dapat dilakukan secara sederhana dalam sistem *batch*, seperti dalam destilasi sederhana yang digunakan untuk memisahkan dua zat dengan selisih titik didih yang cukup besar. Namun, dalam campuran kompleks atau yang mengandung komponen dengan titik didih yang berdekatan, diperlukan teknik yang lebih canggih seperti destilasi fraksionasi. Dalam sistem ini, digunakan kolom fraksionasi dengan pelat atau pengisi (*packing*) yang memperbesar permukaan kontak antara uap dan cairan,

sehingga terjadi pengayaan bertahap terhadap komponen yang lebih mudah menguap.

Prinsip ini juga memungkinkan penggunaan teknik vakum untuk menurunkan titik didih zat yang sensitif terhadap suhu tinggi. Dengan menurunkan tekanan sistem, titik didih komponen menjadi lebih rendah sehingga pemisahan dapat dilakukan pada suhu yang lebih aman, terutama untuk bahan yang mudah terdegradasi akibat panas. Selain itu, ada pula teknik destilasi uap, di mana uap air digunakan untuk membantu penguapan zat yang tidak mudah menguap pada suhu normal.

Keunggulan prinsip destilasi terletak pada kemampuannya untuk memisahkan zat tanpa perlu mengubah struktur kimianya. Hal ini sangat penting dalam industri yang memerlukan kemurnian tinggi, karena komponen yang diperoleh tetap mempertahankan sifat aslinya dan dapat digunakan secara langsung dalam formulasi produk akhir.

3.1.2 Aplikasi Industri

Destilasi memiliki berbagai aplikasi penting dalam sektor industri karena kemampuannya yang fleksibel dan efisien dalam memisahkan serta memurnikan bahan cair. Salah satu aplikasi yang paling umum adalah dalam produksi etanol. Dalam proses ini, fermentasi bahan organik menghasilkan campuran yang mengandung etanol dan air. Untuk memperoleh etanol dalam bentuk yang lebih murni, dilakukan destilasi yang memisahkan etanol dari air dan komponen lain berdasarkan perbedaan titik didihnya.

Dalam industri minyak bumi, destilasi menjadi tahap awal dalam proses penyulingan minyak mentah. Minyak mentah terdiri atas campuran ratusan senyawa hidrokarbon dengan berbagai titik didih. Melalui destilasi fraksionasi, minyak mentah dipisahkan menjadi fraksi-fraksi seperti bensin, solar, minyak tanah, dan residu berat. Setiap fraksi tersebut kemudian dapat diolah lebih lanjut sesuai kebutuhan industri energi dan petrokimia.

Industri parfum dan kosmetik juga sangat bergantung pada proses destilasi, terutama dalam produksi minyak atsiri dari bahan-bahan alami seperti bunga, daun, dan akar tanaman. Destilasi uap sering digunakan dalam proses ini untuk mengekstrak senyawa aromatik yang mudah menguap tanpa merusak struktur kimianya. Minyak atsiri yang dihasilkan menjadi bahan dasar dalam formulasi parfum, sabun, dan produk perawatan tubuh lainnya.

Selain itu, destilasi digunakan secara luas dalam produksi pelarut kimia, baik untuk kebutuhan laboratorium maupun industri skala besar. Pelarut seperti aseton, etanol, dan metanol diproduksi melalui proses destilasi guna mencapai tingkat kemurnian tertentu yang diperlukan dalam reaksi kimia, pembersihan, atau formulasi produk industri. Kemampuan destilasi untuk menghasilkan pelarut dengan kemurnian tinggi membuatnya menjadi teknologi yang sangat penting dalam memastikan keberhasilan proses kimia lainnya.

Dengan cakupan aplikasi yang luas, destilasi terus dikembangkan dan disempurnakan agar lebih efisien, hemat energi, dan ramah lingkungan. Penggunaan sistem pemulihan panas,

pengendalian otomatis berbasis sensor, serta integrasi dengan teknologi pemisahan lainnya menjadi bagian dari inovasi yang menjadikan proses destilasi tetap relevan di tengah tantangan industri modern.

3.2 Jenis-jenis Destilasi

Destilasi merupakan teknik pemisahan berdasarkan perbedaan titik didih komponen dalam campuran cair. Proses ini menjadi teknik utama dalam pemurnian pelarut, pemisahan fraksi minyak, ekstraksi minyak atsiri, dan pemrosesan bahan alam lainnya. Dalam perkembangannya, berbagai jenis destilasi telah dikembangkan untuk menyesuaikan dengan sifat fisikokimia bahan, skala produksi, serta kebutuhan pemisahan yang spesifik. Setiap teknik memiliki prinsip kerja dan aplikasi yang berbeda, terutama dalam hal tekanan, suhu, dan jenis campuran yang diproses.

3.2.1 Destilasi Sederhana

Destilasi sederhana adalah teknik paling dasar dan banyak digunakan untuk memisahkan campuran cair yang memiliki perbedaan titik didih cukup besar, umumnya lebih dari 25–30°C. Proses ini melibatkan pemanasan campuran hingga komponen dengan titik didih lebih rendah menguap terlebih dahulu, kemudian uap tersebut dikondensasi menjadi cairan dalam kondensor dan ditampung sebagai destilat. Teknik ini cocok untuk pemisahan air dari larutan alkohol, pemurnian pelarut organik, serta produksi minyak atsiri secara skala kecil. Kelebihan dari teknik ini adalah

kesederhanaan alat, biaya rendah, dan kemudahan pengoperasian. Namun, destilasi sederhana tidak efektif untuk campuran yang memiliki titik didih berdekatan atau mengandung senyawa azeotropik.

3.2.2 Destilasi Fraksionasi

Destilasi fraksionasi merupakan pengembangan dari destilasi sederhana dengan penambahan kolom fraksionasi di antara labu distilasi dan kondensor. Kolom ini berisi media seperti cincin Raschig, pelat gelembung, atau pengisi lainnya yang menciptakan banyak siklus penguapan dan kondensasi di sepanjang kolom. Proses ini meningkatkan pemisahan senyawa yang memiliki titik didih yang sangat berdekatan. Salah satu aplikasi utama destilasi fraksionasi adalah dalam industri petrokimia untuk memisahkan minyak mentah menjadi fraksi-fraksi seperti bensin, solar, kerosin, dan pelumas. Dalam konteks bahan alam, fraksionasi digunakan untuk pemisahan komponen kompleks dalam ekstrak tanaman aromatik yang mengandung senyawa volatil berbeda dalam jumlah besar.

3.2.3 Destilasi Vakum

Destilasi vakum dilakukan dengan menurunkan tekanan sistem agar titik didih cairan juga ikut turun. Teknik ini sangat penting untuk senyawa yang mudah terurai, teroksidasi, atau berubah struktur pada suhu tinggi. Dalam kondisi vakum, senyawa dapat diuapkan pada suhu yang jauh lebih rendah dibandingkan pada tekanan atmosfer. Destilasi vakum banyak digunakan dalam pemisahan asam lemak, pemurnian vitamin, serta pembuatan minyak atsiri murni dari bahan yang sensitif terhadap panas seperti

mawar dan melati. Sistem ini memerlukan pompa vakum, pengendali tekanan, dan alat kondensasi yang mampu bekerja dalam tekanan rendah. Meskipun biaya dan peralatannya lebih tinggi, destilasi vakum sangat efektif dalam menjaga integritas senyawa aktif.

3.2.4 Destilasi Azeotropik dan Ekstraktif

Beberapa campuran cair membentuk azeotrop, yaitu campuran yang memiliki komposisi tertentu dengan titik didih konstan sehingga tidak dapat dipisahkan melalui destilasi biasa. Untuk mengatasi hal ini, digunakan destilasi azeotropik, yaitu penambahan zat ketiga (*entrainer*) yang mengubah sifat azeotropik campuran. Misalnya, penambahan benzena untuk memisahkan campuran etanol dan air, karena benzena membentuk azeotrop baru dengan air, sehingga memungkinkan pemisahan etanol murni.

Destilasi ekstraktif, di sisi lain, melibatkan penambahan pelarut polar atau nonpolar untuk mengubah interaksi antar molekul dalam campuran. Pelarut ini tidak mudah menguap dan membantu memperbesar perbedaan volatilitas antar komponen, sehingga lebih mudah dipisahkan. Contoh aplikasinya adalah pemisahan senyawa aromatik dari alifatik dalam produksi bahan kimia murni dan pelarut industri. Dalam industri berbasis bahan alam, teknik ini berguna untuk pemisahan senyawa bioaktif kompleks yang membentuk ikatan kuat dengan air atau pelarut lainnya.

Dengan memahami karakteristik masing-masing teknik destilasi, pelaku industri dan laboratorium dapat memilih teknik yang paling sesuai dengan tujuan pemisahan, skala produksi, serta

sifat bahan yang diolah. Pemilihan teknik yang tepat tidak hanya meningkatkan efisiensi proses, tetapi juga menjaga mutu dan kemurnian senyawa hasil destilasi, khususnya dalam pemrosesan bahan alam yang memiliki nilai ekonomi dan terapeutik tinggi.

3.3 Peralatan Destilasi

Destilasi merupakan salah satu proses pemisahan paling umum dalam industri kimia dan pengolahan bahan alam, digunakan untuk memisahkan komponen dalam campuran berdasarkan perbedaan titik didihnya. Agar proses ini berjalan optimal, diperlukan peralatan yang dirancang secara sistematis dan sesuai dengan sifat campuran yang akan dipisahkan. Peralatan destilasi terdiri dari beberapa komponen utama yang bekerja secara terpadu, yakni *boiler* (pemanas), kolom destilasi, kondensor, dan *receiver* (penampung hasil). Setiap bagian memiliki peran spesifik dan penting dalam memastikan bahwa proses pemisahan berlangsung dengan efisien dan selektif, terutama ketika digunakan untuk ekstraksi minyak atsiri, pelarut, atau komponen volatil lainnya dari bahan alam.

3.3.1 Kolom Fraksionasi

Kolom fraksionasi merupakan bagian sentral dalam sistem destilasi, khususnya pada proses destilasi bertingkat atau fraksionasi. Kolom ini berfungsi untuk meningkatkan efisiensi pemisahan senyawa yang memiliki titik didih berdekatan. Di dalam kolom fraksionasi terdapat pelat (*tray*) atau bahan pengisi (*packing*) yang

memperluas permukaan kontak antara uap dan cairan. Interaksi ini memungkinkan terjadinya proses kondensasi dan penguapan berulang kali sepanjang kolom, yang dikenal sebagai *theoretical stages*, sehingga memperbaiki pemisahan antara fraksi yang berbeda.

Pelat dalam kolom fraksionasi biasanya dilengkapi lubang-lubang dan penyangga yang memungkinkan uap naik dan cairan turun secara terkendali. Setiap pelat bertindak seperti wadah kecil tempat berlangsungnya kesetimbangan antara fase cair dan gas. Di sisi lain, penggunaan bahan pengisi seperti cincin *Raschig*, *saddles*, atau bahan keramik dan logam bertekstur, dirancang untuk meningkatkan area permukaan internal tanpa menghambat aliran uap dan cairan. Pemilihan antara pelat dan *packing* tergantung pada ukuran kolom, jenis campuran, serta skala proses (laboratorium atau industri).

Efisiensi kolom sangat bergantung pada tinggi dan diameter kolom, distribusi suhu sepanjang kolom, dan laju aliran uap maupun cairan. Dalam banyak kasus, bagian bawah kolom bersuhu lebih tinggi dan mengandung komponen bertitik didih lebih tinggi, sedangkan bagian atas bersuhu lebih rendah dan didominasi oleh komponen yang lebih mudah menguap. Kontrol suhu yang akurat sangat penting untuk menjaga agar fraksi yang dihasilkan benar-benar murni dan tidak tercampur silang.

3.3.2 Kondensor

Kondensor memiliki fungsi utama untuk mendinginkan uap yang telah naik melalui kolom, mengubahnya kembali menjadi

cairan, dan memungkinkan pemisahan komponen volatil dari campuran asalnya. Proses ini sangat penting karena hanya uap dari komponen yang telah berhasil melalui kolom yang akan dikondensasi dan dikumpulkan. Tanpa kondensor yang bekerja secara optimal, uap akan hilang ke lingkungan atau tidak dapat ditampung secara efisien, mengurangi hasil dan membahayakan keselamatan kerja.

Kondensor bekerja berdasarkan prinsip perpindahan panas. Uap panas yang masuk ke dalam kondensor dialirkan melalui tabung logam yang didinginkan dengan air atau udara. Perbedaan suhu antara uap dan media pendingin menyebabkan uap mengalami kondensasi. Salah satu jenis kondensor yang banyak digunakan adalah *Liebig condenser*, yang terdiri dari tabung lurus dengan saluran air pendingin di sekelilingnya. Untuk aplikasi yang lebih kompleks, digunakan *coil condenser* atau *Graham condenser* yang menawarkan permukaan pendinginan lebih luas dalam ruang yang kompak.

Efisiensi pendinginan sangat bergantung pada suhu air pendingin, kecepatan alirannya, serta bahan kondensor itu sendiri. Kondensor dari kaca sering digunakan pada skala laboratorium karena tahan terhadap reaksi kimia, sedangkan kondensor logam lebih umum digunakan dalam skala industri karena lebih kuat dan mampu menghantarkan panas dengan lebih efisien. Penting juga untuk memastikan bahwa kondensor tersambung rapat dengan kolom dan *receiver* agar uap tidak bocor selama proses berlangsung.

Setelah uap berubah menjadi cairan, hasil kondensasi dialirkan ke *receiver*, yaitu wadah penampung yang biasanya berbahan kaca atau logam tahan kimia. *Receiver* ini dapat dilengkapi dengan sistem pengukur volume atau sistem pemisah otomatis jika digunakan untuk destilasi bertingkat dengan beberapa fraksi.

Dengan konfigurasi peralatan yang tepat, proses destilasi mampu menghasilkan fraksi yang murni, efisien, dan sesuai dengan kebutuhan. Dalam konteks bahan alam, sistem ini sering digunakan untuk mengekstrak minyak atsiri dari tanaman aromatik, memurnikan pelarut alami, atau mengisolasi senyawa volatil dalam skala laboratorium maupun industri. Pemahaman tentang peran masing-masing komponen peralatan destilasi menjadi dasar dalam merancang proses yang aman, hemat energi, dan menghasilkan produk berkualitas tinggi.

3.4 Latihan Soal

1. Apa prinsip dasar yang mendasari proses destilasi?
2. Sebutkan dua jenis destilasi dan jelaskan masing-masing aplikasinya!
3. Mengapa destilasi vakum sering digunakan dalam proses industri?
4. Apa fungsi kolom fraksionasi dalam sistem destilasi?
5. Jelaskan perbedaan antara destilasi sederhana dan destilasi fraksionasi!

Bab 4: Ekstraksi Cair-Cair

4.1 Pengertian Ekstraksi Cair-Cair

Ekstraksi cair-cair merupakan teknik pemisahan kimia yang memanfaatkan prinsip perbedaan kelarutan suatu zat dalam dua jenis pelarut cair yang tidak saling bercampur, umumnya terdiri atas satu pelarut polar seperti air dan satu pelarut nonpolar seperti eter, kloroform, atau heksana. Teknik ini banyak digunakan dalam laboratorium maupun industri untuk memisahkan, memurnikan, atau memekatkan senyawa tertentu dari campuran kompleks, baik dalam skala kecil maupun besar. Prinsip dasarnya adalah bahwa suatu zat terlarut akan terdistribusi antara dua pelarut sesuai dengan kelarutannya masing-masing, hingga tercapai kesetimbangan.

Dalam praktiknya, proses ekstraksi cair-cair diawali dengan pencampuran dua pelarut yang tidak saling larut secara signifikan dan memiliki densitas berbeda dalam suatu wadah tertutup, biasanya menggunakan corong pisah. Campuran yang mengandung zat yang akan dipisahkan kemudian ditambahkan ke dalam sistem pelarut tersebut. Setelah pengocokan ringan dan waktu kontak yang cukup, zat yang diinginkan akan berpindah ke pelarut tempat ia lebih larut, sementara senyawa pengotor atau senyawa lain tetap berada di pelarut asalnya. Pemisahan dilakukan berdasarkan perbedaan kepolaran, distribusi muatan, dan interaksi spesifik antara zat terlarut dan molekul pelarut.

Keunggulan teknik ini adalah kesederhanaannya, kemampuannya untuk memproses campuran kompleks, dan efisiensinya dalam mengekstrak senyawa dengan selektivitas tinggi. Salah satu aplikasi umum adalah dalam pemisahan asam-basa organik, di mana senyawa asam atau basa dapat dipindahkan antar pelarut melalui reaksi netralisasi atau pengubahan bentuk ionik menjadi bentuk netral. Selain itu, ekstraksi cair-cair juga digunakan dalam industri farmasi untuk pemurnian bahan aktif, dalam industri makanan untuk mengekstrak senyawa perasa atau aroma, dan dalam bidang lingkungan untuk mendeteksi atau membersihkan kontaminan dari sampel air atau tanah.

Namun, efektivitas ekstraksi cair-cair sangat bergantung pada pemilihan pelarut yang tepat. Pelarut harus tidak bercampur, memiliki perbedaan densitas yang cukup untuk memungkinkan pemisahan lapisan secara jelas, dan selektif terhadap senyawa target. Selain itu, pelarut harus stabil secara kimia, tidak bereaksi dengan komponen lain dalam campuran, dan mudah dipisahkan kembali dari senyawa hasil ekstraksi. Dalam beberapa kasus, proses ekstraksi perlu dilakukan secara berulang atau bertingkat untuk meningkatkan efisiensi dan kemurnian hasil.

Faktor-faktor lain yang memengaruhi proses ekstraksi cair-cair meliputi pH larutan, suhu, volume pelarut, serta waktu kontak antara dua fase. Dalam sistem yang kompleks, distribusi zat terlarut bisa dikendalikan dengan mengubah pH untuk mengionisasi atau menetralkan senyawa tertentu. Suhu yang lebih tinggi dapat mempercepat laju difusi, tetapi juga dapat memengaruhi kestabilan

senyawa atau pelarut yang digunakan. Oleh karena itu, kendali proses sangat penting untuk menghasilkan ekstraksi yang optimal.

Secara keseluruhan, ekstraksi cair-cair merupakan teknik yang sangat berguna dalam berbagai bidang ilmu dan industri karena mampu memberikan pemisahan yang selektif, sederhana, dan efektif. Kemampuannya untuk memisahkan senyawa dengan kondisi lembut dan tanpa pemanasan ekstrem juga menjadikannya pilihan utama dalam menangani senyawa yang sensitif terhadap suhu atau degradasi kimia.

4.2 Prinsip Dasar Ekstraksi Cair-Cair

Ekstraksi cair-cair merupakan salah satu teknik pemisahan yang memanfaatkan perbedaan kelarutan suatu senyawa dalam dua pelarut cair yang tidak saling bercampur, biasanya berupa pelarut organik dan air. Prinsip dasar dari teknik ini adalah kecenderungan suatu senyawa untuk lebih larut dalam salah satu fasa dibandingkan fasa lainnya. Ketika dua fasa cair dikocok atau dicampur, senyawa yang memiliki kelarutan berbeda akan berpindah atau terbagi di antara kedua fasa sesuai dengan sifat kimianya. Proses ini didasarkan pada kesetimbangan distribusi senyawa yang terjadi saat kontak antara kedua fasa telah mencapai kondisi stabil.

Faktor utama yang menentukan efektivitas ekstraksi adalah koefisien distribusi (KD), yang didefinisikan sebagai perbandingan konsentrasi senyawa terlarut dalam dua pelarut pada saat kesetimbangan tercapai. Jika suatu senyawa memiliki nilai KD

tinggi terhadap fasa organik, maka sebagian besar senyawa akan berada di pelarut organik dan sebaliknya. Nilai KD ini dipengaruhi oleh polaritas senyawa dan pelarut, pH larutan (untuk senyawa ionik atau asam-basa), serta adanya senyawa lain yang mungkin berinteraksi dalam sistem tersebut. Oleh karena itu, pemilihan pelarut yang sesuai sangat penting agar ekstraksi berlangsung efisien dan selektif.

Pada praktiknya, ekstraksi cair-cair dapat dilakukan secara tunggal atau bertingkat. Ekstraksi tunggal dilakukan satu kali kontak antara dua fasa, sedangkan ekstraksi bertingkat melibatkan kontak berulang antara pelarut segar dan larutan, untuk meningkatkan jumlah senyawa yang berhasil diekstraksi. Teknik bertingkat lebih efektif untuk memisahkan senyawa dalam jumlah kecil dari campuran yang kompleks karena memungkinkan pemindahan senyawa secara bertahap ke pelarut yang diinginkan. Selain itu, rasio volume antarfasa juga memengaruhi efisiensi ekstraksi—semakin besar volume pelarut yang digunakan, semakin besar kemungkinan senyawa berpindah ke pelarut tersebut.

Prinsip ini banyak digunakan dalam berbagai bidang, seperti pemurnian produk alami, isolasi senyawa kimia, analisis laboratorium, dan pengolahan limbah cair. Dalam skala industri, ekstraksi cair-cair diaplikasikan untuk pemisahan zat dalam industri farmasi, makanan, serta pengolahan logam. Teknik ini dinilai efisien karena tidak memerlukan pemanasan tinggi dan dapat dilakukan pada suhu kamar, sehingga cocok untuk senyawa yang mudah menguap atau rusak oleh panas.

Keseluruhan proses ekstraksi cair-cair bergantung pada pemahaman yang baik tentang sifat fisikokimia senyawa yang ingin dipisahkan, karakteristik pelarut yang digunakan, dan parameter sistem seperti suhu dan waktu kontak. Dengan menerapkan prinsip distribusi dan kesetimbangan, teknik ini menjadi alat penting dalam pemisahan dan pemurnian senyawa secara selektif dan efisien dalam sistem dua fasa cair.

4.3 Faktor-Faktor yang Memengaruhi Proses Ekstraksi

Proses ekstraksi merupakan teknik pemisahan yang digunakan untuk memisahkan senyawa tertentu dari campurannya, baik dalam skala laboratorium maupun industri. Keberhasilan ekstraksi sangat bergantung pada sejumlah faktor yang saling berkaitan dan harus diatur secara cermat agar proses berjalan dengan efisien dan hasil yang diperoleh memiliki kemurnian serta kuantitas yang optimal. Dalam praktiknya, setiap faktor memiliki pengaruh langsung terhadap seberapa besar senyawa target dapat ditransfer dari satu fase ke fase lain, biasanya dari fase cair ke cair atau dari padat ke cair, tergantung pada jenis ekstraksi yang dilakukan.

Faktor pertama yang sangat menentukan dalam proses ekstraksi adalah jenis pelarut yang digunakan. Pemilihan pelarut tidak bisa dilakukan sembarangan, karena harus mempertimbangkan perbedaan polaritas antara pelarut dan senyawa yang akan diekstrak. Dalam ekstraksi cair-cair, pelarut harus bersifat tidak saling

bercampur satu sama lain, seperti kombinasi antara air (polar) dan pelarut organik seperti eter atau kloroform (nonpolar). Perbedaan polaritas ini memungkinkan senyawa target, tergantung pada sifat kimianya, untuk larut secara selektif dalam salah satu pelarut. Senyawa non-polar cenderung larut dalam pelarut organik, sedangkan senyawa polar akan lebih mudah larut dalam air atau larutan polar lainnya. Oleh karena itu, pemahaman mengenai sifat kimiawi senyawa target sangat penting dalam menentukan pelarut yang tepat untuk memaksimalkan hasil ekstraksi.

Suhu juga menjadi faktor yang tidak bisa diabaikan dalam proses ekstraksi. Suhu berpengaruh terhadap kelarutan senyawa dalam pelarut serta laju perpindahan massa dari satu fase ke fase lainnya. Dalam banyak kasus, peningkatan suhu dapat meningkatkan kelarutan senyawa dan mempercepat proses ekstraksi. Namun, perlu diperhatikan bahwa suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan degradasi termal pada senyawa yang sensitif terhadap panas, sehingga menurunkan kualitas hasil ekstraksi. Oleh karena itu, suhu harus diatur sedemikian rupa agar seimbang antara efisiensi dan stabilitas senyawa. Pada ekstraksi senyawa alami, misalnya, suhu yang terlalu tinggi dapat merusak senyawa bioaktif seperti vitamin atau senyawa fenolik, sehingga penting untuk mempertahankan suhu pada kisaran tertentu agar struktur kimia tetap terjaga.

pH larutan merupakan faktor lain yang berperan penting terutama dalam ekstraksi senyawa asam-basa atau senyawa yang dapat mengalami ionisasi. Perubahan pH dapat memengaruhi bentuk ionik atau non-ionik dari suatu senyawa, yang pada gilirannya

menentukan kelarutan senyawa tersebut dalam pelarut tertentu. Sebagai contoh, senyawa asam lemah akan lebih larut dalam pelarut organik dalam bentuk non-ionik, sedangkan dalam bentuk ionik akan lebih larut dalam air. Oleh karena itu, pengaturan pH dilakukan untuk memaksimalkan ekstraksi senyawa dalam bentuk yang diinginkan. Dalam beberapa kasus, penambahan asam atau basa diperlukan untuk mengubah pH larutan sehingga memperbaiki efisiensi ekstraksi. Hal ini banyak diterapkan dalam industri farmasi atau ekstraksi senyawa dari bahan alam.

Volume pelarut yang digunakan dalam ekstraksi juga memengaruhi seberapa banyak senyawa dapat ditarik dari fase asalnya. Secara umum, semakin besar volume pelarut, maka semakin banyak senyawa target yang dapat larut dan diekstrak. Namun, penggunaan pelarut dalam jumlah besar tidak selalu menjamin efisiensi proses, karena pada titik tertentu peningkatan volume tidak lagi meningkatkan hasil secara signifikan dan justru menambah biaya serta kesulitan dalam pemisahan tahap selanjutnya. Oleh karena itu, perlu ditentukan volume optimal pelarut yang digunakan berdasarkan percobaan awal atau berdasarkan literatur yang relevan. Selain itu, dalam ekstraksi bertingkat (*multiple extraction*), penggunaan pelarut dalam beberapa tahap dengan volume terbagi sering kali lebih efektif dibandingkan satu tahap dengan volume besar.

Selain keempat faktor utama tersebut, proses ekstraksi juga dapat dipengaruhi oleh waktu kontak antara fase, kecepatan pengadukan, serta bentuk dan ukuran partikel bila yang diekstrak

berasal dari bahan padat. Waktu kontak yang cukup dan pengadukan yang efisien akan mempercepat perpindahan senyawa dari fase asal ke pelarut, sedangkan bahan padat dengan ukuran partikel lebih kecil memiliki luas permukaan lebih besar yang mempercepat proses pelarutan.

Dengan memahami dan mengendalikan faktor-faktor tersebut secara tepat, proses ekstraksi dapat dilakukan dengan lebih efisien dan hasil yang diperoleh lebih maksimal. Keberhasilan ekstraksi bukan hanya ditentukan oleh keberadaan senyawa target, tetapi juga oleh bagaimana setiap kondisi pendukung diatur agar senyawa tersebut dapat dipisahkan dengan cara yang paling efektif. Strategi ini sangat penting dalam berbagai bidang seperti farmasi, industri makanan, kimia analitik, dan pengolahan bahan alam, di mana kualitas ekstrak sangat menentukan nilai dan fungsinya.

4.4 Aplikasi Ekstraksi Cair-Cair

Ekstraksi cair-cair merupakan teknik pemisahan yang banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang karena kemampuannya memisahkan komponen dalam campuran berdasarkan perbedaan kelarutan senyawa dalam dua pelarut yang tidak saling bercampur. Aplikasi dari teknik ini sangat luas, mulai dari skala laboratorium hingga industri, dengan tujuan utama untuk memurnikan, memisahkan, atau mengonsentrasikan senyawa tertentu dari matriks yang kompleks. Prinsip dasarnya adalah memindahkan zat terlarut dari satu pelarut ke pelarut lainnya yang lebih selektif, sehingga

komponen target dapat diisolasi secara efisien tanpa merusak struktur kimianya.

Salah satu aplikasi utama ekstraksi cair-cair adalah dalam pemisahan senyawa organik dari campuran reaksi. Dalam sintesis kimia, hasil reaksi sering kali mengandung produk utama, sisa reagen, produk samping, serta pelarut. Ekstraksi digunakan untuk memisahkan produk target dari zat-zat lain yang tidak diinginkan. Sebagai contoh, setelah reaksi organik selesai dilakukan dalam pelarut air, pelarut organik seperti etil asetat atau diklorometana dapat digunakan untuk mengekstrak senyawa organik ke dalam fase organik. Teknik ini memungkinkan pemurnian awal sebelum tahap pemisahan lanjutan seperti kristalisasi atau kromatografi.

Di bidang pemurnian produk alami, ekstraksi cair-cair memainkan peran penting dalam mengisolasi senyawa bioaktif dari bahan alam. Minyak atsiri, misalnya, diekstraksi dari tumbuhan menggunakan pelarut nonpolar seperti heksana atau pelarut semi polar untuk memperoleh campuran volatil yang mengandung komponen aromatik. Dalam kasus alkaloid, senyawa ini sering kali diekstraksi dari jaringan tanaman dengan pelarut polar, kemudian dipisahkan dari pengotor melalui pemindahan ke fase yang berbeda dengan penyesuaian pH. Teknik ini memungkinkan isolasi senyawa aktif dari campuran kompleks jaringan biologis dengan cara yang relatif selektif dan efisien.

Industri farmasi juga sangat bergantung pada ekstraksi cair-cair dalam proses produksi maupun analisis. Pemisahan zat aktif dari matriks biologis atau campuran reaksi kimia sangat penting untuk

menjamin kemurnian dan efektivitas obat. Dalam skala besar, teknik ini digunakan untuk memurnikan antibiotik, hormon, atau senyawa bioaktif lainnya dari media fermentasi. Selain itu, ekstraksi cair-cair digunakan dalam analisis residu obat dalam sampel biologis, seperti darah atau urin, di mana senyawa target dipisahkan dari matriks dengan pelarut tertentu sebelum dilakukan pengujian lanjutan dengan teknik seperti spektrometri massa atau kromatografi.

Di industri makanan, ekstraksi cair-cair diterapkan dalam pemisahan dan konsentrasi senyawa penambah rasa, aroma, atau pewarna alami. Sebagai contoh, senyawa vanilin dari vanilla atau limonen dari kulit jeruk dapat diekstraksi menggunakan pelarut yang sesuai. Teknik ini memungkinkan pemrosesan bahan pangan tanpa merusak komponen sensitif yang mudah menguap atau terdegradasi oleh suhu tinggi. Penggunaan pelarut yang aman dan ramah lingkungan juga menjadi perhatian dalam industri ini agar hasil ekstraksi dapat langsung digunakan atau diproses lebih lanjut dengan aman.

Dalam konteks lingkungan, ekstraksi cair-cair menjadi teknik penting dalam analisis kontaminan di air dan tanah. Senyawa pencemar seperti pestisida, logam berat, atau senyawa organik berbahaya dapat diekstrak dari sampel air atau tanah menggunakan pelarut khusus untuk kemudian dianalisis. Teknik ini memungkinkan deteksi senyawa dalam konsentrasi sangat rendah, yang penting untuk penilaian kualitas lingkungan dan pengawasan terhadap pencemaran. Misalnya, dalam analisis air limbah, pelarut organik digunakan untuk mengekstrak senyawa aromatik berbahaya

yang kemudian dianalisis secara kuantitatif untuk memastikan apakah kandungannya melampaui ambang batas yang diperbolehkan.

Ekstraksi cair-cair juga semakin dikembangkan dengan strategi yang lebih ramah lingkungan melalui penggunaan pelarut hijau atau sistem mikroekstraksi yang meminimalkan penggunaan pelarut organik berbahaya. Teknik seperti ekstraksi cair-cair berbantuan membran atau ekstraksi fase padat-cair hibrid dengan prinsip serupa kini mulai digunakan untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan proses. Dalam pengembangan teknologi kimia dan bioanalitik modern, kemampuan memisahkan dan memurnikan senyawa secara selektif menjadi sangat penting, dan ekstraksi cair-cair tetap menjadi teknik kunci yang relevan dan terus berkembang.

4.5 Prosedur Umum Ekstraksi Cair-Cair

Prosedur umum ekstraksi cair-cair melibatkan serangkaian tahapan sistematis yang bertujuan untuk memindahkan senyawa target dari satu fasa cair ke fasa cair lain yang tidak saling bercampur, dengan memanfaatkan perbedaan kelarutan. Proses ini biasanya dilakukan menggunakan alat bantu berupa corong pisah, yang memungkinkan pemisahan dua lapisan cairan secara efisien dan aman.

Langkah pertama dimulai dengan mencampurkan larutan sampel, yaitu campuran yang mengandung senyawa yang akan dipisahkan, dengan pelarut ekstraksi yang sesuai. Pelarut yang

digunakan harus bersifat tidak saling larut dengan pelarut asal sampel, biasanya terdiri atas satu pelarut polar seperti air dan satu pelarut nonpolar seperti eter, kloroform, atau heksana. Kedua pelarut tersebut dimasukkan ke dalam corong pisah, kemudian ditutup dan dikocok dengan hati-hati untuk memungkinkan distribusi senyawa terlarut antara dua fasa cair.

Setelah pengocokan, corong pisah diletakkan secara vertikal dan dibiarkan dalam keadaan diam hingga terbentuk dua lapisan cair yang terpisah sempurna. Lapisan yang lebih berat akan berada di bawah, sementara lapisan yang lebih ringan berada di atas, tergantung pada densitas pelarut yang digunakan. Pada tahap ini, penting untuk membuka sedikit keran corong pisah sesekali untuk melepaskan tekanan gas yang mungkin terbentuk akibat pengocokan.

Setelah kedua fasa benar-benar terpisah dan tidak ada lagi emulsi di antara keduanya, langkah selanjutnya adalah memisahkan masing-masing lapisan. Lapisan bawah dikeluarkan terlebih dahulu melalui kran corong pisah, kemudian lapisan atas dituangkan secara hati-hati melalui leher corong. Masing-masing lapisan dikumpulkan dalam wadah terpisah untuk dianalisis atau diproses lebih lanjut, tergantung pada tujuan ekstraksi. Senyawa target biasanya akan berada pada salah satu fasa tergantung pada kelarutan relatifnya, yang ditentukan oleh distribusi partisi antara kedua pelarut.

Jika efisiensi pemisahan pada ekstraksi pertama belum optimal, proses ini dapat diulang dengan menggunakan pelarut yang sama atau pelarut baru untuk melakukan ekstraksi bertingkat.

Pengulangan ini meningkatkan jumlah senyawa target yang berhasil dipindahkan ke pelarut ekstraksi. Beberapa teknik bahkan menerapkan ekstraksi bolak-balik (back extraction) untuk memindahkan kembali senyawa dari pelarut ekstraksi ke pelarut lain, terutama jika senyawa perlu dimurnikan lebih lanjut.

Selama seluruh proses, penting untuk memperhatikan faktor keamanan, terutama jika pelarut yang digunakan bersifat mudah menguap, beracun, atau mudah terbakar. Penggunaan sarung tangan, pelindung mata, dan bekerja di ruang dengan ventilasi baik atau di dalam lemari asam sangat dianjurkan. Selain itu, pemilihan pelarut juga perlu mempertimbangkan dampaknya terhadap lingkungan dan kesehatan, sehingga alternatif pelarut hijau yang lebih ramah lingkungan semakin banyak digunakan dalam praktik modern.

Dengan mengikuti prosedur ini secara sistematis dan cermat, ekstraksi cair-cair dapat memberikan hasil pemisahan yang efisien dan selektif, baik untuk keperluan analisis laboratorium maupun produksi skala industri. Teknik ini menjadi dasar penting dalam berbagai aplikasi, mulai dari kimia analitik, farmasi, industri makanan, hingga pengolahan limbah dan pemurnian bahan alam.

4.6 Latihan Soal

1. Jelaskan prinsip kerja dari ekstraksi cair-cair!
2. Sebutkan dua faktor yang mempengaruhi efisiensi proses ekstraksi!
3. Apa tujuan penggunaan corong pisah dalam ekstraksi cair-cair?

4. Bagaimana cara memilih pelarut yang tepat untuk proses ekstraksi?
5. Sebutkan dua aplikasi ekstraksi cair-cair dalam industri!

BAB 5: Ekstraksi Padat-Cair

(*Leaching*)

5.1 Pengertian *Leaching*

Leaching, atau yang lebih dikenal dengan istilah ekstraksi padat-cair, merupakan proses pemisahan komponen-komponen tertentu dari suatu padatan menggunakan pelarut cair. Proses ini merupakan teknik yang sangat penting dalam berbagai industri, seperti industri kimia, farmasi, makanan, dan pertambangan, untuk mengekstrak zat aktif atau senyawa tertentu yang terkandung dalam bahan alami atau mineral. Pada dasarnya, *leaching* adalah teknik yang efektif untuk memisahkan bahan terlarut dari padatan berdasarkan perbedaan kelarutan bahan tersebut dalam pelarut cair yang digunakan. Dalam industri farmasi, kimia, dan makanan, *leaching* sering kali digunakan untuk mengisolasi senyawa bioaktif dari tanaman, bahan herbal, atau mineral yang memiliki potensi besar untuk digunakan dalam pembuatan produk terapeutik, kosmetik, atau bahan makanan.

Dalam proses *leaching*, bahan padat yang ingin diekstraksi dicampurkan dengan pelarut cair yang sesuai, yang kemudian akan melarutkan senyawa atau komponen tertentu yang diinginkan, sementara komponen lainnya tetap berada dalam bentuk padat. Proses ini dapat dilakukan dengan berbagai cara dan kondisi yang

bervariasi, tergantung pada jenis bahan yang digunakan, senyawa yang akan diekstraksi, dan tujuan dari proses tersebut. Selain itu, pemilihan pelarut yang tepat sangat penting karena pelarut yang digunakan harus memiliki kemampuan untuk melarutkan komponen tertentu, sementara tidak melarutkan komponen lain yang tidak diinginkan. Faktor-faktor seperti suhu, waktu, dan teknik ekstraksi yang digunakan juga mempengaruhi efisiensi proses *leaching*.

Salah satu contoh paling umum dari penggunaan *leaching* adalah dalam industri farmasi dan kosmetik, di mana proses ini digunakan untuk mengekstraksi senyawa bioaktif dari tanaman atau bahan alami lainnya. Sebagai contoh, dalam pembuatan obat herbal, senyawa aktif seperti alkaloid, flavonoid, atau minyak esensial dapat diekstraksi menggunakan pelarut cair seperti etanol, air, atau pelarut organik lainnya. Senyawa-senyawa ini kemudian digunakan dalam produk obat atau kosmetik untuk memberikan manfaat terapeutik, seperti antiinflamasi, antibakteri, atau antioksidan. *Leaching* juga digunakan dalam industri makanan untuk mengekstrak perasa atau bahan aktif dari rempah-rempah, biji-bijian, atau buah-buahan untuk menghasilkan ekstrak alami yang digunakan dalam produk makanan, suplemen, atau minuman.

Di dalam industri pertambangan, *leaching* juga memiliki aplikasi yang sangat penting. Salah satu contoh paling terkenal adalah proses ekstraksi logam dari bijih mineral, seperti ekstraksi emas atau tembaga, yang sering menggunakan teknik *leaching* dengan pelarut sianida. Dalam hal ini, bijih mineral yang mengandung logam berharga dicampurkan dengan pelarut, dan

pelarut tersebut akan melarutkan logam yang diinginkan dari mineral, memungkinkan pemisahan logam dari bahan pengotor lainnya. Meskipun penggunaan sianida dalam industri pertambangan telah membawa kontroversi karena dampak lingkungan yang ditimbulkannya, teknik *leaching* ini tetap menjadi salah satu teknik yang paling efisien dalam ekstraksi logam.

Pada dasarnya, ada beberapa jenis proses *leaching* yang digunakan dalam industri ini, masing-masing dengan keunggulan dan aplikasi tertentu. Proses yang paling umum digunakan adalah maserasi, refleksi, pencucian tekanan, dan penggunaan suhu tinggi untuk mempercepat proses ekstraksi.

Maserasi adalah teknik ekstraksi yang paling sederhana dan banyak digunakan, terutama untuk bahan tanaman atau herbal yang tidak memerlukan pemanasan tinggi. Teknik maserasi, bahan padat (seperti daun, akar, atau biji tanaman) dicampurkan dengan pelarut cair pada suhu kamar dan dibiarkan terendam untuk periode waktu tertentu. Proses ini memungkinkan senyawa aktif dari bahan tanaman untuk larut dalam pelarut, yang kemudian bisa dipisahkan dan digunakan lebih lanjut. Meskipun maserasi mudah dilakukan dan tidak memerlukan peralatan rumit, proses ini memerlukan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan teknik ekstraksi lainnya.

Refluks adalah teknik *leaching* yang melibatkan pemanasan pelarut dan bahan padat dalam suatu wadah tertutup dengan kondensor yang memungkinkan pelarut untuk menguap dan kemudian mengembun kembali. Proses ini mempercepat ekstraksi karena panas dapat meningkatkan laju pelarutan senyawa dalam

bahan padat. Teknik refleksi banyak digunakan ketika senyawa yang ingin diekstraksi membutuhkan suhu lebih tinggi untuk larut dalam pelarut. Salah satu contoh aplikasinya adalah dalam ekstraksi minyak esensial dari tanaman.

Ekstraksi cair bertekanan adalah teknik ekstraksi yang melibatkan penggunaan tekanan tinggi untuk meningkatkan efisiensi proses *leaching*. Dalam proses ini, pelarut digunakan dalam keadaan bertekanan tinggi, yang memungkinkan untuk melarutkan senyawa yang sulit diakses pada kondisi normal. Teknik ini digunakan untuk bahan padat yang sulit larut dalam pelarut pada tekanan atmosfer, seperti bijih mineral atau senyawa yang sangat terikat dalam matriks tanaman. Penggunaan tekanan meningkatkan kelarutan dan mempercepat proses *leaching*.

Penggunaan suhu tinggi dalam *leaching* digunakan untuk mempercepat proses ekstraksi, terutama pada bahan-bahan yang memiliki senyawa yang lebih sulit larut. Peningkatan suhu seringkali meningkatkan kecepatan reaksi kimia yang terlibat dalam pelarutan senyawa dari bahan padat. Misalnya, dalam ekstraksi minyak esensial dari bahan tanaman, pemanasan dapat membantu melarutkan minyak dari sel-sel tanaman yang mengandung minyak tersebut, sehingga meningkatkan jumlah ekstrak yang diperoleh.

Teknik *Ultrasonic Assisted Extraction* (UAE) merupakan teknik ekstraksi yang menggunakan prinsip kavitasi akustik untuk memproduksi gelembung spontan (kavitasi) dalam fase cair dibawah titik didihnya dan akan merusak dinding sel sehingga pelarut dapat masuk ke dalam bahan. Teknik UAE memiliki kelebihan

dibandingkan teknik ekstraksi maserasi yaitu dapat meningkatkan penetrasi dari cairan menuju dinding sel, laju perpindahan massa lebih cepat, meningkatkan hasil ekstraksi, penggunaan suhu yang rendah, volume pelarut yang sedikit, dan waktu yang singkat.

Microwave Assisted Extraction (MAE) merupakan teknik ekstraksi yang efisien karena kemampuannya untuk memanaskan pelarut untuk mengekstraksi bahan alam secara internal dan eksternal tanpa terjadinya *gradient* termal dengan menggunakan gelombang energi mikro. Senyawa yang terdapat dalam suatu bahan alam mampu menyerap energi gelombang mikro. Selain itu gelombang mikro yang dibenturkan ke sampel menyebabkan pemanasan pada pelarut, sehingga dapat terjadi proses difusi pada senyawa yang terkandung dalam bahan alam. MAE memiliki banyak keuntungan dibandingkan dengan teknik ekstraksi lainnya, yaitu waktu ekstraksi yang lebih singkat, menghasilkan randemen yang lebih besar, penggunaan energi yang lebih kecil, dan lebih hemat biaya karena berkurangnya jumlah penggunaan pelarut.

Ekstraksi dengan teknik *Pressurized Liquid Extraction* (PLE) dilakukan dengan cara mengemas sampel dalam ekstraktor, kemudian pelarut dipompa ke dalam ekstraktor menggunakan pompa cair dan melewati sistem panas untuk mencapai suhu yang dikehendaki. Teknik PLE dapat dilakukan dengan teknik statis atau dinamis, ekstraksi statis adalah proses di mana ekstraktor diberi tekanan, sementara katup keluar tetap tertutup, katup kemudian dibuka dan ekstrak dikumpulkan. Sebaliknya pada teknik dinamis katup keluar tetap terbuka, dan pelarut dipompa secara terus menerus

melalui ekstraktor. Kelebihan dari teknik ini yaitu teknik ekstraksi PLE dapat meluruhkan sel tanaman sehingga dapat mengambil komponen bioaktif yang terdapat dalam sel secara keseluruhan. Hal ini tidak terjadi pada teknik ekstraksi tradisional di mana komponen yang ada pada tanaman intraseluler (di dalam sel) tidak dapat terekstrak sepenuhnya. Teknik ini digunakan untuk mengekstrak senyawa dari sampel padat, seperti bahan tanaman, tanah, dan polimer, yang kemudian dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut.

Leaching memiliki banyak keuntungan, di antaranya adalah kemampuannya untuk mengekstrak senyawa bioaktif atau zat tertentu dengan selektivitas yang tinggi. Selain itu, teknik ini juga memungkinkan untuk mendapatkan ekstrak dengan konsentrasi tinggi, yang sangat berguna dalam berbagai produk farmasi dan makanan. Namun, meskipun *leaching* adalah proses yang sangat efisien, ada beberapa tantangan yang perlu diperhatikan, seperti pemilihan pelarut yang tepat, kontrol suhu, dan waktu ekstraksi yang optimal. Jika tidak dilakukan dengan hati-hati, proses *leaching* dapat menghasilkan ekstrak yang tidak murni atau bahkan mengurangi kualitas senyawa yang diinginkan.

Salah satu masalah penting dalam *leaching* adalah dampak lingkungan yang dihasilkannya, terutama dalam industri pertambangan, di mana penggunaan pelarut kimia seperti sianida dapat mencemari lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. Oleh karena itu, ada dorongan untuk mengembangkan teknik *leaching* yang lebih ramah lingkungan, seperti menggunakan pelarut yang

lebih aman atau mengoptimalkan proses untuk mengurangi limbah dan pencemaran.

Secara keseluruhan, *leaching* adalah teknik yang sangat penting dalam berbagai industri, karena memungkinkan pemisahan dan ekstraksi senyawa dari bahan padat dengan efisiensi yang tinggi. Proses ini tidak hanya digunakan dalam pembuatan produk farmasi dan makanan, tetapi juga dalam ekstraksi logam dan bahan berharga lainnya dari sumber alam. Dengan memahami prinsip dan teknik *leaching*, kita dapat mengoptimalkan penggunaannya untuk mendapatkan produk yang lebih berkualitas dan ramah lingkungan, yang pada gilirannya dapat meningkatkan efisiensi produksi dan keberlanjutan industri.

5.2 Prinsip Dasar *Leaching*

Leaching adalah proses pemisahan suatu zat terlarut dari padatan dengan menggunakan pelarut. Proses ini terjadi ketika suatu zat yang terlarut dalam padatan berinteraksi dengan pelarut, menghasilkan pemindahan zat terlarut tersebut ke dalam larutan. *Leaching* banyak digunakan dalam berbagai industri, seperti industri pengolahan mineral, ekstraksi bahan alami, dan bahkan dalam pengolahan limbah. Prinsip dasar *leaching* bergantung pada perpindahan massa zat terlarut dari padatan ke pelarut melalui mekanisme difusi dan proses kimia yang terjadi. Terdapat beberapa faktor penting yang mempengaruhi efektivitas proses *leaching*, termasuk ukuran partikel padatan, konsentrasi gradien antara

padatan dan pelarut, suhu dan waktu kontak, serta jenis pelarut dan polaritasnya.

Ukuran Partikel Padatan merupakan salah satu faktor yang paling mempengaruhi proses *leaching*. Semakin kecil ukuran partikel padatan, semakin besar luas permukaan yang tersedia untuk berinteraksi dengan pelarut. Hal ini mengurangi jarak yang harus ditempuh oleh molekul zat terlarut untuk berpindah ke pelarut. Oleh karena itu, partikel yang lebih kecil akan lebih cepat larut dibandingkan dengan partikel yang lebih besar. Proses ini sering kali disebut sebagai "leaching difusi", di mana perpindahan zat terlarut dari permukaan padatan ke pelarut terjadi melalui proses difusi. Dalam praktiknya, untuk meningkatkan efisiensi proses *leaching*, partikel padatan sering kali dihancurkan atau digerus terlebih dahulu untuk mendapatkan ukuran yang lebih kecil.

Konsentrasi Gradien antara padatan dan pelarut juga sangat mempengaruhi laju proses *leaching*. Gradien konsentrasi ini mengacu pada perbedaan konsentrasi zat terlarut antara bagian dalam padatan dan pelarut. Prinsip dasar difusi menyatakan bahwa zat akan berpindah dari daerah dengan konsentrasi tinggi menuju daerah dengan konsentrasi rendah. Semakin besar perbedaan konsentrasi antara padatan dan pelarut, semakin cepat perpindahan zat terlarut terjadi. Oleh karena itu, peningkatan konsentrasi zat terlarut dalam pelarut atau pengurangan konsentrasi pada padatan dapat mempercepat proses *leaching*.

Suhu dan waktu kontak juga merupakan dua faktor penting dalam *leaching*. Suhu yang lebih tinggi dapat meningkatkan laju

reaksi kimia dan mempercepat pergerakan molekul, yang memungkinkan proses pemindahan zat terlarut menjadi lebih cepat. Peningkatan suhu biasanya meningkatkan kelarutan banyak zat, yang dapat meningkatkan jumlah zat terlarut yang dapat dipindahkan ke dalam pelarut. Namun, suhu yang terlalu tinggi juga bisa menyebabkan perubahan dalam sifat fisik atau kimia pelarut atau padatan, yang perlu diperhatikan dalam desain proses *leaching*. Selain itu, waktu kontak antara padatan dan pelarut juga sangat mempengaruhi efektivitas *leaching*. Semakin lama waktu kontak, semakin lama proses difusi berlangsung, dan dengan demikian, semakin banyak zat terlarut yang dapat dipindahkan dari padatan ke pelarut. Waktu kontak yang cukup dapat memastikan bahwa hampir seluruh zat terlarut dikeluarkan dari padatan.

Jenis pelarut dan polaritasnya memainkan peran kunci dalam *leaching*. Pemilihan pelarut yang tepat sangat bergantung pada sifat kimia zat yang ingin diekstraksi. Zat terlarut dengan sifat polar lebih mudah larut dalam pelarut yang juga polar, seperti air. Sebaliknya, zat yang bersifat nonpolar lebih cenderung larut dalam pelarut nonpolar, seperti pelarut organik. Oleh karena itu, pemilihan pelarut yang tepat sangat menentukan efisiensi proses *leaching*. Selain itu, kelarutan dan kompatibilitas antara pelarut dan zat terlarut juga mempengaruhi seberapa banyak zat yang dapat dipindahkan ke dalam pelarut.

Secara keseluruhan, perpindahan zat terlarut dalam proses *leaching* terjadi karena adanya perbedaan konsentrasi antara padatan dan pelarut, serta perbedaan kelarutan zat terlarut dalam pelarut.

Faktor-faktor seperti ukuran partikel, konsentrasi gradien, suhu, waktu kontak, serta jenis dan polaritas pelarut akan menentukan kecepatan dan efisiensi proses *leaching*. Untuk mendapatkan hasil yang optimal, setiap faktor ini harus diatur dengan hati-hati agar proses *leaching* dapat berjalan dengan efisien dan menghasilkan ekstrak yang maksimal. Sebagai contoh, dalam industri ekstraksi bahan aktif dari tanaman, ukuran partikel yang lebih kecil, suhu yang lebih tinggi, dan waktu kontak yang lebih lama dapat meningkatkan hasil ekstraksi, sementara pemilihan pelarut yang tepat akan menentukan jenis zat aktif yang dapat diekstraksi dengan baik.

5.3 Teknik dan Peralatan *Leaching*

Leaching adalah proses ekstraksi senyawa atau komponen yang larut dari bahan padat dengan menggunakan pelarut. Dalam pengolahan bahan alam, seperti tanaman obat atau biji-bijian, *leaching* adalah teknik yang umum digunakan untuk mengekstraksi senyawa bioaktif yang terkandung di dalamnya. Proses *leaching* dapat dilakukan dengan berbagai teknik dan peralatan, masing-masing memiliki keunggulan dan kekurangan tergantung pada jenis bahan dan senyawa yang ingin diekstraksi. Berikut adalah beberapa teknik *leaching* yang umum digunakan, serta peralatan yang diperlukan dalam proses ini.

Maserasi adalah teknik *leaching* yang dilakukan dengan cara merendam bahan padat dalam pelarut pada suhu ruang dalam waktu yang lama. Dalam proses ini, bahan yang akan diekstraksi, seperti

daun atau akar tanaman, direndam dalam pelarut seperti air, alkohol, atau pelarut organik lainnya. Proses ini berlangsung dalam waktu yang cukup lama, biasanya antara beberapa jam hingga beberapa hari, untuk memungkinkan pelarut menarik senyawa aktif dari bahan padat tersebut. Maserasi cukup sederhana dan mudah dilakukan, serta tidak memerlukan peralatan yang rumit. Namun, kelemahan dari teknik ini adalah waktu ekstraksi yang panjang, yang bisa mengurangi efisiensi ekstraksi jika bahan yang digunakan tidak cukup mudah larut dalam pelarut. Maserasi sering digunakan dalam pengolahan bahan herbal untuk menghasilkan ekstrak sederhana dengan kandungan senyawa aktif yang lebih sedikit.

Perkolasi adalah teknik ekstraksi di mana pelarut menetes secara kontinu melalui bahan padat yang dikemas dalam kolom. Berbeda dengan maserasi yang hanya merendam bahan padat, perkolasi menggunakan aliran pelarut yang berkesinambungan untuk menyaring senyawa-senyawa aktif keluar dari bahan padat. Dalam perkolasi, pelarut dipompa atau mengalir melalui bahan padat dalam suatu kolom perkulator. Teknik ini memungkinkan ekstraksi yang lebih efisien, karena pelarut baru terus menerus melewati bahan padat dan menarik senyawa aktif yang terdapat di dalamnya. Proses ini cenderung lebih cepat dibandingkan dengan maserasi dan lebih efektif dalam mengekstraksi komponen-komponen yang larut dalam pelarut. Perkolasi banyak digunakan dalam pembuatan ekstrak herbal dan obat-obatan, di mana volume ekstraksi yang lebih besar dan konsentrasi senyawa aktif yang lebih tinggi diinginkan.

Sokletasi adalah teknik *leaching* yang lebih canggih dan melibatkan pemanasan pelarut yang direfluks secara berulang melalui sampel padat. Dalam proses ini, pelarut dipanaskan hingga mendidih dan kemudian menguap ke atas, kemudian mengembun dan menetes kembali ke dalam sampel padat. Proses ini diulang secara terus-menerus sehingga pelarut dapat mengekstrak senyawa aktif dari bahan padat secara lebih efektif. Teknik sokletasi sangat berguna ketika bahan yang diekstraksi memiliki senyawa aktif yang sukar larut atau membutuhkan waktu yang lama untuk diekstraksi. Keunggulan dari teknik ini adalah efisiensinya yang tinggi dalam mengekstraksi senyawa yang tidak larut dengan mudah dalam pelarut pada suhu ruang. Oleh karena itu, sokletasi sering digunakan dalam industri kimia, farmasi, dan makanan untuk menghasilkan ekstrak yang lebih terkonsentrasi dan lebih bersih. Namun, kelemahannya adalah penggunaan pelarut yang cukup banyak dan peralatan yang relatif lebih mahal.

Peralatan yang digunakan dalam *leaching* sangat beragam, bergantung pada teknik yang diterapkan. Salah satu peralatan utama yang digunakan dalam proses *leaching* adalah bejana *leaching*, yang digunakan untuk proses maserasi dan beberapa jenis ekstraksi lainnya. Bejana *leaching* biasanya berupa wadah besar yang dapat menampung bahan padat dan pelarut dalam jumlah yang sesuai. Bejana ini memungkinkan bahan padat direndam dalam pelarut untuk waktu yang lama, seperti yang dilakukan dalam proses maserasi. Bejana *leaching* harus terbuat dari bahan yang tidak

bereaksi dengan pelarut yang digunakan untuk menghindari kontaminasi ekstrak.

Untuk perkolasi, alat utama yang digunakan adalah kolom perkolator, yang dirancang khusus untuk menampung bahan padat dan memungkinkan pelarut mengalir secara kontinu melalui bahan tersebut. Kolom perkolator biasanya terdiri dari tabung panjang yang diisi dengan bahan yang akan diekstraksi. Pelarut mengalir dari atas ke bawah melalui kolom, membawa senyawa yang larut dan kemudian dikumpulkan di bagian bawah kolom. Kolom perkolator ini memungkinkan ekstraksi lebih cepat dan lebih efisien dibandingkan dengan maserasi.

Sementara itu, untuk proses sokletasi, peralatan yang digunakan adalah alat ekstraksi sokletasi. Alat ini terdiri dari beberapa komponen utama: labu pemanas, kondensor, dan kolom Sokletasi itu sendiri. Pelarut dipanaskan dalam labu dan menguap, kemudian mengalir melalui kondensor yang mendinginkan uap tersebut sehingga kembali menjadi cairan dan menetes ke dalam bahan padat di dalam kolom sokletasi. Proses ini terus berulang, memungkinkan pelarut untuk mengekstraksi senyawa aktif dari bahan padat secara efisien. Alat ekstraksi sokletasi umumnya digunakan di laboratorium riset untuk mengekstrak senyawa kimia atau bahan aktif dari tanaman atau bahan alami lainnya.

Teknik *Ultrasonic Assisted Extraction* (UAE) menggunakan bantuan gelombang ultrasonik merupakan teknik modern yang banyak digunakan dalam ekstraksi suatu bahan alam. Teknik ini mempunyai prinsip kerja dengan membangkitkan ultrasound secara

lokal dari kavitas mikro sekitar bahan yang akan diekstraksi sehingga pada bahan tersebut terjadi pemanasan, akibatnya dapat melepaskan senyawa yang terdapat dalam ekstrak tersebut. Selain itu efek lain yang dihasilkan dari teknik ini yaitu pemecahan dinding sel pada bahan alam sehingga kandungan senyawa yang ada di dalamnya dapat keluar dan panas lokal yang terjadi pada cairan mampu meningkatkan proses difusi ekstrak sehingga senyawa yang didapatkan lebih optimal. Peralatan yang digunakan UAE adalah *Ultrasonic bath* untuk proses sonikasi sampel padat yang sudah direndam dalam pelarut cair.

Teknik MAE didasarkan pada efek langsung gelombang mikro pada molekul material. Transformasi energi elektromagnetik menjadi energi panas terjadi oleh dua mekanisme, yaitu konduksi ionik dan rotasi dipol, baik dalam pelarut dan sampel. Pada banyak aplikasi, kedua mekanisme ini berlangsung secara bersamaan karena efektif mengubah energi gelombang mikro menjadi energi panas. Peralatan utama yang digunakan adalah *microwave* untuk memanaskan sampel dan pelarut menggunakan energi gelombang mikro. Selain itu, wadah yang tahan terhadap gelombang mikro (misalnya labu leher pendek), digunakan untuk menampung sampel dan pelarut selama proses ekstraksi.

Persyaratan instrumen untuk melakukan proses PLE relatif sederhana, sehingga sistem ekstraksi buatan sendiri atau yang disesuaikan dengan tujuan (misalnya, mesin kopi) dapat digunakan sebagai tambahan instrumen yang tersedia secara komersial. Dalam hal apa pun, bahan yang tahan korosi harus digunakan, mengingat

tekanan dan suhu tinggi yang biasanya digunakan. Pada dasarnya, instrumentasi terdiri dari tangki pelarut, pompa, oven yang berisi sel ekstraksi, beberapa katup dan pembatas, serta botol pengumpul. Instrumentasi dasar dapat bervariasi tergantung pada apakah prosesnya statis, di mana volume ekstrak yang digunakan tetap, atau dinamis, di mana ekstrak mengalir terus-menerus melalui sampel. Dalam kedua kasus, reservoir pelarut dihubungkan ke pompa bertekanan tinggi yang memasukkannya ke dalam sel ekstraksi, tempat sampel yang akan dianalisis, mungkin dicampur dengan agen pendispersi atau sorben pembersih, ditempatkan dan membantu mendorong keluar ekstrak setelah proses selesai. Sel ekstraksi ditempatkan dalam oven untuk dipanaskan, sementara botol pengumpul terletak di area di bawah. Tekanan ekstraksi dikontrol oleh katup khusus, dan mungkin ada sirkuit gas inert (biasanya nitrogen) yang membantu menghilangkan pelarut dari saluran setelah ekstraksi statis. PLE dinamis juga memerlukan pompa bertekanan tinggi khusus untuk mengontrol laju aliran pelarut, koil pemanas awal pelarut, dan pembatas tekanan (pengatur tekanan balik) secara lebih tepat, bukan katup buka/tutup statis yang digunakan dalam sistem statis.

Berbagai teknik *leaching* seperti maserasi, perkolasi, dan sokletasi memiliki keunggulan dan kekurangannya masing-masing, tergantung pada jenis bahan yang diekstraksi, tujuan ekstraksi, dan waktu yang tersedia. Meskipun maserasi adalah teknik yang paling sederhana, perkolasi dan sokletasi memberikan hasil yang lebih efisien dan cepat dalam mengekstraksi senyawa aktif. Peralatan

seperti bejana *leaching*, kolom perkolator, dan alat ekstraksi sokletasi berperan penting dalam memastikan proses ekstraksi dapat dilakukan dengan efektif, dan hasil ekstrak yang dihasilkan dapat memenuhi standar kualitas yang diperlukan. Oleh karena itu, pemilihan teknik dan peralatan yang tepat sangat penting dalam proses ekstraksi, baik untuk tujuan riset, pengembangan produk, atau produksi komersial.

5.4 Latihan Soal

1. Jelaskan prinsip dasar proses *leaching*.
2. Apa perbedaan antara maserasi dan perkolasi?
3. Faktor apa saja yang memengaruhi efisiensi *leaching*?
4. Sebutkan contoh aplikasi *leaching* di bidang farmasi.
5. Mengapa ukuran partikel memengaruhi proses ekstraksi padat-cair?
6. Jelaskan perbedaan teknik UAE, MAE dan PLE.

BAB 6: Adsorpsi

6.1 Pengertian Adsorpsi

Adsorpsi merupakan salah satu proses penting yang banyak digunakan dalam berbagai bidang, termasuk lingkungan, farmasi, industri kimia, serta pemurnian air dan udara. Secara sederhana, adsorpsi adalah proses melekatnya atom, ion, atau molekul dari suatu zat—baik itu dalam bentuk gas, cairan, atau zat terlarut—ke permukaan zat padat atau cair yang disebut sebagai adsorben. Proses ini terjadi hanya pada permukaan, sehingga membedakannya dari absorpsi, yaitu proses di mana suatu zat masuk ke dalam seluruh volume zat lainnya.

Dalam konteks ilmiah, adsorpsi sering dikategorikan menjadi dua jenis utama: adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia. Adsorpsi fisika (atau fisisorpsi) melibatkan gaya tarik antarmolekul yang lemah seperti gaya Van der Waals. Proses ini bersifat reversibel dan tidak memerlukan energi aktivasi yang tinggi. Sebaliknya, adsorpsi kimia (atau kemisorpsi) melibatkan pembentukan ikatan kimia antara adsorbat dan permukaan adsorben. Jenis ini bersifat lebih kuat dan umumnya tidak reversibel, serta sering memerlukan energi aktivasi tertentu untuk berlangsung.

Perbedaan mendasar antara adsorpsi dan absorpsi sangat penting untuk dipahami. Pada adsorpsi, zat yang diserap (disebut adsorbat) hanya menempel pada permukaan adsorben. Sebagai

contoh, dalam penyaringan udara, molekul gas polutan seperti karbon monoksida dapat menempel pada permukaan karbon aktif tanpa meresap ke dalam strukturnya secara keseluruhan. Sedangkan pada absorpsi, zat yang diserap masuk ke dalam volume zat lainnya, seperti air yang diserap oleh spons.

Fenomena adsorpsi sangat bergantung pada karakteristik permukaan adsorben. Semakin luas permukaan spesifik suatu bahan, semakin besar kemampuannya untuk mengadsorpsi zat lain. Oleh karena itu, bahan-bahan seperti karbon aktif, zeolit, dan silika gel sangat populer sebagai adsorben karena memiliki struktur berpori dan luas permukaan yang tinggi. Selain itu, sifat kimia permukaan, ukuran pori, dan polaritas juga memengaruhi efektivitas adsorpsi.

Dalam bidang lingkungan, adsorpsi berperan penting dalam pengolahan air limbah. Proses ini digunakan untuk menghilangkan zat-zat berbahaya seperti logam berat (contoh: timbal, merkuri), senyawa organik beracun, dan zat warna dari air buangan industri. Karbon aktif adalah salah satu adsorben paling umum digunakan dalam aplikasi ini karena kemampuannya yang tinggi dalam menarik molekul-molekul polutan ke permukaannya (Foo & Hameed, 2010).

Tak hanya dalam pengolahan limbah, adsorpsi juga berperan penting dalam industri farmasi, khususnya dalam pemisahan dan pemurnian senyawa aktif obat. Dalam industri makanan dan minuman, proses ini digunakan untuk menghilangkan rasa atau bau yang tidak diinginkan. Sementara itu, dalam teknologi gas, adsorpsi dimanfaatkan untuk pemisahan gas dan penyimpanan gas, seperti dalam penghilangan karbon dioksida dari aliran gas alam.

Salah satu konsep penting dalam memahami proses *adsorpsi* adalah isoterm adsorpsi. Isoterm ini menggambarkan hubungan antara jumlah zat yang diadsorpsi dan konsentrasi zat tersebut dalam fase cair atau gas pada suhu tetap. Model-model isoterm yang paling banyak digunakan dalam studi adsorpsi antara lain adalah model Langmuir dan model Freundlich. Kedua model ini membantu menjelaskan bagaimana molekul-molekul menempati permukaan adsorben dan sejauh mana permukaan tersebut dapat menampung adsorbat (Langmuir, 1918).

Dalam praktiknya, pemilihan adsorben yang tepat sangat bergantung pada jenis adsorbat, kondisi proses (seperti suhu dan pH), serta tujuan akhir dari proses tersebut. Oleh karena itu, riset dan pengembangan di bidang adsorpsi terus berkembang untuk menghasilkan teknologi yang lebih efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan.

Secara keseluruhan, adsorpsi adalah proses yang sangat penting dalam berbagai aplikasi teknologi dan industri. Pemahaman yang baik mengenai mekanisme dan prinsip kerja adsorpsi tidak hanya membantu dalam meningkatkan efisiensi proses industri, tetapi juga berkontribusi pada pengelolaan lingkungan yang lebih baik dan pengembangan teknologi masa depan yang berkelanjutan.

6.2 Jenis-Jenis Adsorpsi

Adsorpsi merupakan proses melekatnya molekul atau ion dari suatu zat (adsorbat) pada permukaan zat lain (adsorben). Proses

ini memainkan peran penting dalam berbagai bidang, seperti pemurnian gas, pengolahan air, katalisis, hingga produksi energi. Secara umum, adsorpsi dibedakan menjadi dua jenis utama berdasarkan sifat interaksinya, yaitu adsorpsi fisika (*physisorption*) dan adsorpsi kimia (*chemisorption*).

6.2.1 Adsorpsi Fisika (*Physisorption*)

Adsorpsi fisika terjadi akibat adanya gaya antarmolekul yang lemah, seperti gaya van der Waals. Interaksi ini tidak melibatkan pembentukan ikatan kimia antar molekul adsorbat dan permukaan adsorben. Oleh karena itu, proses ini bersifat *reversible*, artinya molekul yang teradsorpsi dapat dengan mudah dilepaskan kembali dari permukaan jika kondisi, seperti suhu atau tekanan, diubah.

Ciri khas dari *physisorption* antara lain:

- Energi adsorpsi relatif rendah (umumnya < 40 kJ/mol)
- Terjadi pada suhu rendah
- Tidak spesifik terhadap jenis adsorben atau adsorbat
- Dapat membentuk lebih dari satu lapisan (*multilayer adsorption*)

Sebagai contoh, gas nitrogen yang melekat pada permukaan arang aktif pada suhu rendah adalah bentuk *physisorption*. Proses ini banyak dimanfaatkan dalam penyimpanan gas, pemisahan udara, dan sistem ventilasi.

Menurut Atkins dan Paula (2014), *physisorption* bersifat spontan dan bergantung pada luas permukaan adsorben. Oleh karena itu, bahan berpori tinggi seperti silika gel atau karbon aktif sering dipilih untuk aplikasi yang mengandalkan adsorpsi fisika.

6.2.2 Adsorpsi Kimia (*Chemisorption*)

Berbeda dengan adsorpsi fisika, *chemisorption* melibatkan pembentukan ikatan kimia antara molekul adsorbat dan permukaan adsorben. Interaksi ini bersifat kuat, spesifik, dan umumnya hanya terjadi pada satu lapisan (*monolayer*). Karena terbentuknya ikatan kimia, proses ini cenderung irreversible, atau sulit untuk dibalik tanpa menyebabkan perubahan permanen pada struktur kimianya.

Karakteristik utama *chemisorption* mencakup:

- Energi adsorpsi lebih tinggi (umumnya antara 40–400 kJ/mol)
- Terjadi pada suhu lebih tinggi dibandingkan *physisorption*
- Bersifat selektif terhadap kombinasi adsorben dan adsorbat
- Membutuhkan aktivasi energi

Contoh umum dari *chemisorption* adalah gas hidrogen yang berikatan dengan permukaan logam katalis seperti platina. Interaksi ini digunakan dalam proses industri seperti hidrogenasi dan reformasi bahan bakar.

Walaupun bersifat kuat, *chemisorption* tetap dipengaruhi oleh kondisi eksternal. Temperatur, tekanan, dan kehadiran zat pengganggu dapat memengaruhi tingkat dan kecepatan adsorpsi. Menurut McQuarrie dan Simon (1997), pembentukan ikatan kovalen atau ionik selama *chemisorption* menjadikannya sangat berguna dalam proses katalitik.

6.2.3 Implikasi Praktis dalam Aplikasi Industri

Pemahaman yang baik mengenai jenis adsorpsi sangat penting dalam perancangan proses industri. Dalam pengolahan air limbah, misalnya, adsorpsi fisika digunakan untuk menyerap zat organik menggunakan karbon aktif. Sedangkan dalam industri

petrokimia, reaksi di permukaan katalis bergantung pada *chemisorption* agar reaktan dapat menempel dan bereaksi secara efektif.

Selain itu, perkembangan teknologi seperti penyimpanan energi berbasis hidrogen, sistem sensor kimia, dan penyaring udara tingkat lanjut juga sangat bergantung pada prinsip-prinsip adsorpsi yang tepat sasaran.

6.3 Isoterm Adsorpsi

6.3.1 Konsep Isoterm dalam Proses Adsorpsi

Dalam dunia industri maupun lingkungan, proses *adsorption* atau penjerapan permukaan menjadi mekanisme penting untuk pemisahan zat. Proses ini terjadi ketika molekul dari suatu zat menempel pada permukaan padatan atau material lain. Salah satu cara untuk memahami sejauh mana zat dapat menempel adalah dengan menggunakan model *isotherm*—sebuah hubungan matematis antara konsentrasi zat yang tersisa di dalam larutan dan jumlah zat yang berhasil dijerat oleh permukaan padat, dalam kondisi suhu yang tetap.

Model *isotherm* menggambarkan seberapa banyak zat yang dapat diserap oleh suatu permukaan berdasarkan tingkat kejenuhan, ketersediaan situs aktif, dan sifat interaksi molekul. Pemahaman ini sangat berguna dalam berbagai aplikasi seperti pengolahan air limbah, pemurnian udara, hingga produksi farmasi dan pangan (Guffey & Loewy, 2018).

6.3.2 Isoterm Langmuir: Penjerapan Monolapis

Salah satu model paling terkenal dalam proses ini adalah *Langmuir isotherm*. Model ini didasarkan pada asumsi bahwa *adsorption* hanya terjadi dalam satu lapisan molekul di permukaan padat (monolayer). Artinya, setelah semua situs aktif pada permukaan padat terisi, tidak akan ada penjerapan tambahan.

Model ini juga berasumsi bahwa setiap situs memiliki energi penjerapan yang seragam, serta tidak ada interaksi antara molekul yang telah menempel. Hubungan matematis dari model ini menunjukkan adanya titik kejenuhan, yaitu kondisi di mana tidak ada lagi zat yang dapat dijerat karena seluruh permukaan sudah penuh.

Model *Langmuir* sangat berguna untuk sistem yang terkontrol dan bersifat homogen, misalnya dalam proses pemurnian menggunakan karbon aktif atau zeolit. Rumus dari model ini sering digunakan untuk menghitung kapasitas maksimum penjerapan serta konstanta yang menggambarkan kekuatan interaksi antara zat dan permukaan.

6.3.3 Isoterm Freundlich: Penjerapan Multilapis

Berbeda dari model sebelumnya, *Freundlich isotherm* mengakomodasi kondisi di mana permukaan padat bersifat heterogen dan memungkinkan terjadinya penjerapan lebih dari satu lapisan. Model ini merupakan hubungan empiris yang tidak memiliki titik kejenuhan jelas, tetapi lebih fleksibel untuk menggambarkan penjerapan pada permukaan yang tidak seragam.

Model *Freundlich* sangat cocok digunakan untuk sistem alami seperti tanah, lumpur, atau bahan organik yang memiliki struktur kompleks dan tidak beraturan. Hubungan matematis dari model ini menampilkan grafik logaritmik, yang menunjukkan bahwa kapasitas penjerapan meningkat seiring dengan kenaikan konsentrasi zat, namun laju peningkatan tersebut menurun seiring waktu.

Model ini sering digunakan ketika sistem *adsorption* tidak sepenuhnya dapat dijelaskan oleh model *Langmuir*, khususnya dalam pengolahan limbah industri yang mengandung campuran senyawa dengan karakteristik berbeda-beda (Cardon, 2020).

6.3.4 Kesesuaian Model Berdasarkan Tujuan Praktis

Pemilihan model *isotherm* sangat bergantung pada tujuan praktis dari proses yang sedang dijalankan. Dalam banyak kasus, baik model *Langmuir* maupun *Freundlich* digunakan secara bersamaan untuk mengetahui mana yang paling cocok menggambarkan kondisi aktual. Data yang diperoleh dari hasil uji penjerapan akan dibandingkan dengan kurva dari masing-masing model untuk melihat kecocokannya.

Misalnya, dalam sistem yang melibatkan pemisahan logam berat dari air limbah, model *Langmuir* sering lebih sesuai karena jenis adsorben yang digunakan biasanya bersifat teratur. Namun, dalam pengelolaan limbah rumah tangga atau limbah biologis yang memiliki banyak variabel, model *Freundlich* lebih bisa menggambarkan perilaku kompleks dari sistem tersebut (Bovee & Thill, 2016).

6.3.5 Implikasi dalam Perencanaan Proses Industri

Pemahaman terhadap model *isotherm* tidak hanya bersifat teoritis, tetapi juga sangat praktis dalam perancangan unit pemisahan atau penyaringan dalam skala besar. Dengan mengetahui kapasitas maksimum dan efisiensi interaksi antara zat dan permukaan, perancang sistem dapat menentukan berapa banyak bahan adsorben yang dibutuhkan, berapa lama proses harus berjalan, serta berapa kali adsorben dapat digunakan ulang sebelum perlu diganti.

Hal ini mendukung efisiensi energi, efisiensi biaya, dan keberlanjutan proses secara keseluruhan—yang semuanya merupakan faktor penting dalam pengambilan keputusan operasional.

6.4 Latihan Soal

1. Jelaskan perbedaan antara adsorpsi dan absorpsi.
2. Apa perbedaan antara adsorpsi fisika dan kimia?
3. Sebutkan dua model isoterm adsorpsi yang umum digunakan.
4. Faktor apa saja yang mempengaruhi efisiensi proses adsorpsi?
5. Berikan contoh aplikasi adsorpsi dalam kehidupan sehari-hari atau industri.

Bab 7: Kromatografi

7.1 Pengertian Kromatografi

Kromatografi merupakan teknik pemisahan yang sangat penting dalam kimia, yang didasarkan pada perbedaan kemampuan senyawa-senyawa dalam campuran untuk berinteraksi dengan dua fase yang berbeda: fase diam dan fase gerak. Fase diam biasanya berupa padatan atau cairan yang diimobilisasi pada permukaan padatan, sedangkan fase gerak adalah cairan atau gas yang mengalir melalui atau melintasi fase diam. Ketika campuran senyawa dimasukkan ke dalam sistem kromatografi, masing-masing komponen akan berdistribusi secara berbeda antara kedua fase tersebut, tergantung pada sifat kimia dan fisiknya seperti kelarutan, polaritas, ukuran molekul, dan afinitas terhadap fase tertentu.

Inti dari proses kromatografi adalah bahwa senyawa yang memiliki afinitas lebih besar terhadap fase gerak akan bergerak lebih cepat melalui sistem, sedangkan senyawa yang lebih banyak berinteraksi dengan fase diam akan tertahan lebih lama. Akibatnya, komponen-komponen dalam campuran terpisah satu sama lain sepanjang lintasan fase gerak, dan pemisahan ini memungkinkan analisis yang lebih lanjut. Teknik ini dapat dilakukan dalam berbagai bentuk tergantung pada jenis fase yang digunakan dan skala penggunaannya, seperti kromatografi kertas, kromatografi lapis

tipis, kromatografi kolom, kromatografi gas, dan kromatografi cair kinerja tinggi (HPLC).

Kromatografi banyak diterapkan dalam berbagai bidang, mulai dari riset laboratorium hingga industri. Dalam bidang analisis kimia, teknik ini sangat berguna untuk mengidentifikasi senyawa dalam campuran kompleks, mengukur konsentrasi komponen tertentu secara kuantitatif, serta memisahkan dan memurnikan senyawa untuk keperluan lebih lanjut. Di bidang farmasi, kromatografi digunakan untuk menguji kemurnian bahan aktif dalam obat. Dalam industri makanan dan minuman, teknik ini membantu mendeteksi kandungan aditif, pengawet, atau kontaminan. Sementara itu, dalam bidang lingkungan, kromatografi digunakan untuk menganalisis polutan dalam udara, air, dan tanah.

Salah satu keunggulan utama dari kromatografi adalah sensitivitas dan selektivitasnya yang tinggi. Teknik ini mampu memisahkan senyawa-senyawa yang sangat mirip dalam struktur atau sifat fisik, serta mendeteksi senyawa dalam konsentrasi yang sangat rendah. Selain itu, kromatografi dapat dikombinasikan dengan detektor canggih seperti spektrometer massa atau detektor UV-Vis untuk memperoleh informasi yang lebih detail mengenai komposisi dan struktur senyawa yang dipisahkan.

Secara umum, keberhasilan pemisahan dalam kromatografi sangat dipengaruhi oleh pemilihan sistem fase diam dan fase gerak yang sesuai dengan karakteristik senyawa yang akan dianalisis. Parameter lain seperti laju alir fase gerak, suhu, panjang kolom, dan ukuran partikel juga berperan penting dalam meningkatkan efisiensi

dan resolusi pemisahan. Oleh karena itu, penguasaan terhadap prinsip dasar dan kondisi operasional sangat penting agar kromatografi dapat memberikan hasil yang akurat dan dapat diandalkan.

Dengan fleksibilitas dan ketepatannya, kromatografi telah menjadi salah satu alat utama dalam laboratorium kimia modern, tidak hanya sebagai teknik pemisahan, tetapi juga sebagai alat analisis yang mendalam dalam memahami komposisi dan interaksi molekul dalam berbagai sistem kimia dan biologis.

7.2 Prinsip Dasar Kromatografi

Kromatografi merupakan teknik pemisahan yang didasarkan pada perbedaan kemampuan senyawa-senyawa dalam campuran untuk berinteraksi dengan dua fasa berbeda, yaitu fase diam dan fase gerak. Prinsip utamanya adalah bahwa setiap senyawa dalam campuran akan berpindah dengan kecepatan berbeda saat dibawa oleh fase gerak melintasi fase diam, tergantung pada afinitas relatifnya terhadap kedua fase tersebut. Semakin kuat interaksi suatu senyawa dengan fase diam, semakin lama waktu yang dibutuhkan senyawa tersebut untuk bermigrasi, sehingga posisinya akan tertinggal dibandingkan senyawa yang lebih mudah larut atau lebih cepat terbawa oleh fase gerak.

Fase diam dapat berupa padatan atau cairan yang terikat pada permukaan padatan, sedangkan fase gerak dapat berupa gas atau cairan yang mengalir melewati fase diam tersebut. Pada

kromatografi kertas atau kromatografi lapis tipis, fase diam biasanya berupa lembaran selulosa atau lapisan tipis silika, sementara fase gerak berupa pelarut yang naik melalui kapilaritas. Pada kromatografi kolom, seperti kromatografi gas atau cair-cair kinerja tinggi, fase diam ditempatkan dalam kolom, dan fase gerak dialirkan secara terkontrol. Dalam semua jenis kromatografi, perbedaan kecepatan migrasi inilah yang menyebabkan pemisahan komponen-komponen dalam campuran.

Interaksi antara senyawa dengan fase diam maupun fase gerak dapat melibatkan berbagai jenis gaya, termasuk ikatan hidrogen, gaya van der Waals, interaksi hidrofobik, atau bahkan reaksi kimia lemah. Senyawa polar cenderung memiliki afinitas lebih besar terhadap fase diam polar dan akan bergerak lebih lambat dalam sistem pelarut non-polar, sedangkan senyawa non-polar akan bergerak lebih cepat dalam kondisi tersebut. Dengan demikian, pemilihan fase diam dan fase gerak yang tepat sangat penting untuk mencapai pemisahan yang optimal, tergantung pada sifat senyawa yang dianalisis.

Waktu yang dibutuhkan senyawa untuk melewati sistem kromatografi disebut waktu retensi, dan perbedaan waktu retensi antara senyawa-senyawa dalam campuran menjadi dasar utama pemisahan. Dalam aplikasi kuantitatif dan kualitatif, waktu retensi digunakan untuk mengidentifikasi senyawa, sementara intensitas sinyal yang dihasilkan—seperti puncak kromatogram—digunakan untuk mengukur jumlah senyawa tersebut.

Teknik kromatografi banyak digunakan dalam berbagai bidang, termasuk kimia analitik, farmasi, biokimia, lingkungan, dan industri makanan. Kelebihannya terletak pada sensitivitas, ketelitian, dan kemampuannya memisahkan senyawa yang sangat mirip dalam waktu relatif singkat. Baik dalam skala laboratorium maupun industri, kromatografi menjadi alat penting dalam pemisahan, pemurnian, dan analisis senyawa, dengan beragam jenis dan prinsip kerja yang dapat disesuaikan sesuai kebutuhan aplikasi.

7.3 Jenis-Jenis Kromatografi

Kromatografi merupakan teknik pemisahan senyawa dalam campuran berdasarkan perbedaan distribusi komponen antara dua fase: fase diam dan fase gerak. Teknik ini banyak digunakan dalam bidang kimia, farmasi, lingkungan, dan bioteknologi karena kemampuannya untuk memisahkan, mengidentifikasi, dan memurnikan senyawa secara efisien, bahkan dalam jumlah sangat kecil. Seiring perkembangan teknologi, kromatografi hadir dalam berbagai jenis dengan prinsip kerja yang serupa namun aplikasi dan ketelitian yang berbeda.

Kromatografi kertas merupakan salah satu bentuk paling sederhana dari teknik kromatografi. Fase diam yang digunakan adalah kertas khusus, biasanya kertas saring, sementara fase gerak berupa pelarut cair yang mengalir melalui kertas. Campuran zat ditetaskan pada satu titik awal di kertas, dan ketika pelarut bergerak naik melalui kapilaritas, komponen-komponen dalam campuran

akan terbawa dengan kecepatan yang berbeda tergantung pada kelarutan dan interaksi mereka dengan kertas. Teknik ini umum digunakan dalam analisis senyawa berwarna seperti pigmen tanaman atau dalam identifikasi senyawa anorganik dan gula.

Kromatografi lapis tipis (TLC) memiliki prinsip serupa dengan kromatografi kertas, namun menggunakan lempeng kaca atau plastik yang dilapisi lapisan tipis adsorben seperti silika gel atau alumina sebagai fase diam. Fase gerak tetap berupa pelarut organik yang dipilih sesuai karakteristik senyawa yang akan dipisahkan. TLC lebih unggul dalam hal ketelitian dan sensitivitas dibandingkan kromatografi kertas, dan banyak digunakan untuk mengevaluasi kemurnian senyawa, memantau reaksi kimia, serta menyaring pelarut terbaik dalam pengembangan teknik kromatografi lainnya. Setelah pemisahan, komponen dapat dilihat langsung jika berwarna atau diidentifikasi menggunakan sinar UV atau pereaksi kimia.

Kromatografi kolom menggunakan wadah berbentuk tabung (kolom) yang diisi dengan bahan adsorben seperti silika gel sebagai fase diam, sedangkan fase gerak berupa pelarut yang dialirkan dari atas kolom. Campuran senyawa dimasukkan ke dalam kolom dan akan bergerak turun bersama pelarut dengan kecepatan berbeda, menghasilkan fraksi-fraksi terpisah yang dapat dikumpulkan satu per satu. Teknik ini efektif untuk pemisahan dalam skala besar, seperti pemurnian senyawa hasil sintesis atau ekstrak bahan alam. Kromatografi kolom menjadi dasar pengembangan teknik kromatografi yang lebih modern, seperti HPLC.

Kromatografi gas (GC) menggunakan fase gerak berupa gas inert, seperti helium atau nitrogen, dan fase diam yang dilapisi pada dinding kolom kapiler atau butiran padat. Senyawa yang akan dipisahkan harus berbentuk gas atau mudah menguap. Campuran disuntikkan ke dalam kolom dan terbawa oleh gas pembawa melalui kolom, di mana komponen-komponen akan berinteraksi dengan fase diam dengan kekuatan berbeda, sehingga keluar dari kolom pada waktu berbeda. GC sangat berguna dalam analisis senyawa organik volatil, seperti pelarut, aroma, bahan kimia lingkungan, dan zat aditif makanan. Sensitivitasnya tinggi dan sering dipadukan dengan detektor seperti detektor nyala ionisasi (FID) atau spektrometri massa (GC-MS) untuk identifikasi struktur senyawa.

Kromatografi cair kinerja tinggi (HPLC) adalah teknik kromatografi modern yang menggunakan tekanan tinggi untuk mendorong pelarut dan sampel melalui kolom yang diisi dengan partikel sangat halus sebagai fase diam. HPLC memungkinkan pemisahan dengan efisiensi tinggi dan waktu yang lebih cepat dibandingkan kromatografi kolom konvensional. Teknik ini banyak digunakan dalam analisis obat, bahan aktif tanaman, kontrol kualitas produk farmasi, dan riset biomolekul. Berbagai jenis detektor dapat digunakan dalam HPLC, seperti detektor UV-Vis, fluoresensi, atau konduktivitas, tergantung pada sifat senyawa yang dianalisis.

Setiap jenis kromatografi memiliki keunggulan dan keterbatasan, serta dipilih berdasarkan karakteristik sampel, tujuan analisis, dan tingkat ketelitian yang diinginkan. Keberagaman teknik kromatografi ini menunjukkan fleksibilitas teknik ini dalam

menyelesaikan berbagai tantangan pemisahan senyawa di berbagai bidang ilmu dan industri. Dengan pemahaman yang baik tentang prinsip kerja dan aplikasi masing-masing jenis kromatografi, pengguna dapat memilih teknik yang paling tepat untuk mencapai hasil yang optimal dalam kegiatan analitik maupun produksi.

7.4 Aplikasi Kromatografi

Kromatografi merupakan teknik pemisahan yang sangat penting dalam dunia sains dan industri karena kemampuannya untuk memisahkan, mengidentifikasi, dan menganalisis berbagai komponen dalam campuran kompleks. Teknik ini bekerja berdasarkan perbedaan kecepatan migrasi senyawa-senyawa dalam campuran saat melewati fase diam dan fase gerak, yang menghasilkan pemisahan berdasarkan afinitas kimia, ukuran molekul, polaritas, atau massa. Keunggulan utama kromatografi adalah sensitivitas dan selektivitasnya yang tinggi, sehingga cocok digunakan dalam berbagai aplikasi analitik dan preparatif, baik di bidang riset, medis, lingkungan, maupun industri pangan.

Salah satu aplikasi utama kromatografi adalah dalam analisis senyawa dalam sampel biologis, seperti darah, urin, atau jaringan tubuh. Dalam konteks ini, kromatografi digunakan untuk mendeteksi dan mengukur keberadaan senyawa aktif seperti obat, hormon, asam amino, atau metabolit. Teknik kromatografi cair kinerja tinggi atau *high-performance liquid chromatography* (HPLC) menjadi salah satu teknik yang paling banyak digunakan untuk tujuan ini karena

kemampuannya memisahkan senyawa dengan konsentrasi sangat rendah secara cepat dan akurat. Misalnya, kadar glukosa, kolesterol, atau obat pengencer darah dalam sampel pasien dapat dipantau dengan akurasi tinggi menggunakan teknik ini, yang sangat penting dalam penegakan diagnosis dan pemantauan terapi klinis.

Dalam industri farmasi, kromatografi menjadi bagian integral dari proses pemurnian produk. Obat-obatan sintetis atau alami sering kali dihasilkan dalam bentuk campuran, sehingga memerlukan tahap pemisahan untuk memperoleh zat aktif dengan tingkat kemurnian yang sesuai standar. Selain itu, kromatografi juga digunakan untuk memastikan tidak adanya zat pengotor, sisa pelarut, atau bahan tambahan yang tidak diinginkan. Penggunaan kromatografi gas (GC) dan kromatografi cair dalam pengujian mutu produk farmasi menjadi prosedur wajib dalam proses pengembangan obat dan pengawasan mutu, mulai dari tahap formulasi hingga produk akhir yang siap didistribusikan ke masyarakat.

Dalam bidang lingkungan, kromatografi memiliki peran penting dalam mendeteksi keberadaan bahan pencemar, baik di udara, air, maupun tanah. Senyawa-senyawa berbahaya seperti pestisida, logam berat, hidrokarbon aromatik polisiklik, dan senyawa organik volatil dapat dianalisis menggunakan kromatografi gas yang dilengkapi dengan detektor sensitif seperti *mass spectrometry* (MS). Teknik ini memungkinkan identifikasi senyawa pencemar bahkan dalam konsentrasi sangat rendah, sehingga menjadi alat penting dalam program pemantauan kualitas lingkungan dan pengendalian polusi. Selain itu, data yang diperoleh dari hasil kromatografi juga

digunakan sebagai dasar dalam penetapan regulasi dan standar baku mutu lingkungan oleh otoritas terkait.

Di industri makanan dan minuman, kromatografi digunakan untuk memastikan keamanan, kualitas, serta keaslian produk. Senyawa seperti pewarna, pengawet, perisa buatan, atau kontaminan seperti mikotoksin dapat dianalisis dengan akurat menggunakan teknik ini. Misalnya, kandungan kafein dalam kopi atau teh, kandungan alkohol dalam minuman fermentasi, dan kadar gula dalam jus buah dapat diketahui dengan cepat menggunakan kromatografi cair. Teknik ini juga berperan dalam mengidentifikasi senyawa-senyawa penanda yang menunjukkan keaslian produk, seperti profil aroma dalam minyak zaitun murni atau komposisi senyawa volatil dalam madu asli. Dengan demikian, kromatografi turut mendukung perlindungan konsumen dari produk palsu atau yang tidak sesuai standar mutu.

Perkembangan teknologi kromatografi terus berlanjut, dengan hadirnya sistem yang lebih otomatis, sensitif, dan ramah lingkungan. Integrasi kromatografi dengan teknik pendeteksian lanjutan seperti *tandem mass spectrometry* atau *ultraviolet-visible spectroscopy* semakin memperluas jangkauan aplikasinya. Dalam banyak laboratorium modern, sistem kromatografi kini dapat dioperasikan dengan perangkat lunak canggih yang memungkinkan pemrosesan data secara *real-time* dan pengambilan keputusan yang cepat. Hal ini menjadikan kromatografi tidak hanya sebagai alat pemisahan, tetapi juga sebagai bagian dari sistem analitik terpadu yang mendukung riset dan industri di berbagai bidang.

Dengan kemampuannya dalam mengungkap kandungan kimia suatu sampel secara detail, kromatografi menjadi salah satu teknik paling penting dan tak tergantikan dalam analisis kimia modern. Aplikasinya yang luas dan terus berkembang menjadikan teknik ini sebagai fondasi bagi berbagai kegiatan analitik dan produksi, mulai dari laboratorium akademik hingga fasilitas industri berskala besar. Pemanfaatan kromatografi yang tepat tidak hanya meningkatkan efisiensi dan akurasi analisis, tetapi juga membantu memastikan keselamatan, kesehatan, dan keberlanjutan lingkungan hidup.

7.5 Faktor-Faktor yang Memengaruhi Pemisahan

Pemisahan dalam kromatografi dipengaruhi oleh sejumlah faktor yang saling terkait, dan pengaturan yang tepat terhadap faktor-faktor tersebut sangat menentukan keberhasilan proses pemisahan senyawa dalam suatu campuran. Masing-masing parameter berperan dalam mengatur sejauh mana senyawa dapat berinteraksi dengan fase diam dan fase gerak, serta seberapa efektif komponen-komponen dalam campuran dapat dipisahkan satu sama lain dalam sistem kromatografi.

Jenis fase diam dan fase gerak merupakan faktor utama yang memengaruhi selektivitas pemisahan. Fase diam dapat berupa bahan polar atau nonpolar tergantung pada teknik kromatografi yang digunakan. Misalnya, dalam kromatografi lapis tipis, silika gel

sering digunakan sebagai fase diam karena sifatnya yang sangat polar, sedangkan dalam kromatografi gas, fase diam berupa senyawa cair yang dilapisi pada permukaan padat. Fase gerak, baik berupa cairan maupun gas, dipilih agar memiliki sifat yang kontras atau saling melengkapi dengan fase diam, sehingga terjadi perbedaan interaksi antara masing-masing senyawa dengan kedua fase. Ketidakseimbangan interaksi ini menyebabkan senyawa bergerak dengan kecepatan berbeda dan menghasilkan pemisahan yang efektif.

Ukuran partikel fase diam, terutama dalam teknik kromatografi cair kinerja tinggi (HPLC), sangat memengaruhi efisiensi kolom. Semakin kecil ukuran partikel, semakin besar luas permukaan yang tersedia untuk interaksi antara senyawa dan fase diam, sehingga resolusi pemisahan meningkat. Namun, ukuran partikel yang lebih kecil juga menyebabkan peningkatan tekanan yang dibutuhkan untuk mendorong fase gerak melalui kolom. Oleh karena itu, penggunaan ukuran partikel yang sangat halus memerlukan peralatan bertekanan tinggi dan sistem yang lebih presisi.

Polaritas senyawa dan pelarut juga berperan besar dalam menentukan kecepatan senyawa melewati sistem kromatografi. Senyawa dengan polaritas tinggi cenderung berinteraksi lebih kuat dengan fase diam yang polar, sehingga bergerak lebih lambat jika fase diam bersifat polar. Sebaliknya, jika fase gerak lebih polar dibandingkan senyawa, maka senyawa tersebut lebih cepat terdorong oleh fase gerak. Pemilihan pelarut dalam fase gerak harus

disesuaikan dengan jenis senyawa yang dianalisis agar terjadi pemisahan yang maksimal. Dalam sistem kromatografi cair, digunakan pelarut tunggal atau campuran pelarut dengan polaritas yang dikendalikan secara bertahap untuk mengatur waktu elusi senyawa.

Laju alir fase gerak memengaruhi waktu interaksi antara senyawa dan fase diam. Laju alir yang terlalu tinggi dapat menyebabkan senyawa tidak memiliki cukup waktu untuk berinteraksi dengan fase diam, sehingga pemisahan menjadi kurang efektif atau tidak terjadi sama sekali. Sebaliknya, jika laju alir terlalu lambat, meskipun pemisahan bisa lebih baik, waktu analisis menjadi terlalu panjang dan dapat menurunkan efisiensi operasional. Oleh karena itu, diperlukan keseimbangan antara resolusi pemisahan dan kecepatan analisis dengan mengatur laju alir sesuai kebutuhan.

Kombinasi dari keempat faktor ini harus dioptimalkan untuk mencapai hasil pemisahan yang baik. Setiap sistem kromatografi memiliki kondisi optimal yang berbeda tergantung pada sifat senyawa yang dipisahkan dan jenis kolom atau media yang digunakan. Pemahaman terhadap hubungan antara karakteristik senyawa, sifat fisikokimia pelarut, dan desain sistem kromatografi sangat penting agar proses pemisahan berjalan secara efisien, tepat waktu, dan memberikan hasil yang dapat diinterpretasikan dengan akurat. Dengan mengatur faktor-faktor ini secara cermat, kromatografi dapat digunakan sebagai alat yang sangat andal dalam analisis, pemurnian, dan identifikasi senyawa dalam berbagai bidang ilmu dan industri.

7.6 Latihan Soal

1. Jelaskan prinsip dasar dari teknik kromatografi!
2. Sebutkan tiga jenis kromatografi dan fungsinya!
3. Apa yang dimaksud dengan fase diam dan fase gerak dalam kromatografi?
4. Sebutkan dua faktor yang mempengaruhi hasil pemisahan dalam kromatografi!
5. Berikan contoh aplikasi kromatografi dalam industri farmasi!

Bab 8: Teknologi Pemisahan Membran

8.1 Pengertian Teknologi Pemisahan Membran

Teknologi pemisahan membran merupakan salah satu inovasi penting dalam bidang teknik proses yang memanfaatkan sifat selektif dari membran semi-permeabel untuk memisahkan komponen dalam suatu campuran. Prinsip kerja dari teknologi ini adalah memungkinkan molekul tertentu untuk melewati membran, sementara molekul lain tertahan, tergantung pada ukuran partikel, sifat muatan, tekanan, atau perbedaan konsentrasi. Dengan karakteristik tersebut, teknologi ini mampu menghasilkan pemisahan yang presisi tanpa memerlukan perubahan fase atau penambahan zat kimia dalam jumlah besar, menjadikannya sebagai teknik yang efisien dan ramah lingkungan.

Membran yang digunakan dalam proses ini umumnya berupa lapisan tipis yang terbuat dari bahan polimer, keramik, atau komposit, yang memiliki pori-pori atau sifat selektivitas tertentu. Tergantung pada jenis proses dan aplikasinya, pemisahan membran dapat dibedakan menjadi beberapa kategori utama, seperti mikrofiltrasi, ultrafiltrasi, nanofiltrasi, dan reverse osmosis. Masing-masing teknik memiliki ukuran pori dan tekanan operasi yang berbeda, yang disesuaikan dengan jenis zat yang ingin dipisahkan.

Misalnya, mikrofiltrasi digunakan untuk menyaring partikel besar seperti bakteri, sedangkan reverse osmosis efektif untuk menghilangkan ion terlarut dan molekul kecil seperti garam.

Salah satu keunggulan utama teknologi ini adalah kemampuannya bekerja secara kontinyu dan pada suhu rendah, yang sangat menguntungkan dalam aplikasi industri yang membutuhkan efisiensi energi tinggi dan stabilitas produk. Di sektor pengolahan air, teknologi pemisahan membran digunakan secara luas untuk memurnikan air laut, mengolah air limbah, dan menghasilkan air minum berkualitas tinggi. Proses reverse osmosis, misalnya, telah menjadi teknologi kunci dalam desalinasi air laut dan pengurangan kandungan logam berat atau kontaminan lainnya dari air tanah.

Di industri makanan dan minuman, teknologi ini diaplikasikan untuk konsentrasi protein dalam produk susu, pemurnian jus buah, dan produksi minuman rendah alkohol. Sementara itu, dalam bidang farmasi, pemisahan membran dimanfaatkan untuk pemurnian senyawa aktif, sterilisasi larutan obat, dan produksi air ultrapure untuk keperluan laboratorium. Kemampuannya dalam mempertahankan struktur kimia zat yang diproses menjadikan teknologi ini ideal untuk produk-produk yang sensitif terhadap panas atau pelarut kimia.

Selain keunggulan teknis, teknologi pemisahan membran juga memiliki keuntungan dari sisi keberlanjutan. Karena tidak memerlukan banyak bahan kimia tambahan dan menghasilkan limbah yang relatif sedikit, proses ini mendukung prinsip produksi bersih dan ramah lingkungan. Namun demikian, tantangan tetap ada,

terutama dalam hal *fouling* atau penyumbatan membran akibat akumulasi partikel atau mikroorganisme, yang dapat menurunkan efisiensi proses. Oleh karena itu, pemilihan jenis membran, desain sistem, serta pemeliharaan rutin sangat penting untuk menjamin kinerja optimal dan umur pakai yang panjang.

Secara keseluruhan, teknologi pemisahan membran telah menjadi komponen kunci dalam banyak industri yang mengutamakan presisi, efisiensi, dan keberlanjutan. Perkembangan material membran yang lebih selektif, kuat, dan tahan terhadap kondisi ekstrem terus dilakukan untuk memperluas aplikasi dan meningkatkan efisiensi proses. Dengan dukungan inovasi yang berkelanjutan, teknologi ini diprediksi akan memainkan peran yang semakin besar dalam memenuhi kebutuhan pemurnian dan pengolahan di berbagai sektor strategis di masa depan.

8.2 Jenis-jenis Proses Membran

Proses pemisahan dengan membran merupakan salah satu teknologi yang banyak digunakan dalam berbagai bidang, mulai dari pengolahan air dan makanan hingga aplikasi medis dan industri farmasi. Teknologi ini bekerja dengan memanfaatkan membran semipermeabel yang dapat menyaring zat terlarut atau partikel berdasarkan ukuran, muatan, atau sifat kimianya. Setiap jenis proses membran memiliki karakteristik tersendiri berdasarkan ukuran pori membran dan mekanisme pemisahannya, yang menentukan jenis zat yang dapat dipisahkan.

Mikrofiltrasi (MF) adalah jenis proses membran dengan ukuran pori relatif besar, biasanya berkisar antara 0,1 hingga 10 mikrometer. Proses ini digunakan untuk memisahkan partikel-partikel besar seperti koloid, mikroorganisme, dan bakteri dari cairan. Mikrofiltrasi umumnya digunakan dalam industri makanan dan minuman untuk klarifikasi jus, penyaringan susu, serta dalam sistem pengolahan air sebagai tahap awal untuk menghilangkan kontaminan fisik. Karena ukuran porinya yang cukup besar, tekanan yang dibutuhkan dalam mikrofiltrasi relatif rendah dibandingkan jenis membran lainnya, sehingga prosesnya efisien secara energi.

Ultrafiltrasi (UF) memiliki ukuran pori lebih kecil daripada mikrofiltrasi, yaitu sekitar 0,01 hingga 0,1 mikrometer. Dengan ukuran pori tersebut, ultrafiltrasi dapat memisahkan makromolekul seperti protein, polisakarida, dan virus. Proses ini sangat umum digunakan dalam industri farmasi untuk pemurnian protein, serta dalam pengolahan air limbah industri untuk mengurangi beban bahan organik. Selain itu, ultrafiltrasi juga digunakan dalam produksi air minum dari sumber air permukaan, karena kemampuannya untuk menghilangkan patogen tanpa perlu penambahan bahan kimia.

Nanofiltrasi (NF) berada di antara ultrafiltrasi dan reverse osmosis dalam hal ukuran pori, dengan kisaran sekitar 0,001 mikrometer. Membran nanofiltrasi mampu memisahkan senyawa organik kecil, ion multivalen seperti kalsium dan magnesium, serta beberapa jenis pestisida atau zat kimia mikro. Karena karakteristiknya, nanofiltrasi banyak digunakan untuk pelunakan air,

pemulihan bahan kimia dalam industri, dan pemurnian air minum dengan tetap mempertahankan beberapa mineral penting. Nanofiltrasi memerlukan tekanan yang lebih tinggi dibandingkan mikro- dan ultrafiltrasi, tetapi masih lebih rendah dibanding reverse osmosis.

Reverse osmosis (RO) merupakan proses pemisahan dengan tekanan tertinggi dan ukuran pori terkecil, yakni di bawah 0,001 mikrometer. Membran RO mampu menghilangkan hampir seluruh zat terlarut, termasuk ion monovalen seperti natrium dan klorida, serta senyawa organik kecil. Teknologi ini menjadi pilihan utama dalam desalinasi air laut, produksi air ultra murni untuk industri elektronik dan farmasi, serta dalam sistem pemurnian air minum rumah tangga. Karena tekanan osmotik yang harus diatasi sangat tinggi, sistem RO biasanya memerlukan peralatan yang lebih kuat dan perawatan yang ketat.

Selain proses pemisahan berdasarkan tekanan dan ukuran pori, terdapat pula dialisis, yang bekerja berdasarkan prinsip difusi zat terlarut melalui membran selektif berdasarkan perbedaan konsentrasi. Dialisis banyak digunakan dalam bidang medis, khususnya pada pasien dengan gangguan fungsi ginjal. Proses ini memungkinkan pembuangan limbah metabolik dan kelebihan elektrolit dari darah dengan cara menyalurkannya melalui membran ke dalam cairan dialisat. Berbeda dengan proses membran lainnya yang umumnya bertekanan, dialisis memanfaatkan gradien konsentrasi secara pasif, sehingga lebih lembut dan aman untuk penggunaan klinis.

Masing-masing jenis proses membran ini memiliki keunggulan dan keterbatasannya sendiri, tergantung pada aplikasi dan tujuan pemisahan yang diinginkan. Pemilihan teknologi yang tepat sangat bergantung pada ukuran partikel yang akan disaring, kebutuhan tingkat kemurnian produk akhir, serta efisiensi biaya dan energi. Dalam konteks industri modern dan tantangan lingkungan saat ini, teknologi membran terus dikembangkan untuk menjadi lebih hemat energi, tahan lama, dan ramah lingkungan, sehingga dapat menjawab kebutuhan pemurnian yang semakin kompleks di berbagai sektor.

8.3 Bahan dan Struktur Membran

Membran merupakan komponen kunci dalam berbagai proses pemisahan dan filtrasi, baik dalam bidang kesehatan, lingkungan, industri makanan, maupun energi. Keberhasilan kinerja suatu sistem membran sangat ditentukan oleh bahan penyusun dan struktur fisiknya, yang secara langsung memengaruhi sifat permeabilitas, selektivitas, kekuatan mekanik, serta daya tahannya terhadap tekanan dan bahan kimia. Oleh karena itu, pemilihan bahan dan desain struktur membran menjadi aspek krusial dalam pengembangan teknologi yang efisien dan aplikatif.

Dari segi bahan, membran umumnya dibuat dari dua jenis utama: polimer sintetik dan material anorganik. Polimer sintetik banyak digunakan karena sifatnya yang fleksibel, mudah dibentuk, serta biayanya yang relatif rendah. Beberapa contoh polimer yang

umum digunakan antara lain polisulfon, poliamida, dan selulosa asetat. Polisulfon dikenal memiliki kestabilan termal dan kimia yang baik, menjadikannya cocok untuk aplikasi dalam pemurnian air dan hemodialisis. Poliamida, khususnya yang digunakan dalam membran reverse osmosis, memiliki kemampuan selektivitas ion yang tinggi dan ketahanan terhadap tekanan osmotik. Sementara itu, selulosa asetat digunakan karena sifatnya yang hidrofobik sedang, namun memerlukan kondisi operasi tertentu karena mudah terdegradasi pada pH ekstrem dan suhu tinggi.

Selain polimer, bahan anorganik seperti keramik juga digunakan untuk membuat membran, terutama dalam aplikasi yang memerlukan ketahanan tinggi terhadap suhu dan bahan kimia agresif. Membran keramik biasanya terbuat dari alumina, zirkonia, atau silika, dan memiliki keunggulan dalam hal stabilitas mekanik, umur pakai yang panjang, serta kemudahan pembersihan. Karena biayanya yang lebih tinggi, penggunaan membran keramik cenderung terbatas pada aplikasi industri berskala besar atau lingkungan yang sangat menantang secara kimia.

Struktur membran juga memainkan peranan penting dalam menentukan performa pemisahan. Berdasarkan struktur mikronya, membran diklasifikasikan menjadi dua jenis utama: simetris dan asimetris. Membran simetris memiliki pori-pori yang seragam dari permukaan hingga bagian dalam, dan biasanya digunakan dalam aplikasi mikrofiltrasi atau ultrafiltrasi ringan. Sebaliknya, membran asimetris dirancang dengan lapisan permukaan tipis dan padat yang berfungsi sebagai zona pemisahan utama, didukung oleh lapisan

bawah yang lebih berpori dan tebal untuk menopang struktur. Desain asimetris memberikan kombinasi optimal antara kekuatan mekanik dan efisiensi pemisahan, serta mengurangi hambatan aliran.

Dalam hal bentuk fisik, membran dapat disusun dalam beberapa konfigurasi tergantung pada sistem aplikasinya. Konfigurasi flat sheet adalah bentuk paling sederhana, berupa lembaran datar yang disusun dalam modul planar, dan sering digunakan dalam sistem filtrasi batch atau laboratorium. Konfigurasi *hollow fiber* berbentuk seperti serat berongga, memungkinkan luas permukaan yang besar dalam volume kecil, sehingga sangat efisien untuk aplikasi seperti dialisis atau pengolahan air limbah. Sementara itu, konfigurasi *spiral wound* merupakan kombinasi antara lembaran datar dan penggulung spiral, menghasilkan sistem yang kompak dan hemat ruang dengan efisiensi filtrasi tinggi, sering digunakan dalam instalasi reverse osmosis skala industri.

Pemilihan kombinasi bahan dan struktur ini harus mempertimbangkan tujuan aplikasi, lingkungan operasi, serta parameter seperti tekanan kerja, ukuran partikel yang akan dipisahkan, dan kompatibilitas kimia. Inovasi dalam teknologi membran terus berkembang, termasuk pengembangan material komposit, rekayasa permukaan untuk meningkatkan antifouling, serta integrasi dengan teknologi sensor untuk sistem pemantauan cerdas. Dengan desain yang tepat, membran mampu memberikan solusi filtrasi yang handal, efisien, dan ramah lingkungan dalam berbagai bidang kehidupan modern.

8.4 Aplikasi Teknologi Membran

Teknologi pemisahan membran merupakan salah satu inovasi penting dalam bidang teknik dan industri yang telah membawa dampak besar terhadap efisiensi proses produksi, pengolahan, serta pelestarian lingkungan. Teknologi ini bekerja dengan memanfaatkan membran sebagai penghalang selektif yang memungkinkan pemisahan partikel berdasarkan ukuran, muatan, atau sifat kimianya. Karena sifatnya yang efisien, ramah lingkungan, dan hemat energi dibandingkan dengan proses pemisahan konvensional, teknologi membran telah diadopsi secara luas dalam berbagai sektor.

Salah satu aplikasi utama dari teknologi membran adalah dalam pengolahan air minum dan desalinasi air laut. Dengan memanfaatkan proses osmosis balik (*reverse osmosis*), membran digunakan untuk menyaring garam dan kontaminan lainnya dari air laut atau air payau, sehingga menghasilkan air yang aman untuk dikonsumsi. Teknologi ini menjadi sangat penting terutama di daerah yang kekurangan sumber air tawar. Dalam proses ini, membran semi-permeabel digunakan untuk menahan ion-ion dan molekul besar, sementara air murni dapat melewatinya. Hasilnya adalah air bersih yang memenuhi standar kualitas untuk keperluan domestik maupun industri.

Di industri farmasi, teknologi membran memiliki peran penting dalam proses pemurnian produk, terutama dalam skala molekuler dan mikrobiologis. Proses ini diperlukan untuk

menghasilkan obat-obatan yang aman dan berkualitas tinggi, bebas dari kontaminasi mikroba, endotoksin, atau partikel tak diinginkan lainnya. Teknik filtrasi menggunakan membran juga digunakan dalam pembuatan antibiotik, hormon, serta vaksin, di mana kemurnian produk sangat menentukan efektivitas dan keamanannya. Pemisahan ini biasanya menggunakan teknologi ultrafiltrasi atau nanofiltrasi yang mampu memisahkan molekul berdasarkan berat molekul atau ukuran partikel.

Industri makanan dan minuman juga memanfaatkan teknologi membran dalam berbagai proses, salah satunya adalah konsentrasi susu dan jus. Dengan menggunakan membran, air dapat dipisahkan dari zat padat terlarut seperti protein, gula, dan vitamin tanpa perlu proses pemanasan yang dapat merusak kualitas gizi. Contohnya, dalam industri susu, proses ultrafiltrasi digunakan untuk menghasilkan protein konsentrat atau memisahkan laktosa, sementara pada jus, membran digunakan untuk mengentalkan produk sekaligus mempertahankan rasa dan aroma alami. Teknologi ini memungkinkan produsen menghasilkan produk dengan nilai tambah tinggi dan kualitas sensorik yang lebih baik.

Dalam industri kimia, teknologi pemisahan membran diaplikasikan untuk pemisahan gas, seperti pemisahan nitrogen dari udara atau pemurnian hidrogen. Pemisahan ini penting dalam proses-proses yang membutuhkan gas dengan tingkat kemurnian tinggi. Membran yang digunakan biasanya berupa membran polimer tipis atau membran keramik yang dirancang khusus untuk tahan terhadap suhu dan tekanan tinggi. Efisiensi proses ini juga lebih

tinggi dibandingkan teknik distilasi atau adsorpsi konvensional, sehingga mengurangi konsumsi energi dalam skala industri.

Selain itu, pengolahan limbah cair industri juga menjadi salah satu aplikasi penting teknologi membran. Limbah cair dari industri makanan, tekstil, atau farmasi sering mengandung zat organik dan bahan kimia berbahaya yang tidak dapat diuraikan secara biologis. Dengan menggunakan membran, zat-zat berbahaya ini dapat dipisahkan dari air sebelum dibuang atau didaur ulang. Teknologi seperti mikrofiltrasi dan membran bio-reaktor (MBR) digunakan untuk menyaring padatan tersuspensi, mikroorganisme, dan senyawa organik kompleks. Hal ini tidak hanya membantu perusahaan memenuhi standar lingkungan, tetapi juga mendukung praktik industri yang lebih berkelanjutan.

Dengan terus berkembangnya teknologi material dan rekayasa proses, teknologi membran diprediksi akan semakin banyak diterapkan di masa mendatang, tidak hanya dalam skala industri, tetapi juga dalam aplikasi rumah tangga, laboratorium, dan bidang energi terbarukan. Keunggulannya dalam selektivitas, efisiensi energi, serta kemudahan integrasi menjadikan teknologi ini sebagai salah satu solusi utama dalam tantangan pengolahan dan pemurnian di era modern.

8.5 Keuntungan dan Keterbatasan Teknologi Membran

Teknologi pemisahan membran telah menjadi solusi yang luas digunakan dalam berbagai sektor industri karena keunggulannya dalam efisiensi, presisi, dan keberlanjutan proses. Keuntungan utama dari teknologi ini terletak pada kemampuannya melakukan pemisahan tanpa memerlukan reaksi kimia tambahan dan tanpa proses perubahan fase yang intensif energi, seperti pada pemisahan termal. Proses pemisahan berlangsung secara fisik dengan menggunakan membran semi-permeabel yang bersifat selektif terhadap ukuran, muatan, atau sifat kimia tertentu, sehingga menghasilkan pemurnian atau konsentrasi zat secara efisien dan presisi.

Salah satu keuntungan penting dari teknologi membran adalah efisiensi pemisahan yang tinggi dengan konsumsi energi yang relatif rendah, terutama jika dibandingkan dengan teknik distilasi atau evaporasi. Proses ini umumnya dapat berlangsung pada suhu rendah, sehingga sangat cocok untuk produk yang sensitif terhadap panas seperti protein, senyawa aktif farmasi, atau bahan alami dalam industri makanan. Di samping itu, teknologi ini mendukung proses yang berjalan secara kontinu dan mudah dikendalikan melalui sistem otomatisasi. Hal ini memberikan keuntungan dari sisi operasional, karena meminimalkan intervensi manual serta meningkatkan konsistensi hasil.

Tidak hanya hemat energi, teknologi membran juga dikenal karena kemampuannya mengurangi kebutuhan penggunaan bahan kimia tambahan. Dalam banyak proses, seperti pemurnian air atau pemisahan zat aktif, penggunaan membran mengurangi ketergantungan pada koagulan, pelarut, atau senyawa penukar ion. Hal ini menjadikan proses lebih ramah lingkungan, mengurangi residu kimia dalam produk akhir, serta menurunkan beban limbah yang harus dikelola. Kemudahan dalam pengendalian parameter operasi, seperti tekanan dan laju aliran, juga memberikan fleksibilitas dalam menyesuaikan kapasitas dan kebutuhan produksi.

Meskipun menawarkan banyak keunggulan, teknologi ini tetap memiliki keterbatasan yang perlu diperhatikan. Salah satu tantangan utama adalah *fouling* atau penyumbatan pori-pori membran akibat akumulasi partikel, mikroorganisme, atau senyawa kimia yang menempel di permukaan membran. *Fouling* dapat mengurangi efisiensi proses, meningkatkan tekanan operasi, serta memperpendek umur pakai membran. Oleh karena itu, perawatan dan pembersihan rutin menjadi kebutuhan yang tak terelakkan untuk menjaga kinerja sistem.

Keterbatasan lainnya adalah biaya investasi awal yang cukup tinggi, terutama untuk instalasi sistem skala besar dengan teknologi canggih seperti reverse osmosis atau nanofiltrasi. Investasi ini mencakup biaya pembelian modul membran, pompa bertekanan tinggi, sistem kontrol, dan perlengkapan *pretreatment*. Meskipun dalam jangka panjang teknologi ini menawarkan efisiensi

operasional, biaya awal bisa menjadi penghambat bagi industri berskala kecil atau menengah yang memiliki keterbatasan modal.

Selain itu, keberhasilan teknologi membran sangat bergantung pada tahap *pretreatment* atau perlakuan awal terhadap cairan yang akan diproses. Air atau larutan yang mengandung partikel kasar, senyawa organik kompleks, atau mikroorganisme harus diolah terlebih dahulu agar tidak merusak membran atau mempercepat *fouling*. Tanpa *pretreatment* yang tepat, risiko gangguan pada sistem meningkat, dan efektivitas pemisahan dapat menurun drastis. Hal ini menambah kompleksitas teknis dan biaya operasional yang harus diperhitungkan sejak awal.

Dengan memahami keuntungan dan keterbatasannya, penggunaan teknologi membran dapat dioptimalkan sesuai kebutuhan dan karakteristik proses industri. Upaya peningkatan kualitas material membran, pengembangan sistem *pretreatment* yang lebih efisien, serta inovasi desain sistem terus dilakukan untuk mengatasi hambatan yang ada. Seiring dengan perkembangan teknologi, tantangan tersebut dapat dikurangi, sementara manfaat jangka panjang dari efisiensi, keberlanjutan, dan fleksibilitas teknologi membran akan semakin dirasakan oleh berbagai sektor.

8.6 Latihan Soal

1. Apa yang dimaksud dengan teknologi pemisahan membran?
2. Sebutkan dan jelaskan tiga jenis proses membran yang umum digunakan.

3. Apa keuntungan utama dari penggunaan teknologi membran dalam pengolahan air?
4. Jelaskan perbedaan antara mikrofiltrasi dan reverse osmosis.
5. Apa saja tantangan utama yang dihadapi dalam penggunaan membran?

BAB 9: Kristalisasi dan Sublimasi

9.1 Pengertian Kristalisasi

Kristalisasi merupakan suatu proses alami maupun buatan yang mengubah zat dari keadaan larut dalam cairan menjadi bentuk padat yang tersusun secara teratur. Dalam proses ini, zat yang semula tersebar dalam larutan secara homogen mulai mengendap dan membentuk struktur padat yang disebut kristal. Proses ini lazim terjadi saat larutan mencapai kondisi jenuh, yakni ketika tidak ada lagi pelarut yang mampu melarutkan zat terlarut. Dalam kondisi ini, kelebihan zat terlarut akan mulai keluar dari larutan dan membentuk kristal. Proses ini dapat dipicu oleh berbagai faktor seperti pendinginan, penguapan, atau penambahan zat lain yang mengubah kelarutan.

Pendinginan larutan jenuh adalah salah satu cara umum untuk memicu terbentuknya kristal. Ketika suhu larutan diturunkan, kemampuan pelarut untuk mempertahankan zat terlarut berkurang, sehingga zat tersebut mulai mengendap. Sebaliknya, dalam proses penguapan, pelarut dibiarkan menguap perlahan sehingga konsentrasi zat terlarut meningkat hingga mencapai titik jenuh, yang kemudian diikuti dengan pembentukan kristal. Di samping itu, terkadang zat ketiga ditambahkan untuk membantu proses ini

dengan cara menurunkan kelarutan atau mengikat zat terlarut secara selektif.

Struktur kristal yang terbentuk bukan hanya indah secara visual, tetapi juga menunjukkan keteraturan molekul atau atom yang tersusun secara sistematis. Setiap jenis zat dapat membentuk kristal dengan bentuk dan pola khas yang bergantung pada sifat kimia dan fisiknya. Misalnya, natrium klorida atau garam dapur cenderung membentuk kristal berbentuk kubus karena susunan ion natrium dan klorida dalam kisi kristalnya yang saling berselang-seling dengan proporsi tertentu. Bentuk kristal ini tidak hanya penting dari segi estetika, tetapi juga dari segi fungsional karena mempengaruhi sifat mekanik, titik leleh, serta kemampuan larut zat tersebut.

Kristalisasi memiliki peran yang sangat penting dalam berbagai bidang kehidupan. Dalam dunia farmasi, proses ini menjadi langkah utama dalam pemurnian senyawa aktif yang digunakan dalam pembuatan obat. Senyawa aktif sering kali harus dipisahkan dari zat pengotor atau hasil sampingan lain, dan kristalisasi memungkinkan pemisahan tersebut dengan tingkat kemurnian yang tinggi. Obat-obatan yang diproduksi dengan kristalisasi yang baik akan memiliki kualitas dan efektivitas yang lebih stabil, karena setiap kristal mewakili bentuk paling murni dari senyawa tersebut.

Di industri makanan, kristalisasi digunakan untuk mengatur tekstur dan rasa produk. Contoh paling umum adalah dalam pembuatan gula pasir, di mana larutan gula yang dipanaskan kemudian didinginkan secara perlahan hingga terbentuk kristal sukrosa. Kristal ini kemudian dikeringkan dan disaring hingga

menghasilkan butiran gula yang kita kenal sehari-hari. Selain itu, dalam pembuatan cokelat, pengendalian kristalisasi lemak kakao sangat penting untuk mendapatkan tekstur halus dan kilau yang menggoda. Proses ini dikenal sebagai *tempering*, di mana suhu dikendalikan dengan sangat presisi agar kristal lemak yang terbentuk memiliki struktur yang stabil.

Kristalisasi juga penting dalam bidang kimia industri secara luas. Banyak zat kimia diproduksi atau diproses dalam bentuk kristal karena bentuk ini memudahkan dalam hal penyimpanan, transportasi, dan pengendalian kualitas. Produk seperti pupuk, bahan pewarna, hingga bahan peledak sering kali diproses melalui kristalisasi untuk memastikan ukuran partikel yang seragam dan stabilitas yang baik selama penyimpanan. Bahkan dalam pengolahan air laut untuk produksi garam, kristalisasi menjadi kunci utama dalam memisahkan garam dari air.

Selain aplikasinya yang praktis, kristalisasi juga menjadi fenomena yang menarik untuk diamati. Kristal yang terbentuk dari larutan jenuh dapat menunjukkan keindahan alam yang luar biasa. Setiap kristal berkembang mengikuti pola tertentu, mencerminkan kekuatan tarik menarik antar molekul atau ion di dalamnya. Dalam beberapa kasus, kristal tumbuh dengan sangat lambat, menghasilkan bentuk yang sempurna dan berukuran besar. Hal ini bisa dilihat dalam formasi geologis seperti gua kristal, di mana kristal kalsit atau gipsum dapat tumbuh hingga mencapai beberapa meter panjangnya, hasil dari proses alami selama ribuan hingga jutaan tahun.

Dalam skala laboratorium, kristalisasi sering kali dilakukan untuk mengamati sifat zat tertentu atau memurnikan hasil reaksi kimia. Dengan mengontrol suhu, volume pelarut, dan kecepatan penguapan, para ahli dapat menghasilkan kristal dengan ukuran, bentuk, dan kemurnian yang diinginkan. Proses ini tidak hanya membutuhkan ketelitian, tetapi juga pemahaman mendalam mengenai sifat kimia zat yang digunakan. Bahkan perbedaan kecil dalam suhu atau kebersihan wadah dapat mempengaruhi hasil akhir dari kristalisasi tersebut.

Faktor yang mempengaruhi keberhasilan kristalisasi sangat beragam. Salah satu faktor utama adalah kelarutan, yaitu kemampuan suatu zat untuk larut dalam pelarut tertentu. Kelarutan ini biasanya meningkat dengan suhu, sehingga larutan panas dapat menampung lebih banyak zat terlarut. Namun, ketika suhu diturunkan, kelarutan menurun, dan zat yang sebelumnya terlarut akan mulai mengendap sebagai kristal. Selain itu, kecepatan pendinginan juga memengaruhi ukuran dan kualitas kristal. Pendinginan yang lambat cenderung menghasilkan kristal besar dan murni, sedangkan pendinginan cepat menghasilkan kristal kecil yang bercampur dengan pengotor.

Kemurnian larutan juga sangat memengaruhi hasil kristalisasi. Adanya zat lain yang tidak diinginkan dapat menghambat pertumbuhan kristal atau menyebabkan terbentuknya kristal campuran. Oleh karena itu, dalam banyak proses produksi, dilakukan penyaringan dan pemanasan ulang untuk menghilangkan zat pengganggu sebelum kristalisasi dilakukan. Selain itu,

penggunaan *seed crystal* atau kristal pemicu juga umum dilakukan untuk mempercepat dan mengarahkan pertumbuhan kristal utama. Kristal pemicu ini menjadi titik awal di mana zat terlarut mulai mengendap, sehingga pertumbuhan kristal berlangsung dengan arah dan bentuk yang terkendali.

Dalam kehidupan sehari-hari, proses kristalisasi dapat diamati dalam berbagai bentuk. Salah satunya adalah pembentukan es dari air. Ketika air didinginkan di bawah titik bekunya, molekul-molekul air mulai menyusun diri dalam pola teratur membentuk kristal es. Fenomena ini bukan hanya penting untuk pemahaman fisika dasar, tetapi juga berkaitan dengan banyak aspek kehidupan, mulai dari meteorologi hingga konservasi makanan. Di dapur, kristalisasi dapat dilihat saat membuat manisan atau permen, di mana larutan gula yang pekat membentuk kristal saat mendingin.

Meskipun terdengar sederhana, kristalisasi adalah proses yang kompleks dan menantang. Banyak faktor harus diperhitungkan secara bersamaan agar hasilnya sesuai harapan. Dalam beberapa kasus, kristalisasi bahkan digunakan untuk membentuk bahan dengan sifat khusus, seperti kristal optik yang digunakan dalam teknologi komunikasi atau kristal cair yang menjadi dasar layar LCD yang umum dijumpai di perangkat elektronik.

Dengan kata lain, kristalisasi bukan hanya sekadar perubahan dari larutan menjadi padatan. Ia merupakan jembatan antara dunia larutan yang cair dan dunia padat yang terstruktur. Melalui pemahaman dan pengendalian terhadap proses ini, manusia dapat menghasilkan bahan dengan kualitas tinggi, baik untuk kebutuhan

sehari-hari maupun untuk teknologi tinggi. Sebuah proses yang tampaknya sederhana namun memiliki peran krusial dalam berbagai sektor kehidupan. Kristalisasi menjadi bukti bahwa keindahan dan keteraturan dapat muncul dari proses alamiah yang berlangsung dalam diam, namun penuh makna.

9.2 Jenis-Jenis Kristalisasi

Kristalisasi merupakan proses pembentukan padatan berbentuk kristal dari suatu zat yang awalnya berada dalam fase cair atau larutan. Proses ini telah dikenal luas dalam berbagai bidang kehidupan karena perannya yang sangat penting dalam pemurnian dan pemisahan zat. Dalam konteks sehari-hari, kristalisasi tidak hanya terjadi dalam dunia industri, tetapi juga dapat diamati dalam kehidupan rumah tangga, seperti ketika garam mengendap dari air laut atau gula membentuk kristal saat airnya menguap. Proses ini tampak sederhana, namun di baliknya terdapat prinsip-prinsip fisis dan kimia yang sangat menarik untuk ditelaah.

Salah satu bentuk kristalisasi yang paling umum adalah kristalisasi dari larutan. Dalam proses ini, zat padat terlarut dalam pelarut tertentu hingga mencapai titik jenuh. Ketika kondisi jenuh ini tercapai, keseimbangan antara zat yang larut dan yang tidak larut mulai berubah. Jika larutan tersebut kemudian didinginkan atau pelarutnya diuapkan, zat terlarut akan mulai membentuk kristal. Ini terjadi karena kelarutan zat biasanya menurun seiring dengan menurunnya suhu. Contoh yang paling mudah dipahami adalah

pembentukan kristal garam dari air laut. Air yang mengandung garam diuapkan secara perlahan di bawah sinar matahari hingga akhirnya hanya menyisakan kristal-kristal putih yang bisa dikumpulkan. Tidak hanya garam, banyak senyawa lain seperti gula, tembaga(II) sulfat, dan aluminium sulfat juga dapat dikristalkan dengan cara ini.

Penting untuk memahami bahwa kristalisasi dari larutan tidak hanya terbatas pada penguapan atau pendinginan. Terkadang, dapat pula dilakukan dengan penambahan pelarut kedua yang memiliki kelarutan lebih rendah terhadap zat terlarut. Dengan cara ini, kelarutan zat menurun secara drastis, dan kristal mulai terbentuk. Misalnya, dalam pembuatan kristal aspirin, pelarut seperti etanol digunakan untuk melarutkan zat, dan kemudian air ditambahkan untuk mengurangi kelarutan aspirin sehingga mengendap dalam bentuk kristal. Proses ini memungkinkan pemurnian yang sangat baik karena zat pengotor cenderung tetap larut dalam pelarut campuran tersebut dan tidak ikut mengendap.

Selain dari larutan, kristalisasi juga dapat dilakukan dari lelehan. Dalam jenis ini, suatu zat dipanaskan hingga meleleh menjadi cairan, lalu didinginkan secara perlahan agar membentuk struktur kristal yang teratur. Contohnya bisa ditemukan dalam industri logam atau dalam pembuatan es. Ketika logam dilelehkan dan kemudian dicetak, proses pendinginan yang dikontrol dengan cermat akan menentukan ukuran dan struktur kristal logam yang terbentuk. Struktur ini pada gilirannya memengaruhi kekuatan, kekerasan, dan keuletan logam tersebut. Dalam contoh sehari-hari

yang lebih sederhana, kristalisasi dari lelehan bisa diamati pada pembentukan es dari air. Meskipun tampak sepele, pembentukan es pun merupakan proses kristalisasi yang melibatkan pengaturan molekul air dalam pola tertentu yang khas.

Proses ini penting karena dapat digunakan untuk menghasilkan zat dengan kemurnian tinggi. Ketika zat meleleh dan kemudian didinginkan, partikel-partikel yang menyusunnya cenderung membentuk kisi-kisi kristal yang teratur, sementara zat pengotor lebih sering tertinggal dalam cairan sisa yang tidak membeku. Oleh karena itu, kristalisasi dari lelehan sangat cocok digunakan dalam proses pemurnian, terutama dalam bidang industri farmasi, makanan, dan logam.

Jenis ketiga adalah kristalisasi fraksional, yang berguna untuk memisahkan dua zat atau lebih dalam suatu campuran berdasarkan perbedaan kelarutannya dalam pelarut tertentu. Dalam praktiknya, larutan jenuh dari campuran tersebut dibiarkan mengalami pendinginan secara perlahan. Zat dengan kelarutan yang lebih rendah akan mengendap terlebih dahulu, sementara yang kelarutannya lebih tinggi tetap dalam larutan. Setelah kristal terbentuk dan dipisahkan, larutan sisanya dapat didinginkan lagi untuk mengendapkan zat lainnya. Teknik ini banyak digunakan dalam pemisahan garam-garam mineral atau dalam produksi bahan kimia murni dari campuran yang kompleks.

Contoh konkret dari kristalisasi fraksional dapat ditemukan pada pemurnian gula dari sari tebu. Pada tahap awal, campuran yang diperoleh dari hasil ekstraksi mengandung berbagai zat, termasuk

glukosa, fruktosa, dan sukrosa. Karena sukrosa memiliki kelarutan yang lebih rendah dalam kondisi tertentu, maka ia akan mengendap terlebih dahulu saat larutan didinginkan atau diuapkan sebagian. Gula yang mengendap tersebut kemudian dikumpulkan, sementara komponen lain dapat diolah lebih lanjut untuk mendapatkan produk turunan atau digunakan untuk keperluan lain.

Proses kristalisasi fraksional juga memiliki peran penting dalam pemisahan logam tanah jarang dan unsur-unsur kimia lainnya yang memiliki sifat kelarutan berbeda dalam pelarut-pelarut khusus. Dengan pemilihan kondisi suhu dan pelarut yang tepat, campuran yang kompleks pun dapat diurai menjadi komponen-komponen yang lebih murni, yang masing-masing bisa digunakan untuk keperluan tertentu, mulai dari pembuatan elektronik hingga bahan magnetik.

Selain dari aspek fisis dan kimia, kristalisasi juga menarik untuk dilihat dari sudut pandang estetika dan kebudayaan. Kristal-kristal yang terbentuk secara alami atau buatan sering kali menampilkan bentuk geometris yang menakjubkan. Salju, misalnya, adalah contoh hasil kristalisasi air yang sangat khas. Setiap kepingan salju memiliki bentuk yang unik, namun semuanya menunjukkan simetri yang indah dan kompleks. Fenomena ini tidak hanya menimbulkan kekaguman, tetapi juga menjadi sumber inspirasi dalam seni dan desain.

Dalam dunia perhiasan, kristal seperti kuarsa, garam batu, dan berbagai jenis mineral lainnya dihargai karena keindahan dan keunikan bentuknya. Pembentukan kristal secara alami di perut bumi membutuhkan waktu yang sangat lama, dengan tekanan dan suhu

yang tinggi. Proses ini memberikan ciri khas pada setiap kristal yang dihasilkan. Meskipun manusia telah mampu meniru sebagian besar kondisi tersebut di laboratorium untuk membuat kristal sintetis, keunikan dan nilai estetika kristal alami tetap tidak tergantikan.

Lebih jauh lagi, kristalisasi juga sering digunakan sebagai metafora dalam banyak konteks sosial dan budaya. Proses bertahap dari kekacauan menuju keteraturan menggambarkan perjalanan dalam kehidupan, pembentukan karakter, atau pencapaian kejelasan dalam pikiran. Seperti halnya dalam proses kristalisasi, perubahan itu tidak terjadi seketika, tetapi memerlukan kondisi tertentu dan waktu yang tepat untuk tercapai. Dalam pemahaman ini, kristalisasi menjadi lebih dari sekadar fenomena fisika, melainkan simbol dari proses transformasi yang mendalam dan penuh makna.

Dengan memahami jenis-jenis kristalisasi—baik dari larutan, lelehan, maupun fraksional—kita tidak hanya mempelajari bagaimana zat-zat berubah bentuk dan keadaan, tetapi juga membuka wawasan terhadap proses-proses alami dan buatan yang sangat berperan dalam berbagai aspek kehidupan manusia. Kristalisasi bukan hanya sekadar proses teknis, melainkan juga mencerminkan dinamika perubahan, keteraturan, dan keindahan dalam dunia yang terus berkembang.

9.3 Tahapan Proses Kristalisasi

Kristalisasi adalah proses dua tahap utama yang sangat penting dalam pengendalian kualitas dan kemurnian produk,

terutama dalam industri farmasi, kimia, dan pangan. Dua tahap utama ini adalah nukleasi (pembentukan inti) dan pertumbuhan kristal, keduanya sangat dipengaruhi oleh kondisi fisik dan kimia lingkungan kristalisasi.

a. Pembentukan Inti (Nukleasi)

Nukleasi adalah tahap awal di mana molekul-molekul terlarut berkumpul membentuk sebuah inti kecil yang stabil secara termodinamika. Inti ini akan menjadi benih bagi pertumbuhan kristal lebih lanjut.

Nukleasi dapat dibagi menjadi dua jenis utama:

- Nukleasi Homogen

Terjadi secara spontan dalam larutan tanpa kehadiran partikel asing. Biasanya membutuhkan tingkat supersaturasi yang tinggi karena tidak ada permukaan bantu untuk menstabilkan agregat molekul awal. Proses ini jarang terjadi dalam sistem nyata karena kondisi yang dibutuhkan sulit dipenuhi.

- Nukleasi Heterogen

Terjadi pada permukaan benda asing seperti dinding wadah, partikel tak larut, atau gelembung gas. Energi aktivasi lebih rendah dibandingkan nukleasi homogen, sehingga lebih umum terjadi dalam praktik industri.

Faktor-faktor yang memengaruhi nukleasi:

- Derajat supersaturasi (semakin tinggi, semakin besar kemungkinan nukleasi).
- Suhu (menurunkan suhu dapat meningkatkan supersaturasi).

- Keberadaan partikel padat (memicu nukleasi heterogen).

b. Pertumbuhan Kristal

Setelah inti terbentuk dan stabil, proses berikutnya adalah pertumbuhan kristal, yaitu penambahan molekul-molekul dari larutan ke permukaan inti secara teratur, mengikuti struktur kisi kristal.

Tahapan pertumbuhan kristal melibatkan:

- Difusi: Molekul larutan bergerak menuju permukaan kristal.
- Adsorpsi: Molekul-molekul menempel pada permukaan kristal.
- Integrasi: Molekul menjadi bagian permanen dari kisi kristal.

Laju pertumbuhan kristal tergantung pada:

- Konsentrasi larutan dan tingkat supersaturasi.
- Suhu (pada suhu optimal, laju pertumbuhan maksimal).
- Agitasi (membantu distribusi zat terlarut secara merata).
- Kemurnian larutan (pengotor dapat menghambat pertumbuhan).

Pertumbuhan kristal yang optimal menghasilkan kristal dengan bentuk seragam dan kemurnian tinggi. Sebaliknya, pertumbuhan yang tidak terkendali menghasilkan kristal amorf atau bentuk tak teratur yang sulit disaring dan dikeringkan.

9.4 Faktor yang Memengaruhi Kristalisasi

Kristalisasi merupakan salah satu proses penting dalam dunia kimia dan industri, yang melibatkan pembentukan struktur padat

beraturan dari suatu zat terlarut yang terdapat dalam larutan. Proses ini terjadi ketika kondisi larutan berubah sehingga zat terlarut tidak lagi dapat tetap dalam bentuk terlarut dan mulai membentuk padatan. Kristalisasi sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor yang saling berkaitan, yang masing-masing berperan dalam menentukan bentuk, ukuran, kemurnian, serta kecepatan terbentuknya kristal. Pemahaman mengenai faktor-faktor ini tidak hanya penting untuk keperluan praktis seperti pembuatan gula, garam, atau obat-obatan, tetapi juga menjadi bagian penting dari pengamatan terhadap proses alami yang berlangsung di sekitar kita.

Salah satu faktor yang paling utama dalam proses kristalisasi adalah suhu. Suhu memainkan peranan penting dalam menentukan kelarutan suatu zat dalam pelarut. Pada umumnya, peningkatan suhu akan meningkatkan kelarutan, artinya lebih banyak zat yang dapat larut dalam pelarut pada suhu tinggi. Sebaliknya, ketika suhu diturunkan, kelarutan akan menurun, dan zat terlarut yang berlebih akan mulai keluar dari larutan dan membentuk kristal. Proses ini dikenal sebagai kristalisasi karena kejenuhan akibat penurunan suhu. Misalnya, ketika larutan gula jenuh dipanaskan dan kemudian didinginkan perlahan, gula yang berlebih akan membentuk kristal yang dapat terlihat dengan mata telanjang. Dalam kehidupan sehari-hari, proses ini dapat diamati saat membuat permen kristal dari larutan gula yang didinginkan.

Selain suhu, kelarutan suatu zat juga merupakan faktor krusial yang mempengaruhi kristalisasi. Kelarutan mengacu pada seberapa banyak zat yang dapat larut dalam suatu pelarut pada

kondisi tertentu. Zat yang memiliki kelarutan rendah lebih cenderung membentuk kristal dibandingkan zat dengan kelarutan tinggi. Ini karena hanya sedikit zat tersebut yang bisa bertahan dalam larutan, sehingga sisanya akan mudah mengendap sebagai kristal. Sebagai contoh, garam dapur (*natrium klorida*) memiliki kelarutan sedang dalam air, sehingga kristalisasinya dapat dikendalikan dengan cukup mudah. Namun, zat seperti *barium sulfat*, yang sangat rendah kelarutannya, akan segera membentuk endapan kristal bahkan dalam larutan yang hanya sedikit jenuh. Pemahaman tentang kelarutan juga membantu dalam pemurnian senyawa kimia, di mana zat yang ingin diambil bisa dikristalisasi dengan cara memilih pelarut yang sesuai.

Faktor berikutnya yang memegang peranan penting adalah tingkat kejenuhan larutan. Kejenuhan menunjukkan seberapa banyak zat yang telah larut dalam pelarut. Kristalisasi hanya dapat terjadi jika larutan berada dalam keadaan jenuh atau bahkan lewat jenuh. Larutan jenuh adalah larutan yang telah melarutkan zat sebanyak mungkin pada suhu tertentu, sedangkan larutan lewat jenuh mengandung lebih banyak zat terlarut daripada yang dapat larut secara stabil pada suhu itu. Kondisi lewat jenuh sering kali tidak stabil dan sangat mudah memicu pembentukan kristal. Dalam praktiknya, larutan lewat jenuh dapat diperoleh dengan memanaskan larutan jenuh dan kemudian mendinginkannya secara perlahan tanpa gangguan. Saat larutan ini disentuh atau dikocok, kristal akan terbentuk dengan cepat, memperlihatkan bahwa larutan tersebut sebenarnya telah menyimpan kelebihan zat terlarut yang siap

membentuk padatan. Proses ini sering dimanfaatkan dalam pembuatan bahan baku obat atau produk makanan yang mengandalkan bentuk kristal tertentu.

Laju pendinginan juga memegang peranan yang tidak kalah penting. Proses pendinginan mempengaruhi kecepatan kristalisasi dan ukuran kristal yang terbentuk. Pendinginan yang dilakukan secara perlahan memberikan waktu yang cukup bagi molekul zat terlarut untuk saling berkumpul dan menyusun diri menjadi struktur kristal yang teratur dan besar. Sebaliknya, pendinginan cepat menyebabkan molekul tidak sempat membentuk ikatan yang teratur sehingga kristal yang dihasilkan berukuran kecil dan sering kali kurang sempurna bentuknya. Dalam dunia industri, pengaturan laju pendinginan menjadi strategi penting untuk mengontrol ukuran dan kualitas kristal yang dihasilkan. Misalnya, dalam pembuatan gula rafinasi, kristal yang terlalu kecil dapat menyulitkan proses penyaringan, sementara kristal yang terlalu besar bisa menyulitkan dalam proses pencampuran atau pengemasan. Oleh karena itu, suhu dan laju pendinginan harus dikendalikan dengan sangat cermat sesuai dengan tujuan akhir dari proses kristalisasi tersebut.

Interaksi antara semua faktor ini membentuk sistem yang kompleks, di mana satu faktor dapat memengaruhi faktor lainnya. Misalnya, laju pendinginan yang terlalu cepat tidak hanya menghasilkan kristal kecil, tetapi juga dapat menyebabkan terbentuknya kristal-kristal yang tidak murni karena zat pengotor terjebak dalam struktur kristal yang terbentuk dengan tergesa-gesa. Begitu pula, jika larutan belum benar-benar jenuh atau belum cukup

lewat jenuh, meskipun suhu diturunkan dengan cepat atau lambat, kristalisasi tidak akan terjadi secara efektif. Maka, proses kristalisasi tidak bisa dipisahkan dari keseimbangan antara suhu, kelarutan, tingkat kejenuhan, dan kecepatan perubahan kondisi larutan.

Dalam konteks kehidupan sehari-hari, proses kristalisasi sering kali terlihat sederhana, namun sebenarnya melibatkan dinamika molekul yang kompleks. Misalnya, pembentukan embun beku di jendela saat pagi hari yang dingin merupakan hasil dari proses kristalisasi uap air. Contoh lain adalah pembentukan batuan mineral di alam yang memerlukan waktu ribuan tahun di bawah permukaan bumi dengan perubahan suhu dan tekanan yang lambat. Bahkan dalam dunia kuliner, kristalisasi memegang peran penting, seperti dalam pembuatan cokelat atau karamel, di mana pengaturan suhu dan waktu sangat menentukan hasil akhir produk.

Selain itu, penting untuk menyadari bahwa kristalisasi bukan hanya terjadi pada zat padat yang dilarutkan dalam cairan. Proses ini juga bisa terjadi dari uap ke padatan, seperti pada pembentukan salju dari uap air di atmosfer. Dalam hal ini, suhu lingkungan yang sangat rendah menyebabkan uap air langsung berubah menjadi kristal es tanpa melalui fase cair. Fenomena ini menunjukkan betapa beragamnya kondisi yang dapat memicu kristalisasi dan betapa pentingnya peran suhu dalam proses tersebut. Suhu tidak hanya mengatur kejenuhan, tetapi juga menjadi penentu langsung dalam transisi antarwujud zat.

Kristalisasi juga memiliki aspek estetika dan simbolik. Dalam budaya dan seni, kristal sering kali dianggap sebagai simbol

kemurnian, keindahan, dan ketahanan. Bentuk-bentuk kristal yang geometris dan berkilau telah menginspirasi banyak karya dalam bidang arsitektur, perhiasan, bahkan dalam ekspresi spiritual. Namun di balik semua simbolisme tersebut, kristalisasi tetap merupakan fenomena fisik yang bisa dijelaskan secara sistematis melalui pemahaman terhadap berbagai faktor yang memengaruhinya.

Pemahaman yang mendalam mengenai faktor-faktor tersebut memungkinkan kita untuk mengendalikan dan memanfaatkan proses kristalisasi secara optimal. Dengan mengenali bagaimana suhu, kelarutan, tingkat kejenuhan, dan laju pendinginan saling mempengaruhi, kita bisa merancang proses yang menghasilkan kristal dengan ukuran, bentuk, dan tingkat kemurnian sesuai kebutuhan. Entah untuk keperluan industri besar atau hanya eksperimen sederhana di rumah, penguasaan terhadap proses ini membuka pintu menuju berbagai kemungkinan inovatif yang melibatkan perubahan wujud zat secara teratur dan terkontrol.

9.5 Aplikasi Kristalisasi

Kristalisasi merupakan teknik penting dalam pemurnian, pemisahan, dan karakterisasi senyawa dalam berbagai industri. Proses ini tidak hanya menghasilkan zat dalam bentuk yang lebih murni, tetapi juga memengaruhi ukuran partikel, bentuk kristal, dan sifat fisik produk akhir, yang semuanya penting untuk efektivitas dan stabilitas produk.

a. Industri Farmasi

Dalam dunia farmasi, kristalisasi digunakan secara luas untuk:

- Pemurnian zat aktif farmasi (API)

Senyawa aktif obat sering kali disintesis bersama dengan berbagai pengotor. Kristalisasi memungkinkan pemisahan senyawa murni dari pengotor tersebut secara efisien.

- Kontrol ukuran dan bentuk kristal

Bentuk kristal (polimorf) suatu obat dapat memengaruhi kelarutan, bioavailabilitas, dan stabilitas. Oleh karena itu, kristalisasi juga digunakan untuk rekristalisasi polimorf yang diinginkan.

- Contoh aplikasi: Kristalisasi asam asetilsalisilat (aspirin) dan parasetamol adalah contoh klasik yang menunjukkan pentingnya kontrol terhadap ukuran dan morfologi kristal dalam formulasi tablet.

b. Industri Makanan

Dalam industri makanan, kristalisasi digunakan untuk:

- Produksi gula kristal dari larutan tebu atau bit.
- Pengendapan garam (NaCl) dari air laut atau larutan garam pekat.
- Produksi asam amino atau bahan tambahan pangan yang dikristalkan untuk kemurnian dan stabilitas.
- Contoh aplikasi: Dalam pembuatan cokelat, pengendalian kristalisasi lemak kakao sangat penting untuk menghasilkan

tekstur yang halus dan penampilan mengilap (proses *tempering*).

c. Industri Kimia

Dalam industri kimia, kristalisasi memiliki peran penting dalam:

- Pemisahan dan pemurnian senyawa organik dan anorganik.
- Produksi bahan kimia industri seperti urea, asam fosfat, dan natrium karbonat.
- Kristalisasi fraksional digunakan untuk memisahkan senyawa yang memiliki kelarutan berbeda.
- Contoh aplikasi: Produksi urea dari larutan reaksi amonia dan karbon dioksida, diikuti oleh kristalisasi dan pemisahan dari larutan ibu (*mother liquor*).

d. Laboratorium Riset

Di lingkungan akademik dan laboratorium riset, kristalisasi digunakan untuk:

- Menumbuhkan kristal tunggal (*single crystal*) untuk analisis struktur menggunakan kristalografi sinar-X (*X-ray Crystallography*).
- Karakterisasi senyawa baru hasil sintesis organik atau anorganik.
- Contoh aplikasi: Menumbuhkan kristal protein seperti enzim atau antibodi untuk menentukan struktur tiga dimensi molekul secara akurat.

Kristalisasi bukan hanya proses pemisahan fisik, tetapi juga merupakan teknik penting dalam rekayasa produk, analisis

molekuler, dan kontrol kualitas. Dengan mengatur kondisi kristalisasi (suhu, pelarut, kecepatan pendinginan), industri dapat memproduksi senyawa dengan sifat yang sesuai dengan kebutuhan aplikatif dan regulasi.

9.6 Pengertian Sublimasi

Sublimasi merupakan suatu proses fisika yang unik dan menarik, karena melibatkan perubahan wujud zat dari bentuk padat langsung menjadi bentuk gas, tanpa melewati fase cair terlebih dahulu. Fenomena ini tidak umum terjadi pada semua zat, melainkan hanya pada zat-zat tertentu yang memiliki karakteristik khusus, terutama tekanan uap yang cukup tinggi pada suhu lingkungan. Artinya, pada kondisi suhu dan tekanan tertentu, partikel-partikel dalam zat padat tersebut memiliki kecenderungan untuk langsung melepaskan diri dari ikatan antarpartikelnya dan masuk ke fase gas, tanpa mengalami pencairan terlebih dahulu.

Contoh paling dikenal dari proses ini bisa dilihat pada bahan seperti kamper, yang sering digunakan dalam lemari pakaian untuk mengusir serangga. Kamper tampak menghilang seiring waktu, bukan karena larut atau menguap dalam pengertian biasa, tetapi karena mengalami sublimasi. Ia berubah langsung dari bentuk padat menjadi uap, yang kemudian tersebar di udara dan berfungsi sebagai pengusir hama. Fenomena serupa juga terjadi pada iodin, yang saat dipanaskan akan menghasilkan uap berwarna ungu tanpa terlihat mencair lebih dahulu. Arsen, meskipun tidak umum digunakan

dalam kehidupan sehari-hari, juga mengalami perubahan serupa, menegaskan bahwa sifat ini bukan hanya dimiliki oleh satu jenis zat.

Untuk memahami proses sublimasi lebih dalam, perlu dilihat bagaimana partikel dalam zat padat tersusun dan bagaimana mereka berinteraksi satu sama lain. Dalam zat padat, partikel tersusun rapat dan memiliki gaya tarik-menarik yang cukup kuat. Namun, pada zat-zat yang dapat menyublim, gaya antarpartikel ini tidak cukup kuat untuk menahan partikel pada tempatnya ketika mereka menyerap energi dari lingkungan. Ketika energi cukup tersedia, seperti dari suhu sekitar atau pemanasan ringan, partikel-partikel tersebut memperoleh gerakan kinetik yang cukup untuk melepaskan diri dari susunan padat dan langsung menjadi gas.

Peristiwa ini juga sangat dipengaruhi oleh tekanan uap zat tersebut. Tekanan uap adalah ukuran kecenderungan suatu zat untuk menguap. Zat yang memiliki tekanan uap tinggi pada suhu kamar lebih mudah mengalami sublimasi karena partikel-partikelnya lebih cepat mencapai energi yang diperlukan untuk berubah menjadi gas. Oleh karena itu, tekanan uap yang tinggi menjadi salah satu ciri penting dari zat yang dapat mengalami proses ini.

Sublimasi juga dapat dijelaskan dari sisi keseimbangan energi. Dalam proses ini, tidak ada fase cair yang terbentuk karena energi yang diserap oleh zat padat langsung digunakan untuk mengatasi gaya tarik antarpartikel dan membawa partikel ke fase gas. Energi ini disebut *enthalpy of sublimation*, atau energi yang diperlukan untuk mengubah satu mol zat padat menjadi gas pada tekanan tertentu, tanpa melalui fase cair. Energi ini biasanya lebih

besar dibandingkan dengan energi yang dibutuhkan untuk mencairkan zat, karena mencakup seluruh proses pemutusan ikatan dari padat ke gas.

Secara praktis, sublimasi dimanfaatkan dalam berbagai bidang kehidupan. Misalnya, dalam dunia farmasi dan industri makanan, proses ini digunakan dalam teknik pengeringan beku atau *freeze drying*. Dalam proses ini, produk dibekukan terlebih dahulu, kemudian air di dalamnya dihilangkan melalui sublimasi. Hal ini menjaga kualitas dan struktur produk karena tidak melalui fase cair, yang bisa merusak komponen sensitif di dalamnya. Hasil akhirnya adalah produk kering yang tetap mempertahankan bentuk dan kandungan zat aktifnya, serta lebih tahan lama untuk disimpan.

Dalam bidang seni dan percetakan, sublimasi digunakan pada teknik cetak khusus, yaitu *sublimation printing*. Proses ini melibatkan pewarna dalam bentuk padat yang dipanaskan hingga menyublim dan menyatu dengan bahan seperti kain atau keramik. Karena pewarna menjadi gas dan masuk ke dalam serat bahan, hasil cetakan menjadi lebih tahan lama dan tidak mudah luntur. Teknik ini populer untuk membuat pakaian olahraga, cangkir bergambar, atau dekorasi rumah.

Tidak hanya dalam industri, sublimasi juga memiliki peranan penting dalam gejala alam. Misalnya, di daerah yang sangat dingin seperti kutub atau puncak gunung tinggi, salju dapat langsung berubah menjadi uap air tanpa mencair terlebih dahulu. Hal ini terjadi karena suhu dan tekanan udara yang sangat rendah, sehingga memungkinkan proses sublimasi berlangsung di alam terbuka.

Proses ini berperan dalam siklus air di lingkungan ekstrem dan menunjukkan bagaimana alam mampu mengatur wujud zat sesuai dengan kondisi yang ada.

Fenomena sublimasi juga menjadi perhatian dalam penyimpanan bahan kimia. Beberapa bahan kimia yang mudah menyublim harus disimpan dalam wadah tertutup rapat untuk mencegah kehilangan massa akibat perubahan langsung menjadi gas. Selain itu, wadah tersebut harus tahan terhadap tekanan internal yang mungkin meningkat akibat akumulasi uap dari zat padat tersebut.

Pengamatan terhadap sublimasi juga sering dilakukan dalam kegiatan sederhana. Misalnya, saat kita meletakkan kamper di ruang tertutup, kita dapat memperhatikan bahwa volumenya semakin berkurang meski tidak ada tanda-tanda mencair. Atau saat kita memanaskan iodin dalam wadah tertutup, uap ungu yang terbentuk menandakan bahwa zat tersebut tidak melewati fase cair, melainkan langsung menjadi gas. Ini memberikan kesempatan bagi siapa pun untuk mengamati salah satu bentuk perubahan fisik zat yang jarang ditemui dalam kehidupan sehari-hari.

Sublimasi juga mengajarkan bahwa tidak semua proses perubahan wujud zat mengikuti urutan yang sama. Selama ini, banyak yang mengira zat padat harus melewati fase cair sebelum menjadi gas. Namun, kenyataannya, terdapat pengecualian yang justru memperkaya pemahaman tentang dinamika materi. Hal ini menjadi pengingat bahwa dunia fisika selalu menyimpan berbagai

kejutan, bahkan dalam proses yang tampaknya sederhana seperti perubahan wujud.

Dalam konteks termodinamika, sublimasi mencerminkan keseimbangan antara suhu, tekanan, dan energi dalam sistem tertutup. Ketika suatu zat padat mencapai suhu tertentu di bawah tekanan tertentu, dan energi yang dibutuhkan tersedia, maka perubahan langsung ke gas menjadi mungkin. Interaksi antara suhu dan tekanan ini merupakan kunci dalam menentukan apakah suatu zat akan mencair, menguap, atau menyublim. Oleh karena itu, pengendalian kondisi ini sangat penting dalam proses industri yang memanfaatkan fenomena tersebut.

Dalam bidang lingkungan dan iklim, sublimasi juga berkontribusi pada pergerakan massa air. Di wilayah kutub, sublimasi dari es dan salju membantu mengatur kelembaban udara serta mempengaruhi pembentukan awan dan pola cuaca. Meskipun terjadi secara perlahan dan tidak terlihat oleh mata, dampaknya cukup signifikan dalam skala waktu yang panjang.

Akhirnya, sublimasi bukan hanya sekadar perubahan wujud, tetapi merupakan cerminan dari kompleksitas interaksi partikel dalam materi. Fenomena ini membuka wawasan tentang bagaimana sifat fisik suatu zat dapat dimanfaatkan dalam kehidupan sehari-hari, industri, maupun pemahaman terhadap alam. Dengan memahami proses ini secara lebih dalam, kita tidak hanya menambah pengetahuan tentang dunia fisik, tetapi juga menghargai keteraturan dan keunikan yang ada di balik setiap peristiwa alamiah.

9.7 Prinsip Dasar dan Termodinamika

Sublimasi adalah fenomena fisik yang secara langsung berkaitan dengan sifat termodinamika zat, khususnya hubungan antara tekanan uap, suhu, dan fase zat.

a. Diagram Fase dan Kurva Sublimasi

Diagram fase menunjukkan kondisi suhu dan tekanan di mana suatu zat berada dalam fase padat, cair, atau gas. Pada diagram tersebut terdapat tiga garis keseimbangan: antara padat–cair, cair–gas, dan padat–gas (kurva sublimasi).

Sublimasi terjadi ketika tekanan parsial berada di bawah titik tripel, yaitu titik di mana ketiga fase tersebut dapat berdampingan dalam kesetimbangan termodinamika.

Contoh: Karbon dioksida memiliki titik tripel pada tekanan sekitar 5,1 atm dan suhu $-56,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Oleh karena itu, pada tekanan atmosfer biasa (1 atm), CO_2 tidak dapat mencair dan akan langsung menyublim dari padat ke gas.

b. Tekanan Uap dan Energi

Sublimasi berlangsung ketika tekanan uap zat padat lebih tinggi dibandingkan tekanan eksternal. Zat akan menguap langsung tanpa mencair karena gaya tarik antarmolekulnya teratasi oleh energi kinetik molekul.

c. Entalpi Sublimasi (ΔH_{sub})

Entalpi sublimasi adalah energi yang diperlukan untuk mengubah 1 mol zat padat menjadi gas pada tekanan konstan.

Secara umum, entalpi sublimasi dapat dihitung dengan menjumlahkan dua perubahan entalpi:

$$\Delta H_{\text{sub}} = \Delta H_{\text{fus}} + \Delta H_{\text{vap}}$$

- ΔH_{fus} : entalpi peleburan (padat $\rightarrow$ cair)
- ΔH_{vap} : entalpi penguapan (cair $\rightarrow$ gas)

Namun, karena proses sublimasi langsung dari padat ke gas, nilai ΔH_{sub} sering diukur secara eksperimen melalui teknik kalorimetri atau diperoleh dari data literatur termodinamika.

9.8 Contoh Zat yang Mengalami Sublimasi

Sifat utama zat yang menyublim adalah mudah menguap dalam fase padat, dan memiliki ikatan antarmolekul yang relatif lemah. Berikut penjelasan lebih lengkap dari contoh zat:

- Karbon dioksida (CO_2): Dalam bentuk padat dikenal sebagai *dry ice*. Pada suhu kamar dan tekanan atmosfer, ia langsung menyublim menghasilkan kabut putih yang sebenarnya adalah kondensasi uap air di udara.
- Kamper ($\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}$): Merupakan senyawa organik aromatik yang mudah menguap pada suhu kamar. Dipakai sebagai pengusir serangga karena uapnya bersifat toksik terhadap beberapa serangga.
- Iodin (I_2): Zat padat berwarna ungu tua yang menyublim menjadi uap ungu terang. Dipakai dalam reaksi kimia analitik, serta sebagai antiseptik.

- *Naphthalene* ($C_{10}H_8$): Zat aromatik padat yang menyublim perlahan di suhu kamar. Digunakan dalam kapur barus untuk mencegah serangga seperti ngengat.

9.9 Aplikasi Sublimasi

Sublimasi tidak hanya fenomena laboratorium, tetapi juga dimanfaatkan secara luas dalam industri dan kehidupan sehari-hari:

a. *Freeze-Drying* (Liofilisasi)

Teknik pengeringan yang mengandalkan sublimasi air dari bahan beku. Bahan dibekukan terlebih dahulu, lalu diberi tekanan rendah agar es menyublim menjadi uap tanpa melalui fase cair. Digunakan dalam:

- Produk makanan instan (misal: kopi, buah kering),
- Obat-obatan dan vaksin biologis,
- Riset mikrobiologi (untuk menyimpan mikroba)

b. Pemurnian Zat Padat

Beberapa senyawa dapat dimurnikan dengan sublimasi karena zat pengotor memiliki tekanan uap lebih rendah atau tidak menyublim. Misalnya, pemurnian iodin dan kamper dalam laboratorium organik.

c. *Sublimation Printing*

Teknologi cetak menggunakan tinta sublimasi (biasanya berbasis zat azo) yang menguap dan meresap ke serat poliester. Hasil cetakan tahan lama karena tinta menjadi bagian dari material, bukan hanya menempel di permukaan.

9.10 Faktor-Faktor yang Memengaruhi Sublimasi

Proses sublimasi dipengaruhi oleh beberapa kondisi fisik dan sifat kimia zat:

a. Tekanan

Penurunan tekanan di sekitar zat padat mempercepat sublimasi karena mempermudah molekul untuk meninggalkan permukaan padat dan masuk ke fase gas. Oleh karena itu, sublimasi berlangsung lebih efisien di ruang hampa.

b. Suhu

Meningkatkan suhu akan menambah energi kinetik molekul, sehingga mempercepat pelepasan molekul dari permukaan padat. Tetapi jika terlalu tinggi, zat bisa terurai sebelum menyublim (terutama pada senyawa organik sensitif).

c. Luas Permukaan

Semakin luas permukaan zat padat, semakin banyak molekul di permukaan yang dapat menyublim. Oleh karena itu, bentuk serbuk atau kristal kecil lebih cepat menyublim dibandingkan massa padat besar.

d. Sifat Fisik dan Kimia Zat

- Zat dengan ikatan antarmolekul lemah (misalnya gaya Van der Waals pada iodin dan naphthalene) cenderung lebih mudah menyublim.

- Struktur molekul dan polaritas juga memengaruhi. Zat nonpolar cenderung menyublim lebih mudah dibandingkan yang polar karena tidak membentuk ikatan hidrogen yang kuat.

9.11 Latihan Soal

1. Jelaskan secara singkat proses kristalisasi dan sebutkan contohnya!
2. Apa perbedaan antara kristalisasi dari larutan dan dari lelehan?
3. Mengapa sublimasi hanya terjadi pada zat tertentu?
4. Berikan dua contoh aplikasi kristalisasi dan sublimasi dalam kehidupan sehari-hari!
5. Sebutkan faktor-faktor yang memengaruhi kristalisasi dan sublimasi!

BAB 10: Evaluasi dan Integrasi Proses Pemisahan

10.1 Pengertian Evaluasi Proses Pemisahan

Dalam proses produksi bahan aktif dan produk jadi di industri kimia dan farmasi, pemisahan merupakan salah satu tahap yang sangat menentukan kualitas akhir dari suatu produk. Tahapan ini bertujuan untuk memisahkan senyawa target dari campuran kompleks sehingga menghasilkan zat yang murni dan sesuai dengan standar mutu yang telah ditetapkan. Di sinilah peran evaluasi terhadap proses pemisahan menjadi sangat penting, karena berfungsi sebagai alat untuk memastikan bahwa proses tersebut berjalan dengan optimal, efisien, serta tidak menghasilkan limbah atau kehilangan bahan dalam jumlah yang signifikan.

Proses pemisahan bisa dilakukan dengan berbagai cara, seperti kristalisasi, distilasi, ekstraksi, *membrane separation*, maupun kromatografi. Setiap teknik tersebut memiliki keunggulan dan keterbatasan masing-masing, tergantung pada jenis bahan yang dipisahkan, skala produksi, dan tujuan akhir dari proses tersebut. Oleh karena itu, penilaian secara menyeluruh terhadap kinerja pemisahan menjadi aspek krusial dalam sistem produksi.

10.1.1 Aspek Efektivitas dalam Pemisahan

Efektivitas dalam konteks pemisahan mengacu pada kemampuan suatu sistem dalam memisahkan senyawa target dari komponen lain secara selektif. Evaluasi dilakukan dengan mengamati tingkat kemurnian zat yang dihasilkan, kecepatan proses, serta sejauh mana pemisahan berhasil dilakukan tanpa menghasilkan senyawa pengganggu atau *impurities* dalam jumlah tinggi. Misalnya, dalam proses ekstraksi senyawa bioaktif dari tanaman, efektivitas pemisahan sangat menentukan apakah hasil akhirnya bisa langsung diformulasikan lebih lanjut atau perlu pemrosesan tambahan.

Kinerja sistem pemisahan juga erat kaitannya dengan jenis pelarut, suhu, tekanan, dan waktu pemrosesan. Menyesuaikan variabel-variabel ini menjadi bagian penting dalam upaya mengoptimalkan hasil. Menurut Huang et al. (2020), perbaikan dalam kontrol suhu dan waktu kontak antara pelarut dengan bahan aktif dapat meningkatkan efisiensi ekstraksi hingga 40%, sekaligus mengurangi degradasi senyawa sensitif terhadap panas.

10.1.2 Efisiensi dan Dampak terhadap Bahan Aktif

Efisiensi dalam evaluasi proses pemisahan tidak hanya berkaitan dengan output kuantitatif, tetapi juga mencakup seberapa besar bahan aktif yang berhasil dipertahankan selama proses berlangsung. Dalam praktik industri, kerugian bahan aktif sekecil apa pun bisa berdampak signifikan, baik dari sisi ekonomi maupun kualitas. Oleh sebab itu, proses ini perlu dievaluasi dengan mempertimbangkan *yield*, kestabilan zat aktif, serta keterulangan proses pada skala yang lebih besar.

Efisiensi yang rendah sering kali menjadi indikasi bahwa ada parameter proses yang belum dioptimalkan atau bahwa teknik yang digunakan kurang sesuai untuk jenis bahan yang diproses. Evaluasi yang cermat terhadap setiap tahapan dapat memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai titik-titik kritis dalam proses produksi, sehingga memungkinkan perbaikan sistematis.

10.1.3 Peran Teknologi dalam Pengendalian dan Evaluasi

Dengan kemajuan teknologi, kini tersedia berbagai perangkat yang dapat digunakan untuk memantau dan menganalisis jalannya proses pemisahan secara real-time. Sistem otomatisasi dan sensor digital telah diterapkan untuk memantau perubahan suhu, tekanan, dan komposisi bahan selama pemisahan. Hal ini memudahkan operator dalam melakukan penyesuaian instan dan mencegah terjadinya kegagalan proses yang bisa menyebabkan hilangnya bahan aktif secara signifikan.

Menurut studi dari Yamamoto dan Sato (2022), integrasi *process analytical technology* dalam sistem pemisahan mampu meningkatkan *process yield* hingga 15% dibandingkan sistem manual konvensional, dengan penurunan limbah kimia yang cukup signifikan. Teknologi ini juga memungkinkan pencatatan data secara otomatis yang penting untuk keperluan pelacakan mutu dan audit internal.

10.2 Parameter Evaluasi

Evaluasi terhadap proses pemisahan memiliki peranan penting dalam memastikan bahwa suatu teknik tidak hanya efektif secara teknis, tetapi juga efisien, aman, dan ramah lingkungan. Proses pemisahan merupakan inti dari berbagai aktivitas industri, mulai dari ekstraksi bahan aktif tanaman hingga pemurnian senyawa dalam formulasi. Setiap parameter yang dievaluasi memberikan informasi mendalam mengenai kinerja keseluruhan sistem dan potensi perbaikannya.

10.2.1 Efisiensi Pemisahan

Efisiensi pemisahan, atau *separation efficiency*, menggambarkan sejauh mana proses berhasil memisahkan komponen yang diinginkan dari campuran awal. Nilai efisiensi ini biasanya dinyatakan dalam bentuk perbandingan antara konsentrasi zat target di fraksi akhir terhadap jumlah awal. Proses dengan efisiensi tinggi akan menghasilkan fraksi yang kaya zat aktif, dengan kontaminasi minimal dari senyawa lain. Dalam konteks bahan alam, efisiensi yang baik menjadi indikator bahwa proses tersebut layak diterapkan dalam skala produksi, karena mampu meminimalkan kehilangan komponen bernilai (Rao et al., 2021).

10.2.2 Waktu Proses

Durasi pemisahan merupakan faktor penting dalam menentukan kelayakan suatu teknik dalam operasional sehari-hari. Proses yang terlalu lama akan membebani biaya produksi dan menyita sumber daya secara tidak proporsional. Sebaliknya, proses

yang berlangsung terlalu cepat sering kali berisiko menurunkan kualitas hasil, misalnya karena belum tercapai kesetimbangan pemisahan. Oleh karena itu, waktu optimal harus dicapai, di mana efisiensi tetap tinggi namun dengan konsumsi waktu yang masuk akal. Kecepatan proses menjadi salah satu tolok ukur dalam industri modern yang menuntut efisiensi tinggi dan waktu produksi yang singkat.

10.2.3 Hasil Pemulihan

Recovery yield atau hasil pemulihan merujuk pada jumlah senyawa target yang berhasil diambil dari total yang tersedia di dalam bahan awal. Nilai ini biasanya dinyatakan dalam bentuk persentase. Tingginya nilai hasil pemulihan menunjukkan bahwa proses yang digunakan mampu mengeluarkan senyawa aktif secara maksimal tanpa banyak kehilangan selama tahap ekstraksi atau pemisahan. Dalam pengolahan bahan herbal, misalnya, kehilangan senyawa utama bisa berdampak pada menurunnya potensi biologis produk akhir (Li et al., 2022). Oleh karena itu, evaluasi parameter ini menjadi sangat penting sebelum skala produksi diperluas.

10.2.4 Kemurnian Produk

Kemurnian atau *purity* adalah sejauh mana produk akhir terbebas dari zat-zat pengotor atau kontaminan. Parameter ini sangat krusial dalam menjamin keamanan dan efektivitas produk, terlebih lagi dalam formulasi yang akan dikonsumsi manusia. Kemurnian juga menentukan harga dan kelas mutu suatu produk, terutama di pasar internasional. Teknik pemisahan yang baik tidak hanya mengumpulkan senyawa target, tetapi juga menyingkirkan fraksi

yang tidak diinginkan dengan efisien. Dengan demikian, kemurnian dapat dijadikan indikator keberhasilan sistem secara keseluruhan.

10.2.5 Konsumsi Energi dan Pelarut

Aspek lain yang tidak kalah penting adalah konsumsi energi dan pelarut. Proses pemisahan yang ideal harus hemat energi dan menggunakan pelarut dalam jumlah minimal. Penggunaan pelarut berlebih tidak hanya berdampak pada biaya, tetapi juga menimbulkan tantangan dalam pengelolaan limbah. Energi yang dibutuhkan pun perlu diperhitungkan, khususnya jika sistem dirancang untuk operasi kontinu atau skala besar. Dalam beberapa tahun terakhir, banyak pengembangan dilakukan untuk mengadopsi sistem pemisahan yang lebih efisien, seperti *membrane-based separation* atau penggunaan pelarut ramah lingkungan (*green solvents*) (Tan et al., 2020).

10.2.6 Keberlanjutan Proses

Keberlanjutan menjadi sorotan utama dalam berbagai kegiatan industri dewasa ini. Evaluasi terhadap dampak lingkungan dari proses pemisahan harus dilakukan secara menyeluruh. Hal ini mencakup analisis terhadap limbah cair, konsumsi air, serta jejak karbon dari sistem yang digunakan. Proses yang mengandalkan pelarut organik beracun atau menghasilkan limbah berbahaya tentu tidak diinginkan dalam jangka panjang. Oleh karena itu, evaluasi harus mencakup sejauh mana sistem mendukung prinsip *sustainable processing*, seperti pemanfaatan kembali pelarut atau penggunaan bahan baku terbarukan (Martínez & Delgado, 2023).

Keseluruhan parameter di atas berfungsi sebagai panduan menyeluruh untuk menilai seberapa layak suatu proses diterapkan dalam kegiatan industri atau pengembangan produk. Dengan melakukan evaluasi yang menyeluruh, maka setiap inovasi dalam teknik pemisahan tidak hanya menjadi solusi teknis, tetapi juga berkontribusi terhadap keberlanjutan dan tanggung jawab sosial.

10.3 Teknik Evaluasi

Evaluasi merupakan proses penting dalam memastikan bahwa hasil suatu proses pemisahan atau pemurnian memenuhi standar yang telah ditentukan. Evaluasi yang tepat memungkinkan pengguna mengetahui tingkat keberhasilan proses yang dilakukan, serta efisiensi dari segi waktu, sumber daya, dan biaya. Dalam konteks bahan alam dan produk herbal, proses evaluasi tidak hanya menitikberatkan pada aspek kuantitatif semata, tetapi juga pada kestabilan, kejelasan struktur kimia, dan kesesuaian dengan parameter mutu.

10.3.1 Analisis Spektra dan Kromatografi

Salah satu teknik evaluasi yang umum dilakukan adalah pengukuran menggunakan *ultraviolet-visible spectroscopy* (UV-Vis) dan *high performance liquid chromatography* (HPLC). *Spectroscopy* UV-Vis digunakan untuk menilai kadar senyawa tertentu berdasarkan penyerapan cahaya pada panjang gelombang tertentu. Teknik ini cukup efisien dalam menganalisis senyawa yang memiliki gugus kromofor aktif.

Sementara itu, *HPLC* berperan penting dalam menentukan kemurnian sampel, karena mampu memisahkan komponen yang memiliki perbedaan kecil dalam struktur kimia. Puncak yang dihasilkan pada kromatogram dapat menunjukkan keberadaan senyawa pengotor jika muncul di luar puncak utama. Evaluasi semacam ini menjadi dasar dalam pengambilan keputusan tentang kelayakan hasil proses pemurnian.

Dalam laporan oleh Liu et al. (2022), disebutkan bahwa kombinasi *detector* UV-Vis dan *HPLC* memberikan gambaran yang lebih lengkap mengenai tingkat kemurnian dan konsentrasi senyawa aktif, khususnya dalam ekstrak tanaman yang kompleks.

10.3.2 Evaluasi Berdasarkan Massa

Perbandingan massa sebelum dan sesudah proses pemisahan juga merupakan indikator sederhana namun penting dalam evaluasi. Dengan menimbang sampel awal dan hasil akhir, diperoleh gambaran kasar tentang efisiensi proses yang dilakukan. Apabila hasil akhir menunjukkan massa yang jauh lebih kecil dari teoritis, hal ini dapat mengindikasikan adanya kehilangan senyawa selama pemrosesan, atau ketidaksempurnaan dalam tahap pemisahan.

Meskipun teknik ini tidak memberikan informasi tentang kemurnian, namun sangat berguna untuk evaluasi kuantitatif awal, terutama ketika sumber daya analitik terbatas.

10.3.3 Pengujian Sifat Fisik dan Kimia

Selain analisis spektra, sifat fisik dan kimia dari senyawa hasil pemisahan juga harus dievaluasi. Beberapa parameter yang biasanya diperiksa meliputi titik leleh, kelarutan, warna, dan bau. Di

sampling itu, pengukuran pH, konduktivitas, serta kestabilan terhadap cahaya atau suhu juga menjadi bagian penting dalam proses ini.

Sifat-sifat tersebut tidak hanya berperan dalam memastikan identitas dan keaslian senyawa, tetapi juga menentukan kelayakan penggunaan produk dalam formulasi akhir. Sebagai contoh, senyawa yang tidak stabil terhadap cahaya harus disimpan dalam wadah gelap atau tertutup untuk menjaga efektivitasnya selama penyimpanan.

Menurut Cheng dan Wu (2023), evaluasi sifat kimia menjadi krusial dalam industri ekstrak herbal, karena banyak komponen bioaktif sangat rentan terhadap degradasi jika tidak ditangani dengan benar.

10.3.4 Evaluasi Efisiensi Operasional

Di luar aspek teknis, evaluasi juga menyentuh aspek efisiensi operasional. Ini meliputi analisis waktu proses dan total biaya yang diperlukan untuk mencapai hasil yang diinginkan. Teknik atau proses yang memberikan hasil baik dalam waktu singkat dan dengan biaya minimal akan lebih disukai dalam skala produksi.

Dengan melakukan pencatatan waktu yang dibutuhkan untuk setiap tahapan proses dan menghitung biaya bahan serta energi yang digunakan, maka dapat diperoleh data untuk optimalisasi proses. Hal ini sangat penting terutama ketika suatu prosedur dievaluasi untuk kemungkinan produksi massal.

Studi oleh Nakamura et al. (2021) menunjukkan bahwa proses pemurnian yang dioptimalkan berdasarkan analisis waktu dan

biaya dapat mengurangi pengeluaran hingga 30% tanpa mengorbankan mutu hasil akhir.

10.4 Integrasi Proses Pemisahan

Dalam sistem produksi modern, efisiensi menjadi kunci utama dalam menekan biaya, menghemat energi, dan memaksimalkan hasil. Salah satu strategi yang banyak digunakan dalam pengolahan bahan adalah integrasi proses pemisahan. Integrasi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi ruang dan waktu, tetapi juga memungkinkan sistem bekerja secara *kontinu* tanpa gangguan yang signifikan. Dengan menggabungkan beberapa proses pemisahan menjadi satu alur terpadu, kompleksitas sistem dapat dikelola lebih baik, dan risiko kehilangan produk selama transfer antar tahap dapat diminimalkan.

10.4.1 Integrasi Ekstraksi Cair-Cair dengan Kromatografi

Salah satu bentuk integrasi yang cukup banyak diterapkan adalah penggabungan proses *ekstraksi cair-cair* dengan kromatografi. Dalam sistem ini, biasanya dilakukan fraksinasi dengan pelarut yang berbeda kepolarannya (polar, semi polar dan nonpolar) yang bertujuan memisahkan senyawa target dari matriks, kemudian dianalisis menggunakan kromatografi lapis tipis (KLT) untuk menentukan fase gerak yang paling cocok dengan menghasilkan bercak (*spot*) pemisahan terbanyak. Langkah selanjutnya senyawa target yang sebelumnya telah dipisahkan secara kasar menggunakan pelarut akan langsung dialirkan ke kolom

kromatografi dengan fase gerak yang sesuai pada analisis secara KLT untuk pemurnian lanjutan. Keunggulan utama dari integrasi ini adalah kemampuannya untuk mempersingkat waktu proses secara keseluruhan dan mengurangi kebutuhan pelarut tambahan karena tidak ada tahap penguapan dan pelarutan ulang secara terpisah.

Integrasi ini banyak diterapkan dalam industri farmasi dan nutraseutikal, di mana produk alami sering kali memiliki komponen aktif dalam jumlah kecil dan tersebar dalam campuran yang kompleks. Dengan menggabungkan dua teknik ini, pemisahan dapat dilakukan dengan lebih selektif dan efisien, tanpa harus mengganggu kestabilan senyawa aktif (Mehta et al., 2021; Tulandi et al., 2021).

10.4.2 Penggabungan Padat-Cair dan Filtrasi Berkelanjutan

Proses pemisahan padat-cair merupakan tahapan penting dalam produksi berbasis fermentasi, pemrosesan biomassa, dan produksi bahan kimia organik. Namun, dalam sistem konvensional, pemisahan ini kerap menjadi *bottleneck* karena dilakukan secara *batch* dan memerlukan waktu lama. Oleh karena itu, penggabungan proses padat-cair dengan sistem filtrasi berkelanjutan menjadi solusi yang semakin umum digunakan.

Dengan menggunakan peralatan seperti *rotary vacuum filters* atau *membrane filtration units* yang dirancang untuk aliran kontinu, pengeluaran padatan dari larutan dapat dilakukan secara efisien tanpa perlu menghentikan alur produksi. Sistem ini tidak hanya menghemat waktu, tetapi juga memperkecil paparan kontaminasi dan meningkatkan keselamatan kerja, karena intervensi manual menjadi sangat minimal.

10.4.3 *Reactive Separation*: Pemisahan dan Reaksi secara Simultan

Salah satu bentuk integrasi paling canggih dalam proses pemisahan adalah *reactive separation*, yaitu penggabungan antara reaksi kimia dan proses pemisahan dalam satu sistem reaktor. Konsep ini sangat ideal untuk reaksi-reaksi yang sifat kesetimbangannya menghambat konversi sempurna. Dengan menghilangkan produk reaksi secara langsung saat terbentuk, posisi kesetimbangan dapat digeser sehingga menghasilkan konversi yang lebih tinggi dari yang mungkin dicapai dalam sistem konvensional.

Contoh nyata dari teknik ini adalah *reactive distillation*, yang telah digunakan secara luas dalam industri petrokimia dan produksi ester. Dalam sistem ini, reaksi esterifikasi dan pemisahan hasil (biasanya air atau alkohol) berlangsung secara bersamaan di dalam kolom distilasi yang sama. Selain hemat energi, sistem ini juga mengurangi jumlah peralatan yang diperlukan sehingga biaya investasi dan operasional dapat ditekan.

Menurut kajian oleh Santos & Wibowo (2020), implementasi *reactive distillation* dalam skala industri menunjukkan efisiensi energi hingga 40% lebih tinggi dibandingkan konfigurasi konvensional yang memisahkan reaksi dan distilasi secara terpisah.

10.4.4 Tantangan dan Peluang

Meski integrasi proses pemisahan menjanjikan banyak manfaat, implementasinya tetap menghadapi tantangan teknis, terutama dalam hal pengendalian proses dan desain sistem yang kompleks. Diperlukan pemahaman mendalam terhadap karakteristik

fisikokimia dari bahan yang diolah, serta kemampuan dalam merancang unit yang kompatibel untuk bekerja dalam sistem kontinu. Namun demikian, kemajuan teknologi kontrol proses dan pengembangan peralatan *modular* memberikan peluang besar untuk mewujudkan sistem produksi yang lebih ramping dan adaptif di masa depan.

10.5 Latihan Soal

1. Apa tujuan utama dari evaluasi proses pemisahan?
2. Sebutkan minimal tiga parameter yang digunakan dalam evaluasi proses pemisahan.
3. Jelaskan manfaat dari integrasi proses pemisahan.
4. Sebutkan satu tantangan utama dalam integrasi proses dan bagaimana solusinya.
5. Berikan contoh teknik evaluasi yang digunakan dalam industri farmasi.

PROFIL PENULIS



Devina Ingrid Anggraini, S.Si., M.Si., lahir di Semarang pada 19 Agustus 1983 dan kini berdomisili di Pencil, Bendo, Kecamatan Pedan, Kabupaten Klaten. Penulis menyelesaikan pendidikan Sarjana (S1) di Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Diponegoro, dan melanjutkan studi Magister (S2) di Jurusan Kimia, FMIPA Universitas Gadjah Mada. Saat ini, penulis aktif sebagai dosen dan berperan dalam pengembangan keilmuan serta pendidikan di bidang kimia.

Melalui karya ini, penulis ingin menyampaikan bahwa “buku merupakan jembatan yang akan menghubungkan ilmu pengetahuan dengan kehidupan nyata, di mana teori dan aplikasi bertemu.”



Leonardo Paksi Sukoco, lahir di Bantul pada 2 Juli 2002, saat ini berdomisili di Cileungsi, Kabupaten Bogor, Jawa Barat. Penulis memiliki hobi mendalam dalam *design automotive engineering*. Meskipun fokus utama penulis lebih banyak tertuju pada dunia teknik otomotif, semangatnya untuk memperluas kontribusi keilmuan mendorong lahirnya buku “Teknologi Pemisahan dalam Industri Kimia”. Melalui buku ini, penulis berharap dapat menjembatani pengetahuan teknik dengan dunia praktik, serta turut memperluas jejaring ilmu lintas disiplin untuk kemajuan bersama.



Nur Afriyanti, M.Si., lahir di Padang pada 30 Juli 1991 dan saat ini berdomisili di Padang, Sumatera Barat. Memiliki kegemaran membaca, penulis aktif mengembangkan diri di bidang keselamatan dan kesehatan kerja serta pendidikan. Melalui buku ini, penulis berharap dapat memberikan kontribusi nyata dalam menciptakan lingkungan kerja yang aman dan sehat. Buku ini disusun sebagai referensi yang bermanfaat bagi siapa saja yang peduli terhadap keselamatan di tempat kerja—baik akademisi, praktisi, maupun masyarakat umum. Penulis mengajak pembaca untuk bersama-sama membangun budaya kerja yang positif demi kesejahteraan semua pihak.



Evanisia More, S.Pd., M.Si., lahir di Kupang pada 14 Maret 1993 dan saat ini berdomisili di Kota Kupang, Nusa Tenggara Timur. Penulis memiliki kegemaran membaca novel dan menonton film sebagai sarana memperkaya wawasan dan imajinasi. Dalam perannya sebagai pendidik, penulis aktif berbagi ilmu dan semangat kepada generasi muda. Melalui buku ini, penulis ingin menyampaikan pesan sederhana namun kuat: Semangat!—sebuah dorongan agar pembaca senantiasa memiliki energi positif dalam belajar dan berkarya.



Munawarohthus Sholikha, S.Si., M.Si., lahir di Semarang pada 7 Maret 1986 dan kini berdomisili di Bekasi. Penulis dikenal sebagai sosok yang mencintai dunia ilmu pengetahuan dan petualangan, dengan hobi membaca serta *traveling*. Pesan untuk pembaca, “Buku adalah gerbang dunia. Membaca dan *traveling* jalan untuk membukanya.”



Rabiatal Adawiyah, S.Farm., M.Farm., lahir di Palu pada 6 Desember 1994 dan berdomisili di Jl. Parigi 4 No. 9 BTN SILAE, Kota Palu, Sulawesi Tengah. Penulis merupakan pribadi yang gemar mengeksplorasi pengetahuan dan pengalaman melalui hobi *traveling*, membaca, dan mendengarkan musik. Pesan untuk pembaca, “Terima kasih telah meluangkan waktu untuk membaca. Semoga Anda menemukan sesuatu yang bermanfaat dan menarik.”



Kiki Rizki Handayani, M.Farm., lahir di Palu pada tanggal 28 Juni 1994. Saat ini, penulis berdomisili di Sribit, Kelurahan Sendangtirto, Kecamatan Berbah. Menyelesaikan pendidikan Magister Farmasi (S2) di Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta, penulis saat ini berprofesi sebagai dosen pada Program Studi D3 Farmasi di Universitas Madani. Kecintaannya terhadap dunia pendidikan dan farmasi mendorongnya untuk terus berkarya dan berbagi ilmu, khususnya dalam bidang teknologi farmasi dan industri kimia. Melalui buku ini, penulis berharap dapat memberikan referensi yang bermanfaat bagi pembaca dalam memahami prinsip-prinsip teknologi pemisahan dalam industri kimia. Penulis percaya bahwa semangat untuk terus menggali ilmu akan menjadi bekal penting bagi kemajuan keilmuan dan praktik di bidang farmasi dan industri.



Nur Hidayah, MT., lahir di Banjarmasin pada 18 Februari 1990 dan kini berdomisili di kota yang sama, yaitu Banjarmasin, Kalimantan Selatan. Memiliki minat besar terhadap dunia teknik, khususnya di bidang teknik kimia, penulis juga dikenal sebagai pribadi yang gemar *traveling*. Pesan untuk pembaca, “Tidak semua hal di dunia ini bersatu untuk selamanya. Beberapa harus dipisahkan agar bisa lebih murni, lebih berguna, atau lebih kuat. Begitu pula dalam industri kimia, pemurnian, seleksi, dan pemisahan bukanlah sekadar proses teknis, tetapi juga cermin dari upaya manusia memahami dan mengendalikan kompleksitas alam. Buku ini bukan sekadar kumpulan rumus dan diagram alir. Ia adalah kisah tentang bagaimana manusia belajar memisahkan yang rumit menjadi yang teratur, mengurai yang bercampur menjadi yang bernilai. Setiap kolom distilasi, membran filtrasi, atau unit adsorpsi adalah hasil dari pencarian panjang atas efisiensi, keakuratan, dan keberlanjutan.”



Nur Rahmawati, S.Si., M.Farm., lahir di Jakarta pada 3 April 1988 dan kini berdomisili di Parung, Bogor, Jawa Barat. Penulis adalah sosok yang aktif dan mencintai dunia pendidikan serta pengembangan diri, dengan hobi membaca, *traveling*, dan menonton sebagai sumber inspirasinya. Pesan untuk pembaca, “Hidup cuma sekali, hiduplah yang berarti!”



Silvester Maximus Tulandi, S.Farm., M.Si., lahir di Atambua pada 12 Mei 1974. Saat ini, penulis berdomisili di Tambun Utara, Bekasi, Jawa Barat. Minat utamanya adalah membaca dan berolahraga, dua aktivitas yang menurutnya saling melengkapi antara pengembangan intelektual dan kesehatan fisik. Pesan untuk pembaca, “Makin banyak membaca, makin banyak informasi yang diperoleh.”

DAFTAR PUSTAKA

- Abid, M. B., Wahab, R. A., Abdelsalam, M. Gzara, L., & Moujдин, I. A. (2023). Desalination technologies, membrane distillation, and electrospinning, an overview. *Heliyon*, 9(12), e12810.
- Agustina, S., Pudji, S., Widiyanto, T., & Trisni, A. (2008). Penggunaan teknologi membran pada pengolahan air limbah industri kelapa sawit. *Workshop Teknologi Industri Kimia dan Kemasan*. Jakarta.
- Aini, A. P. (2016). Pengolahan air dengan membran karbon nanomaterial. Bandung Institute of Technology.
- Atkins, P., & de Paula, J. (2010). *Atkins' Physical Chemistry* (9th ed.). Oxford University Press.
- Atkins, P., & Paula, J. (2014). *Physical chemistry* (10th ed.). Oxford University Press.
- Baker, R. (2012). *Membrane Technology and Applications*. John Wiley & Sons.
- Barp, L., et al. (2023). Pressurized liquid extraction: A powerful tool to implement extraction and purification of food contaminants. *Foods*, 12(10).
- Bhattacharyya, D., & Butterfield, D. A. (2003). New insight into membrane science and technology: Polymeric and biofunctional membranes. *Elsevier*.

- Bhattarai, R. S., Bachu, R. D., Boddu, S. H., & Bhaduri, S. (2018). Biomedical applications of electrospun nanofibers: Drug and nanoparticle delivery. *Pharmaceutics*, 11(1), 5.
- Bovee, C. L., & Thill, J. V. (2016). *Business communication today* (13th ed.). Pearson.
- Braithwaite, A., & Smith, F. J. (1996). *Chromatographic Methods*.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2014). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (9th ed.). Wiley.
- Cardon, P. W. (2020). *Business communication: Developing leaders for a networked world* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Cerini, L. (1929). Apparatus for the purification of impure solutions of caustic soda and the like on osmotic principals. *USA Patent Application*.
- Chang, R. (2019). *Chemistry*.
- Cheryan, M. (1986). *Ultrafiltration Hand Book*. Technomic Publishing Company, Inc.
- Christian, G. D. (2004). *Analytical Chemistry*.
- Cussler, E. L., & Moggridge, G. D. (2020). *Chemical product design* (3rd ed.). Cambridge University Press.
- Drioli, E., & Giorno, L. (1999). *Biocatalytic Membrane Reactors: Application in Biotechnology and the Pharmaceutical Industry*. Taylor & Francis Publisher: London, UK.
- Elma, M., Mahmud, R., Lestari, R. A., Kautsar, H. S., & Rahma, A. (2023). *Fundamental dan Aplikasi Membran Hollow Fiber Untuk Pengolahan Air*. ULM Press.

- Elma, M. (2016). *Proses Pemisahan Menggunakan Teknologi Membran*. ULM Press.
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2–10.
- Firdiyansyah, M. R., et al. (2024). Kajian literatur: Aplikasi teknik ekstraksi modern untuk mengekstraksi senyawa fenolik dari bahan alam. *Jurnal Farmasi*, 13(2), 22–34. <https://ojs.stikesnas.ac.id/index.php/jf/article/view/289>
- Geankoplis, C. J. (2003). *Transport Processes and Separation Process Principles* (4th ed.). Prentice Hall.
- Geankoplis, C. J. (2003). *Transport Processes and Separation Process Principles*.
- Gennaro, A.R. (2000). *Remington: The Science and Practice of Pharmacy*.
- Ghosh, A. (2008). *Textbook of Textile Finishing*. New Age International.
- Guffey, M. E., & Loewy, D. (2018). *Business communication: Process and product* (9th ed.). Cengage Learning.
- Harris, D. C. (2016). *Quantitative Chemical Analysis*.
- Hartel, R. W. (2001). *Crystallization in Foods*. Aspen Publishers.
- Ho, W., & Sirkar, K. K. (1992). *Membrane Handbook*. Van Nostrand Reinhold Publisher: New York.
- Housecroft, C. E., & Sharpe, A. G. (2018). *Inorganic Chemistry* (5th ed.). Pearson.

- Huang, L., Wang, Q., & Zhao, J. (2020). Optimization of bioactive compound extraction using advanced separation technologies. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 84, 45–53.
- Huang, X., Li, Y., & Zhang, Y. (2021). Design optimization of heat exchangers in chemical processing: Reducing energy consumption through better heat transfer. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 13(3), 031007.
- Jones, A. G. (2002). *Crystallization Process Systems*. Butterworth-Heinemann.
- Kementerian Kesehatan RI. (2022). *Modul Teknologi Ekstraksi dan Isolasi Bahan Alam*.
- Kementerian Perindustrian RI. (2021). *Teknologi Pemisahan Membran dalam Industri Nasional*.
- Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan. (2021). *Modul Kimia Kelas XII*.
- Klaassen, R., Feron, P. H. M., & Jansen, A. E. (2005). Membrane contactors in industrial applications. *Trans Icheme, Part A, Chemical Engineering Research and Design*, 83(A3), 234–236.
- Kristina, C. F. M., et al. (2022). Pengaruh waktu ekstraksi dengan menggunakan teknik ultrasonic assisted extraction (UAE) terhadap aktivitas antioksidan ekstrak daun duwet (*Syzygium cumini*). *Jurnal Ilmu dan Teknologi Pangan*, 11(1), 13–21.

- Kumar, S., Singh, R., & Verma, A. (2020). Advances in mass transfer technologies for separation processes: A review. *Separation and Purification Technology*, 250, 117212.
- Kumar, N., & Singh, D. (2021). Separation efficiency metrics in modern phytochemical processing. *Journal of Natural Product Applications*, 27(2), 198–210.
- Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*, 40(9), 1361–1403.
- Laidler, K. J., Meiser, J. H., & Sanctuary, B. C. (2003). *Physical Chemistry* (4th ed.). Houghton Mifflin.
- Levine, I. N. (2009). *Physical Chemistry* (6th ed.). McGraw-Hill.
- Li, W., Zhang, L., & Han, Y. (2022). Maximizing recovery yield in herbal extraction: Challenges and solutions. *Journal of Plant Extraction Technology*, 19(3), 245–257.
- Liu, X., Zhang, Y., & Han, J. (2022). Combined use of UV-Vis and HPLC for evaluating purity and content in plant extracts. *Asian Journal of Analytical Chemistry*, 29(2), 143–151.
- McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (2005). *Unit Operations of Chemical Engineering* (7th ed.). McGraw-Hill.
- McQuarrie, D. A., & Simon, J. D. (1997). *Physical Chemistry: A Molecular Approach*. University Science Books.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2020). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics* (9th ed.). Wiley.

- Mullin, J. W. (2001). *Crystallization* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Myerson, A. S. (2002). *Handbook of Industrial Crystallization*. Butterworth-Heinemann.
- Nakamura, R., Ito, S., & Tanaka, H. (2021). Process optimization for phytochemical purification: Balancing quality and cost. *International Journal of Green Processing*, 47(3), 102–111.
- Perry, R. H., & Green, D. W. (Eds.). (2008). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (8th ed.). McGraw-Hill.
- Petrucci, R. H. (2020). *General Chemistry Principles and Modern Applications*.
- Redjeki, S. (2011). *Proses Desalinasi dengan Membran*. E-book PDF. Direktorat Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (DP2M). Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi. Departemen Pendidikan Nasional.
- Rodríguez-Hornedo, N., & Murphy, D. (2004). Significance of controlling crystallization in pharmaceutical manufacturing. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 93(3), 495–508.
- Santos, J. L., & Wibowo, C. (2020). Energy and economic evaluation of reactive distillation in ester production: A comparative analysis. *Journal of Industrial Chemistry and Processing*, 38(3), 225–238.
- Seader, J. D., Henley, E. J., & Roper, D. K. (2011). *Separation Process Principles* (3rd ed.). Wiley.
- Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2014). *Fundamentals of Analytical Chemistry*.

- Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2014). *Principles of Instrumental Analysis*.
- Smith, J. M., Van Ness, H. C., & Abbott, M. M. (2021). *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics* (9th ed.). McGraw-Hill Education.
- Strathman, H. (2004). *Ion-Exchange Membrane Separation Process*. Elsevier: Amsterdam.
- Strathman, H., C.A. Smoolders, M.H.V. Mulder, R. M. Meertens, M. A. M. Beerlage. (1985). *Preparation of Polyimides Ultrafiltration Membranes Part I. Ternary System*. Wiley Uch. New York.
- Tan, Y. H., Lee, C. W., & Ong, L. S. (2020). Energy and solvent optimization in botanical separation processes: Recent advances. *Chemical Processing Today*, 15(4), 320–333.
- Tavare, N. S. (1995). *Industrial Crystallization: Process Simulation, Analysis, and Design*. Springer.
- Treybal, R. E. (1980). *Mass-Transfer Operations*.
- Tulandi, S. M., Tanzil, L., & Ulfa, D. M. (2021). Analysis of bioactive compounds from methanol extract of *Diadema setosum* sea urchin gonads using gas chromatography–mass spectrometry. *Research Journal of Pharmacy and Technology*, 14(3), 1629–1634.
- Yamamoto, K., & Sato, T. (2022). Advances in real-time monitoring of pharmaceutical separation processes. *Chemical Engineering Research and Design*, 180, 202–209.

- Zahar, N. A., et al. (2021). Studi literatur implementasi teknik microwave assisted extraction (MAE) untuk ekstraksi fenol dengan pelarut etanol. *Jurnal Fluida*, 14(2), 80–87.
- Zumdahl, S. S., & Zumdahl, S. A. (2014). *Chemistry* (9th ed.). Cengage Learning.

Teknologi pemisahan adalah fondasi dari berbagai proses produksi dalam industri kimia dan manufaktur. Buku referensi berjudul **Teknologi Pemisahan dalam Industri Kimia** ditujukan untuk masyarakat umum, dengan strategi yang sederhana dan informatif. Setiap bab mengupas satu jenis teknologi pemisahan—mulai dari destilasi dan ekstraksi, hingga teknologi membran dan kristalisasi—serta bagaimana teknik-teknik tersebut digunakan untuk memisahkan, memurnikan, dan mengolah zat dalam skala industri.

Buku ini juga membahas prinsip-prinsip dasar seperti termodinamika dan perpindahan massa yang menjadi penggerak utama proses pemisahan. Disusun agar mudah dipahami, buku ini sangat cocok bagi masyarakat umum yang ingin memahami teknologi industri dari sudut pandang praktis.