



FUNDAMENTAL DAN APLIKASI MEMBRAN HOLLOW FIBER UNTUK PENGOLAHAN AIR

Muthia Elma
Mahmud
Riani Ayu Lestari
Awali Sir Kautsar Harivram
Aulia Rahma

20
23

FUNDAMENTAL DAN APLIKASI MEMBRAN HOLLOW FIBER UNTUK PENGOLAHAN AIR

Tim Penulis:

Muthia Elma

Mahmud

Riani Ayu Lestari

Awali Sir Kautsar Harivram

Aulia Rahma



FUNDAMENTAL DAN APLIKASI MEMBRAN HOLLOW FIBER UNTUK PENGOLAHAN AIR

Tim Penulis :

Muthia Elma, Mahmud, Riani Ayu Lestari, Awali Sir Kautsar,
Harivram, Aulia Rahma

Kontributor :

Gusti Ratu Sri Dewi, Rahmad Apridho Patria, Ermila Ramadani
Aisyah, Sultan Putra Ansyfa, Ibnu Adea Muhammad, Giovani,
Nur Yassa Yuzaeva, Sekar Yuniar Banowati, Rahmat Subkhan,
Santi Widiawardani, Suci Nisa Zakia, Yunida Nisa Sholeha, Noor
Aida Febriani, Fidela Shabrina

Desain Sampul :

Gusti Ratu Sri Dewi

Editor :

Rhafiq Abdul Ghani, Fitri Ria Mustalifah, Zahratunnisa

PENERBIT:

Diterbitkan oleh: Lambung Mangkurat University Press, 2023

d/a Pusat Pengelolaan Jurnal dan Penerbitan ULM

Lantai 2 Gedung Perpustakaan Pusat ULM

Jl. Hasan Basri, Kayutangi, Banjarmasin 70123

Telp/Fax. 0511 - 3305195

ANGGOTA APPTI (004.035.1.03.2018)

Hak cipta dilindungi oleh Undang Undang

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin
tertulis dari Penerbit, kecuali

untuk kutipan singkat demi penelitian ilmiah dan resensi

I - V + 265 hal, 15,5 × 23 cm

Cetakan Pertama. ... 2023

ISBN : ...

PRAKATA

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga buku yang berjudul “**Fundamental dan Aplikasi Membran *Hollow fiber* untuk Pengolahan Air**” ini dapat diselesaikan dengan baik. Shalawat serta salam semoga selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW yang telah membimbing dan mengajarkan ilmu pengetahuan kepada umatnya.

Secara spesifik buku ini membahas tentang fundamental membran *hollow fiber*, teknik pembuatannya, modifikasi dan karakterisasi dari membran *hollow fiber*. Selain itu, pada buku ini disampaikan contoh-contoh aplikasi membran *hollow fiber* yang saat ini digunakan secara luas di bidang industri. Diharapkan buku ini dapat bermanfaat dan dijadikan referensi bagi mahasiswa, peneliti di industri, lembaga riset dan di perguruan tinggi khususnya di Indonesia.

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Aida, Ermila, Fidela, Fathya, Giovani, Hastati, Iben, Odoy, Ratu, Rahma, Sekar, Rifani, Rahmat, Syahid, Santi, Sultan, Yassa, Yunida, Zakia, Ziqri atas kontribusinya dalam penyusunan buku ini.

Penulis menyadari dalam penulisan dan penyusunan buku ini, masih terdapat kekurangan. Adapun kritik dan saran yang membangun, untuk penyempurnaan buku ini sangat dibutuhkan dari para pembaca sekalian.

Banjarbaru, Juli 2023

Penulis

Muthia Elma

KATA PENGANTAR

EDITOR

Buku dengan judul: "Fundamental dan Aplikasi Membran Hollow Fiber untuk Pengolahan Air" ini ditulis dan disusun dengan baik oleh tim penulis dengan tujuan untuk menambah khasanah ilmu pengetahuan khususnya dibidang membran *hollow fiber*. Dalam konteks bidang teknologi membran, buku ini akan semakin menambah kemutakhiran ilmu pengetahuan pembacanya. Seiring dengan perkembangan dunia global, maka kemajuan teknologi juga semakin pesat. Oleh karena itu, pengetahuan akan informasi teknologi sangat diperlukan untuk dapat beradaptasi dengan kemajuan dunia yang selalu bergerak dinamis.

Air tidak diragukan lagi merupakan salah satu sumber daya paling berharga, dan pengelolaannya yang berkelanjutan merupakan tantangan kritis yang harus dihadapi oleh masyarakat di seluruh dunia. Membran *hollow fiber* telah muncul sebagai solusi pengolahan air yang menawarkan berbagai keuntungan, termasuk *surface area* yang tinggi, perpindahan massa yang efisien, dan selektivitas yang luar biasa. Sifat luar biasa ini telah

memposisikan membran *hollow fiber* sebagai teknologi mumpuni dalam mengatasi tantangan pengolahan air yang kompleks, seperti desalinasi, pengolahan air limbah, dan penghilangan polutan dan kontaminan.

Pengetahuan mengenai fundamental membran *hollow fiber* telah banyak terpublikasikan pada buku lain, akan tetapi pada buku ini tim penulis berhasil menyajikan informasi yang lebih spesifik terutama aplikasinya untuk pengolahan air rawa dan gambut. Mahasiswa, akademisi, peneliti, pemerintah, maupun praktisi akan dibuat mudah memahami tentang pengetahuan dasar membran *hollow fiber* beserta aplikasinya untuk pengolahan air. Data-data yang disajikan pada buku ini disusun dan disitasi oleh tim penulis dari berbagai sumber referensi yang berkualitas. Selain itu buku ini telah melalui proses editing sesuai yang dipersyaratkan UU No 3 Tahun 2017.

Editor,

Rhafiq Abdul Ghani

Fitri Ria Mustalifah

Zaharatunnisa

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	iv
KATA PENGANTAR EDITOR.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Teknologi Membran	1
1.2 Konfigurasi Membran (<i>Flat Sheet, Spiral Wound, Tubular, Hollow Fiber</i>).....	3
1.2.1 <i>Flat Sheet</i>	4
1.2.2 <i>Spiral Wound</i>	10
1.2.3 <i>Hollow fiber</i>	11
1.2.4 Membran Tubular.....	13
BAB II MEMBRAN <i>HOLLOW FIBER</i>	15
2.1 Pengertian	15
2.2 Modul Membran <i>Hollow fiber</i>	20
2.3 Klasifikasi dan Aplikasi Membran <i>Hollow fiber</i> .	22
BAB III JENIS MEMBRAN <i>HOLLOW FIBER</i>	33
3.1 <i>One-Layer</i>	33

3.2	Multi-Layer	45
3.3	<i>Multi hollow fiber</i>	53
3.4	<i>Branched Hollow fiber</i>	59
BAB IV MATERIAL MEMBRAN <i>HOLLOW FIBER</i>		72
4.1	Membran Polimer	73
4.2	Membran Inorganik.....	86
BAB V TEKNIK FABRIKASI MEMBRAN <i>HOLLOW FIBER</i>		102
5.1	<i>Solution-Base Teknik</i>	102
	5.1.1 <i>Wet Spinning</i>	118
	5.1.2 <i>Dry Spinning</i>	122
	5.1.3 <i>Dry-jet wet Spinning</i>	141
5.2	<i>Melt Spinning</i>	164
5.3	<i>Electrospinning</i>	170
5.4	<i>Microfluidic Spinning</i>	186
5.5	Teknik Lain	195
BAB VI APLIKASI MEMBRAN <i>HOLLOW FIBER</i>		197
6.1	Pengolahan Air.....	197
6.2	Pengolahan Air Limbah	202
6.3	Industri	212
BAB VII PENUTUP.....		227
HALAMAN INDEX		230
TENTANG PENULIS		233

DAFTAR PUSTAKA.....	235
GLOSARIUM.....	259

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Skema pemisahan dengan teknologi membran.....	3
Gambar 1.2 Bentuk modul <i>flat sheet</i>	4
Gambar 1.3 (a) Model modul membran <i>flat and frame</i> (b) Pengoperasian modul membran <i>flat and frame</i> (Abid et al., 2023).....	6
Gambar 1.4 (a) Proses DCMD, (b) proses SGMD, (c) proses AGMD, (d) proses VMD (Abid et al., 2023)	6
Gambar 1.5 Ilustrasi Skematis Modul <i>Spiral Wound</i> dengan Sepasang Saluran Aliran Utama (Abid et al., 2023).....	10
Gambar 1.6 Bentuk Modul <i>Hollow Fiber</i> (Raji et al., 2020).....	12
Gambar 1.7 Bentuk Modul Tubular (Raji et al., 2020).....	14
Gambar 2.1 Membran <i>Hollow Fiber</i> (Dortmundt et al., 2019).....	17
Gambar 2.2 Elemen Membran <i>Hollow fiber</i> (Dortmundt & Doshi, 2019).....	18

Gambar 2.3 Modul Membran <i>Hollow Fiber</i> Dengan <i>Feed</i> dan <i>Sheel Side</i> (Dortmundt & Doshi, 2019).....	18
Gambar 2.4 Bentuk dari <i>Hollow fiber</i> (Dortmundt & Doshi,2019).....	18
Gambar 2.5 Desain Rakitan <i>Hollow fiber</i> Du Pont	21
Gambar 2.6 Struktur Modul Membran <i>Hollow fiber</i>	28
Gambar 3.1 Mikrograf SEM membran <i>hollow fiber</i> yang dicetak dari 11% berat PVDF pada TEP (d-f); TEP dan aseton 17,8% berat (g-i); TEP dan DBP 17,8% berat (j-l) ; TEP dan toluene 17,8% berat (m-o) (Yao et al., 2019).....	39
Gambar 3.2 Morfologi SEM penampang (bawah) dan permukaan luar (atas), menggunakan berbagai komposisi IPA/ air dalam bak koagulasi eksternal: (A) 100/0; (B) 80/20; (C) 60/40; (D) 40/60; (E) 20/80 (berat%) (Ahmad et al., 2018)	42
Gambar 3.3 Membran <i>hollow fiber dual layer</i> (kiri) dan <i>triple layer</i> (kanan).....	47
Gambar 3.4 <i>Spinneret</i> dari berbagai sisi; (a) tampak samping;.....	50

Gambar 3. 5 a) 3-bore, (b) 4-bore (c) 7-bore DMSO dan (d) 7-bore-NMP LSCF	58
Gambar 3. 6 Branched <i>hollow fiber</i> (Qiu et al., 2010)	60
Gambar 3. 7 Efek fungsionalisasi <i>hollow fiber</i> : (a) pemutusan ikatan amida C–N pada tulang punggung PAI, (b) Spektrum FTIR mendukung pemutusan ikatan, dan perubahan hidrofilitas <i>hollow fiber</i> sebelum (c) dan setelah (d) fungsionalisasi	62
Gambar 3. 8 Matriks evaluasi struktur kisi untuk menentukan parameter pemrosesan untuk proses 2PP: a) Skema tata letak dengan nilai kecepatan tulis (sumbu horizontal) dan daya laser (sumbu vertikal); gambar SEM untuk b) kecepatan tulis 0,1 – 1,0 mm/dtk dan daya laser 28 – 114 mW; c) kecepatan tulis 0,8 – 1,7 mm/dtk dan daya laser 81 – 122 mW; d) Kecepatan tulis 5,0 – 11,0 mm/dtk dan daya laser 129 – 145 mW (Bieda et al., 2015).....	66
Gambar 3. 9 Struktur kisi di OrmoCompa) v = 0,8 mm/s, Pavg = 86 mW; b) v = 1 mm/s, Pavg	

= 86 mW; c) $v = 0,5$ mm/s, $P_{avg} = 105$ mW; d) $v = 0,7$ mm/s, $P_{avg} = 37$ mW. (Bieda et al., 2015)	67
Gambar 3. 10 <i>Hollow fiber</i> bercabang yang dibuat melalui 2PP OrmoCompa) Pematangan <i>hollow fiber</i> bercabang yang dibuat melalui 2PP OrmoComp; b) penutupan ujung serat; c) pori dengan diameter 28,5 μ m; d) serat berlubang lengkap: daya laser rata-rata = 105 mW, kecepatan tulis = 5,0 mm/s, panjang = 3,5 mm, diameter luar = 150 μ m, diameter dalam = 90 μ m (Bieda et al., 2015)	67
Gambar 3. 11 Ilustrasi pencangkakan polimer hipercabang pada membran PRO. 194 Proses Gradien Salinitas Berbasis Membran untuk Pengolahan Air dan Pembangkit Listrik PDA, Polidopamin. Hak Cipta (2014) American Chemical Society	69
Gambar 4. 1 Membran dari bahan Poliakrilonitril (Chung & Feng, 2021)	75
Gambar 4. 2 Permukaan Membran dari bahan Polisulfon (Pandele et al., 2020).....	78

Gambar 4.3 Membran dari bahan Selulosa Asetat (Kumar et al., 2019)	80
Gambar 4.4 Membran Poliamida (Sari et al., 2019).....	83
Gambar 4.5 Membran poliamida (Chung & Feng, 2021).....	85
Gambar 4.6 Gambar SEM dari (a) berpori, (b) padat, (c) asimetris, dan (d) membran anorganik simetris (Kayvani Fard et al., 2018).....	87
Gambar 4.7 Aplikasi Membran Keramik Berdasarkan Ukuran Pori.....	88
Gambar 4.8 Contoh Satuan Sel Perovskit (CaTiO_3) (Fatihah, 2017).....	89
Gambar 4.9 Struktur Primer & Sekunder macam Zeolit (Sholeha, 2017).....	92
Gambar 4.10 Proses Terbentuknya <i>Metal-Organic Framework</i> secara Umum (Mahreni et al., 2020).....	94
Gambar 5.1 Skematis dari proses wet spinning (Shirvan et al., 2022)	120
Gambar 5.2 <i>Dry Spinning</i> (Lau et al., 2022)	124

Gambar 5.3 <i>Dry spinning</i> Dibantu Medan Listrik yang Lemah (Tan et al., 2019).....	126
Gambar 5.4 Ilustrasi Pengendapan Serat Lurus dan Sejajar pada <i>rotating collector as the solution jet</i> (Tan et al., 2019).....	127
Gambar 5.5 Konseptual dari pemintalan kering untuk regenerasi serat sutra (Satoh et al., 2022). ...	129
Gambar 5.6 Sketsa alat pemintalan kering dan orientasi dasar luar (Wieland et al., 2020)...	130
Gambar 5.7 Mikrograf SEM dari (a) PU6, (b) PU7, (c) PU8 dan (d) PU9 (Wieland et al., 2020).....	131
Gambar 5.8 Variasi Diameter Fiber dengan Tegangan yang Diberikan (Wieland et al., 2020)	132
Gambar 5.9 Diagram Skema Proses Pemintalan Kering (Feng et al., 2021).....	138
Gambar 5.10 Hasil Karakterisasi SEM Serat GO-TPU yang Dibuat dengan Berbagai Proses Pemintalan Dengan Perbandingan Massa 10 : 100, (AC) Pemintalan Kering, (DF) Pemintalan Basah. (A) dan (D) Morfologi Profil, (B) dan (E) Morfologi Penampang,	

(C) dan (F) Pembesaran P (Feng et al., 2021).....	140
Gambar 5. 11 Proses <i>dry spinning</i> pada <i>fiber Cellulosa Asetate (CA)</i> (L. Zhang et al., 2019)	141
Gambar 5. 12 Sistem umum (A) <i>wet spinning</i> , dan (B) <i>dry-jet wet spinning</i>	143
Gambar 5. 13 <i>Dry jet wet spinning</i>	144
Gambar 5. 14 Tahapan Pembentukan Fiber (Seyedin et al., 2015).....	158
Gambar 5. 15 Perubahan parameter fiber pada proses <i>spinning</i>	160
Gambar 5. 16 Keseimbangan gaya dalam spinning filamen	161
Gambar 5. 17 Skema Proses Melt Spinning pada Membran (Zhong et al., 2021).....	167
Gambar 5. 18 Skema proses elektrospinning (a) <i>Electrospinning</i> menggunakan kolektor drum berputar (Yuan et al., 2017). (b) <i>Electrospinning</i> menggunakan pengumpul kolektor <i>ground</i> (Aman Mohammadi et al., 2020)	181

Gambar 5.19	Penyiapan Eksperimental untuk Menghasilkan <i>Hollow fiber</i> menggunakan <i>Microfluidic Spinning</i> (Vohra et al., 2023a) ..	201
Gambar 5.20	Tinjauan tentang berbagai metode microfluidic spinning yang digunakan untuk membuat serat, bersama dengan aplikasi rekayasa jaringan serat (Jun et al., 2014)	181
Gambar 5.21	Skematik ilustrasi (kanan) dan gambar waktu nyata (kiri) dari proses microfluidic spinning untuk serat mikro yang diikat spindel dengan saluran Janus (Afshin et al.) dan saluran helical (d). skala tekanan: 500 μm (R. Xie et al., 2018) ..	206
Gambar 5.22	Teknologi <i>Microfluidic Spinning</i> (MKR et al., 2021)	207

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Beberapa Fitur Membran yang Digerakkan oleh Tekanan	22
Tabel 2. 2	Beberapa Aplikasi Proses Membran yang Didorong Tekanan dalam Pengolahan Air Limbah.....	25
Tabel 2. 3	Klasifikasi Membran Berpori (Rackley, 2017).....	28
Tabel 2. 4	Rasio Luas Terhadap Volume untuk Berbagai Konfigurasi (Rackley, 2017)	28
Tabel 2. 5	Karakteristik Konsep Modul yang Berbeda (Fane et al., 2011).....	29
Tabel 2. 6	Sifat Khas Membran yang Digerakkan Oleh Tekanan (Fane et al., 2011).....	30
Tabel 2. 7	Korelasi Fitur Membran dengan Rentang Pemisahan (Abdel-Fatah, 2018)	31
Tabel 3. 1	Perbandingan kekuatan mekanik dan kristalinitas membran <i>hollow fiber</i> pada berbagai larutan <i>dope</i>	44

Tabel 3.2	Komposisi suspensi keramik dan parameter pemintalan.....	56
Tabel 4.1	Parameter <i>spinning</i> membran <i>Hollow fiber</i> Poliakrilonitril (Tsai et al., 2018).....	75
Tabel 4.2	Parameter <i>spinning</i> membran <i>Hollow fiber</i> Polisulfon (Plisko et al., 2021)	78
Tabel 4.3	Parameter <i>spinning</i> membran <i>Hollow fiber</i> Selulosa Asetat (Mubashir et al., 2019)	80
Tabel 4.4	Parameter <i>spinning</i> membran <i>Hollow fiber</i> Poliamida (Jeon et al., 2018)	83
Tabel 4.5	Parameter <i>spinning</i> membran <i>Hollow fiber</i> PVDF (Galiano et al., 2018).....	85
Tabel 5.1	Perbandingan Hasil menurut Efek Parameter.....	105
Tabel 5.2	Parameter yang mempengaruhi proses <i>spinning</i> HF	106
Tabel 5.3	Macam-macam pelarut digunakan sebagai koagulaneksternal.....	111
Tabel 5.4	Jenis Pelarut <i>Bore Fluid</i>	112
Tabel 5.5	Kondisi <i>spinning jet-wet dry</i> untuk preparasi fiber (I. M. Kim et al., 2013).....	145

Tabel 5.6	Parameter struktural dan sifat mekanik <i>Dry Jet Spin</i> dan fiber komersial (Viscord 1840 CS3) (Vocht et al., 2021)	158
Tabel 5.7	Perbedaan Proses <i>Dry-Jet Wet Spinning</i> dan <i>Wet Spinning</i>	162
Tabel 5.8	Pengaruh Parameter Lingkungan Terhadap Proses <i>Electrospinning</i> (Long et al., 2019).....	175
Tabel 6.1	Kualitas air sumur sebelum dan sesudah filtrasi dengan membran.....	201
Tabel 6.2	Baku mutu air limbah bagi usaha dan/atau kegiatan (Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia, 2014)	208
Tabel 6.3	Karakteristik air limbah sasirangan	210

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Teknologi Membran

Selama ini penggunaan teknologi membran telah diaplikasikan secara luas. Sebagian besar digunakan pada pengolahan air minum, pengolahan air limbah industri serta pemulihan sumber daya berharga yang terkandung dalam air limbah dan fraksinasi campuran makromolekul dalam industri makanan dan obat-obatan. Selain itu, proses membran juga merambah pada industri pemisahan gas dan sistem konversi energi organ buatan seperti dialisis ginjal.

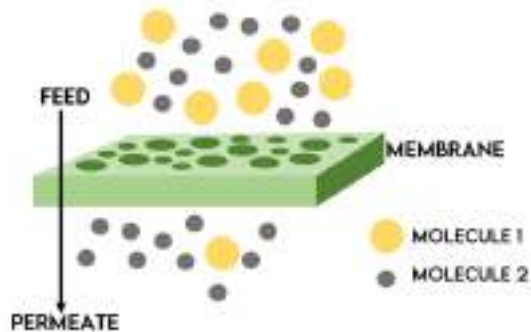
Pada dasarnya membran adalah suatu lapisan tipis antara dua fasa fluida yaitu fasa umpan (*feed*) dan fasa permeat yang bersifat sebagai penghalang (*barrier*) terhadap suatu spesimen tertentu. Lapisan ini dapat memisahkan zat berdasarkan perbedaan ukuran serta membatasi transport dari berbagai spesimen berdasarkan sifat fisik dan kimianya. Membran bersifat semipermeabel karena dapat menahan spesimen yang berukuran lebih kecil. Sifat selektif membran inilah yang biasanya digunakan dalam proses pemisahan dengan memanfaatkan tekanan atau energi potensial.

Teknologi membran mempunyai beberapa keunggulan yaitu proses pemisahannya dapat dilakukan

pada suhu ruang dan kontinu, sifatnya yang dapat divariasikan sesuai kebutuhan, penggunaan kembali membran dan ramah lingkungan karena tidak menimbulkan dampak buruk bagi lingkungan (Chung et al., 2021). Membran juga dapat berfungsi sebagai filter yang sangat spesifik dengan molekul-molekul tertentu saja yang dapat diolah membran sedangkan sisanya akan tertahan di permukaan membran.

Penerapan teknologi membran masih sangat luas untuk dikembangkan. Setiap proses pemisahan membran dikarakterisasi menggunakan kinerja membran dalam menyisihkan partikel tertentu. Membran memiliki kemampuan untuk memindahkan suatu komponen lebih baik daripada bahan lain karena perbedaan karakter fisik dan sifat kimiawinya diantara membran dan komponen permeatnya.

Proses pemisahan dengan membran mempunyai kemampuan memindahkan salah satu komponen berdasarkan sifat fisik dan kimia dari membran serta komponen yang dipisahkan. Perpindahan yang terjadi karena adanya gaya dorong (*driving force*) dalam umpan yang berupa beda tekanan (ΔP), beda konsentrasi (ΔC), beda potensial listrik (ΔE) dan beda temperatur (ΔT) serta selektifitas membran yang dinyatakan dengan rejeksi. Pada gambar 1.1 memperlihatkan skema proses pemisahan dengan membran (Mulder et al., 1996).



Gambar 1. 1 Skema pemisahan dengan teknologi membran

Membran secara umum dapat diklasifikasikan pada beberapa kelompok. Berdasarkan materialnya, membran diklasifikasikan pada membran polimer, membran anorganik dan membran biologi. klasifikasi lainnya mikrofiltrasi, ultrafiltrasi, nanofiltrasi dan *reverse osmosis*. Selain itu beberapa karakteristik fisik membran juga dijadikan dasar klasifikasi membran seperti konfigurasi, jumlah lapisan dan lain-lain.

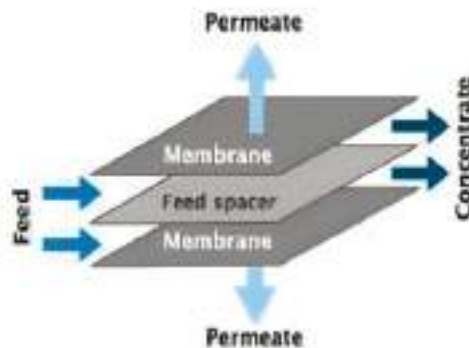
1.2 Konfigurasi Membran (*Flat Sheet, Spiral Wound, Tubular, Hollow Fiber*)

Membran diproduksi dalam berbagai bentuk, seperti *plate and frame, hollow fiber, spiral wound* dan tubular (Elma et al., 2020). Setiap tipe modul memiliki konfigurasi yang berbeda yang berdasarkan pada *packing densitas*, kemudahan dalam perawatan, biaya modul, volume *hold up* dan kualitas

pretreatment. Konfigurasi membran juga dapat digunakan untuk menentukan menentukan cara membran dikemas di dalam modul dan pemilihan metode pembersihan suatu membran.

1.2.1 *Flat Sheet*

Selama 50 tahun terakhir, konfigurasi ini secara konsisten menjadi konfigurasi modul membran yang paling banyak dieksplorasi dalam distilasi membran. Modul bentuk *plate* ini merupakan rancangan pertama dari terciptanya modul yang lain. Biasanya, modul *flat sheet* dibangun menggunakan lembaran atau *flat sheet* (Gambar 1.2) (Abid et al., 2023).

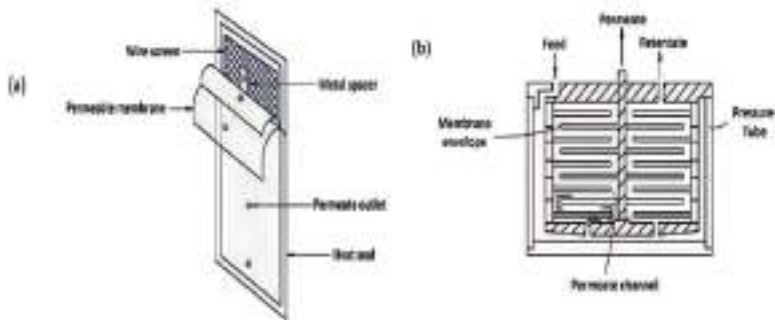


Gambar 1. 2 Bentuk modul flat sheet

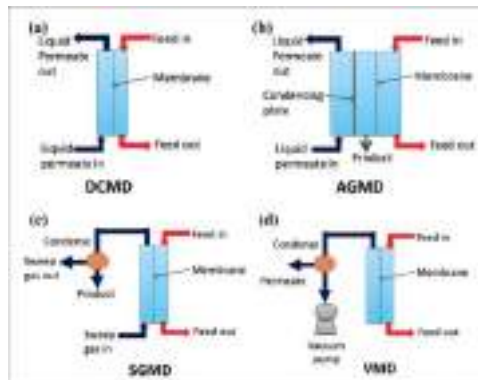
Bentuk yang *plate* memungkinkan *fouling* yang terjadi kecil dan tidak terlalu cepat. Pencucian dan penggantian modul jika rusak dari modul ini cukup mudah karena cukup mengganti modul yang bermasalah tersebut dengan modul

membran baru. Sehingga energi yang digunakan dalam penggunaan modul ini tidak terlalu besar. Modul *plate* dapat digunakan untuk elektrodialisis, sistem pervaporasi dan sebagian kecil *reverse osmosis* dan ultrafiltrasi.

Konfigurasi membran *flat sheet* banyak digunakan dalam *membrane distillation* (MD). Terdapat empat konfigurasi dalam MD yaitu *Direct Contact Membrane Distillation* (DCMD), *Air Gap Membrane Distillation* (AGMD), *Vacuum Membran Distillation* (VMD), dan *Sweeping Gas Membrane Distillation* (SGMD) (Abid et al., 2023). Proses dari ke-empat konfigurasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 1.4. Modul-modul ini mempertahankan *spacer* diantara pasangan *flat sheet*. Karena kesederhanaannya, mereka biasanya digunakan di *laboreatorium*. Modul ini terkait dengan desalinasi dan penjernihan air (Abid et al., 2023). Untuk pengolahan air dan desalinasi, (Gambar 1.3) modul pelat dan rangka sesuai dengan MD (Aliyu, 2021).



Gambar 1. 3 (a) Model modul membran *flat and frame*
 (b) Pengoperasian modul membran *flat and frame* (Abid et al., 2023)



Gambar 1. 4 (a) Proses DCMD, (b) proses SGMD, (c) proses AGMD, (d) proses VMD (Abid et al., 2023)

a) *Direct Contact Membrane Distillation (DCMD)*
 Pada DCMD, permukaan sisi membran panas bersentuhan langsung dengan larutan panas

(umpan). Kemudian, sisi umpan dihubungkan ke sisi permeat, uap air diangkut dan dikondensasi. Karena perbedaan tekanan uap, gradien uap menggerakkan uap air melintasi membran (Gambar 1.4). Keuntungan dari konfigurasi membrane ini yaitu DCMD yang digunakan untuk desalinasi air laut dan penghilangan arsenik dari larutan berair memiliki fluks permeat yang tinggi tetapi memiliki kelemahan kehilangan panas konduktif (Parani et al., 2021).

b) *Air Gap Membrane Distillation (AGMD)*

Pada AGMD, Sisi panas permukaan membran bersentuhan langsung dengan larutan umpan dalam konfigurasi ini (Gambar 1.4). Ketebalan membran dan Panjang celah udara ditambahkan untuk menentukan panjang keseluruhan difusi uap. Antara permukaan membran panas dan sisi kondensasi, udara stagnan dimasukkan (Gambar 1.4). Keuntungan dari konfigurasi membran ini AGMD adalah proses yang sederhana dan memiliki kehilangan panas yang rendah tetapi fluksnya lebih kecil dari DCMD dan VMD (Parani & Oluwafemi, 2021).

c) *Sweeping Gas Membrane Distillation (SGMD)*

Pada SGMD, gas non-reaktif digunakan untuk menyapu uap keluar dari kompartemen permeat

membran dan masuk ke kompartemen kondensasi (Gambar 1.4). Penghalang gas yang dapat dipindahkan juga membantu perpindahan massa dan mengurangi kehilangan panas. Dasar-dasar proses, fitur membran, bahan yang digunakan untuk membran, modul membran, variabel proses, peningkatan fluks, metode pengangkutan, dan proses polarisasi semuanya telah diuraikan oleh Onsekizoglu. Keuntungan dari konfigurasi membrane ini adalah SGMD memiliki kehilangan panas rendah dan resiko polarisasi suhu rendah tetapi memiliki kelemahan risiko maksimum polarisasi air (Parani & Oluwafemi, 2021).

d) *Vacuum Membran Distillation (VMD)*

Pada VMD, vakum diproduksi dalam konfigurasi VMD. Mengemudi uap air di luar penghalang menyebabkannya mengembun (Gambar 1.4). Hilangnya panas sangat berkurang dalam pengaturan ini. Dalam perangkat bertenaga surya, VMD juga telah digunakan untuk memulihkan air dari larutan yang terkontaminasi (Abid et al., 2023). VMD digunakan pada skala komersial karena *flux* tinggi tetapi merupakan proses yang kompleks dan menimbulkan risiko pembasahan pori yang tinggi (Parani & Oluwafemi, 2021).

Modul ini sering digunakan dalam industri riset untuk desalinasi air asin, menggunakan teknologi MD, karena manfaatnya. Khususnya, modul-modul ini mudah dibuat, dihubungkan, digunakan, diuji, dan dibersihkan. Penghapusan atau penggantian membran yang rusak juga mudah dan transparan. Modul ini banyak digunakan di seluruh laboratorium untuk menguji bagaimana faktor operasional dan sifat membran mempengaruhi fluks permeat atau efisiensi energi distilasi membran (Thanh et al., 2019). Selain itu, Dari semua jenis modul membran yang digunakan dalam kondisi kerja yang identik, teknologi MD yang menggunakan membran *flat sheet* memberikan aliran maksimum. Modul *flat sheet* memiliki beberapa kelebihan yaitu:

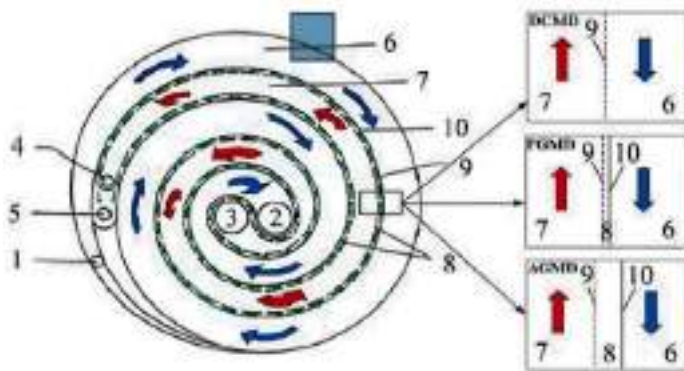
- a. Mudah diproduksi, dirakit, digunakan, diuji, dan dibersihkan.
- b. Dari pengaturan ini, membran yang rusak mudah dilepas atau diganti.
- c. Aliran maksimum diperoleh dengan menggunakan membran *flat sheet* dalam prosedur MD.
- d. Untuk meningkatkan area membran, banyak membran *flat sheet* dapat diletakkan dalam bingkai membran yang sama.
- e. Kompatibilitas dengan keempat setup MD

- f. Di bawah kondisi operasi yang sama, proses MD menggunakan membran ini menghasilkan aliran maksimum di antara jenis modul membran lainnya.

Selain kelebihan yang ditawarkan, modul ini juga memiliki kekurangan tertentu yaitu:

- Kepadatan pengepakan sangat rendah (luas membran efektif per satuan volume adalah antara 100 dan 400 m²/m³).
- Kekuatan mekanik rendah.
- Lapisan pendukung membran, yang dibutuhkan dan memiliki dampak signifikan pada proses distilasi membran.

1.2.2 *Spiral Wound*



Gambar 1.5 Ilustrasi Skematis Modul *Spiral Wound* dengan Sepasang Saluran Aliran Utama (Abid et al., 2023)

Membran *spiral* dibuat dari penutup yang digulung dan diputar di sekitar tabung pengumpul perforasi berlubang, *spacer* jala, pembawa permeal, dan sebuah lapisan pendukung membran. *Flat sheet* dan *spacer* dirancang untuk dikemas dan digulung di sekitar area pengumpulan yang ditusuk dengan bantuan modul (Gambar 1.5). Membran dilalui secara aksial oleh larutan umpan, dan filtrat keluar melalui area pengumpulan (Abid et al., 2023).

Modul *spiral wound* memiliki beberapa kelebihan yaitu:

- a. Kepadatan pengepakan efektif 300–1000 m² /m³.
- b. Jumlah energi yang wajar digunakan
- c. Polarisasi suhu rendah.

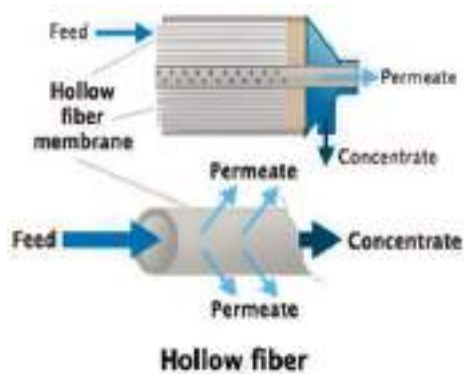
Selain kelebihan yang ditawarkan, modul ini juga memiliki kekurangan tertentu yaitu:

- a. Kesulitan dalam membersihkan atau mengganti ketika membran kotor
- b. Permeabilitas minimal
- c. Sangat rentan terhadap *fouling*.

1.2.3 *Hollow fiber*

Membran *hollow fiber* polimer telah digunakan secara luas secara mikro/ultra/nano filtrasi (MF/UF/NF), *forward/reverse-osmosis* (FO/RO), pemisahan gas, pervaporasi, distilasi membran dan aplikasi *dialysis* ginjal. Membran *hollow fiber* memiliki beberapa keunggulan dibandingkan membran lainnya. Salah satunya yaitu

karakteristik mandiri secara mekanis. Dimana membran *hollow fiber* dapat menghilangkan kebutuhan akan *spacers* dan *packing* yang lebih padat dan luas permukaan membran efektif yang lebih tinggi (Chun Feng Wan et al., 2017).



Gambar 1. 6 Bentuk Modul *Hollow Fiber* (Raji et al., 2020)

Garam dan kontaminan lain dari air umpan ditarik melalui membran, dikumpulkan di luar, dan kemudian dihilangkan menggunakan pipa keluar bawah dan aliran terkonsentrasi. Uap luar masuk melalui membran tipis *hollow fiber*. *Hollow fiber* dipasang dan disusun dalam cangkang tubular modul ini. Umpan melewati cangkang, sedangkan filtrat menembus membran. Modul *hollow fiber* memiliki beberapa kelebihan yaitu (Abid et al., 2023):

- a. Kepadatan pengepakan maksimum adalah $3000 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

- b. Mampu bekerja pada tekanan yang sangat tinggi (di atas 100 bar).
- c. Luas permukaan efektif yang lebih besar per volume.
- d. Digunakan di berbagai industri, termasuk pengolahan air limbah, ginjal buatan, ekstraksi cair-cair, dan desalinasi.
- e. Tidak menggunakan banyak energi.
- f. Kurang rentan terhadap polarisasi suhu karena efisiensi transmisi massa dan termal yang tinggi.

Selain kelebihan yang ditawarkan, modul ini juga memiliki kekurangan tertentu yaitu (Abid et al., 2023):

- a. Permeasi fluks rendah.
- b. Kualitas mekanik yang buruk.
- c. *Fouling* membran sulit dikendalikan.
- d. Melaksanakan penggantian serat yang rusak sangat menantang, yang menyebabkan tingginya biaya.

1.2.4 Membran Tubular

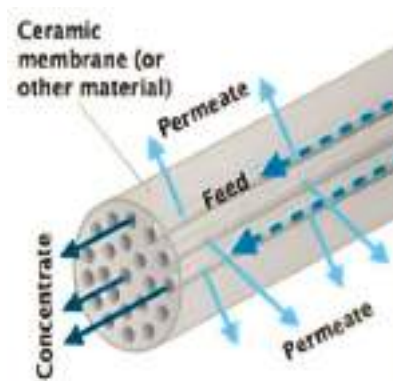
Membran tubular sebagian besar terdiri dari keramik, PP, PVDF, dan PTFE, dan digunakan dalam desalinasi air laut, mengolah air payau, dan menangani air limbah. Modul ini terbuat dari membran hidrofobik dan cangkang. Di dalam silinder paralel fluida dingin dan panas, struktur

berbentuk tabung dipertahankan (Gambar 1.7). Modul ini memiliki beberapa karakteristik penting yaitu (Abid *et al.*, 2023):

- a. Laju aliran tinggi.
- b. Luas permukaan membran tubular secara signifikan lebih besar dari rasio volumenya.
- c. Kecenderungan rendah untuk tersumbat dan mudah dibersihkan

Selain itu, membran tubular juga memiliki kekurangan tertentu yaitu (Abid *et al.*, 2023):

- a. Kerapatan pengepakan rendah adalah $300 \text{ m}^2 / \text{m}^3$.
- b. Modul lengkap harus diganti jika membran basah karena cangkang dan tabung terlilit.
- c. Biaya operasi yang tinggi.
- d. Fluks permeat minimal.



Gambar 1.7 Bentuk Modul Tubular (Raji *et al.*, 2020)

BAB II

MEMBRAN

HOLLOW FIBER

2.1 Pengertian

Membran *hollow fiber* adalah salah satu jenis membran asimetris yang memiliki lapisan tipis tetapi padat yang didukung oleh lapisan berpori. Lapisan padat bertanggung jawab atas separasi sementara lapisan berpori bertanggung jawab untuk memberikan dukungan kuat pada lapisan padat dengan permeat tinggi fluks (Bunga H Naszirahul et al., 2018). Membran *hollow fiber* memiliki keuntungan yaitu dukungan mekanis yang baik dan kemudahan penanganan selama proses operasi serta pembuatan modul.

Modul membran tersusun dari beberapa serat halus yang disusun menjadi satu *bundle* dalam satu *shell silindris*, dengan keterangan dalam satu *bundle* terdapat 5 sampai 10000 (Xu et al., 2020). Membran *hollow fiber* memiliki beberapa keunggulan dibandingkan modul lainnya, seperti karakteristik mekanis yang mendukung, menawarkan *packing* yang lebih padat dan luas permukaan membran yang lebih tinggi, dan proses pembuatan modul mudah ditangani. Selain itu, juga menghilangkan kebutuhan akan

spacer (W. C. Lestari et al., 2021). Pada pemurnian air limbah dalam kasus ini menggunakan membran *hollow fiber*. Di antara semua jenis, membran *hollow fiber* memiliki kepadatan pengepakan yang tinggi, dukungan mekanis yang baik, dan kemudahan penanganan selama proses operasi. Fitur-fitur yang membedakan ini membuat setelan membran untuk digabungkan dengan fotokatalitik (Elma et al., 2019). Membran *hollow fiber* dapat menghilangkan kebutuhan akan spacers dan *packing* yang lebih padat dan luas permukaan membran efektif yang lebih tinggi (C. F. Wan et al., 2017).

Membran *hollow fiber* memiliki keuntungan yaitu dukungan mekanis yang baik dan kemudahan penanganan selama proses operasi serta pembuatan modul. Membran *hollow fiber* mempunyai densitas yang baik. Densitas yang baik disebabkan oleh diameter luarnya yang sangat kecil. Selain itu, membran *hollow fiber* mempunyai ketebalan dinding luar yang tipis. Diameter luar membran *hollow fiber* berkisar antara 50 μm sampai 1800 μm (Fang et al., 2012).

Terdapat beberapa parameter proses yang dapat disesuaikan untuk mengoptimalkan kinerja, tergantung pada kebutuhan dan aplikasi. Optimasi yang paling penting untuk sistem yang besar dimana perbaikannya kecil dapat membawa manfaat yang besar. Beberapa kelebihan dari membran *hollow fiber*, adalah :

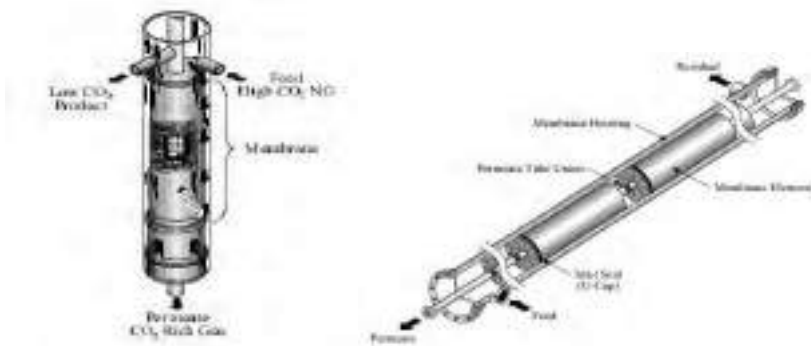
- Biaya rendah/murah.
- Keandalan tinggi.
- *On-stream* tinggi ketika beroperasi.
- Mudah dalam penggunaan.
- Dapat menghilangkan hidrokarbon tinggi.
- Pemeliharaan rendah.
- Konsumsi energi rendah.

Adapun kekurangan dari membran *hollow fiber* sebagai berikut :

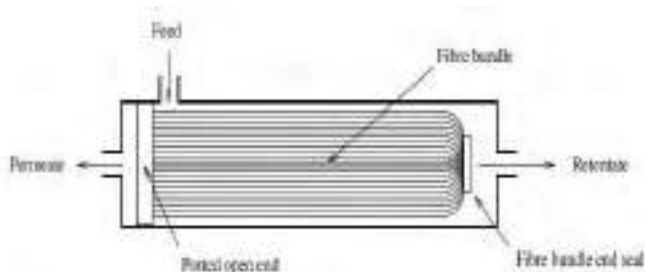
- Menambah selektivitas tapi mengurangi permeabilitas.
- Biaya investasinya besar jika digunakan dalam waktu yang lama.
- Sensitif terhadap perubahan kondisi umpan.
- *Pressure drop* besar, bisa mencapai 5 kg/cm².



Gambar 2. 1 Membran *Hollow Fiber* (Dortmundt et al., 2019)



Gambar 2. 2 Elemen Membran *Hollow fiber* (Dortmundt & Doshi, 2019)



Gambar 2. 3 Modul Membran *Hollow Fiber* Dengan *Feed* dan *Sheel Side* (Dortmundt & Doshi, 2019)



Gambar 2. 4 Bentuk dari *Hollow fiber* (Dortmundt & Doshi, 2019)

Berikut adalah beberapa jenis membran *hollow fiber* yang umum digunakan dalam berbagai aplikasi. *Polysulfone* (PSf) merupakan bahan membran yang umum digunakan dalam aplikasi pemisahan air dan gas. Membran ini memiliki kekuatan mekanik yang baik dan tahan terhadap suhu tinggi. *Polyvinylidene Fluoride* (PVDF) *Hollow fiber* adalah bahan membran yang tahan terhadap bahan kimia agresif dan memiliki sifat hidrofobik. Membran ini banyak digunakan dalam aplikasi filtrasi dan pemurnian air. *Polyethersulfone* (PES) adalah bahan membran dengan kekuatan mekanik yang tinggi dan ketahanan terhadap suhu tinggi. Membran ini digunakan dalam berbagai aplikasi seperti pemurnian air, ultrafiltrasi, dan mikrofiltrasi.

Untuk pemisahan dan filtrasi air limbah, terdapat beberapa jenis-jenis membran *hollow fiber* yang sering digunakan. Membran Ultrafiltrasi (UF) memiliki ukuran pori yang relatif besar, sekitar 0,01 hingga 0,1 mikron. Membran UF dapat digunakan untuk memisahkan partikel-partikel besar seperti padatan terlarut, koloid, dan bakteri dari air limbah. Membran UF dan MF efektif dalam menghilangkan zat organik terlarut, warna, bau, dan memperbaiki kekeruhan air limbah. Mikrofiltrasi secara umum merupakan sebagai salah satu proses pemisahan membran menggunakan membran yang memiliki ukuran pori sekitar 0,03-10 mikron (1 mikron = 0,0001 milimeter).

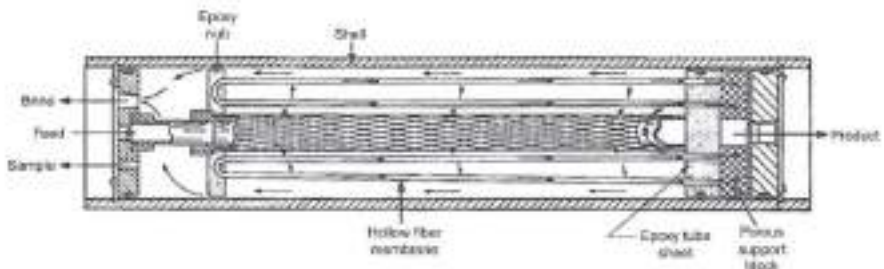
Beroperasi pada tekanan operasi sekitar 100-400 kPa (15 sampai 60 psi).

Zat-zat yang dapat disaring melalui proses mikrofiltrasi ini antara lain pasir, lumpur, tanah liat, Giardia lamblia, kista *Cryptosporidium*, algae, dan beberapa jenis bakteri. MF bukan penghalang yang efektif untuk virus. Tetapi jika penggunaannya di kombinasi dengan desinfeksi, MF dapat mengontrol mikroorganisme tersebut dalam air. Membran Nanofiltrasi (NF) memiliki ukuran pori yang lebih kecil daripada membran UF dan MF, berkisar antara 0,001 hingga 0,01 mikron. Membran NF dapat digunakan untuk memisahkan molekul-molekul organik, ion-ion terlarut, senyawa kimia, dan zat warna dari air limbah. Mereka juga dapat digunakan untuk pemulihan logam berat. Membran *Reverse Osmosis* (RO) memiliki ukuran pori paling kecil, sekitar 0,0001 hingga 0,001 mikron. Membran RO dapat memisahkan sebagian besar senyawa terlarut, garam, logam berat, dan zat organik dari air limbah. Mereka digunakan secara luas dalam pengolahan air limbah industri untuk menghasilkan air yang bermutu tinggi.

2.2 Modul Membran *Hollow fiber*

Modul *hollow fiber* biasanya berdiameter 4-8 inci (10-20 cm) dan panjang 3-5 ft (1,0-1,6 m). Dinding serat harus mendukung hidrostatis yang cukup besar tekanan, serat biasanya memiliki diameter kecil dan dinding tebal,

biasanya 50 mm diameter dalam dan diameter luar 100 - 200 mm. Dalam desain umpan sisi lubang, serat terbuka di kedua ujungnya dan umpan terbuka disirkulasikan melalui lubang (*area annulus*) dari serat. Untuk meminimalkan penurunan tekanan di dalam serat, diameternya biasanya lebih besar dari serat halus yang digunakan dalam desain umpan sisi cangkang. Serat kapiler ini digunakan dalam ultrafiltrasi, pervaporasi, dan beberapa aplikasi gas bertekanan rendah hingga sedang. Satu-satunya keuntungan terbesar dari modul *hollow fiber* adalah kemampuan untuk mengemas suatu area membran yang sangat besar menjadi satu modul. Misalnya, dalam diameter 8 inci, Modul *spiral wound* sepanjang 40 inci akan berisi sekitar 20 - 40 m² pada membran. Modul *hollow fiber* setara yang diisi dengan serat berdiameter 100 mm, akan berisi sekitar 600 m² dari daerah membran (Satyabama, 2019).



Gambar 2. 5 Desain Rakitan *Hollow fiber* Du Pont

2.3 Klasifikasi dan Aplikasi Membran *Hollow fiber*

Proses membran yang digerakkan oleh tekanan sejauh ini merupakan proses membran yang paling banyak diterapkan dalam pengolahan air limbah, dari pra-pengolahan hingga pasca-pengolahan air limbah. Proses ini bergantung pada tekanan hidrolis untuk mencapai pemisahan. Ada empat jenis utama dari proses ini. Ini adalah mikrofiltrasi (MF), ultrafiltrasi (UF), nanofiltrasi (NF), dan *reverse osmosis* (RO). Perbedaan utama yang ditunjukkan oleh proses ini, selain dari persyaratan tekanannya, adalah ukuran pori membrannya.

Tabel 2.1 Beberapa Fitur Membran yang Digerakkan oleh Tekanan

Proses Membran	MWCO (Kilo Dalton)	D (μm)	Tekanan (bar)	Tipe Membran	Permeabilitas Rata-Rata ($\text{L}/\text{m}^2 \text{ h bar}$)	Larutan
Mikrofiltrasi	100-500	10^{-1} -10	1-3	Berpori, asimétris atau simétris	500	Bakteri, lemak, minyak, koloid, partikel organik mikro
Ultrafiltrasi	20-150	10^{-3} -1	2-5	Mikro berpori, asimétris	150	Protein, pigmen, minyak, gula,

Proses Membran	MWCO (Kilo Dalton)	D (μm)	Tekanan (bar)	Tipe Membran	Permeabilitas Rata-Rata ($\text{L}/\text{m}^2 \text{ h bar}$)	Larutan
Nanofiltrasi	2-20	10^{-3} -1	5-15	Asimetris berpori ketat, film tipis	10-20	organik mikroplastik Pigmen, sulfat, divalent kation, anion divalen, laktosa, sukrosa, natrium klorida
<i>Reverse Osmosis</i>	0,2-2	10^{-4} - 10^{-3}	15-75	Semi berpori, asimetris, <i>thin film composite</i>	5-10	Semua kontaminan termasuk ion monovalen

*MWCO= *Molecular Weight Cut Off*

Di antara proses membran yang digerakkan oleh tekanan, RO sangat dikenal karena efisiensinya dalam pemisahan partikel kecil termasuk bakteri dan ion monovalen seperti ion natrium dan ion klorida hingga 99,5%. RO telah menjadi yang terdepan dalam reklamasi air melalui pengolahan air limbah dan desalinasi air laut sejak lama. Selama *reverse osmosis*, dihasilkan tekanan hidrostatik

yang kuat cukup untuk mengatasi tekanan osmotik intrinsik umpan. Ini bertentangan dengan proses osmosis alami. Untuk proses lengkap, molekul air diserap ke permukaan membran (di bawah tekanan). Molekul-molekul ini berdifusi melalui bahan membran dan akhirnya terdesorpsi pada permeat sisi membran untuk koleksi.

Kombinasi berbeda dari proses membran yang digerakkan oleh tekanan ini telah diterapkan secara berbeda pengaturan pengolahan air limbah. Dalam beberapa kasus, mereka berfungsi sebagai pra-perawatan untuk proses unit lainnya. Dalam sebuah percobaan, Racar et al. (2020) menggabungkan NF dan RO untuk mengolah air limbah penyulingan yang rata-rata dari 98% kontaminan (warna, total padatan terlarut, kebutuhan oksigen kimiawi, dan kalium) berhasil dihapus. Dalam aplikasi lain, UF dan RO digabungkan dalam pabrik skala percontohan untuk dirawat air limbah dari pencetakan pewarna reaktif. Setelah UF, permeat masih jauh dari batas debit, namun permeat RO cocok untuk dibuang dan digunakan kembali. Kontaminan seperti urea, natrium alginat, pewarna reaktif dan zat pengoksidasi berhasil dihilangkan. Beberapa contoh penerapan lainnya proses membran yang digerakkan oleh tekanan ini ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Beberapa Aplikasi Proses Membran yang Didorong Tekanan dalam Pengolahan Air Limbah

Proses Membran Berpenggerak Tekanan	Pengolahan Air Limbah	Hasil	Referensi
UF	Pabrik minyak sayur	COD (91%), TSS (100%), TOC d (87%), PO (85%), CI (40%)	(Mohammadi et al., 2004)
MF-RO	Air limbah perkotaan	Pestisida dan obat-obatan dihapus ke batas debit	(Rodriguez-Mozaz et al., 2015)
MF	Air limbah kota (disinfeksi dan penghilangan fosfor)	Kontaminan dihilangkan hingga di bawah batas deteksi	(Dittrich et al., 1996)
MF	Air limbah berminyak sintetik emulsi	95% penghilangan kontaminan organik	(Y. Wang et al., 2009)
NF-RO	Lindi tempat pembuangan	Pemulihan air 90%	(Rautenbach et al., 2000)
UF	Air limbah rumah potong unggas	Penghapusan COD dan BOD > 94%, lemak (99%), zat	(Yordanov, 2010)

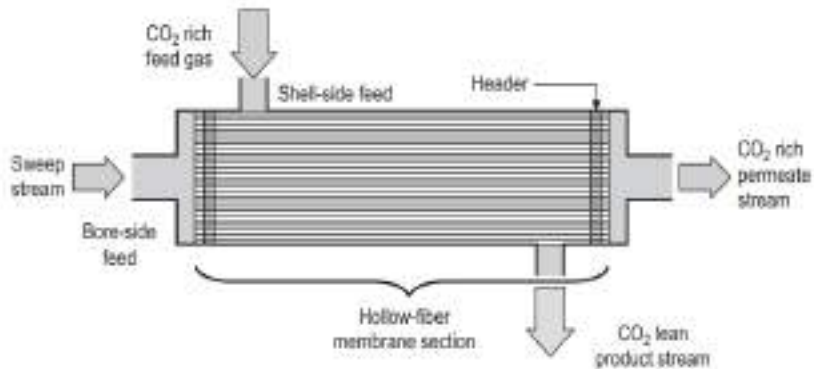
Proses Membran Berpenggerak Tekanan	Pengolahan Air Limbah	Hasil	Referensi
NF	Tekstil	tersuspensi (98%) COD (57%), warna (100%), salinitas (30%)	(Ilouze et al., 2012)
UF-RO	Industri finishing logam	Penghapusan 90-99% kontaminan yang berbeda	(Petricin et al., 2015)
UF-RO	Air limbah berminyak	Oli dan lemak (100%), TOC (98%), COD (9%), TDS (95%), kekeruhan (100%)	(Salahi et al., 2011)
UF-NF/RO	Air limbah fenolik dari pabrik kertas	COD (95,5%), fenol (94,9%)	(Sun et al., 2015)

Catatan: COD (*Chemical Oxygen Demand*), TSS (*Total Suspend Solids*), BOD (*Biochemical Oxygen Demand*), TOC (*Total Organic Carbon*), TDS (*Total Dissolved Solids*).

Seperti yang terlihat di sebagian besar aplikasi yang tercantum di atas, MF, UF, dan NF biasanya berfungsi sebagai pretreatment langkah menuju RO ini untuk

mengurangi pengotoran membran RO dan untuk meningkatkan pemeliharaan konstan aliran. Ini juga berfungsi sebagai pengobatan multi-penghalang untuk menghilangkan kontaminan dari air limbah. Proses membran yang digerakkan oleh tekanan tidak diragukan lagi membuat reklamasi air dari air limbah pilihan bagus. Namun, tantangannya masih tetap pada kebutuhan energi akibat tekanan.

Optimalisasi modul *hollow fiber* untuk aplikasi pemisahan gas melibatkan pemilihan dari diameter serat, dan karenanya kerapatan serat dalam modul, dan arah aliran cangkang versus serat — apakah aliran ini *co-current* atau *counter current*. Modul serat umumnya memiliki panjang 1 m dan diameter 0,2 - 0,25 m, sekali lagi untuk alasan penanganan fisik, dan mengandung serat individu B106 dengan diameter internal dan eksternal B50 dan 100 μm . Modul *hollow fiber* untuk penggunaan kontakor cairan gas serat polimer, yang biasanya urutan besarnya lebih besar pada penampang, dengan diameter dalam dan luar B600 dan 1000 μm . Unit pemisahan berbasis *hollow fiber* biasanya lebih kecil dari yang berbasis modul *spiral wound*, meskipun modul *spiral wound* mampu menangani lebih tinggi tekanan operasi dan lebih tahan terhadap *fouling* yang disebabkan oleh partikel dalam umpan aliran gas yang dapat memblokir serat halus (Rackley, 2017).



Gambar 2. 6 Struktur Modul Membran *Hollow fiber*

Gambar 2.6 diatas menunjukkan struktur dari modul membran *hollow fiber* yang umumnya di aplikasikan dalam pengolahan air. adapun klasifikasi membran berdasarkan jenis-jenis klasifikasi filtrasi, konfgurasi dari membran serta lainnya dapat dilihat pada tabel-tabel berikut berikut:

Tabel 2. 3 Klasifikasi Membran Berpori (Rackley, 2017)

Klasifikasi Pori	Kisaran Ukuran Pori	Klasifikasi Filtrasi
Makropori	> 50 nm (500 Å)	Mikrofiltrasi
Mesopori	2-50 nm (20-500 Å)	Ultrafiltrasi
Mikropori	1-2 nm (10-20 Å)	Nanofiltrasi
Nanopori	<1 nm (10 Å)	Penyaringan molekular

Tabel 2. 4 Rasio Luas Terhadap Volume untuk Berbagai Konfigurasi (Rackley, 2017)

Modul Konfigurasi	Tipe Rasio Area ke Volum (m ² /m ³)
<i>Plate dan frame</i>	200
<i>Spiral wound</i>	500-1000
<i>Hollow fiber</i>	1500-10.000

Adapun Berbagai Macam Ukuran Membran dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 2. 5 Karakteristik Konsep Modul yang Berbeda (Fane et al., 2011)

Karakteristik	<i>Spiral Wound</i>	<i>Tubular</i>	<i>Hollow fiber</i>	<i>Submerged</i>
<i>Packing density</i> (m ² m ⁻³)	Tinggi (500-1000)	Rendah-sedang (70-400)	Tinggi (500-5000)	Sedang
Penggunaan energi	Sedang (kehilangan <i>spacer</i>)	Tinggi (turbulen)	Rendah (laminar)	Rendah
Manajemen cairan/fouling	Baik (tidak padat) Buruk (padat)	Baik	Sedang (<i>in-to-out</i>) Buruk (<i>out-to-in</i>)	Sedang
Standarisasi Penggantian	Ya Elemen	Tidak Tabung (atau elemen)	Tidak Elemen	Tidak Elemen (atau bundle)

Karakteristik	<i>Spiral Wound</i>	<i>Tubular</i>	<i>Hollow fiber</i>	<i>Submerged</i>
Pembersihan	Bisa sulit (padat)	Pembersihan fisik yang baik dapat dilakukan	<i>Backflush</i> (MF/UF)	<i>Backflush</i> (HF)(MF/UF)

Tabel 2.6 Sifat Khas Membran yang Digerakkan Oleh Tekanan (Fane et al., 2011)

	Mikrofiltrasi	Ultrafiltrasi	Nanofiltrasi	Reverse Osmosis
Ukuran pori (nanometer)	50 – 10.000	1 – 100	~ 2	< 2
Permeabilitas air ($Lm^{-2}h^{-1}bar^{-1}$)	>500	20-500	5 – 50	0,5 - 10
Tekanan operasi (bar)	0,1 – 2,0	1,0 – 5,0	2,0 – 10	10 - 100
MWCO (Da)	Tak dapat diterapkan	1000 – 300.000	>100	>10

Kontaminan yang ditargetkan dalam air	Bakteri, ganggang, padatan tersuspensi, kekeruhan	Bakteri, virus, koloid, makromolekul	Ion Di- dan multivalent, bahan organik alami, molekul organik kecil	Ion terlarut, molekul kecil
Bahan membran	Polimer, anorganik	Polimer, beberapa anorganik	Poliamida komposit film tipis, selulosa asetat, bahan lainnya	Poliamida komposit film tipis, selulosa asetat

Tabel 2.7 Korelasi Fitur Membran dengan Rentang Pemisahan (Abdel-Fatah, 2018)

Tipe Membran	<i>Reverse Osmosis</i>	Nanofiltrasi	Ultrafiltrasi	Mikrofiltrasi
Film permukaan tebal	Asimetris 150 μm 1 μm	150 μm 1 μm	150-250 μm 1 μm	10-150 μm
Ukuran pori	<0,002 μm	<0,002 μm	0,02 – 0,2 μm	0,2 -5 μm
Rejeksi	HMWC, LMWC, natrium	HMWC, mono, di-, dan	Macromolekul, gula, protein,	Partikulat, tanah liat, bakteri

Tipe	<i>Reverse Osmosis</i>	Nanofiltrasi	Ultrafiltrasi	Mikrofiltrasi
	klorida	oligosakarida, anion polivaten	polisakarida, virus	
Bahan membran	CA: thin-film	CA:thin film	Keramik. PSO, CA, PVDF, film tipis	Keramik, PP, PSO, PVDF
Modul membran	Tubular, spiral-wound, plate dan frame	Tubular, spiral wound, plate dan frame	Tubular, hollow, <i>fiber</i> , spiral, wounf, plate dan frame	Tubular, <i>hollow fiber</i> , plate dan frame
Tekanan	15 – 150 batang	5 – 35 batang	1 – 10 batang	2 bar <

BAB III

JENIS MEMBRAN

HOLLOW FIBER

3.1 *One-Layer*

Membran *hollow fiber one layer*/lapisan tunggal merupakan membran *hollow fiber* yang hanya terdiri dari satu lapisan. Lapisan ini memiliki satu buah inti dan satu buah *shell*. Diameter inti dan *shell* dapat disesuaikan dengan mengubah laju aliran pada larutan inti menuju *shell* (Vohra et al., 2023b). *Hollow fiber one layer* dapat dibentuk dengan cara dipintal menggunakan pemintal (*spinneret*) lapis tunggal. Lapisan tunggal pada membran *hollow fiber* tersebut dibuat melalui *spinneret* dengan cara mengekstruksi larutan *dope* yang telah homogen (Pagliaro et al., 2021). Membran *hollow fiber one layer* umumnya difabrikasi melalui proses pemisahan fasa. Proses ini dibedakan menjadi dua jenis yaitu NIPS (*nonsolvent induced phase separation*) dan TIPS (*thermally induced phase separation*).

Agar diperoleh membran *hollow fiber one layer* dengan karakteristik yang diinginkan dapat dilakukan dengan cara mengatur komposisi larutan polimer yang digunakan. Modifikasi sifat larutan dapat dibuat dengan memilih polimer yang digunakan untuk larutan *dope* secara tepat

agar dihasilkan larutan dengan viskositas dan tegangan permukaan yang sesuai dalam hal ini konsentrasi dan berat molekul polimer untuk membentuk pori yang diinginkan dapat dilakukan melalui penambahan aditif yang sesuai, pemilihan pelarut dan lain sebagainya. Viskositas larutan polimer yang akan digunakan memiliki peranan penting dalam karakteristik intrinsik. Nilai kritis viskositas sangat diperlukan untuk mendapatkan membran *hollow fiber* dengan ukuran pori yang tepat serta kekuatan mekanik yang diharapkan (Pagliore et al., 2021).

Viskositas menjadi parameter penting dari pembuatan larutan *dope* membran *hollow fiber one layer*, dimana viskositas menjadi pengontrol kinetika koagulasi yang berdampak pada interdifusi antara pelarut dan non-pelarut (H. Z. Zhang et al., 2018). Proses pemintalan membran dari larutan *dope* tidak memungkinkan untuk dilakukan jika viskositasnya terlalu tinggi. Penelitian yang dilakukan (H. Z. Zhang et al., 2018) menunjukkan peningkatan viskositas dari 37.583 menjadi 46.930 mPa-s ketika dilakukan penambahan konsentrasi massa partikel anorganik seperti SiO₂ pada larutan *dope*. Peningkatan konsentrasi padatan berupa SiO₂ yang menyebabkan viskositas menjadi lebih tinggi mengakibatkan keterikatan rantai serta mengurangi porositas matriks membran. Selain itu penambahan campuran partikel yang berbeda menunjukkan bahwa perbedaan ukuran partikel memberikan perpindahan massa

yang berbeda pula. Perbedaan ukuran partikel tersebut menyebabkan distribusi ukuran pori yang dihasilkan kurang seragam (Pauzan et al., 2021).

Beberapa penelitian menunjukkan efek aditif dari beberapa *nonsolvent* sebagai aditif, seperti dibutil ftalat, aseton, *toluene*, dan *dibutyl phthalate* (DBP) terhadap morfologi membran yang dihasilkan. Pada penggunaan aseton ukuran pori serta porositas membran yang dihasilkan lebih kecil karena viskositas larutan *dope* yang rendah dan afinitas air tinggi. Untuk penggunaan DBP menghasilkan membran dengan pori-pori yang lebih besar dan dapat meningkatkan risiko pembasahan ketika dilakukan tes MD. Hal ini dikarenakan afinitas air pada nonsolven DBP lebih rendah dan viskositasnya yang lebih tinggi. Pada penambahan aditif *toluene* dihasilkan membran simetris yang tersusun atas *spherulites* berukuran kecil. Membran tersebut memiliki ukuran pori kecil, porositas yang besar, dan fluks permeat yang dihasilkan baik serta stabil (Yao et al., 2019).

Kondisi pemintalan membran pada *spinneret* dapat dimodifikasi untuk menghasilkan morfologi serta kinerja membran *hollow fiber* agar sesuai dengan yang diinginkan (Paglioreo et al., 2021). Pada metode TIPS (*thermally induced phase separation*) interaksi pelarutan polimer menjadi parameter penting yang menentukan keberhasilan. Selain itu suhu pada bak pendingin dan konsentrasi polimer yang digunakan pada larutan

dope berpengaruh pada pemisahan fasa yang dihasilkan. Untuk metode NIPS (*nonsolvent induced phase separation*) yang menjadi parameter utama keberhasilan yaitu interaksi antara polimer dengan *nonsolvent*. Faktor penting untuk mendapatkan morfologi spesifik membran sesuai dengan yang diinginkan dilakukan melalui penggunaan *nonsolvent* berbeda sebagai cairan *bore* serta sebagai koagulan eksternal. hal tersebut menjadi penentu struktur penampang pada membran, hidrofobisitas, dan porositasnya.

Pada membran *hollow fiber* asimetris yang dibuat dengan meningkatnya panjang celah udara menyebabkan permeasi mengalami penurunan dan selektivitas meningkat (G. Li et al., 2020). Ketika terjadi peningkatan ketebalan pada lapisan kulit membran akan meningkatkan kekuatan tarik, modulus *young* serta tegangan putus. Perpanjangan tegangan mengakibatkan orientasi molekul dan strukturnya mengalami peningkatan menjadi lebih padat dan penebalan lapisan kulit membran terjadi karena waktu penguapan yang lebih lama. Untuk membran *hollow fiber* yang digunakan dalam pemisahan gas keselarasan pada rantai polimer dan dinamika inversi fasa dipengaruhi oleh *extrusion shear*. Dengan peningkatan *extrusion shear* membuat selektivitas semakin meningkat pula. Agar terbentuk lapisan aktif yang terbebas dari cacat dengan ukuran lebih tipis dan orientasi yang lebih tinggi dapat dibuat dengan mengoptimalkan waktu tinggal.

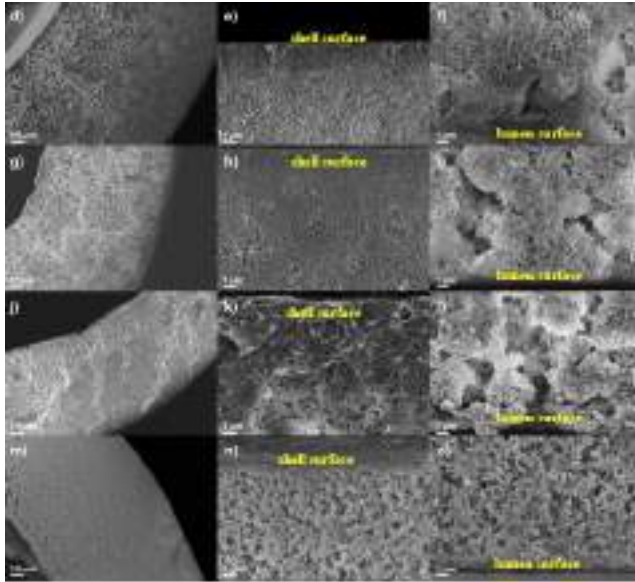
Membran *hollow fiber* asimetris one layer dengan selektivitas tinggi dapat dihasilkan dengan menambahkan aditif berupa senyawa organik yang mudah menguap ke dalam larutan *dope* (G. Li et al., 2020). Aditif yang baik untuk

meningkatkan selektivitas tersebut berupa metanol, aseton, dan campuran aseton-metanol dimana memiliki miscibilitas koagulan yang baik serta foatilitas tinggi. *Hollow fiber* yang dibentuk dengan konsentrasi polimer lebih tinggi menghasilkan membran yang memiliki permeabilitas lebih rendah serta selektivitas yang tinggi. Selain itu peningkatan ketebalan lapisan kulit pada membran dapat terjadi karena celah udara yang ditingkatkan (G. Li et al., 2020).

Pembasahan pori pada membran *hollow fiber one layer* dapat dikurangi dengan meningkatkan hidrofobisitas permukaan membran. Agar dapat dicapai produktivitas serta selektivitas yang tinggi maka membran harus cukup hidrofobik. Nanopartikel silika yang hidrofobik memiliki energi permukaan lebih rendah dan ketika ditambahkan dalam larutan *dope* menyebabkan penurunan energi permukaan membran berkurang.

Struktur di bagian dalam membran *hollow fiber one layer* bergantung pada larutan *dope* yang dibuat dengan menyesuaikan pelarut dan non solven. Penelitian (Yao et al., 2019) menemukan bahwa struktur makrovoid dapat dicegah dengan menggunakan pelarut TEP. Untuk optimalisasi di bagian dalam membran *hollow fiber* dapat dilakukan dengan mengatur viskositas serta afinitas larutan *dope*. Penambahan aseton dengan viskositas lebih rendah dari TEP sebanyak 20% berat ke dalam larutan *dope* dapat menurunkan viskositas larutan dari 332 menjadi 278 P dan

meningkatkan afinitas. Untuk larutan *dope* yang ditambahkan DBP menunjukkan peningkatan viskositas menjadi lebih besar dan menyebabkan penurunan afinitas air. Hal tersebut membuat membran yang terbentuk memiliki nodus kristal sferulitik besar dengan pori terbuka yang besar pada sisi cangkangnya. Sedangkan pada penambahan toluene dalam larutan *dope* menyebabkan penurunan viskositas hingga 275 P serta menurunkan afinitas air. Penambahan toluena dengan metode NIPS menghasilkan membran dengan struktur bagian dalam yang simetris. Morfologi SEM pada membran *hollow fiber* PVDF dengan berbagai non solven berdasarkan penelitian (Yao et al., 2019) sebagai berikut.



Gambar 3. 1 Mikrograf SEM membran *hollow fiber* yang dicetak dari 11% berat PVDF pada TEP (d-f); TEP dan aseton 17,8% berat (g-i); TEP dan DBP 17,8% berat (j-l) ; TEP dan toluene 17,8% berat (m-o) (Yao et al., 2019)

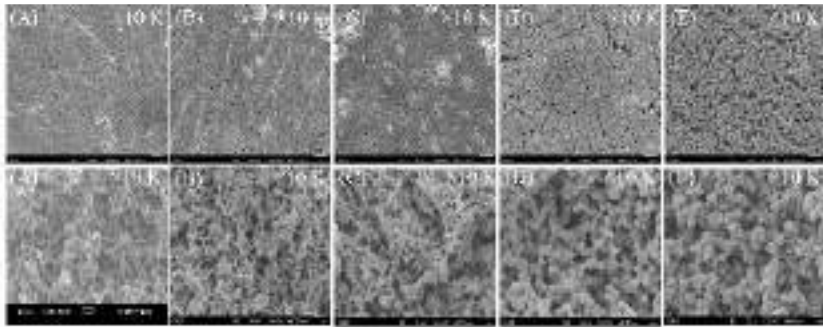
Pada membran *hollow fiber one layer* penguapan pelarut, orientasi rantai molekul, serta pemanjangan yang diinduksi gravitasi di sepanjang celah udara mempengaruhi larutan *dope* yang dihasilkan (Paglioreo et al., 2021). Ketika jarak pada celah udara tinggi, menghasilkan serat baru yang memiliki ketebalan dinding dan diameter lebih kecil. Hal tersebut dapat berakibat pada pecahnya serat yang baru terbentuk. Umumnya peningkatan celah udara juga

meningkatkan waktu yang diperlukan untuk serat baru mencapai *external bath* yang mengakibatkan penguapan pelarut dari lapisan bagian luar membran sehingga konsentrasi polimer dibagian tersebut menjadi lebih tinggi (Paglireo et al., 2021). Tingginya konsentrasi dibagian luar mengakibatkan terbentuknya lapisan kulit padat yang tidak diinginkan pada membran. Pengaruh dari celah udara tersebut menjadi sangat penting terutama pada metode TIPS jika dibandingkan dengan metode NIPS karena dalam prosesnya memerlukan suhu yang tinggi. Dimana ketika pelarut yang digunakan mudah menguap maka peluang terbentuknya lapisan padat semakin besar. Namun hal tersebut dapat dihindari dengan pemilihan pelarut yang tidak mudah mengalami penguapan. Proses penguapan yang lambat berpengaruh terhadap tumbuhnya *spherulit*. Pada jarak celah udara yang lebih pendek membuat larutan *dope* lebih cepat mencapai *quenching bath* sehingga dapat menghalangi tumbuhnya *spherulit*. Tidak adanya *spherulit* membuat porositas permukaan luar membran semakin rendah.

Pada pembuatan membran *hollow fiber* asimetris poliamida 6 FDA-DAM yang bebas cacat untuk pemisahan gas perlu dilakukan optimalisasi komposisi larutan *dope* karena bahan 6FDA memiliki tingkat pemisahan yang relatif rendah pada *water bath* (G. Li et al., 2020). Penggunaan air sebagai aditif non-pelarut kurang menguntungkan jika

dibandingkan dengan etanol dan lithium nitrat yang dapat membentuk *hollow fiber* asimetris. Penambahan lithium nitrat sebagai aditif akan menghasilkan serat yang bebas cacat dengan ketebalan kulit dan ukuran serat yang lebih kecil.

Untuk menghambat ketidakstabilan yang diakibatkan pertukaran pelarut yang lambat, aliran konveksi/difusi, dan laju densifikasi dapat dilakukan dengan penggunaan IPA (isopropanol) dalam bak koagulasi eksternal (Ahmad et al., 2018). Namun kandungan IPA yang tinggi dapat menyebabkan lemahnya koagulasi, penundaan *demixing*, dan menghasilkan permukaan berpori. Peningkatan kandungan IPA pada bak koagulasi eksternal membuat fluks permeasi meningkat, akan tetapi ketika kandungan IPA melebihi 60% peningkatannya menjadi *unobvious* (Ahmad et al., 2018). Hal tersebut dipengaruhi oleh dua faktor, yaitu adanya perubahan pada penampang dan terjadinya peningkatan porositas permukaan serta evolusi pada morfologi penampang dari struktur seluler menjadi globul yang diakibatkan oleh *demixing liquid-liquid* yang tertunda bersamaan dengan peningkatan kristalisasi dan *demixing padat-cair*. Struktur morfologi penampang bawah dan atas membran *hollow fiber* dengan berbagai komposisi IPA dan air pada bak koagulasi eksternal dalam penelitian (Ahmad et al., 2018) sebagai berikut.



Gambar 3. 2 Morfologi SEM penampang (bawah) dan permukaan luar (atas), menggunakan berbagai komposisi IPA/ air dalam bak koagulasi eksternal: (A) 100/0; (B) 80/20; (C) 60/40; (D) 40/60; (E) 20/80 (berat%) (Ahmad et al., 2018)

Proses kristalisasi membran PVDF selama berlangsungnya NIPS dapat dipengaruhi oleh adanya non solven yang ditambahkan pada larutan *dope* (Yao et al., 2019). Selama inversi fasa proses *demixing* memiliki peranan penting karena struktur PVDF yang merupakan polimer semi kristal. PVDF berbentuk amorf umumnya dapat terbentuk karena proses *demixing liquid-liquid* yang cepat dari larutan polimer dengan non solven kuat (P. Wu et al., 2018). Pada penelitian (Yao et al., 2019) penggunaan metil-2-pirolidon (NMP) menghasilkan membran dengan regangan putus dan kekuatan tarik terbesar dari semua sampel yang digunakan. Membran dengan struktur spons dan serat

padat dapat dibentuk melalui proses *demixing liquid-liquid* yang cepat dimana hal tersebut menghasilkan kekuatan mekanik yang tinggi dan kristalinitas yang rendah.

Pada penggunaan Trietil fosfat (TEP) dalam larutan *dope* membuat proses *demixing liquid-liquid* menjadi tertunda sehingga menyebabkan peningkatan kristalinitas membran dan penurunan kekuatan mekanik. Penambahan aseton sebagai non solven pada larutan *dope* membuat laju *demixing liquid-liquid* bertambah karena terjadinya penurunan viskositas larutan *dope*. Pada larutan *dope* yang ditambahkan non solven *dibutyl phthalate* (DBP) menghasilkan membran yang memiliki struktur kristal *spherulitic* besar sehingga modulus young dihasilkan lebih tinggi sebesar 8,8 mPa. Hal ini terjadi karena penambahan DBP meningkatkan viskositas larutan dan menghambat proses *demixing liquid-liquid*. Penambahan toluena sebagai non-solven menghasilkan membran yang serupa dengan penambahan DBP sebagai non-solven. Dengan adanya toluena membuat proses *demixing liquid-liquid* menjadi lebih lambat. Hasil penelitian (Yao et al., 2019) dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut:

Tabel 3. 1 Perbandingan kekuatan mekanik dan kristalinitas membran *hollow fiber* pada berbagai larutan *dope*

Sampel	Non Solven	Kristalinitas (%)	Kekuatan Tarik (MPa)	Modulus Young (MPa)
NMP0	-	35,2 ± 1,3	2,83 ± 0,03	4,35 ± 0,17
TEP0	-	43,5 ± 2,0	2,04 ± 0,02	3,60 ± 0,33
TEPA-1	Aseton	41,3 ± 1,6	2,17 ± 0,03	3,63 ± 0,24
TEPA-2	Aseton	40,3 ± 0,6	2,28 ± 0,01	3,68 ± 0,1
TEPD-1	DBP	46,4 ± 2,2	1,92 ± 0,01	5,51 ± 0,18
TEPD-2	DBP	50,6 ± 2,1	1,45 ± 0,02	9,07 ± 0,16
TEPT-1	Toluena	44,9 ± 1,5	1,95 ± 0,02	4,43 ± 0,16
TEPT-2	Toulena	46,6 ± 2,3	1,76 ± 0,01	5,51 ± 0,15

Kristalinitas dan struktur membran *hollow fiber* yang dihasilkan juga bergantung pada suhu rendaman selama proses koagulasi (Ahmad et al., 2018). Difusi pada pelarut akan semakin cepat ketika suhu tinggi dan saat suhu rendah proses difusi akan berjalan lambat sehingga mempengaruhi keseragaman pori. Jalur komposisi serat polimer cenderung berbentuk melintang melewati daerah *gelation*, *spinodal* dan *binodal line*, memulai proses *demixing luquid-liquid*, dan membentuk fasa polimer yang buruk. Pada suhu bak koagulasi eksternal tinggi menghasilkan struktur membran seperti jari sedangkan pada suhu rendah menghasilkan

struktur seperti spons. Saat terjadi peningkatan suhu koagulasi eksternal menyebabkan peningkatan pada kekuatan tarik membran. Kenaikan suhu membuat lebih banyak area kosong pada permukaan luar membran yang menghasilkan struktur seluler menjadi lebih luas (Ahmad et al., 2018). Hal tersebut menyebabkan peningkatan permeabilitas gas secara bertahap. Peningkatan suhu membuat lapisan kulit membran menjadi semakin padat dan menyebabkan peningkatan kekuatan putus dan porositas.

3.2 Multi-Layer

Multi-layer merujuk pada struktur yang terdiri dari beberapa lapisan tipis bahan. Dalam konteks membran, multi-layer biasanya digunakan untuk meningkatkan efisiensi pemisahan dan kekuatan mekanik membran tersebut. Proses pembuatan multi-layer pada membran dapat dilakukan dengan berbagai metode yang ada (Wypysek, Kalde, et al., 2021).

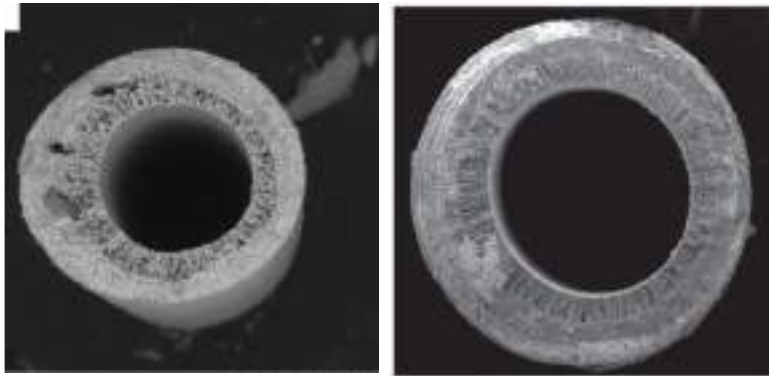
Multi-layer pada *hollow fiber* merujuk pada struktur membran berbentuk serabut yang terdiri dari beberapa lapisan tipis bahan. *Hollow fiber* sendiri adalah sebuah teknologi membran yang digunakan dalam proses pemisahan untuk menghasilkan air bersih atau produk-produk lainnya dengan cara memfilter campuran larutan

melalui dinding serat-serat membran tersebut. Dalam penggunaannya, multi-layer pada *hollow fiber* dapat meningkatkan efisiensi dan kekuatan mekanik dari membran tersebut. Struktur multi-layer biasanya dibuat dengan cara menumpuk beberapa lapisan material yang memiliki sifat-sifat tertentu sehingga mampu meningkatkan kinerja pemisahan dan daya tahan terhadap tekanan atau suhu tinggi (Sulaiman et al., 2014).

Setiap layer/lapisan memiliki peran tersendiri sebagai membran multi-layer. Lapisan *support* berpori berperan dalam kekuatan mekanik, memiliki porositas tinggi dan ketahanan perpindahan massa yang rendah. Selain itu materialnya harus murah dan mudah diproses menjadi struktur yang berpori. Pada lapisan selanjutnya berupa lapisan selektif berperan dalam sifat pemisahan utama membran. Parameter idealnya dari membran multi-layer adalah permeat dan selektivitas yang tinggi. Adapun parameter pendukung dapat berupa life-time, biaya, *aging*, dan stabilitas (Dai et al., 2016).

Fabrikasi membran *hollow fiber* multi-layer menggunakan teknik konvensional seperti *dip coating* dan polimerisasi in situ. Teknik ini terdiri dari beberapa langkah yang sifatnya mahal, tidak efisien dan memakan banyak waktu. Teknik *co-extrusion* dapat digunakan untuk mengatasi hal tersebut dengan membuat membran *hollow*

fiber multilayer dalam hanya satu langkah baik *dual layer* atau *triple layer* seperti pada Gambar 3.3 berikut.



Gambar 3.3 Membran *hollow fiber dual layer* (kiri) dan *triple layer* (kanan)

Pada membran *double layer hollow fiber* (DLHF) yang melalui proses *co-extrusion* memiliki semua keunggulan dari *single layer hollow fiber* (SLHF) seperti (Khan et al., 2018):

1. Luas permukaan aktif tinggi terhadap rasio volume, resistensi yang rendah terhadap aliran gas, self-supporting struktur dan kemampuan bekerja pada tekanan tinggi.
2. Signifikan mengurangi biaya material kinerja tinggi dengan menyesuaikan rasio ketebalan lapisan luar dan dalam.
3. Polimer yang rapuh tetapi selektif dan permeable dapat digunakan sebagai lapisan luar tipis yang selektif.

4. Langkah *depositing*/pelapisan sebuah lapisan yang selektif (Lapisan kedua, dst) pada *hollow fiber* membran dapat dihilangkan.

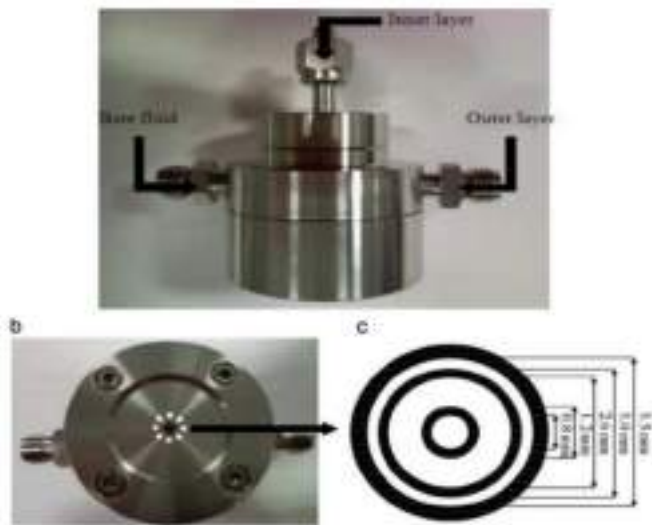
Co-extrusion adalah proses fabrikasi membran multilayer dalam sebuah langkah, di mana dua atau lebih larutan polimer diekstrusi melalui satu cetakan dan bergabung bersama di lubang. Bentuk dan struktur lubang dirancang khusus untuk memenuhi kebutuhan yang berbeda. *Co-extrusion* dapat digunakan untuk menghasilkan lembaran multilayer, *blown film*, *cast film*, tubular, *wire coating*, membran dual layer *hollow fiber* (DLHF) dan produk lainnya. Biasanya, komposisi larutan polimer memungkinkan pembentukan struktur padat selektif di lapisan luar dan struktur berpori di lapisan dalam yang mendukungnya. Beberapa polimer dengan selektivitas dan permeabilitas tinggi dapat dibuat menjadi membran *single layer hollow fiber* (SLHF) karena beberapa alasan, seperti viskositas rendah, kegagalan getas atau presipitasi yang lama. Beberapa polimer yang tidak dapat digunakan dalam proses fabrikasi membran konvensional dapat digunakan dalam metode *co-extrusion*. Dalam proses *co-extrusion*, satu larutan *dope* diekstrusi melalui lubang luar dari pemintal tiga lubang, sedangkan yang kedua secara bersamaan diekstrusi melalui lubang dalam. Koagulan internal harus dimasukkan pada saat yang sama melalui tabung pusat. *Co-extrusion* lebih menarik dibandingkan dengan proses

pemintalan konvensional karena alasan berikut seperti (Khan et al., 2018):

1. Mengurangi biaya dan waktu produksi karena berkurangnya jumlah polimer mahal untuk kinerja yang sama.
2. Mengurangi risiko menyebabkan cacat.
3. Peningkatan daya rekat antar lapisan.
4. Setiap lapisan memberikan sifat karakteristik yang diinginkan, seperti kekakuan, stabilitas panas, permeabilitas atau ketahanan. Tidak mungkin bagi setiap bahan tunggal untuk mencapai semua sifat ini.
5. Memungkinkan untuk membuat struktur multilayer dan multifungsi dalam satu proses.
6. Memberikan kemungkinan untuk menangani polimer yang memiliki permselektivitas yang sangat baik tetapi tidak dapat membentuk membran asimetris terintegrasi sendiri.

Dalam proses *co-extrusion* DLHF dibutuhkan *spinneret* dengan 3 lubang seperti pada Gambar 3. 4 dimana saluran tengah atau luar dalam *spinneret* dapat digunakan untuk membawa koagulan pertama (*bore fluid*). Di sisi lain, non-pelarut dalam bak koagulasi eksternal utama disebut koagulan kedua. Ketiga larutan (lapisan luar, lapisan dalam, dan *fluida bore*) secara bersamaan diekstrusi dari saluran masing-masing dan menyatu di lubang *spinneret*. HF yang baru keluar segera dikontakkan dengan koagulan eksternal

pertama (cairan *bore*). Setelah melewati celah udara, serat masuk ke bak koagulasi eksternal utama (koagulan kedua). Membran yang dihasilkan adalah DLHF. Morfologi permukaan membran dapat dikontrol oleh komposisi dan laju alir koagulan pertama (cairan *bore*).



Gambar 3. 4 *Spinneret* dari berbagai sisi; (a) tampak samping; (b) tampak bawah; (c) dimensi (Khan et al., 2018).

Pengembangan DLHF melalui proses *co-extrusion* dan intrusi fasa semakin maju dalam teknologi membran. Sejak awal, studi tentang DLHF telah diperluas ke aplikasi lain seperti pemisahan gas, distilasi membran, nanofiltrasi,

membran penukar ion, dan pervaaporasi. Pengembangan membran DLHF dengan kinerja pemisahan dan morfologi yang dibutuhkan masih bukan tugas yang mudah. Membran DLHF yang ideal untuk pemisahan gas harus memiliki beberapa aspek morfologi utama seperti Lapisan luar harus memiliki lapisan selektif padat tipis dengan sisi lumen berpori untuk mengurangi resistensi transportasi. Kemudian tidak ada delaminasi yang dapat diterima di antara lapisan DLHF membran untuk kinerja yang andal dan penggunaan jangka panjang. Dan rasio diameter DLHF dan ketebalan dinding dua kali lipat ($D/2\Delta h$) harus sekitar 2 untuk beroperasi pada tekanan tinggi. Oleh karena itu, studi tentang pemilihan bahan membran, sistem pelarut dan cairan lubang, serta optimalisasi kondisi pemintalan, harus dilakukan dengan cermat untuk mencapai kinerja membran DLHF yang diinginkan dengan tetap menjaga daya rekat dua lapisan (Khan et al., 2018).

Terdapat beberapa kendala teknis dalam pengaplikasian DLHF secara komersial. Misalnya, ketidakstabilan interlayer dan enkapsulasi kental. Istilah "ketidakstabilan interlayer" digunakan untuk menggambarkan perubahan ketebalan pada antarmuka antara dua lapisan yang dapat menjadi masalah serius ketika diperlukan lapisan ultrathin. Enkapsulasi kental adalah fenomena di mana polimer yang kurang kental cenderung mengenkapsulasi polimer kental tinggi ketika

mereka mengalir secara bersamaan melalui saluran. Selain itu, penyusutan membran, baik dalam arah aksial maupun radial, biasanya terjadi selama inversi fasa akibat pertukaran pelarut. Tingkat penyusutan memiliki efek kecil pada SLHF asimetris tetapi efek serius pada DLHF, karena dapat menyebabkan delaminasi antar lapisan dan meningkatkan resistensi perpindahan massa, mengurangi kekuatan mekanik dan dengan mudah menurunkan kinerja pemisahan membran. Membandingkan proses pemintalan lapisan ganda dengan topi SLHF, satu-satunya perbedaan untuk proses DLHF mungkin adalah struktur pemintal. *Spinneret* adalah elemen kunci dalam pemintalan DLHF. Struktur harus dirancang dengan baik untuk memenuhi persyaratan yang ketat. Untuk pemisahan gas, diameter luar HF umumnya antara 100 dan 300 μm dan diameter lubang luar *spinneret* kira-kira sekitar 500–800 μm . Ini adalah tugas yang menantang untuk menyesuaikan tiga lubang annular konsentris individu dalam ruang sekecil itu dan membuat aliran solusi membran di saluran. Fitur penting lainnya untuk membuat membran DLHF adalah pemilihan material karena kompatibilitas antara material kedua lapisan dapat menghilangkan delaminasi. Polimer berbiaya rendah dengan karakteristik mekanik dan termal yang sangat baik adalah pilihan terbaik untuk lapisan dalam polimer dengan permselektivitas dan permeabilitas tinggi sangat cocok untuk lapisan luar selektif yang tipis.

3.3 *Multi hollow fiber*

Definisi *multi hollow fiber* membran mengacu pada sebuah struktur membran yang terdiri dari beberapa lapisan atau kompartemen berongga yang dipisahkan oleh membran tipis. Setiap lapisan membran ini memiliki rongga internal yang dapat diisi dengan fluida atau gas. *Multi hollow* membran sering digunakan dalam berbagai aplikasi, terutama dalam teknologi pemisahan dan filtrasi. Struktur berongga pada membran ini memungkinkan pemisahan bahan atau komponen berbeda berdasarkan perbedaan ukuran, muatan, atau sifat molekulnya. Misalnya, dalam proses filtrasi air, membran *multi hollow* dapat digunakan untuk menghilangkan partikel-partikel terlarut atau mikroorganisme dari air dengan memanfaatkan perbedaan ukuran pori pada lapisan-lapisan membran.

Keuntungan utama dari *multi hollow* membran adalah peningkatan luas permukaan yang tersedia untuk proses pemisahan. Dengan adanya beberapa lapisan membran berongga, luas permukaan efektifnya dapat ditingkatkan secara signifikan. Hal ini memungkinkan laju pemisahan yang lebih tinggi dan meningkatkan efisiensi proses. Selain itu, *multi hollow* membran juga dapat digunakan dalam aplikasi seperti pertukaran gas, proses desalinasi, pemurnian protein, dan pemisahan zat kimia dalam industri. Desain dan material membran yang digunakan

dapat bervariasi tergantung pada kebutuhan aplikasi tertentu.

Multi hollow membran dapat diproduksi dengan berbagai cara. Lima kategori umum metode produksi untuk membran termasuk fase inversi (PI), polimerisasi antarmuka (IP), pelapisan, pencangkakan dan multilayer polielektrolit (PEM). Di samping ini, kami mengusulkan penambahan kimia dalam kategori keenam (Shere et al., 2022).

Berikut adalah beberapa keunggulan *multi-bore hollow fiber* membran (Wypysek, Rall, et al., 2021):

1. Efisiensi Pemisahan yang Tinggi: Dengan desain *multi-bore*, jumlah pori pada membran menjadi lebih banyak dan permukaan area yang tersedia juga semakin luas. Hal ini membuat proses pemisahan dapat dilakukan dengan lebih cepat dan efektif.
2. Kapasitas Produksi yang Lebih Tinggi: Desain *multi-bore* memungkinkan aliran fluida melalui banyak pori sekaligus sehingga kapasitas produksinya juga meningkat.
3. Hemat Biaya: Teknologi *multi-bore* dapat menghemat biaya karena mampu meningkatkan efisiensi pemisahan tanpa perlu menambah jumlah membran atau ukuran tangki pengolahan.
4. Daya Tahan Mekanik yang Baik: Struktur *multi-bore* memberikan keuntungan dalam hal daya tahan mekanik

karena mampu menanggulangi tekanan atau gaya gesek yang tinggi tanpa merusak struktur membrannya.

5. Mudah Dipelihara dan Digunakan: Membran dengan desain *multi-bore* biasanya mudah dipelihara dan digunakan karena memiliki sifat-sifat seperti kemudahan pembersihan, ketangguhan terhadap benda asing, serta daya tahan terhadap suhu tinggi atau kondisi lingkungan ekstrim lainnya.
6. Menghasilkan Produk Berkualitas Tinggi: Kinerja pemisahan dari teknologi *multi-bore* memungkinkan produk-produk hasil filtrasi memiliki kualitas tinggi sehingga cocok untuk digunakan di berbagai industri seperti air minum, farmasi, makanan dan minuman, serta kimia.

Meskipun memiliki banyak keunggulan, *multi-bore hollow fiber* membran juga memiliki beberapa kelemahan sebagai berikut

1. Kemungkinan Terjadinya *Fouling*: Membran dengan desain *multi-bore* dapat mudah terkena *fouling* atau penumpukan partikel pada permukaannya akibat strukturnya yang kompleks.
2. Sulit Dalam Pembersihan: Struktur *multi-bore* membuat membran sulit dibersihkan secara menyeluruh karena jumlah pori dan saluran yang lebih banyak sehingga memerlukan teknik pembersihan khusus.

3. Rentan Terhadap Kerusakan Akibat Getaran: Desain *multi-bore* tidak cocok untuk aplikasi di lingkungan dengan getaran tinggi karena dapat merusak struktur membran.
4. Lebih Mahal Dalam Pembuatan: Biaya pembuatan membran dengan desain *multi-bore* cenderung lebih mahal dibandingkan dengan jenis lainnya seperti *single bore* karena proses produksi dan bahan material yang digunakan lebih rumit dan spesifik.
5. Kapasitas Produksi Tergantung pada Ukuran Tangki Pengolahan Air: Jumlah kapasitas produksi dari membran ini terbatas oleh ukuran tangki pengolahan air sehingga harus dipertimbangkan dalam pemilihan teknologi filtrasi yang tepat sesuai dengan skala industri maupun aplikasi tertentu.

Membran kapiler *multi-hollow* dibuat menggunakan metode inversi/sintering fasa gabungan dan komposisi suspensi keramik tercantum pada Tabel 3.2.

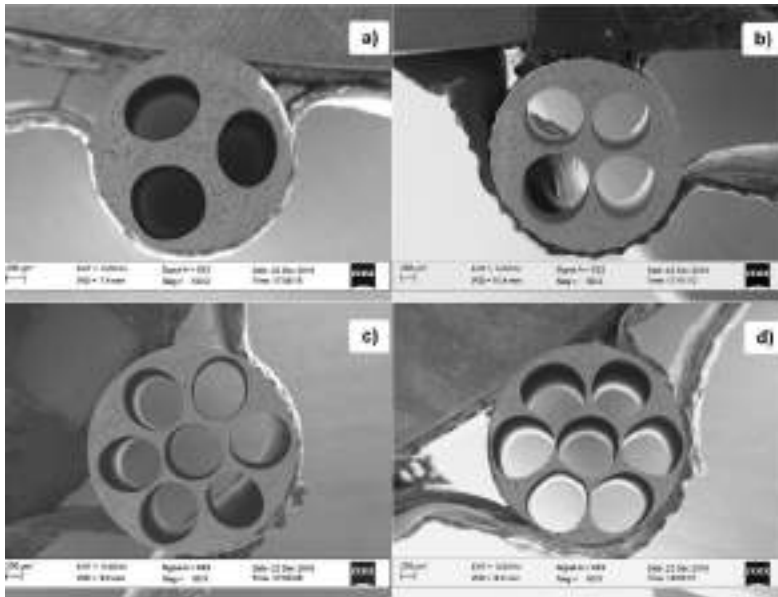
Tabel 3. 2 Komposisi suspensi keramik dan parameter pemintalan

Komposisi Suspensi	LSCF (wt%)	67.0			
	DMSO atau NMP (wt%)	25.8			
	PESf (wt%)	6.7			
	Dispersant (wt%)	0.5			

Parameter Pemintalan		3- bore	4- bore	7-bore DMSO	NMP
	Tingkat ekstrusi obat bius (cm ³ min ⁻¹)	9	9	8	9
	Bore cairan (air) (cm ³ min ⁻¹)	12	14	14	18
	Celah udara (cm)	0	0	0	1

Suspensi keramik dicampur secara menyeluruh dengan penggilingan bola sebelum menghilangkan gelembung udara menggunakan sistem vakum, dan kemudian berputar melalui dirancang khusus *spinneret* untuk mendapatkan prekursor membran kapiler multi-lubang. Di dalam penelitian ini, pemintal tiga kali lipat, tetra, dan tujuh lubang digunakan, yang konfigurasi geometris ditunjukkan pada Gambar 3.5. Untuk 3 lubang dan 4 lubang membran, DMSO digunakan sebagai pelarut untuk suspensi keramik; untuk membran 7-bore, digunakan dua jenis suspensi, di mana DMSO atau NMP adalah pelarutnya, dan membran yang diperoleh akan menjadi dinamai sebagai 7-bore-DMSO dan 7-bore-NMP di bagian berikut, masing-masing. Parameter pemintalan digunakan untuk mendapatkan *multi-bore* membran kapiler juga

dirangkum dalam Tabel 1. Setelah kering, prekursor kemudian dipanaskan hingga 600 °C dengan laju 2 °C min⁻¹ dan kemudian tetap pada suhu ini selama 2 jam untuk menghilangkan pengikat polimer, dilanjutkan dengan sintering pada suhu 1350 °C selama 5 jam dengan laju pemanasan sebesar 3 °C min⁻¹. Akhirnya, tungku didinginkan pada laju 3 °C min⁻¹ sampai suhu kamar (Chia et al., 2017). Berikut hasil struktur makro dari multi *bore* membran:

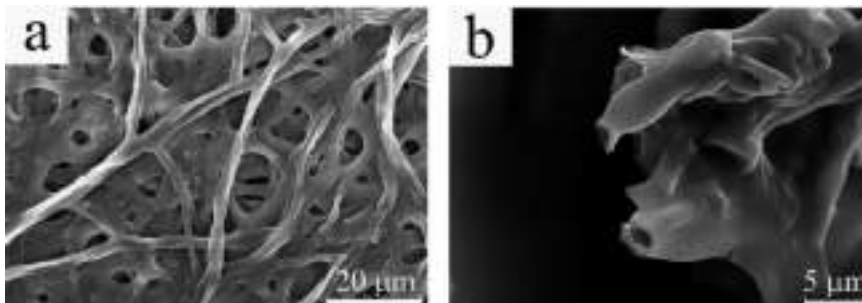


Gambar 3.5 a) 3-bore, (b) 4-bore (c) 7-bore DMSO dan (d) 7-bore-NMP LSCF

3.4 *Branched Hollow fiber*

Branched-hollow fiber (serat beringga bercabang) dengan pori-pori yang telah ditentukan merupakan pemisahan partikel besar makromolekul (mikrofiltrasi dan ultrafiltrasi). Ukuran pori akan menentukan sifat pemisahannya, dimana selektifitas yang tinggi dapat diperoleh jika ukuran pori lebih kecil daripada ukuran partikel yang akan dipisahkan. Pembuatan *hollow fiber* bercabang berpotensi digunakan dalam mikrofluida, pembuluh darah buatan, dan rekayasa jaringan. Metode pemrosesan yang digunakan di masa lalu untuk menghasilkan *hollow fiber* berbasis alginat atau hidrogel didasarkan pada chip mikrofluida, perangkat nozel mikro, dan sistem tenun. *Hollow fiber* multi-pori dibuat menggunakan sistem pelarut yang dipariasikan dengan proses *electrospinning*. Kemampuan yang menguntungkan untuk menghasilkan ukuran fitur kapiler dalam kisaran sub-mikro-meter menunjukkan potensi 2PP untuk menghasilkan *hollow fiber*, dan membuka fleksibilitas yang belum pernah ada sebelumnya dalam desain 3D dibandingkan dengan teknologi lainnya. *Hollow fiber* dengan pori-pori yang telah ditentukan sebelumnya dengan berbagai ukuran dan bentuk juga dapat dengan mudah dihasilkan, memungkinkan pasokan nutrisi yang cukup ke sel, misalnya, dalam lingkungan mikrofluida *in-vitro* dengan menggunakan 2PP untuk membuat saluran mikrofluida telah didemonstrasikan

di masa lalu. Misalnya, polimerisasi penyerapan multifoton bertopeng area besar digunakan untuk menghasilkan saluran dengan penampang persegi panjang di *Fluor-SU-8*, formulasi campuran khusus dari resin SU-8 yang tersedia secara komersial (Bieda et al., 2015).



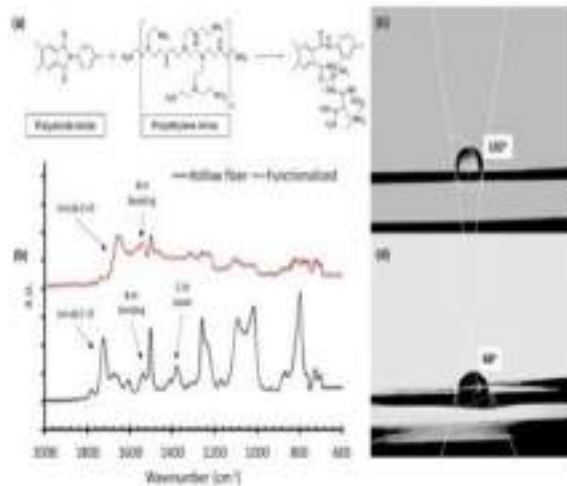
Gambar 3. 6 Branched *hollow fiber* (Qiu et al., 2010)

Branched hollow fiber merupakan jenis modul modern. Memiliki bentuk serat-serat halus yang apabila diperbesar terlihat seperti modul tabung yang memiliki diameter dalam sebesar 50 μm dan diameter luar sebesar 100-200 μm. Dengan ukuran sekecil itu, modul ini memiliki luas kontak yang sangat besar. Sebuah modul membran *hollow fiber* dengan luas permukaan 300 m² akan membutuhkan 1000 km serat dimana luas kontak tersebut 10 kali lebih besar dibandingkan dengan luas kontak modul *spiral wound*. Sehingga sebagai contoh, dalam aplikasi *reverse osmosis* tekanan tinggi atau pemisahan gas, akan diperlukan 1 juta membran ukuran 100 μm dalam sebuah modul untuk luas penampang kontak sebesar 315 m².Berkat luas

penampangnya yang besar, dalam penggunaannya modul ini tidak memerlukan energi yang tinggi. Namun karena ukurannya yang sangat kecil dan terdiri dari banyak sekali serat dalam satu modul, maka akan sangat sulit untuk membersihkannya dari pengotor tapi hal ini dapat diatasi dengan cara *backflush*. Ukurannya yang sangat kecil pula yang membuatnya rentan terhadap tekanan yang tinggi, sehingga dalam penggunaannya, tekanan operasi yang diperbolehkan yaitu dibawah 150 psig. Modul *hollow fiber* ini memiliki harga yang lebih murah dibandingkan dengan modul-modul lainnya, yaitu sekitar US\$ 5-50. Proses pembuatan modul ini tidaklah rumit, namun membutuhkan peralatan yang mahal. Pemilihan modul membran yang akan digunakan harus disesuaikan dengan kebutuhan penggunaannya dan beberapa faktor lain. Faktor yang utama disini adalah harga. Umumnya, modul untuk tekanan tinggi akan lebih mahal dibandingkan dengan modul untuk tekanan rendah atau vakum (G. Han et al., 2018).

Salah satu aplikasi *branched hollow fiber* adalah penggunaan PEI pada saat meningkatkan hidrofilitas permukaan *hollow fiber* PAI untuk menyaring *Ciproflaxin* dari aliran air. *Hollow fiber* berbasis PAI difungsikan untuk meningkatkan penyerapan karbon dioksida. Demikian pula, *hollow fiber* yang diterima difungsikan menggunakan larutan PEI-airIsopropanol (5:5:90% berat) untuk meningkatkan hidrofilitas permukaan. Gugus amina primer dari PEI

bercabang menyerang karbonil (C=O) dari tulang punggung PAI yang mengakibatkan terbukanya cincin imida. Perbandingan *spektrum* FTIR *hollow fiber* yang tidak diberi perlakuan dan yang difungsikan menunjukkan perubahan struktur PAI setelah reaksi fungsionalisasi . Puncak serapan imida (C-N) pada 1360 cm hilang berongga yang difungsikan dan puncak serapan pada serat karbonil (C=O) 1 dan 1730 cm pada 1750 cm lebih lemah jika dibandingkan dengan *hollow fiber* netral. Berikut Gambar 3.7 amina primer dari PEI bercabang (Mishra et al., 2021).



Gambar 3. 7 Efek fungsionalisasi *hollow fiber*: (a) pemutusan ikatan amida C–N pada tulang punggung PAI, (b) Spektrum FTIR mendukung pemutusan ikatan, dan perubahan hidrofilisitas *hollow fiber* sebelum (c) dan setelah (d) fungsionalisasi

Untuk membuat membran substrat *hollow fiber*, dipilih fraksi PI 17,5% berat dalam campuran dengan PES. Lubang membran serat dibuat dalam pemintalan cum NIPS terus menerus di mana diperoleh diameter luar dan dalam dari *hollow fiber* membran diukur sebagai 0,87 mm dan 0,69 mm, masing-masing. Membran buatan dianalisis dengan pencitraan SEM persilangan Perangkat lunak digunakan untuk menganalisis distribusi ukuran pori. Menggunakan MWCO dari membran buatan diperkirakan dan disajikan bersama dengan distribusi ukuran pori dan jari-jari pori rata-rata. Harus disebutkan bahwa kondisi fabrikasi dengan struktur seperti jari lurus untuk meminimalkan resistensi lapisan substrat. Ini akibatnya meminimalkan tekanan transmembran yang diperlukan. Cincin yang terlihat pada gambar penampang disebabkan oleh efek pemisahan fasa dari air non-pelarut sebagai koagulan dalam (cairan *bore*) dan koagulan eksternal (dalam bak koagulasi). Membran *hollow fiber* diatur untuk mendapatkan membran (K. S. Goh et al., 2020).

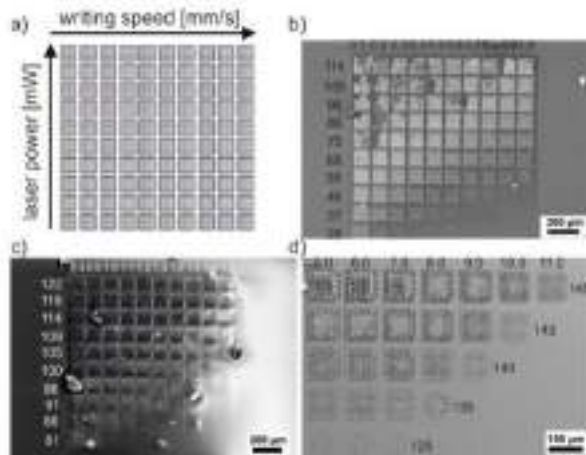
Pembuatan *hollow fiber* bercabang dengan pori-pori menggunakan parameter proses yang tepat dari bagian sebelumnya, dibuat *hollow fiber* bercabang dengan panjang 3,5 mm dan lebar 0,55 mm (Gambar. 3.10). Geometri dan ukuran *hollow fiber* kompleks yang diproduksi dipilih sesuai dengan perangkat *lab-on-chip* yang ada yang membutuhkan

geometri ini. Diameter dalam (ID) serat diatur menjadi 90 μm dan diameter luar (OD) menjadi 150 μm . Dua pori kecil (diameter: 30 μm) ditempatkan di atas kedua lengan struktur untuk menunjukkan kemungkinan penambahan elemen 3D lainnya. Pori-pori ini dapat, misalnya, memfasilitasi difusi nutrisi melalui jaringan serat untuk mensuplai sel.

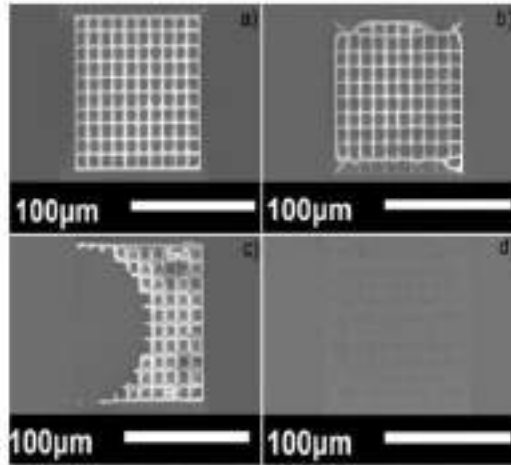
3.2 Evaluasi kualitas struktur sebagai fungsi kecepatan tulis dan daya laser.

Struktur kisi ditulis melalui 2PP untuk menentukan kecepatan tulis maksimum yang layak dalam *OrmoComp* (Gambar. 3.8). Kecepatan tulis bervariasi antara 0,1 dan 11 mm/s, sedangkan daya laser rata-rata ditetapkan antara 28 dan 145 mW. Struktur kisi memiliki ukuran total 100 μm x 100 μm dengan struktur dalam terpisah 10 μm (10 kali 10 sel). Tata letak skematis dari analisis yang dilakukan dan hasilnya dapat diamati pada Gambar. 3.8a. Analisis *Scanning Electron Microscopy* dari struktur kisi mengungkapkan perilaku ambang dari proses 2PP (Gambar. 3.8b – 3.8d). Ambang polimerisasi didefinisikan sebagai tingkat intensitas laser di mana reaksi fotokimia menjadi tidak dapat diubah. Oleh karena itu, kemampuan untuk membuat kisi pada Gambar. 3.8b – 3.8d sangat bergantung pada rasio daya laser dan kecepatan tulis. Meskipun pengembangan parameter awal menghasilkan hasil yang baik dengan daya laser rata-rata 86 mW pada kecepatan penulisan 0,8 mm/dtk (Gambar. 3.9a), pengurangan waktu siklus merupakan masalah penting

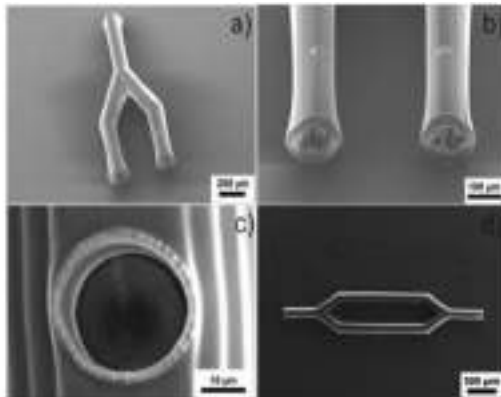
untuk dipertimbangkan. Oleh karena itu, kecepatan penulisan diatur ke 5,0 mm/dtk pada daya laser rata-rata 105 mW. Serat foto-polimerisasi dihasilkan lapis demi lapis dengan jarak lapisan 1,0 μm (arah z) dan lebar garis 0,5 μm (bidang xy). Karena mekanisme fabrikasi serat, yaitu pemrosesan dan penetasan lapis demi lapis (pengisian bergantian dari setiap lapisan), bahan terpolimerisasi terkena sinar laser lebih sering daripada satu baris struktur kisi seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 3.9. Faktanya, polimerisasi lapisan kedua serat tidak dapat dihindari tanpa menghindari interaksi sinar laser dengan lapisan pertama. Akibatnya, material "lebih banyak" terpolimerisasi yang memungkinkan kecepatan penulisan yang jauh lebih tinggi dengan daya laser yang sedikit lebih tinggi. Gambar 3.10a menunjukkan potongan *hollow fiber* buatan. Distorsi kecil diamati pada dinding luar, dekat bukaan serat (Gambar. 3.8b). Fenomena ini dapat dijelaskan dengan pelepasan gas pelarut setelah pengembangan pasca paparan yang menyebabkan penyusutan volume (Bieda et al., 2015).



Gambar 3. 8 Matriks evaluasi struktur kisi untuk menentukan parameter pemrosesan untuk proses 2PP: a) Skema tata letak dengan nilai kecepatan tulis (sumbu horizontal) dan daya laser (sumbu vertikal); gambar SEM untuk b) kecepatan tulis 0,1 – 1,0 mm/dtk dan daya laser 28 – 114 mW; c) kecepatan tulis 0,8 – 1,7 mm/dtk dan daya laser 81 – 122 mW; d) Kecepatan tulis 5,0 – 11,0 mm/dtk dan daya laser 129 – 145 mW (Bieda et al., 2015).



Gambar 3. 9 Struktur kisi di OrmoCompa) v = 0,8 mm/s, Pavg = 86 mW; b) v = 1 mm/s, Pavg = 86 mW; c) v = 0,5 mm/s, Pavg = 105 mW; d) v = 0,7 mm/s, Pavg = 37 mW. (Bieda et al., 2015)

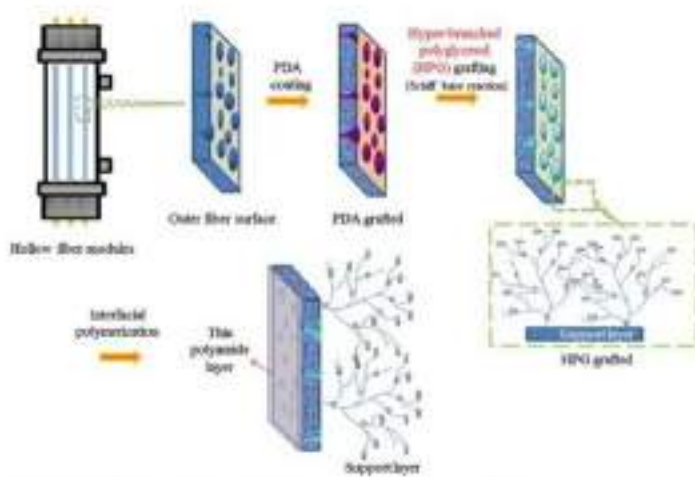


Gambar 3. 10 *Hollow fiber* bercabang yang dibuat melalui 2PP OrmoCompa) Pemotongan *hollow fiber* bercabang yang dibuat melalui 2PP

OrmoComp; b) penutupan ujung serat; c) pori dengan diameter 28,5 μm ; d) serat berlubang lengkap: daya laser rata-rata = 105 mW, kecepatan tulis = 5,0 mm/s, panjang = 3,5 mm, diameter luar = 150 μm , diameter dalam = 90 μm (Bieda et al., 2015)

Antifouling Hollow-Fiber Membrans PRO fouling dapat dikurangi dengan *pretreatment* yang efektif, mengoptimalkan kondisi operasi, dan pembersihan membran. Namun, *fouling* organik dan mikroba tidak dapat sepenuhnya dimusnahkan karena organisme yang aktif secara biologis dapat tumbuh, berkembang biak, dan berpindah tempat. Oleh karena itu, mengembangkan membran *antifouling* yang kuat merupakan metode penting untuk menurunkan kecenderungan *fouling*, terutama ketika air limbah asli digunakan sebagai larutan umpan yang menghadap substrat berpori. Baru-baru ini, membran *hollow fiber antifouling* TFC-PRO yang dirancang secara molekuler dengan mensintesis poli gliserol (HPG) bercabang hiper dendritik dengan situs penahan, dan mencangkokkannya ke penyangga serat PES dengan 194 Proses Gradien Salinitas Berbasis Membran untuk Pengolahan Air dan Pembangkit Listrik bantuan polidopamin (Gambar. 3.11). Dibandingkan dengan membran murni dan membran termodifikasi lainnya, membran yang dicangkokkan HPG menunjukkan ketahanan

fouling yang baik terhadap berbagai jenis bakteri. Dalam uji PRO tekanan tinggi, membran yang dicangkokkan HPG menunjukkan penurunan fluks yang jauh lebih lambat terhadap waktu.



Gambar 3. 11 Ilustrasi pencangkokan polimer hiper-cabang pada membran PRO. 194 Proses Gradien Salinitas Berbasis Membran untuk Pengolahan Air dan Pembangkit Listrik PDA, Polidopamin. Hak Cipta (2014) American Chemical Society.

Reversibilitas *fouling* juga ditingkatkan dengan modifikasi permukaan. Belakangan, Cai *et al.* Memperkenalkan komponen *2-methacryloyloxyethyl lipoate* ke dalam kopolimer *zwitterionic* untuk menyediakan situs

pencangkakan yang cukup ke membran PES yang telah diberi perlakuan polidopamin. Kopolimer zwitterionik yang dicangkakkan membran tidak hanya menunjukkan ketahanan *fouling* yang sangat baik terhadap perlekatan bakteri, tetapi juga menunjukkan pemulihan fluks yang jauh lebih baik hingga 98% dalam uji air limbah kota yang terkonsentrasi (G. Han et al., 2018).

Hollow fiber yang difungsikan, pengaturan serupa untuk deposisi lapisan ganda in-situ disiapkan. Larutan PMAA dengan muatan negatif awalnya diperkenalkan ke rakitan *hollow fiber* karena fungsionalisasi menghasilkan permukaan bermuatan positif. Lapisan PEO/PMAA diendapkan pada permukaan *hollow fiber* menggunakan proses iteratif dari larutan polimer bolak-balik yang mengalir (5 menit untuk lapisan pertama dan 2 menit untuk selanjutnya) dengan langkah pembilasan air dan pengeringan udara masing-masing selama 30 detik. Rakitan pompa jarum suntik digunakan untuk memberi makan larutan PEO dan PMAA sebagai alternatif ke anulus pada laju alir 10 mL / menit pada kondisi sekitar. Larutan PEO diperkenalkan pada awalnya untuk membentuk lapisan bermuatan positif di atas permukaan *hollow fiber* netral. 10, 15, dan 20 lapisan bi diendapkan pada *hollow fiber* untuk mempelajari perilaku permeasinya dan ini dilambangkan sebagai [HF-PEO²/PMAA²], [HFPEO²/ PMAA²], dan [HF-PEO²/PMAA²]. Peningkatan lapisan membran ganda

meningkatkan kelarutan CO₂ yang pada gilirannya meningkatkan permeabilitas CO₂ serta selektivitas CO₂:N₂. Kinerja membran dapat disesuaikan dengan memanipulasi interaksi antara lapisan alternatif dan antara substrat dan film selektif. Membran ini memiliki struktur yang seragam, kompak, konformal, padat, dan homogen yang digambarkan dari perilaku mekanisnya dan gambar mikroskop elektron pemindaian pembesaran tinggi. Pergeseran maksimum ujung nanoindentor berada di antara 500 dan 600 nm, dan modulus elastisitas rata-rata dan kekerasan 10 lapis ganda [PEO₂/PAA₂] pada lembaran Torlon© datar diukur dengan analisis nanoindentasi, adalah 6,03 ± 1,32 GPa dan 0,24 ± 0,12 GPa, masing-masing, dengan nilai sebanding masing-masing 6,50 ± 1,32 GPa dan 0,26 ± 0,09 GPa untuk [f-HF-PEO₂/PAA₂]₁₀ (Mishra et al., 2021).

BAB IV

MATERIAL MEMBRAN

HOLLOW FIBER

Pemilihan bahan yang sesuai untuk membuat membran untuk aplikasi tertentu merupakan faktor kunci yang memerlukan penyelidikan lebih lanjut. Pemilihan bahan membran memungkinkan kontrol atas sifat dan besarnya interaksi antara permeat dan membran. Ini menentukan kepadatan pengepakan dan mobilitas segmen rantai membran. Meskipun pemilihan bahan dan prosedur preparasi membran mempengaruhi mekanisme transportasi, stabilitas membrane, kinerja membran, dan menentukan morfologi membrane yang mempengaruhi laju permease oleh sifat fisik (K. R. Lestari, 2020)

Membran dapat dikategorikan menurut sifat bahan yang digunakan untuk fabrikasi, karakteristik, aplikasi, dan mekanisme reaksinya. Berdasarkan jenis material yang digunakan, membran diklasifikasikan menjadi membran organik (misalnya polimer) dan anorganik. Membran polimer berbasis organik memiliki sifat kimia dan mekanik yang baik. Sebaliknya, membrane anorganik yang terdiri

dari oksida, logam, atau karbon dasar memiliki stabilitas yang lebih baik dalam kondisi yang keras seperti tekanan atau suhu tinggi dan sangat selektif dan permeabel untuk molekul tertentu (Mulder, 1996).

4.1 Membran Polimer

Polimer kebanyakannya masih dijadikan bahan utama dalam pembuatan membran. Membran dari bahan polimer memiliki keunggulan mudah dibuat, dapat dimodifikasi sesuai yang diinginkan, menghasilkan fluks air yang besar dengan ketahanan anti-*fouling* yang sangat baik. Akan tetapi, bahan polimer ini juga memiliki kelemahan yaitu rentan terhadap zat kimia dan suhu yang tinggi (Ismail et al., 2020). Membran *hollow fiber* dari bahan polimer dibuat dengan fase inversi banyak diperjualbelikan secara komersial karena skala produksi yang sangat besar dan juga sangat diperlukan oleh industri pengolahan air (Chung & Feng, 2021).

Kelebihan modul *hollow fiber* sendiri seperti yang diketahui bahwa konfigurasinya mempunyai luas permukaan yang sangat besar dibandingkan volume yang dihasilkan. Sehingga modul *hollow fiber* memerlukan bahan dasar yang juga mampu menghasilkan volume lebih banyak. Bahan polimer sendiri biasanya dibuat dengan memiliki fase laju inversi dengan elektrospinning. Fase laju inversi ini berdampak signifikan terhadap larutan *dope*

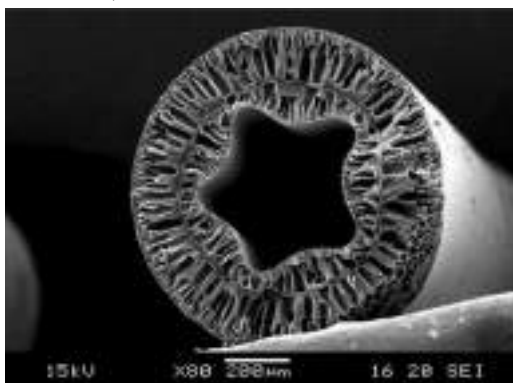
polimer karena dapat merubah struktur pori dan porositas membran (T. Zhang et al., 2018). Membran dari bahan polimer tak jarang juga bermasalah oleh *fouling* yang parah pada pengolahan air limbah. Untuk mengatasinya dilakukan modifikasi berupa permukaan membran, pencampuran larutan polimer dan kombinasi partikel matriks membran (Ismail et al., 2020).

Pada produksi membran yang terpenting adalah menentukan bahan dan metode yang sesuai agar sesuai dengan hasil membran yang diinginkan. Bahan polimer yang sering dimanfaatkan dengan modul *hollow fiber* yaitu (Ismail et al., 2020):

1. Poliakrilonitril (PAN)

Poliakrilonitril merupakan polimer hidrofilik yang memiliki karakteristik kestabilan kimia dan mekanik yang cukup baik dalam pengolahan membran (Ryšánek et al., 2019). Selain itu, dapat bekerja di berbagai rentang pH dan suhu pada pengaplikasiannya (Dutta et al., 2020). Karena dapat bekerja pada berbagai rentang suhu, bahan polimer ini tidak mempunyai sifat toksik dan tidak berpengaruh pada hasil pengolahan air (Ryšánek et al., 2019). Gugus nitril yang ada pada poliakrilonitril turut membantu dalam proses modifikasi pembuatan membran (Dutta et al., 2020). Gugus nitril ini berperan sebagai akseptor hidrogen dengan pelarut kimia. Namun modifikasi membran dengan bahan poliakrilonitril juga harus diperhatikan ukuran diameter

serat poliakrilonitri dan ukuran pori membran yang akan direncanakan agar dapat menghasilkan luas permukaan yang sesuai. Serat dari poliakrilonitri umumnya dimanfaatkan dalam dunia medis sebagai pembalut luka dan dalam industri sebagai prekursor pembuatan serat karbon (Ryšánek et al., 2019). Pada pengaplikasiannya dalam modul *hollow fiber*, mempunyai kelebihan yaitu tekanan operasi yang rendah, pembuatan sederhana, dan rasio antara permukaan dan volume fluks yang dihasilkan tinggi (Karmakar et al., 2018).



Gambar 4. 1 Membran dari bahan Poliakrilonitri (Chung & Feng, 2021)

Tabel 4.1 Parameter *spinning* membran *Hollow fiber* Poliakrilonitri (Tsai et al., 2018)

Kondisi Parameter	Range	Satuan
Komposisi larutan <i>dope</i>	20% PAN/NMP	Wt%
Suhu larutan <i>dope</i>	50	°C
Komposisi larutan <i>bore</i>	H ₂ O/NMP 100/0; 90/10; 80/20	-

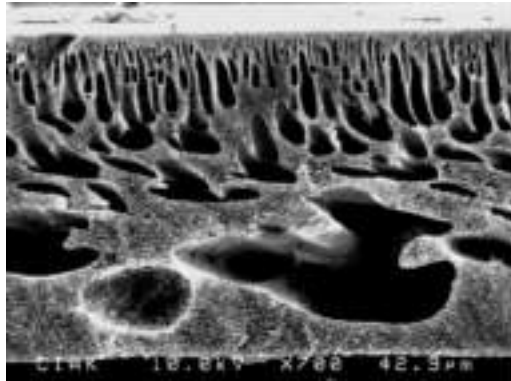
Suhu larutan <i>bore</i>	50	°C
Koagulan eksternal	H ₂ O	-
Suhu wadah koagulasi	50	°C
Celah udara	0	cm
Tingkat ekstrusi larutan <i>dope</i>	4	atm
Laju aliran cairan <i>bore</i>	2	ml/menit
Suhu air	Suhu ruang	°C
Diameter <i>spinneret</i>	OD/ID, 0,83/0,53	mm

2. Polisulfon (PSF)

Polisulfon merupakan polimer sintesis yang memiliki berat molekul tinggi dengan kestabilan sifat mekanik dan kimia yang sangat baik. Bahan polimer ini stabil digunakan dan resistensi yang luar biasa terhadap bahan kimia berbahaya (Matveev et al., 2020). Kualitas polisulfon menjadikannya cocok dimanfaatkan sebagai bahan pembuatan membran. Namun, polisulfon memiliki kekurangan yaitu bersifat hidrofobik dan hasil fluks permeal yang rendah. Karena itu dibutuhkan modifikasi kombinasi antara polisulfon dengan polimer hidrofilik (Modi et al., 2019). Pengaplikasiannya dengan modul *hollow fiber* cocok digunakan pada mikrofiltrasi, ultrafiltrasi, nanofiltrasi dan pemisahan gas (Ilya Borisov et al., 2019). Umumnya, polimer polisulfon adalah polimer yang paling banyak digunakan untuk membran ultrafiltrasi dan mikrofiltrasi karena

kekuatan penyerapan yang tinggi, tahan bahan kimia, dan serta tahan suhu panas (Elma et al., 2022)

Polisulfon memiliki berat molekul yang sesuai untuk dijadikan bahan utama pembuat membran. Meski bersifat hidrofobik, polisulfon memiliki kekuatan mekanik yang stabil, tahan terhadap zat kimia dengan pH 2 – 13, tahan kaustik dan juga klorin sedang. Kekuatan mekanik polisulfon yang unggul menjamin membran dapat digunakan dengan tekanan operasi yang tinggi. Namun, fluks yang diperoleh dari filtrasi rendah karena sifat hidrofobik membran polisulfon. Untuk meningkatkan permeabilitas molekul air, membran polisulfon memerlukan beberapa modifikasi permukaan. Menurut studi dalam literatur, penggabungan nanopartikel hidrofilik dapat meningkatkan laju fluks membran PSf yang tinggi. Partikel nano termasuk, namun tidak terbatas pada, tabung nano karbon, *graphene* oksida, perak, seng oksida, titanium dioksida (TiO₂), dan nanopartikel seng oksida (ZnO). Karena hidrofilisitasnya yang tinggi, biaya rendah, dan kurangnya toksisitas bagi manusia, nanopartikel ZnO adalah salah satunya dan dianggap sebagai oksida logam yang menjanjikan untuk memodifikasi membran polisulfon (Pechmani et al., 2021).



Gambar 4. 2 Permukaan Membran dari bahan Polisulfon (Pandele et al., 2020)

Tabel 4.2 Parameter spinning membran *Hollow fiber* Polisulfon (Plisko et al., 2021)

Kondisi Parameter	Range	Satuan
Dimensi spinner	Diameter dalam 1,0 Diameter luar 1,8	mm
Laju aliran larutan <i>dope</i>	6 - 7	gram/menit ⁻¹
Suhu larutan <i>dope</i>	20 dan 45	°C
Larutan <i>bore</i>	Air suling	-
Suhu larutan <i>bore</i>	30 - 80	°C
Laju aliran larutan <i>bore</i>	10 - 30	ml/menit ⁻¹
Koagulan eksternal	Air keran	-
Suhu kagulan eksternal	20	°C
Celah udara	0,9 – 1,0	m
Suhu ambien	20	°C
Kelembapan	70	%

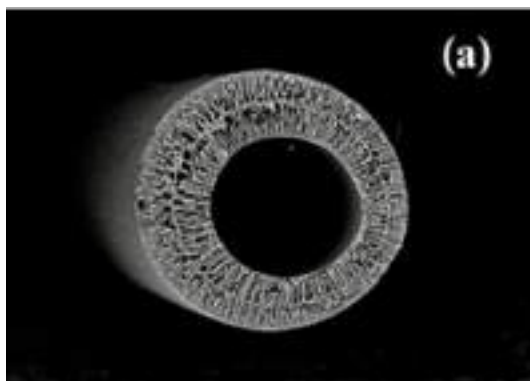
3. Selulosa Asetat (CA)

Selulosa asetat merupakan polimer alam turunan dari selulosa dengan sifat hidrofilik yang baik digunakan pada pembuatan membran (Nazarian et al., 2019). Selulosa memiliki struktur gugus rantai kimia yang kuat karena kristalisasi yang seragam serta keteraturan dan kekompakan yang sangat baik, kekompakan dan keteraturan yang sangat baik (Wafiroh et al., 2021). Karakteristiknya yaitu biaya produksi rendah, mobilitas rantai kimia tinggi, dengan hasil fluks sedang (Mubashir et al., 2019). Selulosa sangat cocok untuk desalinasi dan filtrasi air karena sifat hidrofilik dan hidrofobiknya yang ekuivalen dan tahan sterilisasi (Chung & Feng, 2021). Selulosa asetat juga efektif digunakan untuk memisahkan zat arsenik dari air (Kumar et al., 2019). Namun selulosa asetat memiliki pada proses ultrafiltrasi, nanofiltrasi dan reverse osmosis (Kumar et al., 2019).

Kombinasi selulosa asetat dan agen penyerap telah berhasil digunakan oleh banyak peneliti. Selulosa asetat sebagian besar digunakan sebagai adiktif ultrafiltrasi dengan biaya rendah, selulosa asetat dikenal dengan hidrofilisitasnya, fluks sedang, properti adsorpsi, dan sumber daya yang selalu ada di alam. Namun, membran *Hollow fiber* dari bahan selulosa asetat murni memiliki kelemahan yaitu sifatnya yang rapuh (Kumar et al., 2019). Pada pengaplikasiannya dengan modul *hollow fiber* dengan menggunakan pelarut organik (Chung & Feng, 2021). Tetapi

dengan teknik pencampuran komposisi yang tepat, bahan ini menjanjikan dala meningkatkan sifat membran yang diperlukan.

Bila dibandingkan dengan polimer lain, selulosa asetat menunjukkan kualitas unggul dalam hal sifat fisik dan kimia yang luar biasa, suhu transisi kaca yang tinggi, sifat mekanik yang lebih baik, dan ketahanan terhadap hidrolisis. Karena itu penerapannya banyak dimanfaatkan pada ultrafiltrasi, nanofiltrasi dan mikrofiltrasi (Kumar et al., 2019).



Gambar 4. 3 Membran dari bahan Selulosa Asetat (Kumar et al., 2019)

Tabel 4. 3 Parameter spinning membran *Hollow fiber* Selulosa Asetat (Mubashir et al., 2019)

Kondisi Parameter	Range	Satuan
Larutan <i>dope</i>	Diameter dalam 1,0 Diameter luar 1,8	mm
Konsentrasi selulosa	CA/NMP	-

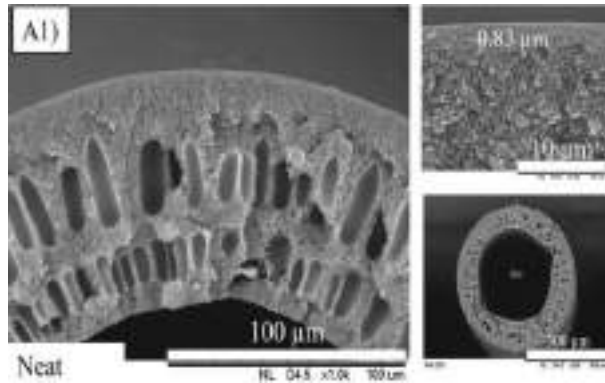
Kondisi Parameter	Range	Satuan
asetat		
Larutan <i>bore</i>	90/10 NMP/air	Wt%
Laju aliran larutan <i>dope</i>	3	ml/menit
Laju aliran larutan <i>bore</i>	0,9	ml/menit
Suhu Koagulan	25	°C
Dimensi spinner	Diameter dalam 0,4 Diameter luar 0,8	mm

4. Poliamida (PA)

Poliamida merupakan polimer hidrofilik yang dapat terbentuk secara alami maupun sintesis yang terikat pada gugus metilen dan amida dengan ikatan hidrogen yang kuat (Jeon et al., 2018). Polimer ini memiliki karakteristik sifat fisikokimia dan termal yang sangat baik, termasuk ketahanan radiasi dengan sifat semikonduktor yang luar biasa (Chung & Feng, 2021). Poliamida memiliki ketahanan suhu hingga lebih dari 300°C dengan bentuk tetap dan tidak melewati transisi fase leleh (Sari et al., 2019). Rantai tulang punggung kimia yang dimiliki poliamida bersifat kaku dengan ikatan kuat antar molekulnya sehingga mempunyai kekuatan mekanik yang sangat baik, termasuk ketahanan radiasi dengan sifat semikonduktor yang luar biasa (IL Borisov et al., 2020). Bahan polimer ini juga tahan terhadap senyawa hidrokarbon aromatik dan alifatik dan sangat stabil pada pelarut organik (etanol, tetrahidrofuran dan aseton). Poliamida larut dalam asam kuat seperti asam silfat dan

asam klorida (Jeon et al., 2018). Ketika dikombinasikan dengan modul *hollow fiber*, keunggulan dari kedua modul menjadi lebih maksimal dengan hasil membran yaitu ketahanan kimia dan mekanik yang sangat baik, rasio luas permukaan pada volume tinggi dan packing density yang tinggi (Chung & Feng, 2021).

Keuntungan yang disebutkan tersebut juga tergantung pada kendala pembuatan membran dimana sulit dalam membuat membran polimida dan biayanya yang tinggi, yang mengarah pada inovasi dan optimalisasi komposisi polimida dan metode pemrosesan di pasar bernilai tambah dan bidang penggunaan akhir yang sangat teknis dari aerospace hingga mikroelektronika. Sampai saat ini, poliamida telah digunakan dalam berbagai aplikasi pengolahan air, termasuk adsorpsi, *reverse osmosis* (RO), *forward osmosis* (FO) dan *pressure retarded osmosis* (PRO). Karena keunggulan polimida dalam hal modifikasi fisik dan kimia, lebih dari separuh membran *hollow fiber* yang terbuat dari polimida yang digunakan dalam pengolahan air dibuat untuk aplikasi NF. Strategi ini telah digunakan untuk mengubah membran ultrafiltrasi *hollow fiber* asimetris menjadi membran nanofiltrasi karena membran poliamida dapat dihubungkan silang dengan molekul besar yang mengandung amina seperti polietilenimina (Chung & Feng, 2021).



Gambar 4. 4 Membran Poliamida (Sari et al., 2019)

Tabel 4. 4 Parameter spinning membran *Hollow fiber* Poliamida (Jeon et al., 2018)

Kondisi Parameter	Range	Satuan
Konsentrasi Polimer	20, 22, 25	Wt%
Suhu pencampuran	220	°C
Suhu spinning	220	°C
Celah udara	5	mm
Tingkat ekstrusi larutan polimer	0,05 – 0,85	m/detik
Laju aliran cairan <i>bore</i>	5	Gram/menit
Suhu air	Suhu ruang	°C
Kecepatan pengambilan	0,2	m/detik

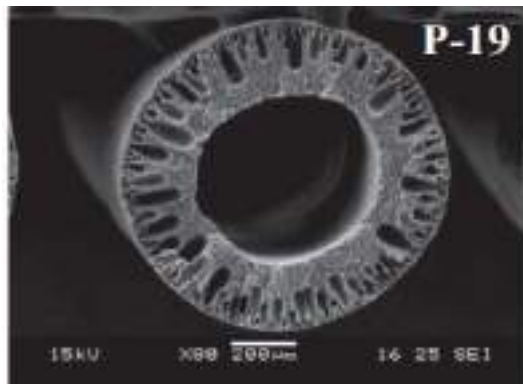
5. Polivinilidena Fluorida (PVDF)

Polivinilidena fluorida merupakan polimer sintetis dengan karakteristik stabil pada kekuatan mekanik dan termal serta resisten pada zat kimia (Y. Liu et al., 2020).

Polimer ini memiliki kestabilan pada senyawa dan pelarut halogen. Polimer PVDF memiliki sifat sukar dengan kadar garam, oleh karena itu cocok digunakan pada desalinasi air laut (Pradhana et al., 2021). Namun kekurangannya memiliki sifat hidrofobik (Galiano et al., 2018). Untuk mengatasinya, dilakukan modifikasi penggabungan antara polivinilidena fluorida dengan polimer hidrofilik dan polimer amfilik (W. Wu et al., 2020). Modul *hollow fiber* yang dibuat dari bahan polimer polivinilidena fluorida memiliki sifat kerapatan pengepakan membran tinggi, luas permukaan besar dan selektivitas yang juga besar, dan fleksibilitas yang baik (H. Zhang et al., 2018).

Struktur semi-kristal serta kandungan trigliserida yang sangat rendah membuat PVDF dapat digunakan pada rentang suhu 50 – 140 °C. Sebagian besar pelarut organik stabil digunakan kecuali dimetil-formamida, dimetil-asetamida, N-metil-pirolidon dan dimetil-sulfoksida. PVDF memiliki kekurangan yaitu sangat hidrofobik. Produksi membran asimetris menggunakan proses inversi fasa hanya bekerja dengan (PVDF), satu-satunya polimer hidrofobik yang larut dalam pelarut biasa. Selain itu, menambahkan aditif non-pelarut ke *dope* polimer dapat meningkatkan *demixing* cair-cair selama inversi fase, menyediakan metode alternatif untuk membuat membran berpori. Pada banyak penelitian ditemukan bahwa menggabungkan polivinilpirolidon (PVP) ke larutan *dope*

PVDF dapat menghasilkan membran dengan porositas yang efektif lebih tinggi daripada tanpa penambahan PVP. Membran PVDF sering digunakan dalam distilasi membran karena hidrofobisitas dan kemampuan prosesnya yang unggul jika dibandingkan dengan bahan polimer yang banyak digunakan seperti polipropilen (PP) dan politetrafluoroetilena (PTFE) (J. Wang et al., 2016).



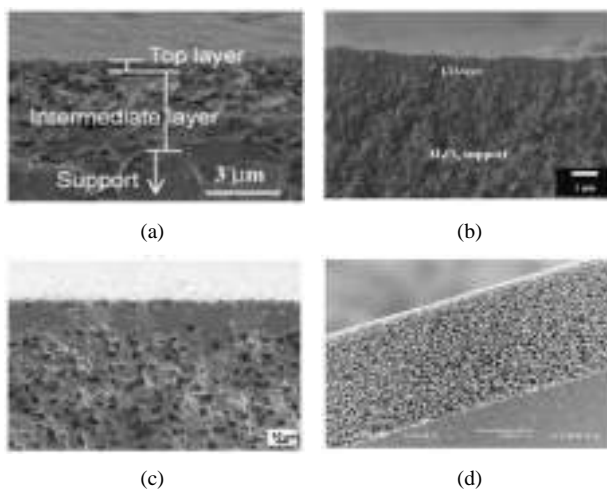
Gambar 4. 5 Membran poliamida (Chung & Feng, 2021)

Tabel 4. 5 Parameter spinning membran *Hollow fiber* PVDF (Galiano et al., 2018)

Kondisi Parameter	Range	Satuan
Suhu larutan <i>dope</i>	80	°C
Laju aliran larutan <i>dope</i>	11 -12	Gram/menit
Komposisi cairan <i>bore</i>	30%	NMP
Laju aliran cairan <i>bore</i>	13	Gram/menit
Suhu larutan <i>bore</i>	50	°C
Koagulan luar	Air keran di suhu ruang	-
Dimensi pemintal	1,6 – 0,6	mm
Celah udara	24	cm

4.2 Membran Inorganik

Membran inorganik adalah membran yang dibuat dari bahan-bahan seperti logam, gelas, keramik, dsb. Bahan-bahan polimer umumnya masih terdapat kekurangan, yaitu tidak tahan terhadap temperatur yang tinggi, mudah rusak oleh pelarut organik dan bahan kimia. Sementara itu membran anorganik memiliki kestabilan yang tinggi terhadap temperatur yang tinggi, pelarut organik dan bahan kimia yang bersifat asam maupun basa (Saputra et al., 2004). Struktur dan morfologi membran anorganik memiliki efek substansial pada kinerjanya. Menurut struktur dan morfologinya, membran anorganik dibagi menjadi membran berpori dan membran tidak berpori (padat) (Kayvani Fard et al., 2018).



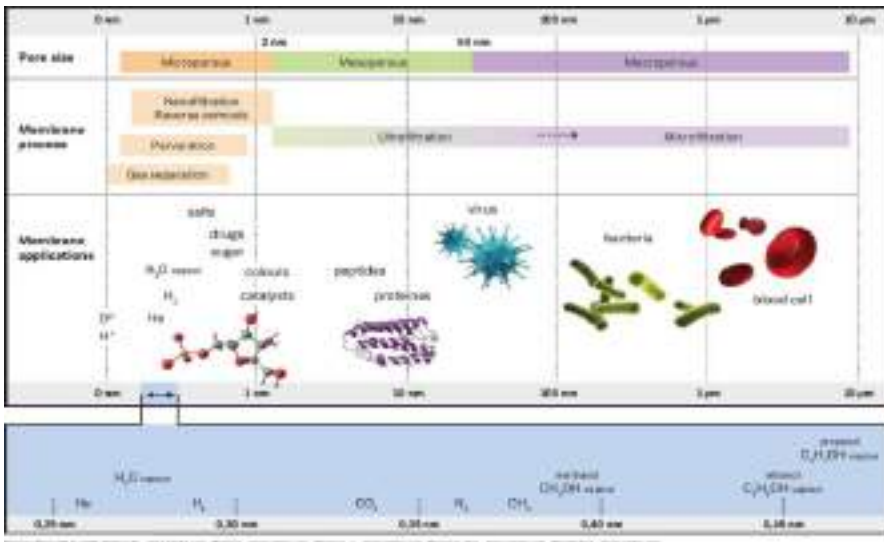
Gambar 4. 6 Gambar SEM dari (a) berpori, (b) padat, (c) asimetris, dan (d) membran anorganik simetris (Kayvani Fard et al., 2018)

Membran inorganik termasuk membran logam, keramik dan zeolitik, yang disintesis dengan sintering oksida logam/logam diikuti oleh pengendapan berikutnya pada substrat berpori. Mereka lembam pada pH ekstrim dan dapat digunakan untuk katalisis, adsorpsi hidrogen, dll. Namun, keterbatasan utama adalah keracunan permukaan, retak membran pada suhu tinggi dan fluks rendah (Sridhar, 2019). Jenis – jenis material inorganik yang digunakan pada pembuatan membran *hollow fiber* sebagai berikut.

1. Membran Keramik

Membran keramik dengan material dari senyawa oksida dianggap sebagai bahan yang sangat baik untuk pembuatan membran keramik. Hal ini dikarenakan senyawa tersebut memiliki stabilitas kimia dan termalnya yang baik, fluks air yang tinggi, serta ketahanan suhu yang tinggi (Figoli, 2022). Alumina (Al_2O_3), titania (TiO_2), zirkonia (ZrO_2), kaca (SiO_2), silikon karbida (SiC) atau kombinasi oksida logam ini adalah contoh bahan yang paling umum digunakan untuk pembuatan membran keramik. Bahan lain yang cocok termasuk non-oksida (karbida, *boreida*, nitrida, dan silisida) dan komposit kombinasi oksida dan non-oksida. Membran keramik biasanya memiliki struktur

asimetris yang terdiri dari setidaknya dua, kebanyakan tiga, lapisan porositas yang berbeda (Kayvani Fard et al., 2018). Membran *hollow fiber* keramik memiliki banyak keunggulan: (1) ketahanan pelarut yang sangat baik (2) kualitas produk pulih yang sangat baik (3) operasi suhu rendah (4) rasio pemulihan produk yang baik (5) tidak ada masalah pembuangan limbah tambahan (6) diterapkan pada skala kecil (Othman et al., 2017). Membran keramik lebih mahal untuk diproduksi daripada membran polimer dan oleh karena itu digunakan dalam aplikasi di mana membran polimer tidak dapat digunakan karena kinerja pemisahan yang lebih rendah, suhu yang lebih tinggi, atau kondisi lingkungan yang agresif (Meulenberg et al., 2019).

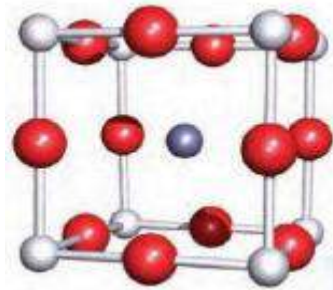


Gambar 4.7 Aplikasi Membran Keramik Berdasarkan Ukuran Pori

Membran keramik *hollow fiber* dapat diklasifikasikan menjadi tiga yaitu oksida perovskit, zeolit, kerangka logam-organik, dan silika.

a. Oksida Perovskit

Perovskit merupakan oksida logam yang memiliki rumus umum ABO_3 dengan A adalah ionion logam blok s-, d-, atau f- yang berukuran lebih besar sedangkan B merupakan ion-ion logam transisi (Sasmiasi, 2017). Kation B adalah ion logam transisi seperti Ti, Ni, Fe, Co, atau Mn. Terletak di tengah oktahedron anion oksigen. Kation A dapat berupa ion logam monovalen, divalen dan trivalen seperti K, Na, Li, Ba, Ca, atau La, Pr, Nd. Ion A dikelilingi oleh 12 ion oksigen yang berjarak sama jauh. Perovskit memiliki struktur kubik atau hampir kubik, namun biasanya akan mengalami satu atau lebih transisi fase struktur, terutama saat temperatur rendah (Fatihah, 2017).



Gambar 4. 8 Contoh Satuan Sel Perovskit ($CaTiO_3$)
(Fatihah, 2017)

Membran *hollow fiber* perovskit disiapkan oleh tiga langkah yaitu bubuk perovskit, pengikat polimer, dan pelarut dicampur dalam larutan. Selanjutnya, larutan yang disiapkan dipintal menjadi *hollow fiber*. Dalam proses ini, geometri *hollow fiber* diproduksi, kemudian *hollow fiber* disinter pada suhu tinggi (lebih tinggi dari 1000°C) untuk membakar pengikat polimer (Figoli, 2022). Membran *hollow fiber* perovskit dapat diterapkan sebagai reaktor membran mikro untuk oksidasi suhu tinggi untuk mengintegrasikan pemisahan udara dan reaksi dalam unit yang sama. Reaktor membran biasanya membutuhkan pemuatan katalis tambahan (N. Han et al., 2021). Membran *hollow fiber* perovskit diproduksi melalui proses inversi fase, dapat memberikan fluks permeasi oksigen yang lebih tinggi dan area membran yang lebih besar per unit volume pengemasan ketika dikemas ke dalam modul membran (Hu et al., 2018).

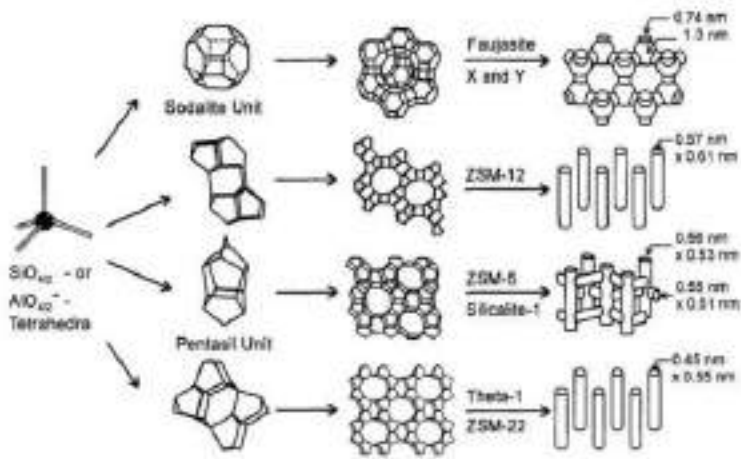
Teknologi membran khususnya membran keramik menjadi sangat penting untuk dikembangkan karena dapat digunakan dalam berbagai aplikasi. Contoh aplikasi membran tersebut adalah dalam proses pemisahan gas oksigen dan sebagai oksidator untuk proses oksidasi parsial hidrokarbon. Oksida perovskit merupakan material yang berpotensi digunakan dalam proses tersebut karena mampu

memiliki kekosongan oksigen pada kisi kristalnya. Oksigen kisi pada kerangka struktur perovskit ABO_3 mampu terlepas tanpa mengalami perubahan struktur yang berarti dan kekosongan oksigen tersebut dapat segera diisi melalui reaksi reoksidasi. Hal ini menunjukkan kestabilan struktur perovskit. Kemampuan membran perovskit untuk menghantarkan ion oksigen dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu jenis oksida perovskit, ketebalan membran dan luas permukaan (Fatimah, 2017).

b. Zeolit

Zeolit merupakan suatu material aluminosilikat berpori dengan dimensi ukuran pori molekularnya pada range 0.3-2 nm. Zeolit tersusun atas satuan-satuan tetrahedral $(SiO_4)^{4-}$ dan $(AlO_4)^{5-}$ dengan satu atom oksigen sebagai penghubung antara atom silikon dan aluminium yang membentuk kerangka tiga dimensi (Sholeha, 2017). Baik zeolit alami maupun sintetis adalah kristal, aluminosilikat terhidrasi yang memiliki kation dalam kelompok IA dan IIA, seperti Na, K, Ca, Mg, Sr dan Ba. Pori-pori zeolit terdiri dari cincin dalam kerangka dan dipilih oleh jumlah atom oksigen yang menciptakan cincin dengan struktur dan matriks yang berbeda. Rasio antara Si dan Al dalam struktur zeolit memainkan

peran utama di mana sebagian besar sifat seperti keterbasahan membran dan muatan permukaan membran dikontrol (Kayvani Fard et al., 2018).



Gambar 4. 9 Struktur Primer & Sekunder macam Zeolit (Sholeha, 2017)

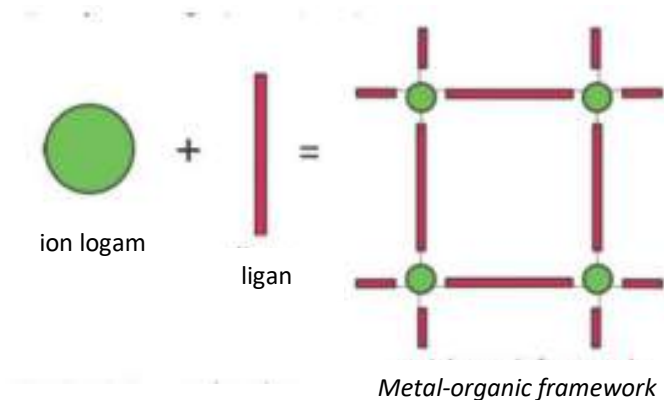
Membran zeolit pada bahan pendukung mungkin tidak stabil di lingkungan yang keras. Meskipun deposisi yang relatif stabil masih dapat diperoleh dalam kondisi sintesis tertentu, kemungkinan membran zeolit terlepas dari dukungan tidak dapat dikesampingkan. Salah satu strategi yang mungkin untuk melestarikan membran zeolit adalah dengan melapisinya dengan lapisan polimer setelah deposisi zeolit insitu telah selesai (Muhamad et al., 2021).

Membran *hollow fiber* zeolit biasanya disiapkan dengan pendekatan pertumbuhan sekunder, yang umumnya melibatkan dua langkah, termasuk nukleasi dan pertumbuhan kristal. Metode nukleasi, termasuk penyemaian vakum, dip-coating, dan teknologi spin coating, telah banyak digunakan untuk mensintesis membran serat zeolit dengan kualitas tinggi. Kemudian untuk pertumbuhan kristal, metode yang umum digunakan adalah kristalisasi hidrotermal, sol-gel kering, konversi gel langsung, sisi dalam, polimerisasi kontradifusi, dan, baru-baru ini, metode gelombang mikro. Membran *hollow fiber* zeolit telah menunjukkan sifat pemisahan gas yang menarik dalam aplikasi industri (Figoli, 2022).

c. *Metal-Organic Framework*

Metal-Organic Framework (MOF) merupakan senyawa koordinasi organik logam yang bersifat polimerik dan memiliki struktur jaringan satu, dua, atau tiga dimensi. MOF umumnya mengandung logam atau kluster logam yang saling terkoneksi oleh linker (penghubung) organik yang di, tri, atau multifungsi (Khair, 2011). MOF biasanya memiliki luas permukaan dan porositas yang besar, sifat permukaan pori yang dapat diatur dengan baik, kepadatan rendah ($0,2-1 \text{ g/cm}^3$), dan stabilitas termal dan kimia yang wajar. Material MOFs mempunyai

struktur pori yang stabil dan keuntungan dari material MOFs, sifat fisika dan kimianya dapat dikembangkan dengan cara memasukan material lain ke dalam pori – pori membentuk struktur baru yang stabil (Mahreni et al., 2020).



Gambar 4. 10Proses Terbentuknya *Metal-Organic Framework* secara Umum (Mahreni et al., 2020)

Berdasarkan ciri-ciri struktural, MOF diklasifikasikan dalam beberapa kelompok sebagai berikut (Mahreni et al., 2020):

- a) *Rigid frameworks* (kerangka kaku).

Kerangka kaku Merupakan kerangka berpori yang stabil dan kuat dan selalu berusaha mempertahankan kerangka berporinya baik pada saat adsorpsi maupun desorpsi molekul lain (molekul tamu). MOF ini dapat diterapkan dalam pengayakan molekuler.

b) *Flexible Dynamic Frameworks* (Kerangka kerja fleksibel/dinamis)

Kerangka fleksibel merupakan kerangka yang dapat merubah struktur porinya. Kerangka ini memberikan perubahan bentuk maksimal saat terjadi pengikatan maupun pelepasan partikel tamu yang dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti tekanan dan suhu.

c) Situs logam terbuka

Kinerja MOF dapat ditingkatkan dengan adanya situs logam terbuka. Keberadaan air di situs logam terbuka MOF meningkatkan kemampuan menangkap CO₂ dari MOF.

d) Kerangka fungsional permukaan

Kemampuan adsorpsi MOF dapat ditingkatkan dengan mencangkokkan gugus fungsi ke permukaan MOF. Di antara berbagai MOF, aluminium fumarat MOF (AlFu MOF) tersedia secara komersial. Penggabungan AlFu MOF adalah pilihan yang menjanjikan dan mudah diskalakan untuk membran kinerja tinggi untuk desalinasi air laut dan pengolahan air limbah (Cheng et al., 2019). Bahan MOF sebagai membran memiliki potensi yang signifikan untuk pengembangan metode pemisahan campuran gas yang hemat energi dan ramah lingkungan, dan oleh karena itu telah mendapat perhatian yang cukup besar dalam beberapa tahun terakhir (W. Li et al., 2014).

e) Membran Silika

Silika adalah bahan yang menarik untuk diterapkan sebagai membran ultrafiltrasi, karena memberikan pengayakan molekul yang baik, kuat, tahan terhadap suhu tinggi dan bahan kimia, serta *antifouling* lebih dibanding membran berbasis polimer. Namun demikian, membran silika juga memiliki kelemahan utama yang memiliki stabilitas rendah ketika bersentuhan dengan air (Rahma et al., 2022).

Membran silika banyak digunakan dalam aplikasi industri seperti pemisahan hidrogen suhu tinggi dan reaksi simultan dan proses pemisahan. Aplikasi membran silika dalam reaktor membran juga telah dilaporkan sangat berhasil dengan hasil tinggi (Kayvani Fard et al., 2018). Pada membran keramik, silika dilapisi atau dicangkokkan ke membran keramik untuk memodifikasi sifat-sifat permukaan membran keramik. Sebagian besar membran berbasis silika diterapkan untuk aplikasi pemisahan gas (Othman et al., 2017).

Saat ini, ada dua jenis membran silika anorganik yang banyak diteliti untuk desalinasi, yaitu zeolit dan membran silika amorf. Membran zeolit telah terbukti efektif tetapi stabilitas dan peningkatan jangka panjangnya masih menghadirkan masalah yang sedang berlangsung. Membran silika memiliki sifat pengayakan molekul yang sangat baik

dan proses fabrikasi yang lebih sederhana melalui pemrosesan sol-gel, meskipun mereka membutuhkan fungsionalisasi untuk mengatasi ketidakstabilan hidro. Struktur membran silika memiliki ukuran pori dalam kisaran 3-5 Å pada urutan diameter kinetik molekul air ($d_k = 2,6 \text{ \AA}$), sehingga ideal untuk menghambat lewatnya ion garam terhidrasi (Elma et al., 2013).

2. Membran Berbasis Karbon

Carbon nanotube (CNT) dan *carbon nanofibers* (CNFs) telah mendapatkan perhatian besar karena sifat fisikokimia yang unik, seperti stabilitas kimia, termal, dan mekanik yang sangat baik, stabilitas dimensi yang baik, dan konduktivitas listrik. Atom karbon disusun dalam struktur kisi heksagonal dalam *graphene* 2D dan sebagai lapisan *graphene* terlipat dalam CNT, yang dapat dirakit sebagai *singlewall nanotube carbon* (SWCNT), nanotube karbon berdinding ganda (DWCNT), dan nanotube karbon multi-dinding (MWCNTs) (Figoli, 2022).

a. Membran *Carbon Nanotube* (CNT)

CNT telah diakui sebagai teknologi inovatif yang memungkinkan untuk mengatasi kekurangan air saat ini dan masalah polusi air. Sebagai salah satu anggota keluarga *fullerene*, CNT secara struktural terdiri dari lembaran grafit silinder yang digulung menjadi tabung mulus seperti struktur dengan diameter urutan nanometer dan penampilan pagar

kisi. Tergantung pada lapisan cangkang *graphene*, CNT dapat diklasifikasikan lebih lanjut sebagai nanotube karbon berdinding tunggal (SWCNT), nanotube karbon berdinding ganda (DWCNT) dan nanotube karbon *multiwalled* (MWCNTs). Sifat-sifat nanotube sangat terkait dengan susunan atomnya (kiralitas), morfologi (pembentukan cacat) serta diameter dan panjang nanotube (P. S. Goh et al., 2018). Kemampuan CNT dalam mentransportasikan air selain disebabkan oleh struktur pori yang dimilikinya, juga disebabkan oleh sifat hidrofobik CNT. Simulasi dinamik molekular memperlihatkan bahwa sifat alami pori CNT yang hidrofobik menciptakan interaksi yang lemah dengan molekul air, sehingga memungkinkan aliran yang cepat dan hampir tanpa adanya gesekan (Aini, 2016).

b. Membran *Graphene*

Graphene merupakan alotrop karbon yang berbentuk lembaran datar tipis di mana setiap atom karbon memiliki ikatan sp^2 dan dikemas rapat dalam bentuk kisi kristal seperti sarang lebah. *Graphene* merupakan lapisan atomik grafit, merupakan bahan kimia yang luar biasa karena mempunyai stabilitas termal yang baik dan fleksibilitas yang tinggi (Aini, 2016). Bahan *graphene* telah diakui sebagai generasi baru membran RO karena dikenal lebih kuat, lebih

tipis dan lebih kuat secara kimiawi dan selektif ion daripada lapisan aktif poliamida dalam membran TFC RO. Karena fluks melintasi membran diketahui berbanding terbalik dengan ketebalan membran, nanosheet *graphene* yang dianugerahi ketebalan mono-atom dan membran struktur dua dimensi menawarkan janji besar untuk fluks tinggi dan pemisahan hemat energi. Karena impermeabilitas semua atom dan molekul di seluruh atom karbon array dua dimensi yang padat dalam *graphene* murni (P. S. Goh & Ismail, 2018).

Graphene dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu *graphene* lapis tunggal dan *graphene* komposit. *Graphene* lapis tunggal dengan ketebalan monoatomik, mempunyai ketahanan hidrodinamik yang rendah. Lapis tunggal *graphene* dapat berfungsi sebagai membran untuk pengolahan air dengan menciptakan pori subnano pada lapisan *graphene*. Selain *graphene* lapis tunggal, jenis *graphene* lainnya adalah *graphene* komposit, yang terdiri menjadi modifikasi permukaan *graphene*, tumpukan *graphene*, serta campuran *graphene-matrix*. Kedua jenis *graphene* ini lebih dapat diterima untuk komersialisasi *scale-up* (Aini, 2016).

3. *Mixed Matrix Membrane*

Secara umum, membran matriks campuran (MMM) adalah membran yang memiliki bahan nanopartikel anorganik ("pengisi") yang dimasukkan ke dalam bahan polimer makroskopik ("matriks"). Tujuan utama fabrikasi MMM adalah untuk mengatasi beberapa kelemahan membran polimer dan anorganik dengan menggabungkan sifat mekanik yang tinggi dari pengisi anorganik dengan kemampuan proses yang unggul dan biaya rendah bahan polimer. MMM disiapkan dengan beberapa metode, termasuk inversi fase dan pelapisan permukaan. Baru-baru ini penelitian ekstensif telah dilakukan untuk menggabungkan nanopartikel anorganik seperti SiO₂, perak (Ag), ZrO₂, Fe₃O₄, Al₂O₃, TiO₂, ZnO, zeolit, senyawa organo-selenium, dan nanotube karbon (CNT) ke dalam membran polimer (Kayvani Fard et al., 2018).

membran dapat disintesis menggunakan partikel anorganik seperti nanopartikel alumina, besi-oksida atau titanium dalam matriks polimer. Membran tersebut berperilaku sebagai unit hibrida adsorpsi dan filtrasi in situ. Mereka memiliki pori-pori yang lebih terbuka dan membutuhkan konsumsi daya yang jauh lebih sedikit, tidak seperti membran RO dan NF. Terutama mereka digunakan dalam pemisahan gas dengan menambahkan zeolit dalam polimer. Mereka juga menemukan utilitas dalam sel bahan bakar, baterai lithium ion (Li-ion), sensor, pervaporasi dan

nanofiltrasi pelarut organik (OSN) (Aroon et al., 2010). Aditif anorganik doping tidak hanya meningkatkan selektivitas membran tetapi juga meningkatkan permeabilitas, hidrofilitas, dan kekasaran permukaan untuk kinerja yang lebih baik (Sridhar, 2019).

BAB V

TEKNIK FABRIKASI

MEMBRAN *HOLLOW FIBER*

5.1 *Solution-Base Teknik*

Spinning membran *hollow fiber* adalah konfigurasi potensial dalam teknologi membran karena sifatnya yang mandiri dan produktivitas yang tinggi per-satuan volumenya. Pembuatan membran *hollow fiber* dipengaruhi oleh banyak parameter dan penting untuk mengeksplorasi pengaruh parameter ini terhadap sifat membran. Konversi polimer menjadi *fiber* dikenal dengan istilah *spinning*. Teknologi *spinning hollow fiber* melibatkan produksi fiber tunggal dan ganda secara terus menerus melalui ekstrusi melalui *spinneret* yang kemudian dikembalikan dalam keadaan padat (melalui pepadatan). Hasil ini menjadi fiber dengan sifat bervariasi yang tergantung pada parameter dan proses yang digunakan (Ahmad et al., 2019).

Metode lain yang berkaitan dengan *spinning hollow fiber* sering dikenal sebagai *solution spinning* dan *melt spinning*. Metode ini menggunakan alat yang dikenal dengan *spinneret*, yaitu alat yang berisi jarum tempat larutan polimer

diekstrusi dan alat lain tempat pelarut diekstrusi. Ekstrusi pelarut dan polimer dapat dilakukan melalui penggunaan pompa meteran atau ekstrusi gas. Saat polimer diekstrusi melalui *spinneret*, ia mempertahankan bentuk silinder berongga (Ahmad et al., 2019). Selain itu, saat polimer keluar dari *spinneret*, ia akan masuk kedalam bak luar berisi cairan (koagulan) yang bukan merupakan pelarut dari polimer tersebut. Polimer akan memadat menjadi membran saat kontak cairan tersebut atau prosesnya dikenal sebagai inversi fasa. Saat inversi fasa, terjadi pertukaran antara pelarut dari *dope* dan koagulan (*non-solvent*) yang menyebabkan penghilangan pelarut, solidifikasi (pemadatan) dan pengendapan fiber yang dihasilkan. Solidifikasi adalah transfer massa melalui antarmuka larutan koagulan dengan *dope*.

Ada berbagai jenis ketidakstabilan dalam fiber yang mungkin terjadi selama *spinning hollow fiber* seperti putus, resonansi penarikan, penciutan, dan ketidakteraturan dalam pembentukan dan penampang fiber. Keterbatasan tersebut dapat terjadi karena amplifikasi dari berbagai kondisi *spinning*. Beberapa kondisi tersedia dalam pembuatan membran *hollow fiber* yang secara negatif akan mempengaruhi kinetika inversi fase yang akan sangat menentukan morfologi dan sifat membran yang dihasilkan (Ahmad et al., 2019).

Banyak jenis polimer dapat digunakan, tetapi pemilihan polimer membran bukanlah sesuatu hal yang mudah. Polimer harus memiliki karakteristik yang sesuai. Polimer terkadang harus menawarkan afinitas pengikatan yang rendah untuk molekul yang terpisah (seperti dalam kasus aplikasi bioteknologi), dan harus tahan terhadap kondisi *hard cleaning* (Vandekar, 2015).

Hal itu juga harus kompatibel dengan teknologi fabrikasi membran yang dipilih. Polimer harus menjadi pembentuk membran yang sesuai dalam hal kekakuan rantai, interaksi rantai, stereo-regularitas, dan polaritas gugus fungsinya. Polimer dapat membentuk struktur amorf dan semi kristal (dapat juga memiliki suhu transisi gelas yang berbeda), yang mempengaruhi karakteristik kinerja membran. Polimer harus dapat diperoleh dan harganya terjangkau agar dapat memenuhi kriteria biaya rendah dari proses pemisahan membran (Vandekar, 2015).

Banyak polimer membran dicangkokkan, dimodifikasi khusus, atau diproduksi sebagai kopolimer untuk meningkatkan sifat-sifatnya. Polimer yang paling umum dalam sintesis membran adalah selulosa asetat, Nitroselulosa, dan ester selulosa (CA, CN, dan CE), polisulfon (PSf), polieter sulfon (PES), poliakrilonitril (PAN), poliamida (PA), polimida (PI), polietilen (PE), dan polipropilena (PP), polytetrafluoroethylene (PTFE), polivinilidena fluorida (PVDF), polivinilklorida (PVC)

(Vandekar, 2015). Berikut menurut (Turken et al., 2019) pada Tabel 5.1 dipaparkan perbandingan parameter fabrikasi membran HF yang diperkuat dengan efek parameter pada membran.

Tabel 5. 1 Perbandingan Hasil menurut Efek Parameter

Parameter	Contoh	Hasil
<i>Support Layer</i>	<i>Homogeneous, heterogeneous and hybrids braids</i>	Efek pada kinerja ikatan permukaan antar jalinan dan polimer.
<i>Polymer Type</i>	PS, PES, PVDF, PAN, PVC, CA, PMIA, PI, PAI, As porogen, PEG, PVP, dan gliserol	Efek pada kinerja ikatan permukaan antar jalinan dan polimer Seperti porogen, PEG, PVP, dan gliserol. Efek pada struktur membran dan kinerja membran.
<i>Spinneret Design</i>	<ul style="list-style-type: none"> – <i>Nozzle diameter for coating layer</i> – <i>Single or double stage</i> 	<ul style="list-style-type: none"> – Menentukan ketebalan lapisan <i>coating</i> pada lapisan pendukung. – Efek pada kinerja ikatan antarmuka antara jalinan dan polimer.
<i>Spinning Speed</i>	Kecepatan fabrikasi	Menentukan ketebalan pada lapisan <i>coating</i> dan distribusi ukuran pori

Parameter	Contoh	Hasil
<i>Coagulation Bath</i>	– Suhu – Konten	membran. – Pengaruh pada struktur membran dan distribusi ukuran pori. – Pengaruh pada struktur dan kinerja membran.

Pada bagian ini, pengaruh kondisi yang terlibat dalam pembuatan membran HF seperti laju alir ekstrusi *dope*, celah udara, kimia fluida *bore*, jarak tempuh, suhu dan tekanan ekstrusi, waktu tinggal, jenis dan suhu koagulasi eksternal, desain *spinneret* dan kecepatan *take-up* dijelaskan (Ahmad et al., 2019). Beberapa kerugian dan keuntungan dari parameter *spinning* menurut (Ahmad et al., 2019) ini ditabulasikan pada Tabel 5.2.

Tabel 5.2 Parameter yang mempengaruhi proses spinning HF

Parameter	Efek
<i>Bore fluid type</i>	– Mencegah runtuh/hancurnya HF yang baru dibuat
<i>Bore fluid temperature</i>	– Temperatur yang lebih rendah akan menyebabkan laju pencampuran antara pelarut dan polimer menjadi lebih lambat. – Semakin tinggi suhu, semakin

Parameter	Efek
<i>Bore fluid flowrate</i>	<p>rendah laju pendinginan di bagian dalam HF.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mengontrol morfologi kulit bagian dalam.
<i>Air gap distance</i>	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Air Gap</i> yang lebih besar berarti dibutuhkan <i>Residence Time</i> yang lama dari HF yang baru dicetak. - Dipengaruhi oleh elastisitas <i>dope</i> AG yang lebih besar dapat menghasilkan cacat akibat tekanan elongasi dan gravitasi. - Sebagai peran penting dalam transfer massa dalam pembentukan HF yang baru dibuat. - Pada AG yang lebih besar, inversi fase parsial yang diinduksi gravitasi dan inversi fase parsial terjadi secara bersamaan. - Pada AG konstan, DR yang lebih tinggi menghasilkan tekanan (ketegangan) yang lebih kuat di HF.

Parameter	Efek
<i>Dope extrusion flowrate</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Menentukan ketebalan HF setelah presipitasi. - Laju alir ekstrusi yang tinggi dapat membuat lapisan luar selektif rusak atau lebih tebal, sedangkan laju alir ekstrusi rendah dapat menghasilkan lapisan luar selektif padat yang rusak. - Laju alir ekstrusi yang lebih cepat akan menghasilkan HF berdiameter luar yang lebih besar.
<i>Dope extrusion pressure</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Bergantung pada sifat <i>dope</i>, laju alir ekstrusi <i>dope</i>, geometri ekstruder dan matriks. - Tekanan ekstrusi <i>Dope</i> yang lebih tinggi memberikan waktu yang lebih singkat untuk pertukaran pelarut/nonpelarut pada antarmuka cairan <i>bore</i> dan HF. - DEP yang lebih tinggi dapat menyebabkan runtuhnya lapisan luar. - Detasemen lapisan luar dari lapisan pendukung dalam.
<i>Dope viscosity</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Mempengaruhi kinetika koagulasi. - Viskositas tinggi akan meningkatkan keterikatan rantai HF yang baru tercetak.
<i>Take-up speed</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Konsentrisitas pemintal adalah faktor penentu.

Parameter	Efek
	– Semakin kecil dimensi <i>spinneret</i> , semakin kecil pula dimensi seratnya.
<i>External coagulation type</i>	– Untuk mencapai inversi fase lengkap dari lapisan luar HF.
<i>External coagulation temperature</i>	– Suhu koagulasi eksternal – Suhu koagulan mempengaruhi perpindahan massa antara non-pelarut, pelarut dan polimer, serta morfologi HF. – Menentukan kristalinitas HF yang baru lahir.
<i>Residence time (RT)</i>	– Semakin tinggi suhu, semakin cepat proses difusi pelarut dan sebaliknya. – RT ditentukan oleh celah udara, laju aliran ekstrusi <i>dope</i> , dan kecepatan pengambilan.
<i>Traveling distance and coagulation bath depth</i>	– Menentukan RT HF yang baru dibuat dalam media koagulasi eksternal.

Pada jenis dan kondisi koagulasi eksternal, morfologi permukaan eksternal membran HF pintal dapat dirancang dengan mengontrol kondisi bak koagulasi eksternal dan kimiawi. Pertama pada jenis koagulannya, ketika koagulan yang kuat seperti air digunakan sebagai koagulan, permukaan luar yang halus dan permukaan yang padat terbentuk. Namun, ketika pelarut campuran seperti etanol

(EthOH) atau metanol (MEthOH) dimasukkan, pori permukaan luar terbentuk. Selanjutnya, ketika non-pelarut (seperti air) memiliki tingkat difusi yang lebih tinggi di lapisan luar dibandingkan dengan di lapisan dalam, lapisan luar cenderung menahan lebih banyak air pada antarmuka serta mengembang untuk membentuk makrovoid yang besar. Akibatnya, air yang terkumpul dapat menghambat daya rekat kedua lapisan, yang menyebabkan delaminasi (Ahmad et al., 2019).

Salah satu efek dari penggunaan koagulan yang lemah adalah pengendapan yang tertunda dan pencampuran yang mengarah ke kulit luar yang lebih keropos. Efek ini mungkin mendominasi struktur mengkristal dan sel seperti spons berevolusi dengan menggunakan koagulan lemah dan karakteristik resistensi transfer massa yang lebih tinggi. Biasanya koagulan eksternal yang telah dipilih berasal dari pelarut yang berbeda seperti air, isopropanol (IPA), propilen glikol (PG), trietil fosfat (TEP), NMP, etanol (EthOH), dan DMAC (Ahmad et al., 2019).

Kedua yaitu suhu koagulan, temperature/suhu bak koagulasi merupakan parameter penting yang membantu menentukan kristalinitas dan struktur membran membran HF. Semakin tinggi temperatur, semakin cepat proses difusi pelarut yang selanjutnya akan mempengaruhi volume pori. Semakin rendah suhu, semakin lambat laju difusi yang akan

menentukan keteraturan dan keseragaman pembentukan pori (Ahmad et al., 2019).

Pada Tabel 5.3 yang menyajikan ringkasan berbagai pelarut yang digunakan sebagai koagulan eksternal sebagai berikut.

Tabel 5.3 Macam-macam pelarut digunakan sebagai koagulan eksternal

Koagulan Eksternal	Konsentrasi	Suhu
DMAC	0, 20, 40, 50, 60 wt.%	Ruangan
IPA	0, 20, 40, 60, 80 wt.%	-
IPA	-	25 °C
IPA	60 wt.%	-
PG	60 v/v%	Ruangan
EthOH	10, 30, 50 wt.%	25 °C
EthOH	50 wt.%	25 °C
EthOH	50 wt.%	-
NMP	50 wt.%	-
TAP	0, 30, 60 wt.%	25 °C
<i>Tep Water</i>	100 wt.%	10, 30, 45, 60 °C
<i>Tep Water</i>	100 wt.%	30, 50, 70, 60 °C
<i>Tep Water</i>	100 wt.%	10, 25, 40 °C
<i>Tep Water</i>	100 wt.%	25, 40 °C
<i>Tep Water</i>	100 wt.%	5-35 °C
<i>Tep Water</i>	100 wt.%	14, 50 °C
<i>Tep Water</i>	100 wt.%	50, 60, 70, 60 °C
<i>Tep Water</i>	100 wt.%	10, 25 °C

Parameter laju aliran ekstrusi *dope* (DEF) juga berperan penting karena menentukan ketebalan fiber setelah pengendapan. Morfologi permukaan internal HF dapat ditentukan secara tepat dengan pemilihan *bore fluid* (BF) yang tepat dari sejumlah besar bahan seperti air, etilena glikol (EG), NMP, TEP, Et-OH, IPA, DMAC, dimetilsulfoksida (DMSO), dimetilformamida (DMF), nitrogen, gamma-butirolakton (GBL), polivinilpirolidon (PVP), dan heksana. Pemilihan cairan *bore* yang tepat akan mempengaruhi laju inversi fasa, dan dengan demikian mencegah serat runtuh selama ekstrusi *dope*. Tabel 5.4 menyajikan ringkasan berbagai pelarut yang digunakan sebagai *bore fluid*.

Tabel 5. 4 Jenis Pelarut *Bore Fluid*

<i>Bore Fluid</i>	Konsentrasi	Kondisi	Keterangan
NMP	0, 30, 60, 90, 100 wt.%	Saat kandungan NMP meningkat	<ul style="list-style-type: none"> - Meningkatkan kinerja penyerapan oksigen. - Meningkatkan ukuran pori, penurunan porositas. - Kekuatan mekanik yang buruk, mungkin karena pengepakan yang lebih dekat dari daerah seperti spons.
NMP	0, 50, 70, 90 wt.%	Saat NMP meningkat	

<i>Bore Fluid</i>	Konsentrasi	Kondisi	Keterangan
NMP	25, 50, 75 w/w, %	Saat NMP meningkat	<ul style="list-style-type: none"> - Meningkatkan ukuran pori dan penurunan porositas. - Sedikit penurunan permean gas dan ketahanan pembasahan. - Permukaan bagian dalam menjadi lebih berpori karena penekanan fluks pelarut keluar dari fase larutan polimer ke fase koagulan.
NMP	80 wt.%	Saat EthOH meningkat	<ul style="list-style-type: none"> - Kekuatan mekanis yang buruk karena pengepakan yang lebih dekat dari daerah seperti spons. - Kekuatan mekanik buruk.
EthOH	0, 25, 50, 75, 100 wt.%	Saat NMP meningkat	<ul style="list-style-type: none"> - Transformasi morfologi lapisan dalam yang berbentuk lingkaran menjadi morfologi seperti bergelombang. - Jumlah gelombang atau lekukan meningkat seiring dengan peningkatan kandungan etanol. - Peningkatan porositas dan ukuran pori serta permeabilitas air. - Mengurangi ketebalan dinding dan tegangan

<i>Bore Fluid</i>	Konsentrasi	Kondisi	Keterangan
NMP	80 wt.%	Saat NMP meningkat	maksimum. – Toleransi tekanan lebih rendah
NMP	0, 20, 30, 50 v/v	Saat NMP meningkat	– Penurunan jumlah gelombang. – Mengurangi penyerapan CO ₂ . – Peningkatan dalam sifat mekanis.
NMP	10, 50, 90 wt.%	Saat NMP meningkat	– Selektivitas CO ₂ /N ₂ tinggi. – Penurunan <i>permeance</i> gas dan ketahanan pembasahan.
NMP	50, 70, 90 wt.%	-	-
EthOH/NMP	10, 30, 50, 100 wt.%	-	-
NMP	70 wt.%	-	-
NMP	40, 60, 70 wt.%	-	-
NMP	100 wt.%	-	– Permukaan dalam HF tanpa kulit. – Kapasitas pengikat lisozim maksimum tinggi.
Glycerol	100 wt.%	-	– Kulit padat dengan ukuran pori lebih kecil.
DMAC	0, 20, 40, 50, 60, 70, 80 wt.%	Saat konten DMAC meningkat	– Pembentukan morfologi partikel berpori pada sisi lumen. – Peningkatan sifat mekanik.

<i>Bore Fluid</i>	Konsentrasi	Kondisi	Keterangan
			- Penurunan ketebalan struktur seperti jari pada sisi lumen.
DMAC	0, 10 20, 30, 40, 50 wt.%	Saat konten DMAC meningkat	- Pembentukan morfologi partikel berpori pada sisi lumen. - Transformasi morfologi partikulat seperti jari menjadi spons pada lapisan kulit bagian dalam. - Hasilkan lebih sedikit makrovoid
NMP	20 wt.%	-	-
DMAC	0, 50, 70, 85, 95 wt.%	Saat konten DMAC meningkat	- Transformasi dari <i>double skin</i> ke <i>single skin</i> .
DMAC	50, 80 wt.%	Saat konten DMAC meningkat	- Pembentukan kulit kendur pada permukaan bagian dalam. - Peningkatan sifat mekanik.
DMAC	10, 20, 30 wt.%	Saat konten DMAC meningkat	- Penurunan ketebalan struktur seperti jari pada sisi lumen. - Hasilkan lebih sedikit makrovoid.
EthOH	50 wt.%		-
DMAC	60 wt.%	-	- Permeabilitas ea rah dan fluks CO ₂ meningkat secara signifikan.
EG	50 wt.%	-	- Menghasilkan serat

<i>Bore Fluid</i>	Konsentrasi	Kondisi	Keterangan
			dengan lapisan seperti sepon di dekat permukaan dan struktur dua lapis seperti jari.
			– Permeabilitas air lebih tinggi.
			– Tidak mendukung pembentukan makrovoid seperti jari sehingga mengurangi porositas serat.
			– Penolakan yang tinggi sekitar 80% untuk ea rah .
NMP	90 wt.%	-	-
TEP	20, 30, 40 wt.%	Saat konten TEP meningkat	– Pembentukan struktur ea rah bebas makrovoid. – Peningkatan tegangan Tarik hingga lebih dari 50%.
NMP	40 wt.%	-	-
EthOH	30 wt.%	-	– Kepadatan pori dan permeabilitas yang lebih tinggi.
IPA	30 wt.%	-	– Efek yang kuat pada distribusi pori di permukaan ea rah HF.
DMSO	100 wt.%	-	– Penghapusan lapisan tipis seperti spons di bagian dalam.

<i>Bore Fluid</i>	Konsentrasi	Kondisi	Keterangan
			- Pembentukan saluran mikro seperti jari.
Hexane	100 wt.%	-	-
DMF	15 – 35 wt.%	Saat konten DMF meningkat	- Pembentukan makrovoid pada permukaan bagian dalam Penghapusan makrovoid pada permukaan bagian dalam seiring dengan peningkatan DMF.
EthOH	30 wt.%	-	-
Nitrogen Gas	-	-	- Porositas permukaan dalam lebih rendah karena kandungan polimer pada permukaan dalam meningkat karena pelarut yang menguap ke dalam aliran nitrogen.
IPA	30 wt.%	-	- Pengurangan ketebalan lapisan rongga makro akibat demixing tertunda.
MEthOH	30 wt.%	-	-
EthOH	30 wt.%	-	-
GBL	30 wt.%	-	-
PVP	0, 1, 3, 5 wt.%	Saat konten PVP meningkat	- Daerah antara matriks ea rah lumen dan spons dengan makrovoid menjadi lebih besar, menyebabkan makrovoid dpaat bergeser ea rah

<i>Bore Fluid</i>	Konsentrasi	Kondisi	Keterangan
			serat perifer.
			– Peningkatan hidrofilitas dan koefisien rejeksi.
			– Penurunan PWF.

5.1.1 *Wet Spinning*

Wet spinning adalah metode produksi membran *hollow fiber* yang relatif murah. *Wet spinning* memiliki hasil yang berbeda dengan *dry-jet wet spinning*. *wet spinning* dapat menghasilkan membran *hollow fiber* dengan permukaan luar yang lebih kecil dan/atau lebih bulat, yang menghasilkan fluks lebih tinggi dan produktivitas yang lebih tinggi (Qin et al., 2001).

Proses *wet spinning* diklasifikasikan dalam kategori *solution spinning*. Polimer *spinning* pertama-tama dilarutkan dalam pelarut yang sesuai dan kemudian *wet spinning* dibentuk dengan ekstrusi larutan yang diperoleh melalui *spinneret*, dalam bak koagulasi. *Spinneret* dapat langsung direndam (metode terendam) atau mungkin ada celah kecil antara *spinneret* dan permukaan bak koagulasi (metode celah udara). Tiga metode pemadatan dapat dibedakan, yang diberi nama metode kristal cair, pembentukan gel dan pemisahan fasa (Weisser et al., 2016).

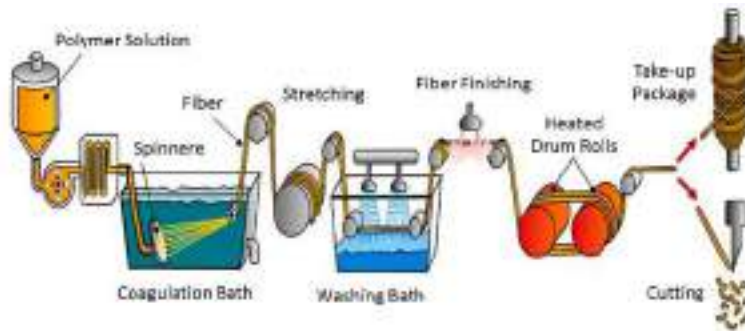
Ada tiga tahap untuk menghasilkan *hollow fiber* dengan menggunakan metode ini, larutan polimer yang terdiri dari polimer serta tambahan dari bahan aditif lain

dengan pelarutnya yang sesuai. larutan dikeluarkan melalui diameter lubang *spinneret* yang diinginkan, tahap ini disebut ekstrusi. sebaiknya diameter lubang harus sehalus mungkin, memungkinkan untuk memproduksi serat halus. Larutan akan dimasukkan dalam bak koagulasi yang terdiri dari cairan non-pelarut, tahap ini disebut tahap koagulasi. pada bak koagulasi ini akan menghilangkan pelarut, dimana polimer dilarutkan meninggalkan serat polimer yang dipadatkan memulai tahap pemintalan. Polimer ini kemudian diregangkan secara kontinyu menggunakan rol yang membentuk filamen halus kontinyu dari polimer. Pada tahap ini, menggunakan rol diameter yang panjang sesuai dengan yang diinginkan (Shang et al., 2019).

Metode *wet spinning* pertama kali digunakan dalam pembuatan rayon (*Chardonnet Silk*) dengan mengekstrusi larutan alkohol selulosa nitrat melalui corong yang dicelupkan ke dalam air dingin. Saat aliran *collo dion* (larutan selulosa nitrat) melewati air, filamen diregangkan dan dipadatkan. Pematatan filamen terjadi dari permukaan ke inti. Awalnya, larutan *viscose*, yang robek, didorong oleh udara bertekanan ke rangka *spinning*. Pompa yang digunakan untuk produksi *viscose* biasanya dari jenis roda gigi dimana *viscose* melewati filter, dan selanjutnya melalui *spinneret*. Pemintal umumnya terendam dalam bak asam, dan biasanya diatur sedemikian rupa sehingga benang-benang muncul hampir tegak lurus ke permukaan bak. Saat

larutan kental melewati pancaran ke dalam penangas asam, larutan ini mengeras menjadi serat, karena regenerasi selulosa. Kecepatan yang jauh lebih rendah digunakan dalam *wet spinning* dibandingkan dengan teknik *spinning* leleh dan kering, karena *spinning* menggunakan cairan dengan viskositas lebih tinggi yang menghasilkan tegangan tinggi pada filamen. Masalah ini dapat diatasi dengan menggunakan kecepatan rendah (Ozipek et al., 2014).

Memahami prinsip dasar *wet spinning* dan mengendalikan proses koagulasi dan morfologi fiber sangatlah penting. Aspek utama yang mengatur karakteristik fiber dalam proses *wet spinning* meliputi pemisahan fasa, reologi, dan fenomena difusi.



Gambar 5.1 Skematis dari proses *wet spinning* (Shirvan et al., 2022)

Aplikasi *wet spinning* pada bidang kesehatan yaitu reologi obat bius. teknik ini dilakukan dengan obat bius

dilarutkan sebelumnya dalam larutan pelarut, dan kemudian diekstrusi menjadi nonpelarut dalam bak koagulan. Pemisahan dalam larutan polimer filamen berlangsung di bak koagulasi dengan transportasi massa dan pertukaran antara sistem pelarut/nonpelarut dan antara bak koagulasi dan polimer obat bius (filamen). Kunci dari proses ini adalah komposisi kimia dari reagen yang digunakan, yang secara langsung mempengaruhi sifat serat yang dihasilkan. Polimer sangat penting untuk mengendalikan geometri filamen, terutama ketika obat bius keluar dari nosel ke bak koagulasi pada fase awal proses. Aspek reologi juga dapat dikaitkan dengan kinetika difusi dan pembentukan rongga dalam filamen. Pemilihan pelarut yang tepat dan koagulan yang sesuai sangat penting, karena ada beberapa faktor penting yang harus dipertimbangkan, seperti laju difusi dan suhu pelarut/koagulan (Shang, 2019).

Wet spinning didasarkan pada konsep pertukaran pelarut. Pemisahan fasa dalam larutan polimer filamen berlangsung di bak koagulasi dengan transpor massa dan pertukaran antara sistem pelarut/non pelarut dan antara bak koagulasi dan *dope* polimer (filamen). Kontra-difusi spesies terjadi menurut hukum Fick. Pelarut polimer secara bertahap habis dari filamen, menyebabkan penurunan kelarutan polimer (L. Wang et al., 2019). Koagulasi adalah tahap kunci dalam proses *wet spinning*, yang sangat menentukan kualitas *wet spinning*. Tingkat pencampuran

pelarut dan non pelarut ditentukan oleh ketercampurannya. Di sisi lain, difusivitas pelarut dan non-pelarut menentukan seberapa cepat mereka menembus zona yang berlawanan. Selama proses inversi fasa, larutan polimer yang stabil secara termodinamis dipadatkan dan diubah menjadi keadaan padat secara terkendali. Tingkat pertukaran pelarut/non-pelarut dianggap sebagai parameter utama yang mempengaruhi morfologi serat, ukuran rongga, dan distribusi. Kelarutan yang lebih tinggi antara pelarut dan non pelarut biasanya mengarah pada pemisahan fase seketika dan pembentukan rongga makro (D. Yang et al., 2001). Produksi *hollow fiber* selama proses inversi fasa sangat dipengaruhi oleh kinetika dan termodinamika.

5.1.2 *Dry Spinning*

Dry spinning adalah metode produksi untuk fiber polimer (Wieland et al., 2019). *Dry spinning* merupakan teknik yang tidak terlalu rumit dalam hal pembuatan serat dibandingkan dengan teknik *electrospinning* (Tan et al., 2019). *Dry spinning* merupakan metode yang mudah dan ramah lingkungan, dan telah diterapkan dalam industri serat kimia. Proses pembentukan serat yang lambat pada proses *dry spinning* membuat serat polimer menjadi seragam dan padat (Tian et al., 2017). *Dry spinning* dapat menjadi solusi untuk menghilangkan pelebaran dan mencambuk ketidakstabilan jet. *Dry spinning* juga mampu mengontrol

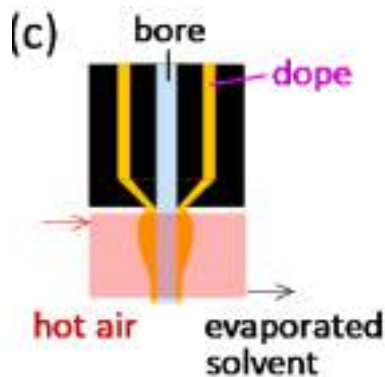
dan menyelaraskan pengendapan fiber ke kolektor (Tan et al., 2019). Tidak seperti *electrospinning*, *Dry spinning* langsung memutar serat ke kolektor tanpa menggunakan suplai tegangan tinggi menggambar serat. Oleh karena itu ketidakstabilan pelebaran dan pencambukan dari pancaran larutan tidak terjadi (Tan et al., 2019).

a. Proses *Dry Spinning*

Dry spinning menggunakan udara atau gas lembam untuk menguapkan sisa pelarut yang ada di dalam *dope* polimer, memungkinkan pembentukan fiber padat langsung setelah ekstrusi. Kecepatan aliran gas di ruang penguapan akan menjadi faktor dominan yang mempengaruhi morfologi membran. Untuk teknik *spinning* yang melibatkan penggunaan celah udara, kelembaban relatif di celah udara memiliki efek nyata pada porositas membran. Saat HF yang baru tercetak terpapar tingkat kelembaban yang lebih tinggi, kandungan air yang meningkat di lapisan luar menimbulkan struktur yang lebih berpori yang menghasilkan tingkat permeasi yang lebih tinggi. Kontrol dari kelembaban relatif di celah udara dengan demikian merupakan alat pragmatis untuk menginduksi bagian luar yang keropos permukaan yang mungkin sangat penting untuk modifikasi sifat permukaan seperti keterbasahan. Demikian juga,

electrospinning adalah teknik fabrikasi serat elektrostatis yang juga menggunakan polimer cair sebagai *dope* polimer. Teknik ini menghasilkan serat pada skala nano dengan mengekstrusi *dope* bermuatan di bawah medan listrik tegangan tinggi (Lau et al., 2022).

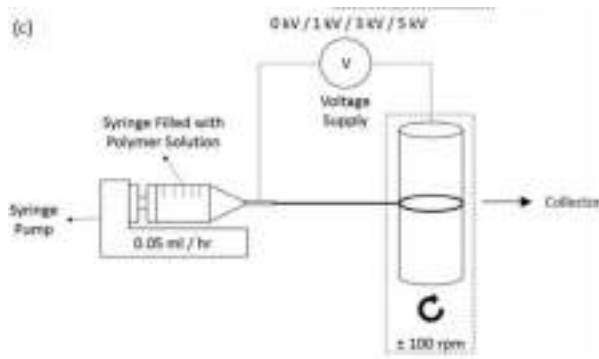
Pada *dry spinning*, polimer dilarutkan dalam pelarut yang mudah menguap. Larutan pelarut polimer kemudian dipompa melalui *spinneret* ke dalam zona yang dipanaskan; di sini fiber mengeras saat pelarut menguap (OGLI et al., 2020). Aliran udara menyebabkan penguapan pelarut dan meninggalkan serat yang mengeras. Di bagian bawah saluran pemintalan, fiber biasanya ditarik ke bawah oleh *roller* pengambil.



Gambar 5. 2 *Dry Spinning* (Lau et al., 2022)

Pada alat *dry spinning*, larutan *dope* diumpangkan dengan kecepatan konstan dan terkendali melalui nosel jet ke saluran pemintalan, di mana serat pintal dikeringkan dengan aliran udara panas. Selama proses pengeringan ini pelarut menguap keluar dari jet dan menyebabkan penipisan dan pemadatan serat. Mempertimbangkan perangkat *dry spinning* industri dengan aliran udara lateral ke dalam saluran pemintalan, yaitu kecepatan aliran udara rata-rata tegak lurus terhadap arah serat, asumsi serat lurus tidak lagi dapat dipertahankan karena defleksi lateral yang diharapkan. Oleh karena itu, kerangka kerja model dan simulasi diperluas untuk deskripsi serat melengkung dalam proses tersebut (Wieland et al., 2019).

Dry spinning menggunakan kekuatan mekanis untuk menarik fiber keluar dari larutan ke kolektor. Pengaturan *dry spinning* dalam penelitian yang dilakukan oleh Tian et al. (2017) hanya terdiri dari pompa semprit dan pengumpul berputar seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut.

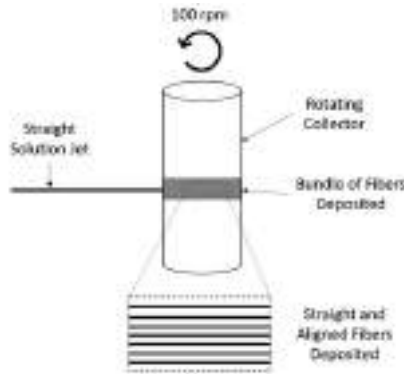


Gambar 5.3 *Dry spinning* Dibantu Medan Listrik yang Lemah (Tan et al., 2019)

Mirip dengan *electrospinning*, jarum suntik dengan ukuran 27 jarum digunakan untuk menampung larutan polimer sementara pompa jarum suntik digunakan untuk mengontrol larutan tingkat injeksi. Untuk memulai proses *dry spinning*, serat ditarik secara manual dari jarum suntik ke kolektor berputar. Kemudian, kolektor yang berputar melakukan pemintalan serat secara mekanis kekuatan menggambar. Larutan poliuretan harus cukup kental dan mudah menguap, sehingga menjadi fiber dapat terus menerus diambil dari larutan dalam jarum suntik. Jika serat terus menerus putus, gambar manual dari serat harus diulang. Tegangan lemah juga diterapkan di antara ujungnya, dari jarum suntik dan kolektor selama proses pemintalan untuk

mempelajari efek gaya listrik pada sampel pental kering. Namun, penting untuk dicatat bahwa diterapkan tegangan tidak cukup kuat untuk memulai proses *electrospinning*.

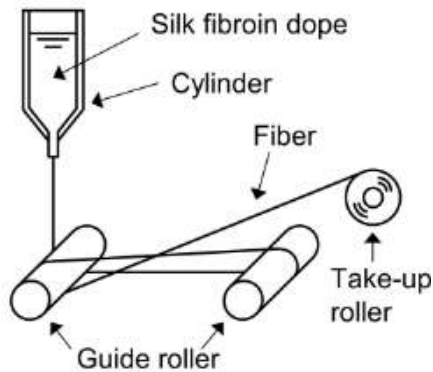
Teknik *dry spinning* dipilih oleh untuk membuat selaras fiber poliuretan karena kesulitan untuk sepenuhnya menghilangkan ketidakstabilan pukulan dalam *elektrospinning* sebab aplikasi tegangan tinggi (Tan et al., 2019). Jet larutan polimer dapat bergerak lurus cara untuk mencapai kolektor berputar tanpa penerapan tegangan tinggi seperti yang diilustrasikan pada Gambar 5.4



Gambar 5.4 Ilustrasi Pengendapan Serat Lurus dan Sejajar pada rotating collector as the solution jet (Tan et al., 2019)

Skema peralatan *dry spinning* ditunjukkan pada Gambar 5.5. Di bawah N_2 tekanan, larutan obat bius

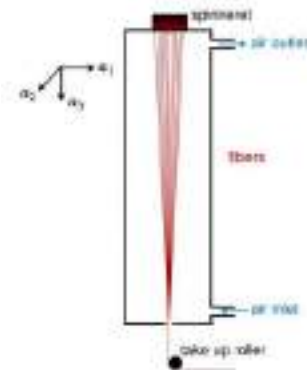
dalam silinder baja tahan karat (id 23 mm) dengan nosel dispenser (0,3 mm id) dibuang ke udara. Jarak antara *spinneret* dan *roller* pemandu pertama adalah 100 cm. Tekanan dikontrol antara 0,3 dan 0,02 MPa untuk menstabilkan operasi pemintalan. Secara bersamaan, kecepatan gulungan rol berkurang dari 12,0 menjadi 4,0 m/menit. Benang dikeringkan terlebih dahulu di antara rol pemandu segera setelah pemakaian dan mengarah ke rol pengambil (4,2 m/mnt). Benang padat yang dihasilkan ditangani sebagai serat pintal. Benang yang diperoleh dikeringkan dalam kondisi vakum pada suhu kamar selama >5 jam dengan kumparan. Pada sistem pemintalan kering ini larutan *dope* yang diekstrusi dikeringkan di udara sekitar untuk dibentuk menjadi serat pada rol pemandu yang dilengkapi dengan tabung *polytetrafluoroethylene* untuk mencegah menempelnya *dope* dalam proses dan dikumpulkan ke rol pengambil (Sato et al., 2022).



Gambar 5.5 Konseptual dari pemintalan kering untuk regenerasi serat sutra (Sato et al., 2022).

Dry spinning fiber dapat dimodelkan dengan mekanika kontinum tiga dimensi. Fiber dapat diperlakukan sebagai media dua fase dari dua kontinum yang saling menembus (polimer dan pelarut) yang berinteraksi dengan fase aliran aerodinamis di sekitarnya. Namun, mengatur efek utama, seperti penguapan pelarut dan interaksi antara beberapa serat tipis dan udara, meningkatkan kompleksitas komputasi dari masalah multifase-multiskala sehingga simulasi numerik langsung dari model tiga dimensi pada umumnya tidak mungkin dilakukan. Oleh karena itu, beberapa model serat pengganti untuk *dry spinning* telah dikembangkan dalam beberapa dekade terakhir. Dimulai dari model

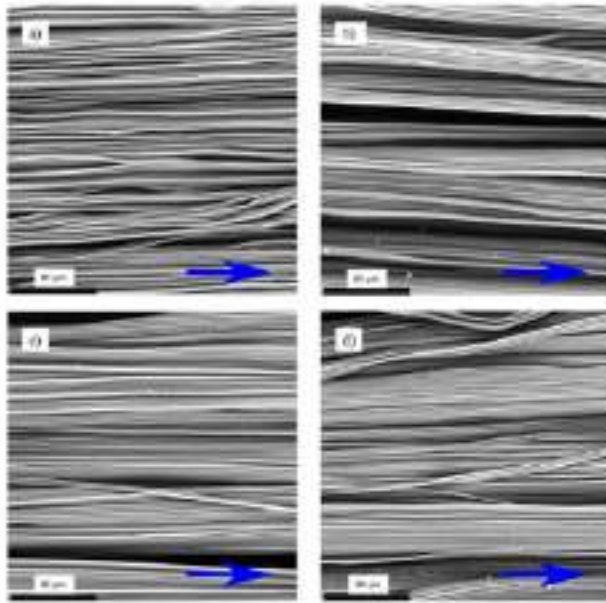
satu dimensi stasioner uniaksial berdasarkan neraca rata-rata cross-sectional dan model dua dimensi dengan hukum reologi yang bergantung pada konsentrasi yang mencakup efek difusi radial (Wieland et al., 2020).



Gambar 5. 6 Sketsa alat pemintalan kering dan orientasi dasar luar (Wieland et al., 2020)

b. Analisis Permukaan Fiber *Dry spinning*

Mikrograf dari semua sampel pintal kering seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.7 Semua sampel memiliki topologi serupa. Serat yang diamati tanpa manik-manik, sangat selaras, dan seragam diameter. Meskipun serat ini adalah pemintalan kering, ketiga karakteristik tersebut ideal untuk serat *electrospun*.

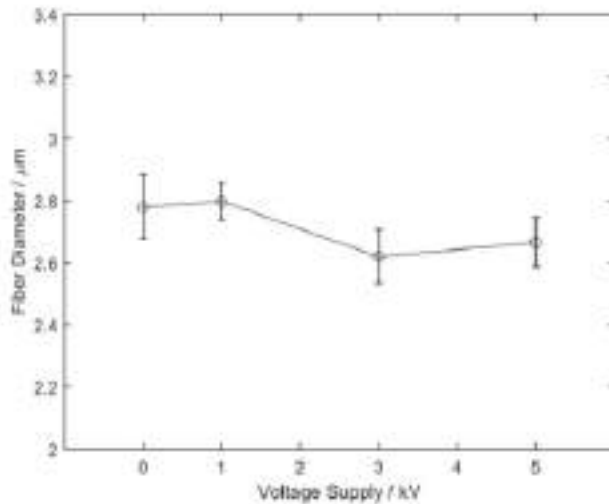


Gambar 5. 7 Mikrograf SEM dari (a) PU6, (b) PU7, (c) PU8 dan (d) PU9 (Wieland et al., 2020)

c. Diameter Fiber

Diameter rata-rata fiber *dry spinning* berkisar antara 2,620-2,799 μm jauh lebih besar dibandingkan dengan fiber elektrospun, yang berkisar antara 0,618-1,915 μm . Namun demikian, diameter serat *dry spinning* ini masih termasuk dalam kisaran diameter yang dibuat *electrospinning* yang berkisar dari nanometer ke mikrometer. Terlepas dari penerapan tegangan 0 hingga 5 kV selama proses *dry spinning*, diameter fiber tidak banyak berubah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.8. Biasanya diameter

serat berubah dengan perubahan tegangan yang diberikan selama *electrospinning*. Ternyata, voltase yang diterapkan pada *dry spinning* ini terlalu rendah untuk memiliki efek yang signifikan diameter fiber.



Gambar 5. 8 Variasi Diameter Fiber dengan Tegangan yang Diberikan (Wieland et al., 2020)

d. Aplikasi Proses *dry spinning* : Serat *Graphene* Fiber (GF)

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Tian et al. (2017) teknik *dry spinning* digunakan untuk membuat GF kontinu dan GF pemintalan kering menunjukkan ketangguhan dan fleksibilitas yang baik. Spinabilitas kering kristal cair *graphene oxide*

dicapai dengan memilih pelarut dispersif dengan tegangan permukaan rendah dan volatilitas tinggi. GF yang dipintal kering memiliki ketangguhan tinggi hingga 19,12 MJ m⁻³, mengungguli GF rapi yang berputar basah. Metodologi pemintalan kering ini memfasilitasi fabrikasi hijau serat *graphene* dan *graphene* di luar bahan nano dua dimensi, dan juga dapat diperluas ke teknologi pencetakan lainnya untuk arsitektur *graphene* kompleks.

Oleh karena itu, strategi *dry spinning* dapat disukai karena kekompakan dan keseragaman fiber *Graphene Oxide* (GO), yang dapat berkontribusi pada peningkatan konduktivitas listrik, dan sifat mekanik dan termal. Sementara itu, tidak memerlukan rendaman koagulasi, yang menyederhanakan proses pemintalan serat dan menurunkan biaya produksi. Pelarut dengan tegangan permukaan tinggi ini memperparah kecenderungan *dope* GO untuk menyusut menjadi tetesan dan tekanan uap jenuhnya yang rendah memperlambat laju pepadatan untuk membentuk serat kering, yang membuat dispersi berair GO dan dispersi DMF gagal membuat GF kontinu. melalui strategi pemintalan kering. Jadi, untuk merealisasikan pemintalan kering GF, dispersibilitas, tegangan permukaan dan volatilitas pelarut *dope* pemintalan harus seimbang dengan baik.

Metanol, etanol, aseton dan tetrahidrofur (THF) dengan air dipilih sebagai bahan campuran. Pelarut GO untuk *dry spinning*. Setelah pelarut dipilih, *dry spinning* sederhana dikembangkan dan GF kontinyu dibuat tanpa menggunakan rendaman koagulasi. GF pental kering mencapai tingkat yang sebanding dalam kekuatan mekanik (hingga 375 MPa) dengan GF pental basah, tetapi memiliki ketangguhan yang lebih baik, hingga 19,12 MJ m⁻³, daripada rekan pental basah mereka. Strategi *dry spinning* untuk GF nyaman, hemat energi, dan ramah lingkungan. Dimungkinkan juga untuk memperluasnya ke perakitan makroskopis dari bahan nano lainnya dan teknologi pencetakan untuk arsitektur *graphene* yang kompleks.

Dry spinning dicoba dengan mengekstrusi dispersi berair GO dan *dope* DMF langsung ke udara, dan kedua *dope* ini dengan tegangan permukaan tinggi dan volatilitas rendah ternyata tidak cocok untuk *dry spinning*. Kemudian efek konsentrasi GO pada spinabilitas diselidiki. Ketika konsentrasi rendah (sekitar 4,5 mg g⁻¹), tetesan terbentuk pada nosel jarum suntik. Ini karena dispersi gel dalam nosel tidak dapat mempertahankan bentuk serat aslinya ketika *doping* GO meninggalkan nosel, yang dapat dibuktikan dengan rendahnya modulus

penyimpanan dispersi berair GO. Pada konsentrasi tinggi hingga 14 mg g^{-1} , meskipun serat dapat mempertahankan bentuk aslinya saat diekstrusi, serat juga cenderung membentuk tetesan di ujung serat gel karena tegangan permukaan H yang tinggi.

Dipandu oleh kriteria pelarut, terdapat beberapa pelarut polar lainnya dengan tegangan permukaan rendah, titik didih rendah, dan tekanan uap jenuh tinggi untuk membubarkan GO secara homogen termasuk metanol, etanol, aseton, dan THF. Dispersibilitas lembaran GO memiliki hubungan erat dengan parameter kelarutan pelarut Hansen, dan sistem parameter ini memiliki tiga komponen: interaksi polar (δP), interaksi ikatan hidrogen (δH), dan gaya dispersi dalam larutan (δD).

Dry spinning GF tidak termasuk penggunaan rendaman koagulasi, yang menyederhanakan proses *spinning* jika dibandingkan dengan metode *wet spinning* sebelumnya. Strategi *dry spinning* menciptakan rute baru yang menjanjikan untuk membangun GF yang fleksibel dan kuat di masa depan dan menyediakan cara alternatif untuk perakitan *graphene* makroskopis di luar bahan dua dimensi. Metode ini dapat diperluas ke teknologi pencetakan lain untuk arsitektur *graphene* kompleks.

Pendekatan *dry spinning* mintalan kering adalah strategi lain yang layak secara industri dan dapat digunakan untuk membuat serat *graphene* kontinyu. Berbeda dari *wet spinning*, kristal cair GO diekstrusi dari *dry spinning* dan langsung dibentuk menjadi fiber tanpa rendaman koagulasi. Untuk memastikan keberhasilan fabrikasi fiber GO berkelanjutan dengan metode *dry spinning*, konsentrasi larutan asli pemintalan cukup tinggi untuk membentuk gel kristal cair viskoelastik dan pelarut obat bius pemintalan GO harus memiliki karakteristik tegangan permukaan rendah dan tekanan uap jenuh tinggi. Untuk menghindari kesulitan dalam menggunakan rendaman koagulasi, *dry spinning* memiliki efisiensi pemintalan yang lebih tinggi, penghematan energi dan perlindungan lingkungan dibandingkan dengan pemintalan basah, dan merupakan teknologi preparasi ramah lingkungan potensial yang ideal dari serat GO. Perlu dicatat bahwa serat GO spin kering memiliki fleksibilitas dan ketangguhan yang baik, tetapi umumnya menunjukkan kekuatan tarik yang buruk karena adanya banyak mikropori. Diasumsikan bahwa beberapa polimer diperkenalkan penghematan energi dan perlindungan lingkungan dibandingkan dengan *wet spinning*, dan merupakan teknologi

persiapan ramah lingkungan yang potensial dari serat GO. Serat GO spin kering memiliki fleksibilitas dan ketangguhan yang baik, tetapi umumnya menunjukkan kekuatan tarik yang buruk karena adanya banyak mikropor. Beberapa polimer diperkenalkan antara lembar GO, yang akan mengatur struktur mikro internal dan mengurangi cacat interlayer, sehingga dapat mengoptimalkan distribusi tegangan internal dan transfer beban, sehingga secara efektif meningkatkan sifat mekanik serat GO secara keseluruhan. Akibatnya, serat pemintalan kering akan menunjukkan sifat unggul (Feng et al., 2021).

Studi kasus pada alat *dry spinning*, *dope* organik GO diekstrusi melalui *spinneret* dengan diameter bagian dalam 130 μm dengan kecepatan mulai dari 1 hingga 10 mm s^{-1} . Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Feng et al. (2021), dua jenis serat komposit GO-TPU telah diperoleh dengan *dry spinning* dan *wet spinning*. Ditemukan dari hasil struktur mikro yang dicirikan bahwa cacat internal pada serat GO pintal kering secara efektif dihambat dibandingkan dengan yang basah. Hasil pengujian mekanik menunjukkan bahwa sifat mekanik serat komposit yang dibuat dengan pemintalan kering lebih baik dibandingkan dengan pemintalan basah.

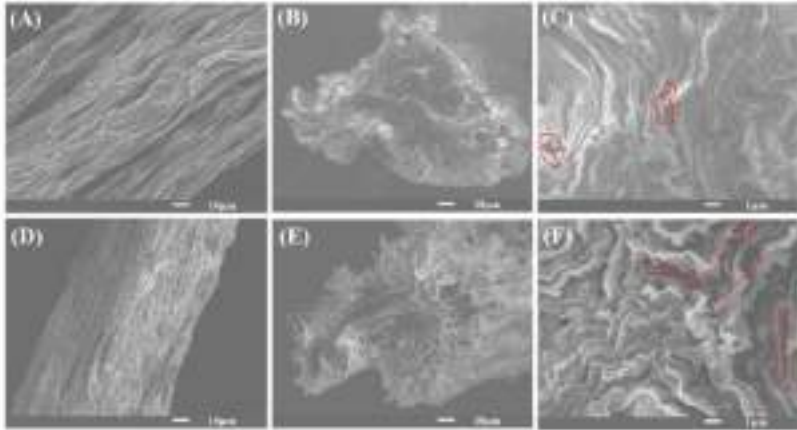
Untuk menganalisis lebih lanjut mekanisme peningkatan penguatan dan ketangguhan serat pemintalan kering, efek cacat internal pada serat pada sifat mekanik makro material dipelajari dengan simulasi numerik elemen hingga dikombinasikan dengan karakteristik struktur mikro. Hasilnya menunjukkan bahwa, dibandingkan dengan pemintalan basah, cacat internal serat pemintalan kering lebih kecil, yang akan bermanfaat untuk mengurangi konsentrasi tegangan lokal dalam struktur laminasi yang terhuyung-huyung dan menunda kegagalan utama material, sehingga dapat secara efektif meningkatkan sifat mekanik makro dari material struktur seperti nacre.



Gambar 5.9 Diagram Skema Proses Pemintalan Kering (Feng et al., 2021)

Pada Gambar 5.9 penampang serat yang disiapkan oleh dua proses telah dikarakterisasi untuk mengamati perbedaannya. Terlihat bahwa

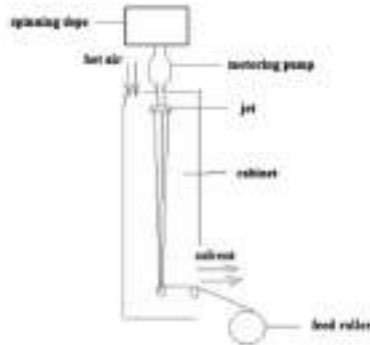
penampang serat pintal kering lebih rapat daripada serat pintal basah. Gambar SEM dengan resolusi lebih tinggi pada gambar 3 (C) dan (F) menunjukkan bahwa lembaran GO bagian dalam dari serat pintal basah memiliki kerutan yang lebih jelas dibandingkan dengan *dry spinning*. Terlebih lagi, ada beberapa pori besar (area bertitik pada gambar 3 (F)) di lamelar *wet spinning*, tetapi hanya beberapa pori kecil (area bertitik pada gambar 5.10 (C)) pada penampang melintang serat pintal kering. Sebagai perbandingan, untuk serat yang dibuat dengan pemintalan kering, cacat bagian dalam (seperti kasus seperti yang ditunjukkan pada gambar 5.10 (C) dan (D)) lebih kecil dan lebih sedikit daripada cacat yang dibuat dengan pemintalan basah (seperti kasus seperti ditunjukkan pada gambar 5.10 (E) dan (F)). Jadi, konsentrasi tegangan di dalam serat pintal kering kurang signifikan dibandingkan serat pintal basah, sehingga sifat mekanik serat pintal kering meningkat.



Gambar 5. 10 Hasil Karakterisasi SEM Serat GO-TPU yang Dibuat dengan Berbagai Proses Pemintalan Dengan Perbandingan Massa 10 : 100, (AC) Pemintalan Kering, (DF) Pemintalan Basah. (A) dan (D) Morfologi Profil, (B) dan (E) Morfologi Penampang, (C) dan (F) Pembesaran P (Feng et al., 2021)

Dry spinning banyak digunakan di pabrik derek asam asetat untuk produksi massal serat CA sebagai bahan yang dapat disaring dalam rokok. Selama proses pemintalan kering (Gambar 5.11), *dope* CA yang merupakan larutan selulosa asetat dalam aseton, diekstrusi dari *spinneret* di bagian atas kolom pemintalan dan kemudian ditarik ke bawah oleh rol pengumpan di bagian bawah kolom. Dalam kabinet pemintalan, jet yang bergerak secara bertahap

dipadatkan menjadi serat CA karena penguapan pelarut melalui udara panas seperti yang diilustrasikan pada Gambar 5.11.



Gambar 5.11 Proses *dry spinning* pada fiber *Cellulosa Asetate* (CA) (L. Zhang et al., 2019)

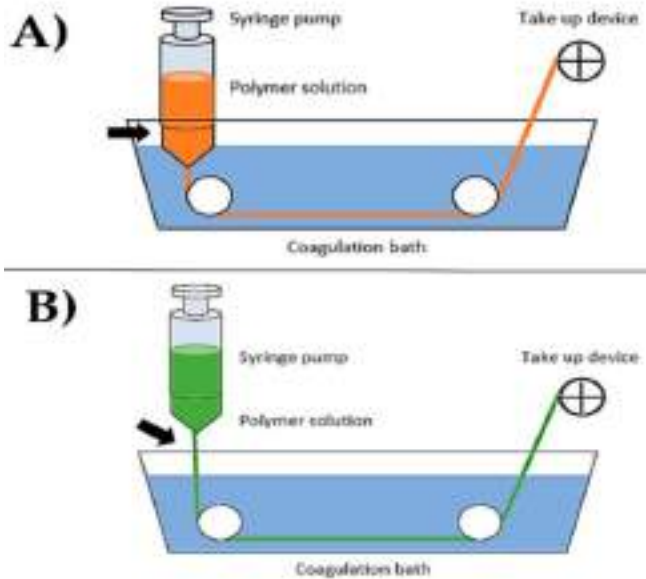
Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 5.11, beberapa jet yang diekstrusi dari *spinneret* adalah aliran viskoelastik pada tahap awal yang secara bertahap menjadi padat setelah pelarut menguap. Mirip dengan getaran transversal dari gerakan aksial serat ramping, getaran seperti tali dipertimbangkan untuk jet yang bergerak dalam proses pemintalan.

5.1.3 *Dry-jet wet Spinning*

Metode utama dalam produksi fiber sintetis adalah *Dry-Jet Wet Spinning*. Metode ini melibatkan proses ekstrusi polimer yang larut dalam suatu medium cair melalui

spinneret yang memiliki lubang-lubang ke dalam medium cair yang akan mengendapkan fiber. *Dry-Jet Wet Spinning* terkenal karena kemampuannya dalam menghasilkan fiber dengan sifat mekanik dan morfologi yang unggul.

Metode *Dry-Jet Wet Spinning* telah banyak digunakan dalam industri tekstil untuk memproduksi berbagai jenis fiber, baik fiber sintetis maupun fiber selulosa. Prosesnya melibatkan tahap-tahap seperti melarutkan polimer menjadi larutan, mengekstrusinya melalui *spinneret* untuk membentuk fiber, dan mengendapkan fiber dalam medium cair agar menjadi fiber padat. Metode ini memungkinkan peningkatan morfologi serta sifat fisik dan mekanik fiber yang dihasilkan. Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian tentang *dry-jet wet spinning* telah difokuskan pada pengembangan fiber yang lebih baik, seperti fiber berkinerja tinggi yang menggunakan cairan ionik. Penggunaan cairan ionik dalam *dry-jet wet spinning* menarik perhatian karena memiliki sifat unik, seperti stabilitas termal yang tinggi, viskositas yang dapat disesuaikan, dan kelarutan yang baik dalam berbagai polimer. Dengan menggunakan cairan ionik dalam *dry-jet wet spinning*, fiber dengan sifat mekanik dan termal yang sangat baik dapat diproduksi (Vocht et al., 2021).

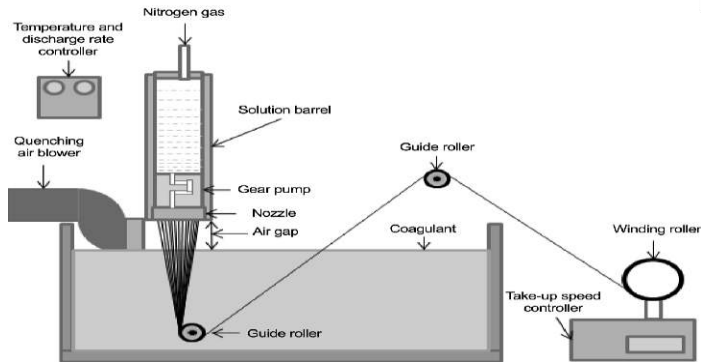


Gambar 5. 12 Sistem umum (A) *wet spinning*, dan (B) *dry-jet wet spinning*

Dalam *dry-jet wet spinning* sedikit berbeda dengan teknik *wet spinning* (Gambar 5.12), larutan polimer pada teknik *dry-jet wet spinning* diekstrusi melalui celah udara sebelum bak koagulasi, menghasilkan lebih tinggi penyelarasan molekul dibandingkan dengan pemintalan basah konvensional.

Teknologi *wet spinning* merupakan salah satu teknologi yang banyak diterapkan dalam bidang ilmu polimer dan tekstil. *dry-jet wet spinning*, yang merupakan modifikasi dari *wet spinning*, menggabungkan keuntungan dari *melt spinning* dan *wet spinning*, dan mampu menghasilkan fiber dengan kinerja tinggi. Proses *dry-jet wet*

spinning umumnya terdiri dari dua bagian yang terpisah: aliran memanjang di daerah celah udara dan difusi ganda dalam bak koagulasi (H.-Y. LIU et al., 2016).



Gambar 5. 13 *Dry jet wet spinning*

Pada Gambar 5.13 terdapat ilustrasi dari alat *dry jet wet spinning* berbahan bakar udara. Alat ini terdiri dari *nozzle spinneret* dan proses koagulasi yang digunakan untuk menghasilkan fiber yang sangat terorientasi. Lapisan udara ditempatkan di antara bak mandi, dan di area ini terjadi orientasi molekul fiber yang lebih baik. Selain itu, informasi rinci tentang kondisi radiasi dapat ditemukan dalam tabel berikut.

Tabel 5.5 Kondisi *spinning jet-wet dry* untuk preparasi fiber (I. M. Kim et al., 2013)

Classification	Cotton linter based Lyocell fiber	Wood pulp based Lyocell fiber
Raw material	Cotton linter (DP=1000)	V-60 (DP=850)
Discharge rate	2.5 cc/min	
Hole spec.	30 holes D=0.15 mm L/D ratio=4	
Dope conc.	9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 wt%	11, 12, 13, 14, 15 wt%
Spinning temp.	110 °C	
Coagulation bath temp.	15 °C	
Quench air temp.	8~12 °C	
NMMO conc. in coagulation bath	0 wt%	
Take-up speed	10, 30, 50 m/min	
Air-gap length	20 mm	

a. Tujuan dan ruang lingkup

Dry-Jet Wet Spinning, juga dikenal sebagai metode pengulutan *dry-wet*, bertujuan untuk menghasilkan fiber sintesis dengan sifat mekanik unggul dan kekuatan tarik yang tinggi. Proses ini juga dimaksudkan untuk menciptakan fiber dengan morfologi terkendali dan ukuran pori yang sesuai. Fiber yang dihasilkan melalui teknik pengulutan *dry-wet* telah berhasil diterapkan dalam berbagai aplikasi industri tekstil, termasuk pakaian, teknologi medis, dan industri otomotif.

Pengembangan *dry-jet wet spinning* melibatkan eksplorasi teknik dan parameter proses yang optimal, seperti kecepatan tarik fiber, komposisi larutan polimer, dan kondisi pengeringan. Penelitian terus dilakukan untuk mendapatkan pemahaman yang lebih mendalam tentang pengaruh faktor-faktor ini terhadap sifat dan kualitas fiber yang dihasilkan. Selain itu, para peneliti juga fokus pada penggunaan bahan dan pelarut alternatif, seperti cairan ionik, dengan tujuan meningkatkan kinerja dan keberlanjutan proses *dry-jet wet spinning* (X. Chen et al., 2007).

b. Prinsip Dasar *Dry-Jet Wet Spinning*:

Dry-Jet Wet Spinning mengikuti prinsip dasar yang melibatkan beberapa langkah penting. Pertama, polimer dilelehkan menjadi larutan yang konsisten dan homogen. Larutan polimer ini kemudian mengalir melalui *spinneret* yang memiliki lubang-lubang kecil. Aliran larutan dengan kecepatan tinggi dan tekanan yang diberikan pada sistem memungkinkan pembentukan fiber saat larutan ditarik.

Setelah fiber terbentuk, fiber tersebut dicelupkan dalam larutan pengendap. Hal ini

menyebabkan pemadatan dan pengerasan fiber. Prinsip dasar ini mengandalkan interaksi antara larutan polimer, fiber yang terbentuk, dan larutan pengendap untuk mencapai pembentukan fiber sintetis yang diinginkan. Proses ini juga memungkinkan pengendalian morfologi fiber dan ukuran pori dengan mengatur parameter seperti kecepatan tarik fiber, komposisi larutan polimer, dan kondisi pengeringan. Dengan mengoptimalkan parameter-parameter ini, fiber sintetis dengan sifat mekanik dan morfologi yang diinginkan dapat dihasilkan melalui metode *Dry-Jet Wet Spinning* (Tuan et al., 2020).

c. Proses pelelehan polimer dalam metode *dry-jet wet spinning*

Pada teknik proses *dry-jet wet spinning*, polimer yang digunakan dilelehkan hingga membentuk larutan *spinnable* yang memiliki konsentrasi optimal untuk pembentukan fiber. Larutan *spinnable* ini dibuat dengan menggunakan suhu yang tinggi untuk melarutkan polimer dengan baik. Polimer yang digunakan dapat berupa polimer sintetis seperti poliester, poliamida, atau poliakrilonitril, atau polimer alami seperti selulosa. Pelelehan polimer dilakukan dalam tangki atau reaktor yang dikendalikan suhu dan tekanannya. Polimer

dipanaskan hingga suhu yang cukup tinggi untuk melelehkan polimer dan membentuk larutan *spinnable* yang konsisten. Pelarut yang sesuai, seperti asam sulfonat, *ionic liquids*, atau pelarut organik lainnya, digunakan untuk melarutkan polimer dalam proses ini. Setelah larutan *spinnable* terbentuk, langkah selanjutnya adalah menarik larutan polimer melalui *spinneret* dengan kecepatan tinggi. *Spinneret* terdiri dari banyak lubang kecil yang membentuk fiber. Saat larutan polimer ditarik melalui *spinneret*, terjadi pendinginan dan pengeringan fiber yang terbentuk. Pada tahap ini, terjadi perubahan fisik dan kimia yang penting dalam membentuk fiber yang kuat dan berkekuatan tinggi.

Parameter penting yang dikendalikan dalam proses ini termasuk kecepatan tarik fiber, komposisi larutan polimer, suhu lingkungan, dan kondisi pengeringan. Pengaturan parameter ini mempengaruhi morfologi, struktur, dan sifat fiber yang dihasilkan. Selama proses pengeringan, larutan pengendap digunakan untuk mencelupkan fiber yang sedang terbentuk. Larutan pengendap ini membantu dalam membentuk fiber padat dengan menghilangkan pelarut yang ada dalam fiber dan mempromosikan pembentukan ikatan molekul yang kuat. Setelah pencelupan, fiber akan dilanjutkan

dengan proses pengeringan lanjutan untuk menghilangkan sisa larutan pengendap dan pelarut yang masih tersisa. Proses pengeringan ini dapat melibatkan penggunaan udara panas atau oven dengan suhu dan waktu yang tepat. Proses *dry-jet wet spinning* menghasilkan fiber dengan kekuatan tarik yang tinggi, ketahanan terhadap robek yang baik, dan sifat mekanik yang superior dibandingkan dengan metode konvensional lainnya. fiber yang dihasilkan dapat digunakan dalam berbagai aplikasi industri tekstil berdasarkan sifat dan karakteristik mekanik yang diinginkan (M Zhang et al., 2017).

Spinneret memainkan peran penting dalam proses *dry-jet wet spinning* untuk pembentukan fiber sintetis. *Spinneret* berfungsi sebagai cetakan yang mengontrol aliran larutan polimer dan membentuk fiber pada tahap awal proses. *Spinneret* terdiri dari banyak lubang kecil yang disebut filamen. Filamen ini dapat memiliki berbagai ukuran dan konfigurasi, tergantung pada desain yang diperlukan untuk fiber yang diinginkan. Selama proses *dry-jet wet spinning*, larutan polimer ditarik melalui filamen *spinneret* dengan kecepatan tinggi. Aliran larutan dalam filamen yang sempit memungkinkan polimer mengalami perubahan fase menjadi fiber padat saat

larutan terpapar ke dalam larutan pengendap (Karami et al., 2020).

Desain dan konfigurasi *spinneret* memiliki pengaruh signifikan pada morfologi dan sifat fiber yang dihasilkan. Parameter seperti jumlah filamen, ukuran lubang filamen, pola penempatan filamen, dan geometri filamen dapat mempengaruhi diameter, porositas, kekuatan tarik, dan sifat mekanik fiber yang dihasilkan. Dengan mengoptimalkan desain *spinneret*, dapat mencapai hasil yang diinginkan dalam hal sifat dan karakteristik fiber sintesis (X. Liu et al., 2018).

Peran larutan pengendap dalam pembentukan fiber dalam proses *dry-jet wet spinning* sangat penting (X. Zhang et al., 2019). Larutan pengendap membantu dalam beberapa aspek utama sebagai berikut:

1. Proses koagulasi fiber: Larutan pengendap memiliki komposisi yang berbeda dari larutan polimer yang digunakan dalam *spinneret*. Ketika fiber larut polimer dikeluarkan dari *spinneret*, kontak dengan larutan pengendap mengakibatkan koagulasi atau pembentukan fiber padat. Dengan demikian, larutan pengendap berperan penting dalam membantu fiber mempertahankan bentuk dan struktur yang diinginkan.

2. Pemulihan larutan pelarut: Selain itu, larutan pengendap juga berfungsi sebagai medium untuk menghilangkan atau mendaur ulang pelarut yang terkandung dalam fiber. Saat larutan pengendap bersentuhan dengan fiber, ia menyerap pelarut, yang membantu dalam pemulihan pelarut dan mengurangi limbah dalam proses produksi.
3. Pengaturan struktur fiber: Larutan pengendap memiliki peran signifikan dalam pembentukan struktur mikro dan makro fiber. Faktor-faktor seperti komposisi, konsentrasi, viskositas, dan suhu larutan pengendap dapat mempengaruhi morfologi dan sifat fisik fiber yang dihasilkan. Dengan mengatur parameter-parameter ini, larutan pengendap dapat digunakan untuk mengendalikan diameter fiber, kekuatan tarik, elastisitas, dan sifat-sifat lainnya.

Berikut adalah beberapa parameter yang umum digunakan dan perlu diperhatikan dalam pembuatan fiber dengan teknik *dry jet wet spinning* meliputi (C. Wang et al., 2020):

1. *Kecepatan* tarik fiber merupakan faktor penting dalam proses *Dry-Jet Wet Spinning*. Kecepatan ini merujuk pada kecepatan fiber saat ditarik melalui *spinneret*. Parameter ini memiliki

pengaruh yang signifikan terhadap diameter fiber, morfologi fiber, dan sifat mekanik fiber yang dihasilkan. Kecepatan tarik fiber yang tinggi dapat menghasilkan fiber dengan kekuatan tarik yang lebih tinggi. Namun, perlu diperhatikan bahwa kecepatan tarik yang terlalu tinggi juga dapat mempengaruhi morfologi fiber, seperti ukuran pori dan struktur fiber. Oleh karena itu, penentuan kecepatan tarik fiber yang tepat perlu mempertimbangkan keseimbangan antara kekuatan tarik yang diinginkan dan morfologi fiber yang diinginkan..

2. Viskositas larutan polimer adalah faktor kunci dalam proses *Dry-Jet Wet Spinning* yang mempengaruhi kecepatan aliran larutan polimer melalui *spinneret*. Viskositas yang tinggi dapat menghambat aliran larutan, sementara viskositas yang rendah dapat menghasilkan fiber dengan kualitas yang buruk. Oleh karena itu, pengaturan viskositas yang tepat sangat penting untuk mendapatkan fiber dengan diameter seragam dan sifat mekanik yang baik. Viskositas larutan polimer dapat diatur melalui berbagai cara, termasuk penggunaan pelarut yang tepat, konsentrasi

polimer yang optimal, dan penggunaan bahan tambahan seperti peningkat viskositas. Tujuan utamanya adalah mencapai viskositas yang memungkinkan aliran larutan dengan lancar melalui *spinneret*, sehingga menghasilkan fiber yang diinginkan. Dalam praktiknya, optimisasi viskositas larutan polimer dapat dilakukan melalui percobaan dan pemantauan yang teliti terhadap parameter-parameter tertentu, seperti suhu, konsentrasi polimer, dan komposisi larutan. Dengan demikian, dapat dicapai viskositas yang sesuai untuk menciptakan fiber dengan kualitas yang diinginkan.

3. *Komposisi* larutan polimer melibatkan tingkat konsentrasi polimer, variasi pelarut yang digunakan, dan penggunaan aditif tambahan. Tingkat konsentrasi polimer yang lebih tinggi cenderung menghasilkan fiber dengan kekuatan tarik yang lebih tinggi, sedangkan pilihan jenis pelarut dapat mempengaruhi kelarutan polimer serta sifat mekanik dari fiber yang terbentuk. Aditif seperti surfaktan atau bahan tambahan lainnya juga dapat dimanfaatkan untuk mengendalikan karakteristik fiber yang dihasilkan.

4. Proses Pengeringan: Setelah imersi dalam larutan pengendap, langkah berikutnya adalah mengeringkan fiber agar menghilangkan sisa pelarut berlebihan dan mengkristalkan polimer. Faktor-faktor seperti suhu dan kelembaban pada tahap pengeringan dapat berdampak pada struktur dan karakteristik fiber yang dihasilkan. Oleh karena itu, penting untuk menjalankan proses pengeringan dengan hati-hati guna mencegah kerusakan fiber dan memastikan terbentuknya sifat mekanik yang optimal.

Dampak kecepatan tarik fiber terhadap morfologi fiber pada proses *dry-jet wet spinning* memiliki peran yang signifikan dalam mengubah karakteristik dan sifat mekanik fiber yang dihasilkan. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan adanya korelasi antara variasi kecepatan tarik fiber dengan beberapa aspek morfologi fiber, seperti ukuran diameter fiber, tingkat porositas, dan tingkat kristalinitas. Peningkatan kecepatan tarik fiber cenderung menghasilkan fiber dengan diameter yang lebih kecil. Hal ini dapat dijelaskan oleh fenomena peregangan yang lebih besar saat fiber ditarik dengan kecepatan tinggi, sehingga fiber mengalami regangan dan menyempit. Selain itu, kecepatan tarik yang

tinggi juga dapat mengurangi porositas fiber, membuat fiber yang dihasilkan menjadi lebih padat dan memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap penetrasi air atau zat lainnya.

Namun, dampak kecepatan tarik fiber terhadap tingkat kristalinitas fiber masih menjadi topik penelitian yang sedang diperdebatkan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kecepatan tarik yang tinggi dapat meningkatkan tingkat kristalinitas fiber, sementara penelitian lain menghasilkan kesimpulan yang berbeda. Selain itu, faktor-faktor lain seperti komposisi larutan polimer dan kondisi pengendapan juga dapat mempengaruhi pengaruh kecepatan tarik fiber terhadap kristalinitas (Smith et al., 2022).

Pengaruh viskositas larutan polimer terhadap kualitas fiber dalam *dry-jet wet spinning* dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Morfologi fiber

Morfologi fiber yang dihasilkan dipengaruhi oleh viskositas larutan polimer. Saat viskositas larutan meningkat, fiber yang terbentuk cenderung memiliki diameter yang lebih besar dan permukaan yang lebih kasar.

Di sisi lain, larutan dengan viskositas rendah dapat menghasilkan fiber dengan diameter yang lebih kecil dan permukaan yang lebih halus.

2. Keunikan Struktur fiber

Struktur internal fiber juga dapat dipengaruhi oleh viskositas larutan polimer. Ketika viskositas meningkat, fiber yang terbentuk memiliki struktur yang lebih padat dan orde molekuler yang lebih tinggi, yang dapat meningkatkan kekuatan dan kekakuan fiber. Di sisi lain, viskositas rendah dapat menghasilkan fiber dengan struktur yang lebih longgar dan pori yang lebih besar.

3. Kekuatan Mekanik fiber

Kekuatan mekanik fiber dapat dipengaruhi oleh viskositas larutan polimer. Dalam beberapa situasi, peningkatan viskositas dapat meningkatkan kekuatan tarik fiber karena adanya peningkatan kontak antara rantai polimer. Namun, viskositas yang terlalu tinggi dapat menimbulkan masalah seperti kesulitan dalam proses spinning dan meningkatkan kerapuhan fiber.

Faktor-faktor lain yang memengaruhi proses *dry-jet wet spinning*

1. Komposisi Larutan Polimer

Komposisi larutan polimer, termasuk jenis polimer, konsentrasi, dan aditif tambahan, memiliki pengaruh pada viskositas larutan dan morfologi fiber yang terbentuk. Perubahan dalam komposisi larutan dapat mempengaruhi karakteristik fiber yang dihasilkan, seperti kekuatan, elastisitas, dan sifat-sifat lainnya (Y. Zhang et al., 2018).

2. Kecepatan Tarik fiber

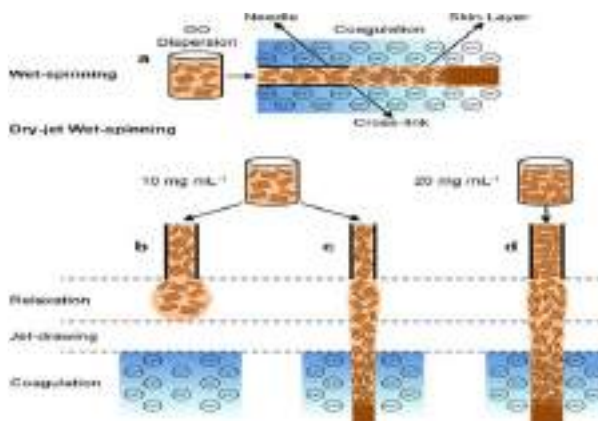
Kecepatan tarik fiber memiliki peran penting dalam mempengaruhi morfologi dan struktur fiber. Variasi kecepatan tarik fiber dapat mempengaruhi ukuran fiber, tingkat porositas, dan orientasi molekul dalam fiber (J. K. Kim et al., 2017).

3. Suhu Larutan dan Suhu Pengeringan

Morfologi dan sifat mekanik fiber yang dihasilkan juga dipengaruhi oleh suhu larutan polimer dan suhu pengeringan. Fluktuasi suhu ini dapat memengaruhi kristalinitas, kekuatan tarik, dan elastisitas fiber (P. Wang et al., 2020)

Tabel 5. 6 Parameter struktural dan sifat mekanik *Dry Jet Spin* dan fiber komersial (Viscord 1840 CS3) (Vocht et al., 2021).

<i>Fiber type</i>	<i>Dry-jet spin (65-6)</i>	Viscord (1840) CS3)
fr	0,79 ± 0,02	0,57 ± 0,06
fc	75 ± 4	68 ± 3
(1-10) (nm)	3,14	3,58
(110) (nm)	3,41	3,62
(020) (nm)	4,93	3,74
<i>finences</i> (dtex)	1,10	2,05
<i>elongation at break</i> (%)	5,0 ± 0,8	14,5 ± 2,5
<i>Tenacity</i> (cN/tex)	45 ± 2	44 ± 4
<i>Young'S modulus</i> (cN/tex)	2250 ± 120	1150 ± 80

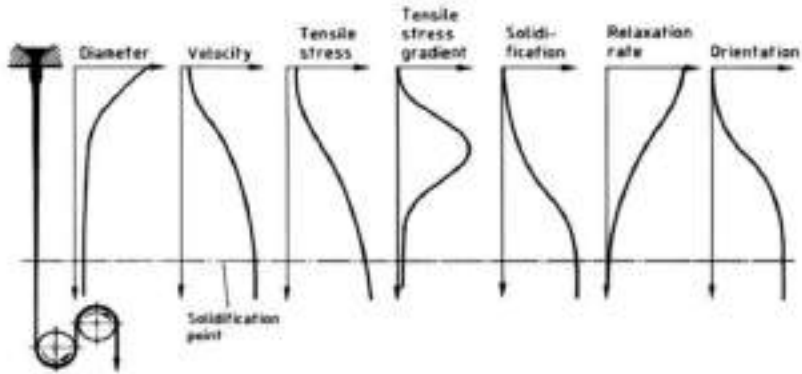


Gambar 5. 14 Tahapan Pembentukan Fiber (Seyedin et al., 2015)

Gambar 5.14 mengilustrasikan berbagai tahapan pembentukan fiber dalam metode *wet spinning* dan *dry-Jet Wet Spinning*. Pada *wet spinning*, terjadi pembentukan kulit pada tahap awal koagulasi, ditandai dengan garis putus-putus. Selanjutnya, terjadi hubungan silang dari struktur internal, yang ditunjukkan oleh garis padat tipis yang melintang lembar GO, selama proses koagulasi. Pada *dry-jet wet spinning*, terdapat larutan spinning yang dapat membentuk tetesan di ujung spinning, yang menghambat pembentukan jet. Untuk mencegah pembentukan droplet, beberapa tindakan dapat dilakukan, seperti mengurangi diameter jarum atau meningkatkan konsentrasi GO. Jika pancaran kontinu terbentuk di udara, baik dengan mengurangi diameter jarum maupun meningkatkan konsentrasi GO, jet dapat mengalami relaksasi dan mengalir.

Parameter yang khas pada fiber yang dipengaruhi selama proses spinning ditampilkan dalam Gambar 5.15. Pematatan filamen terjadi melalui proses pendinginan (*quenching*) atau dalam bak koagulasi. Solidifikasi fiber terkait dengan peningkatan viskositas geser nol. Dalam massa viskos, relaksasi berlangsung dengan kecepatan yang lebih lambat. Dengan demikian, gaya perpanjangan dan peningkatan viskositas meningkat sejalan dengan

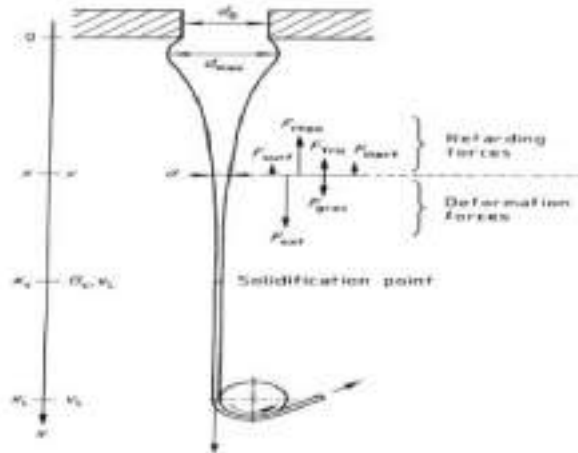
peningkatan orientasi sepanjang sumbu fiber (Asaadi, 2019).



Gambar 5. 15 Perubahan parameter fiber pada proses *spinning*

Kualitas fiber dapat dipengaruhi oleh ketidakstabilan dalam proses *spinning* fiber. Ketidakstabilan ini dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti laju penarikan, tegangan permukaan, inersia, dan karakteristik material. Proses *spinning* dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori yaitu internal dan eksternal. Proses internal terjadi sebelum massa *spinning* keluar dari lubang *spinneret*, sementara proses eksternal dimulai ketika massa *spinning* meninggalkan lubang *spinneret*. Oleh karena itu, gambaran dan pepadatan filamen juga merupakan bagian dari proses eksternal. Proses aliran dalam *spinning* dikendalikan oleh sifat aliran geser seperti

viskositas geser (η) dan laju geser (γ) dari larutan spinning pada kondisi ekstrusi. Proses aliran tersebut juga dapat ditandai oleh viskositas elongasi (η_D) dan laju elongasi ($\dot{\gamma}$) (Asaadi, 2019).



Gambar 5. 16 Keseimbangan gaya dalam spinning filamen

Serat yang dihasilkan *Dry-jet-wet-spinning* memiliki struktur fibrilar yang teratur dan tingkat kristalinitas yang tinggi yang diperlukan, serta memiliki rantai yang panjang untuk menghasilkan kekuatan dan modulus yang lebih baik daripada serat semi-kristalin yang lebih fleksibel. Serat tersebut juga memiliki rendahnya sifat regangan. Modulus serat PPTA pada umumnya tidak terkait dengan viskositas dan keberadaan rongga udara. Serat PPTA dengan

kinerja tinggi diketahui memiliki modulus dan kekuatan yang sangat tinggi, serta stabilitas termal yang diperoleh dari struktur kimianya. Tabel 5.7 membandingkan proses *dry-jet wet spinning* dan proses *wet spinning*.

Tabel 5. 7 Perbedaan Proses *Dry-Jet Wet Spinning* dan *Wet Spinning*

	Dry Jet-Wet Spinning	Wet Spinning
Konsentrasi	<i>Dope</i> dengan konsentrasi anisotropik yang tinggi	<i>Dope</i> dengan konsentrasi rendah
Pemintalan	<i>Downdown</i> yang tinggi dan terjadi proses pemadatan dalam rongga udara	<i>Downdown</i> yang rendah
Keagulasi	Suhu rendah (lambat)	Suhu tinggi (cepat)
Sifat mekanis	Kekuatan 15-30 gpd; modulus 200-1000 gpd; mulur <5%	Kekuatan <12 gpd; modulus 100-500 gpd; mulur sampai 10%
Pemantapan panas	Tidak diperlukan	Sifat-sifat diperoleh dari proses <i>drawing</i> saat proses pemantapan panas

Pada proses *Dry-Jet Wet Spinning* ini, larutan pemintalan memasuki *spinneret*, kemudian filamen polimer diekstrusi dari *spinneret* ke dalam daerah celah udara dengan laju aliran massa Q . Filamen tersebut kemudian ditarik atau dipanjangkan oleh alat pengambil dengan kecepatan keluar u . Selama melintasi daerah celah udara dengan panjang spesifik L , filamen mendingin dan mulai mengalami orientasi akibat gaya pengambilan. Kesenjangan antara

spinneret dan permukaan bak koagulasi, yang dikenal sebagai celah udara, bervariasi tergantung pada jenis polimer dan teknologi yang digunakan. Misalnya, dalam pemintalan akrilik, celah udara dapat memiliki ukuran hanya beberapa milimeter, sedangkan dalam pemintalan *lyocell*, celah udara dapat mencapai beberapa sentimeter.

Suhu merupakan faktor kunci yang mengatur difusi pelarut dan non-pelarut (Shirsat et al., 2016). Seperti pada banyak proses difusi, peningkatan suhu akan meningkatkan tingkat difusi baik pelarut maupun non-pelarut. Perubahan suhu dapat terjadi pada bak koagulasi atau dalam larutan polimer spinning. Tingkat difusi pelarut biasanya meningkat lebih cepat daripada non-pelarut. Pada sistem pemintalan serat akrilik, suhu umpan koagulasi umumnya berada dalam rentang 0 °C hingga 50°C, sementara larutan polimer spinning berada antara 25 °C dan 120 °C.

Pada proses peregangan, daerah amorf dan kristal fiber mengalami orientasi sepanjang sumbu fiber dan peningkatan pori. Molekul dalam rantai bergerak melewati satu sama lain dan sejajar, yang memungkinkan pembentukan ikatan silang melalui interaksi dipol dan membentuk struktur batang dua dimensi. Orientasi atau peregangan yang diberikan

pada serat akrilik saat *wet spinning* sangat penting dalam mengubah struktur fiber dan meningkatkan sifat fiber. Dengan peningkatan peregangan keseluruhan, rasio denier/filamen menurun. Suhu fiber dinaikkan di atas suhu transisi kaca basah, dan fiber diregangkan 3 hingga 12 kali antara sepasang rol dengan menggunakan air panas sebagai media pemanas. Proses peregangan ini meningkatkan orientasi jaringan fibrilar yang terbentuk di bak pemintalan dan juga meningkatkan kekuatan fiber.

5.2 *Melt Spinning*

Pada masa perkembangannya *melt spinning* merupakan teknik yang digunakan dalam proses pembentukan logam yang biasanya digunakan untuk membentuk pita tipis dari logam atau paduan struktur atom tertentu. Teknik *melt spinning* pertama kali dipatenkan pada tahun 1958–1961 oleh Robert Pond dan kemudian konsep *melt spinning* dikembangkan lebih lanjut oleh Pond dan Maddin pada tahun 1969 (Spatz et al., 2021). Sejak tahun 1980-an, proses *melt spinning* yang juga dikenal dengan teknik pemintalan lelehan merupakan teknik yang digunakan dalam memproduksi material magnetik (Pagnola et al., 2018). *Melt spinning* dikenal pula dengan *Thermally-Induced Phase Separation* (TIPS) yang pada awalnya diterapkan sebagai teknik dalam pembuatan membran mikro (Lu et al., 2021).

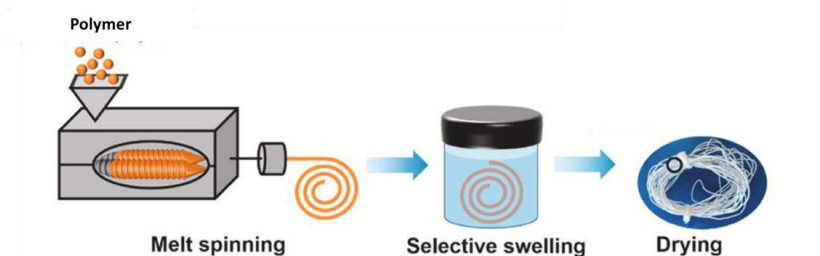
Melt spinning merupakan jenis pemintalan yang dilakukan dengan cara melelehkan padatan polimer yang biasa disebut dengan chips. Lelehan chips akan didorong melewati sebuah filter yang disebut dengan *spinneret* menggunakan *gear pump*. Serat-serat yang keluar melalui lubang *spinneret* akan mengalami pemadatan dan membentuk fiber. Pada proses ini polimer cair akan cepat membeku saat bersentuhan dengan permukaan drum yang dingin dan besar. Pada proses pembentukan logam, *melt spinning* terdiri dari pembentukan lembaran tipis dengan paduan logam pada permukaan datar yang berputar dengan suhu tetap (konstan). Pada proses ini, semburan logam cair dikeluarkan melalui nosel dengan tekanan berlebih dari gas inert, dan berdampak pada permukaan roda tembaga padat yang berputar. Dengan cara ini, membentuk bejana tipis dari bahan cair yang dengan cepat mengeras sebagai pita kontinu yang kemudian dikumpulkan dan digulung untuk mendapatkan kumparan magnet sebagai produk akhir (Pagnola et al., 2018).

Melt spinning merupakan metode yang paling ekonomis untuk menghasilkan *hollow fiber*, yang mana teknik ini tidak memerlukan pelarut dalam proses pemintalan serta kecepatan pemintalan cukup tinggi (Nakajima et al., 1994; Ruckdashel et al., 2020). Teknik ini melibatkan pengecoran polimer cair dengan menyemprotkannya melalui lubang-lubang *spinneret* ke

dalam ruang pendinginan. Pada teknik ini diperlihatkan laju pendinginan yang tinggi berkisar antara 105-106 K/s, yaitu sekitar tiga-empat kali lipat lebih cepat daripada proses pengecoran konvensional (Zhao et al., 2020). Teknik *melt spinning* memerlukan beberapa persyaratan, seperti polimer yang tidak mudah menguap atau terdekomposisi pada suhu lelehan, pengaturan tekanan dan kecepatan yang tepat. Oleh karena itu, polimer termoplastik (seperti poliester, nilon, olefin, polipropilen, saran, dan sulfur) yang dilelehkan digunakan sebagai polimer dalam teknik *melt spinning* (J. Li et al., 2017; Temesgen et al., 2021). Polimer termoplastik memiliki sifat yang mudah dibentuk dalam keadaan dipanaskan dan memadat ketika didinginkan. Menurut Temesgen et al. (2021) dalam teknik *melt spinning*, lelehan polimer dapat diekstrusi melalui *spinneret* yang berisi sejumlah lubang. Pada proses ini dihasilkan serat polimer dengan struktur atom tertentu yang memiliki sifat magnetik dan fisik yang unik dengan bentuk penampang yang berbeda-beda. *Melt spinning* juga banyak digunakan untuk membentuk gelas logam atau bahan dengan butiran atau kristal nano yang sangat kecil (Rong et al., 2018).

Secara umum prinsip kerja teknik *melt spinning* adalah teknik pembuatan serat polimer dengan cara menyempotkan cairan polimer yang diperoleh dari pemanasan serpih polimer. Pemanasan dilakukan menggunakan suhu yang tinggi dari titik leleh polimer (Lu

et al., 2021). Kemudian lelehan polimer tersebut disuapkan dengan tekanan dan kecepatan tetap melalui lubang *spinneret* (S. Wang et al., 2022). *Melt spinning* polimer dalam pembuatan *hollow fiber* dapat dilakukan dengan pemintal dari konstruksi khusus, seperti cetakan annular untuk membentuk bagian berongga dan cetakan busur tersegmentasi untuk menginduksi udara (Lu et al., 2021; Temesgen et al., 2021). Saat udara menyentuh serat, maka serat akan memadat dan dikumpulkan pada roda pengambil yang dingin. Roda yang berputar umumnya didinginkan secara internal dengan air atau bahan konduktif panas tinggi, seperti tembaga (Rong & Shen, 2018). Namun perlu diperhatikan, apabila polimer yang digunakan memiliki viskositas yang sangat tinggi, maka diperlukan modifikasi proses yang memungkinkan proses penarikan yang sangat lembut pada teknik *melt spinning* (Probst et al., 2021). Gambar skematik untuk *melt spinning* ditunjukkan pada Gambar 5.17



Gambar 5. 17 Skema Proses Melt Spinning pada Membran (Zhong et al., 2021).

Melt spinning pada dasarnya adalah proses orientasi rantai molekuler, yang dapat diatur oleh suhu dan tekanan yang diterapkan. Interaksi antar rantai molekul dapat mengalami penurunan sejalan dengan meningkatnya suhu proses dan kecepatan geser, yang dapat diketahui dari menurunnya viskositas lelehan. Namun, suhu dan kecepatan geser yang tinggi dapat menginduksi degradasi polimer melalui pembelahan rantai molekuler, yang dapat menurunkan sifat mekanik serat yang dihasilkan (S. Wang et al., 2022). Selain itu, pengaturan tekanan dan kecepatan geser diperlukan untuk menghindari pembentukan tetesan atau putusya serat yang dapat mempengaruhi kualitas serat. Teknik ini juga memerlukan pendinginan yang cepat dan seragam untuk membentuk struktur atom yang diinginkan. Laju pendinginan dari *melt spinning* tergantung pada beberapa faktor, yaitu: 1) ketebalan lelehan yang didinginkan, biasanya dikontrol dengan mengubah laju putaran rol pendinginan; 2) tingkat tuang dari paduan cair, biasanya dikontrol oleh diameter pembukaan nosel dan tekanan yang keluar; 3) perpindahan panas dari lelehan ke permukaan rol, yang bergantung pada energi antarmuka antara lelehan dan permukaan rol, konduktivitas panas bahan rol, perpindahan panas antara rol dan air pendingin, dan seterusnya (Rong & Shen, 2018). Laju pendinginan pada *melt spinning* dapat memberikan pengaruh terhadap struktur produk akhir yang dibentuk.

Teknik *melt spinning* memiliki beberapa keuntungan, seperti tidak memerlukan pelarut atau penguapan seperti pada teknik pemintalan larutan, memiliki kecepatan pemintalan yang tinggi, dan memiliki biaya investasi yang rendah. Teknik ini juga tidak menimbulkan polusi lingkungan karena tidak melepaskan zat-zat berbahaya ke udara atau air. Namun, teknik *melt spinning* juga memiliki beberapa kelemahan, seperti hanya dapat digunakan untuk bahan yang tidak mudah menguap atau terdekomposisi pada suhu lelehan, sehingga membatasi variasi bahan yang dapat diproses (Wijayanti et al., 2021). Selain itu, teknik *melt spinning* menghasilkan serat polimer dengan ukuran yang cukup besar dan bentuk yang tidak homogen. Bentuk serat polimer yang tidak homogen dapat menyebabkan ketidakseragaman dalam distribusi tegangan dan deformasi pada serat polimer, sehingga mempengaruhi sifat-sifat seperti kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan regangan putus.

Teknik *melt spinning* dipengaruhi oleh kandungan komposisi pemintalan. Secara umum, semakin banyak polimer yang digunakan maka meningkat pula kinerja pemrosesan, tetapi mengurangi porositas. Sedangkan apabila polimer yang digunakan lebih sedikit maka akan menyebabkan putusnya filamen membran, yang tidak dapat memenuhi proses pembentukan secara kontinyu (Ji et al., 2022).

Melt spinning memiliki berbagai tantangan dan prospek masa depan. Tantangan yang dihadapi adalah mengembangkan teknik *melt spinning* untuk bahan-bahan yang mudah menguap atau terdekomposisi, meningkatkan kualitas dan homogenitas produk, serta mengurangi pemborosan energi dan bahan baku. Teknik *melt spinning* juga memiliki prospek masa depan yang menjanjikan, seperti memanfaatkan teknik ini untuk menghasilkan produk-produk inovatif yang memiliki nilai tambah tinggi, seperti serat polimer dengan sifat optik, elektronik, atau biomedis yang unggul, serta menerapkan teknik ini untuk menghasilkan produk-produk ramah lingkungan yang dapat didaur ulang atau terurai secara biologis.

5.3 *Electrospinning*

Electrospinning atau pemintalan serat elektrostatis merupakan salah satu teknik sederhana, efisien, dan ekonomis yang digunakan untuk membuat membran serat polimer dengan diameter mikro/nanometer kontiyu (Aman Mohammadi et al., 2020). Selain itu, *electrospinning* juga sering disebut teknik fabrikasi dengan cara pemintalan serat mikro/nanometer berongga maupun padat dengan menggunakan gaya listik untuk menghasilkan serat-serat yang sangat tipis, bahkan mampu menghasilkan serat nano dengan ukuran paling kecil yakni 0,04 – 2 mikron (Bhattarai et al., 2018). Mesin *electrospinning* biasanya terdiri dari

spinneret, sistem pasokan larutan, pelat pengumpul serat (kolektor), serta catu daya tegangan tinggi. *Spinneret* dengan penampang melingkar akan membantu menghasilkan serat padat melingkar. Pada proses pembuatan serat nanofiber melalui *electrospinning* menurut Long et al. (2019) adalah berdasarkan pada peregangan uniaksia atau pemanjangan jet viskoelastik yang berasal dari larutan atau lelehan polimer.

Proses *electrospinning* dimulai ketika larutan polimer dipompa pada laju aliran konstan dan tegangan tertentu diterapkan untuk menciptakan medan listrik antara ujung jarum dan kolektor. Umumnya Pompa jarum suntik digunakan untuk menggerakkan larutan polimer atau lelehan polimer dari *spinneret*. Ketika tegangan yang dipasok tinggi, maka tetesan polimer di ujung jarum akan berubah menjadi kerucut yang dikenal sebagai kerucut Taylor. Setelah kerucut Taylor terbentuk, jet cair bermuatan dikeluarkan menuju kolektor.

Beberapa parameter yang mempengaruhi proses *electrospinning* dan karakteristik serat nano yang dihasilkan adalah tegangan yang digunakan, jarak antara ujung jarum dan kolektor, laju aliran larutan umpan, serta parameter lingkungan (Krisnandika, 2017) dibahas pada bagian berikut :

a. Tegangan yang Digunakan

Pada proses *elecrospinning* tegangan yang diberikan dapat memberikan pengaruh, salah satunya adalah mempengaruhi jumlah muatan pada larutan yang digunakan. Untuk menghasilkan serat nanofiber, umumnya tegangan yang diberikan harus bervariasi yaitu 5 – 50 kV dengan laju aliran, volume, dan masalah keamanan yang dapat dioptimalkan (Owida et al., 2022). Peningkatan voltase akan mempercepat pembentukan jet, di mana dapat dihasilkan semprotan jet dari polimer elektro yang lebih tinggi dan dikeluarkan dari *spinneret*. Tingginya nilai tegangan untuk membentuk kerucut Taylor tergantung dari laju larutan umpan. Oleh karena itu, pada proses ini diperlukan tegangan yang lebih tinggi sehingga peregangan akan lebih besar yang dapat membuat serat lebih tipis. Hal ini dapat terjadi karena larutan dengan viskositas rendah, pada tegangan yang tinggi dapat menunjang pembentukan pancaran sekunder sehingga didapatkan diameter serat yang lebih kecil. Sementara itu, peregangan tetesan larutan dapat meningkat dengan tegangan yang lebih tinggi. Tegangan tinggi dapat menghasilkan jumlah muatan yang lebih tinggi. Hal ini dapat terjadi karena adanya perbedaan potensial sehingga jet dapat lebih cepat ke arah kolektor karena banyaknya volume larutan pada

ujung jarum. Hasilnya adalah didapatkan diameter serat yang lebih besar.

b. Jarak Antara Ujung Jarum dan Kolektor

Pada proses *electrospinning*, jarak antara ujung jarum dan kolektor berkisar antara 10 – 15 cm. Pada *electrospinning* menggunakan polimer yang dilelehkan, larutan pada polimer akan menguap sehingga sebelum ujung jarum mencapai dinding kolektor semprotan jet menjadi padat dan terkumpul membentuk serat nano yang saling terhubung (Ichwan et al., 2011). Jarak antara ujung jarum dan kolektor berpengaruh pada jalur jet, kuat medan listrik, dan waktu tempuh. Jarak berbanding lurus dengan waktu tempuh dan berbanding terbalik dengan kuat medan listrik. Jika jarak terlalu dekat maka waktu tempuh akan lebih sedikit, hal ini dapat menyebabkan pelarut tidak dapat menguap secara sempurna saat sampai di kolektor. Jika jarak ini dinaikkan maka akan dapat meregang jarak yang membuat diameter serat mengecil. Namun di luar jarak tertentu diameter serat justru dapat meningkat, ini disebabkan karena kekuatan medan listrik yang melemah secara signifikan.

c. Laju Aliran Umpan

Aliran umpan merupakan jumlah larutan yang dapat melewati jarum. Pada umumnya laju aliran umpan tidak memberikan dampaksignifikan pada

sebagian besar serat nano elektrospun. Akan tetapi, terdapat keseimbangan terhadap laju pengeluaran larutan dan laju penarikan larutan dari ujung jarum selama *electrospinning*. Pada laju umpan optimal, sebaran diameter serat dan penyimpangan akan menghasilkan sebaran diameter serat yang lebih besar. Ketika laju larutan umpan terlalu tinggi, larutan akan menetes secara berkala dan serat dengan butiran kecil akan diamati. peningkatan diameter serat dan laju umpan dapat mengakibatkan pembentukan tetesan dan serat basah. Ketika laju larutan umpan dinaikkan, menyebabkan larutan menjauh dari ujung jarum karena adanya gaya tolak oleh muatan pada larutan. Sedangkan pengurangan laju larutan umpan dapat mengurangi ukuran terhadap serat yang dikumpulkan. Namun, apabila laju larutan umpan konstan, maka akan menyebabkan gangguan terhadap pemintalan polimer sehingga dihasilkan kerucut Taylor yang kecil dan kurang stabil. Selain itu ketika laju larutan umpan tidak memenuhi laju penarikan serat, maka dapat mengganggu proses pembentukan kerucut Taylor dan menimbulkan diameter serat yang lebih besar.

d. Parameter Lingkungan

Selain proses *electrospinning*, sifat larutan dan parameter lingkungan juga dapat memberikan pengaruh pada produksi dan morfologi serat.

Pengaruh parameter lingkungan terhadap proses *electrospinning* dapat dilihat pada Tabel 5.8 berikut:

Tabel 5.8 Pengaruh Parameter Lingkungan Terhadap Proses *Electrospinning* (Long et al., 2019)

Parameter	Efek pada Serat Elektrospon	Mekanisme
Konduktivitas larutan	Peningkatan konduktivitas larutan dapat meningkatkan kualitas serat yaitu butir-butir berkurang serta diameter serat menjadi lebih tipis	konduktivitas larutan yang meningkatkan dapat menyebabkan peregangan terhadap pancaran larutan akibat muatan larutan lebih tinggi, Selain itu, peningkatan konduktivitas dapat menyebabkan ketidakstabilan lentur dan memperpanjang jalur jet
Viskositas larutan	Viskositas larutan yang tinggi akan menginduksi diameter serat yang lebih besar	Saat viskositas meningkat, peregangan larutan polimer agar menjadi diameter yang diinginkan tidak maka muatan dalam proses memintal memulai pemintalan mungkin tidak cukup

Parameter	Efek pada Serat Elektrospun	Mekanisme
		<p>untuk meregangkan larutan polimer ke diameter serat yang diinginkan.</p>
Volatilitas pelarut	<p>Volatilitas pelarut harus berada di wilayah tertentu. Pelarut yang mudah menguap dapat menghasilkan serat pita atau datar dan serat dengan pori-pori pada permukaan</p>	<p>Larutan yang dibuat dari pelarut dengan volatilitas yang sangat rendah dapat menyebabkan serat basah, serat menyatu, bahkan tidak terdapat kumpulan serat. Sebaliknya, volatilitas yang tinggi dapat mengakibatkan pemintalan terputus-putus karena pemadatan polimer di ujung pemintal.</p>
Kelembaban	<p>Kelembaban yang lebih tinggi atau lebih rendah dapat menghasilkan diameter serat yang lebih besar.</p>	<p>Pada kelembapan yang relatif tinggi, dapat mencegah pemanjangan polimer lebih lanjut, dengan demikian dapat dihasilkan serat yang lebih tebal. Sedangkan untuk kelembapan yang relatif lebih rendah,</p>

Parameter	Efek pada Serat Elektrospun	Mekanisme
		dapat mempercepat penguapan pelarut serta meningkatkan laju pepadatan, sehingga diameter serat mengalami peningkatan.
Suhu	Temperatur yang lebih tinggi akan menghasilkan diameter serat yang lebih tipis.	Temperatur yang lebih tinggi dapat menyebabkan laju penguapan (evaporasi) mengalami peningkatan serta dapat menyebabkan viskositas pada larutan polimer menurun yang dapat menyebabkan penurunan pada diameter serat.

Parameter-parameter ini dapat disesuaikan untuk menghasilkan serat nano dengan diameter, morfologi, orientasi dan komposisi yang diinginkan. Oleh karena itu, parameter ini harus dioptimalkan dengan teliti dengan mengontrol diameter serat serta keselarasannya. Elektrospinning dalam prosesnya dipengaruhi oleh beberapa faktor yang meliputi: 1) parameter sistem, seperti

berat molekul polimer, distribusi berat molekul dan larutan (viskositas, tegangan permukaan, konduktivitas); 2) parameter proses, seperti laju aliran, potensial listrik, jarak antara kapiler dan kolektor, gerak kolektor; 3) parameter lingkungan, seperti suhu, kelembaban, dan kecepatan udara (Abdelhafiz et al., 2022)

Teknik *electrospinning* memiliki tujuan untuk membuat serat-serat skala nano kontinu dengan diameter kecil dalam kisaran sub-mikrometer hingga nanometer menggunakan medan listrik dengan tegangan tinggi (Putri, 2023). Teknik ini juga memiliki tujuan untuk memanfaatkan sifat-sifat unik dari serat nano seperti luas permukaan yang tinggi, struktur berpori, dan modulus elastisitas yang tinggi untuk berbagai aplikasi di bidang biomedis, filtrasi, sensor, dan lain-lain (Wahyudi et al., 2011). Teknik *electrospinning* memiliki beberapa jenis yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan dan tujuan pembuatan serat nano. Dengan demikian, tujuan utama teknik *electrospinning* adalah untuk menciptakan serat-serat nanofiber dengan struktur yang unik, luas permukaan yang besar, dan porositas yang tinggi, serta memenuhi kebutuhan aplikasi tertentu dalam berbagai bidang seperti teknologi membran, pengiriman obat, rekayasa jaringan, dan katalisis.

Salah satu bagian penting dalam teknik *electrospinning* adalah pemberian tegangan tinggi pada larutan. Proses *electrospinning* memerlukan minimal tiga komponen yaitu :

Sumber listrik bertegangan tinggi (*high voltage*) dengan arus searah (Jim et al.), pompa semprot atau *syringe* beserta jarum dengan lubang halus (*spinneret*), dan dinding atau kolektor serat nano (Putri, 2023). Berbeda dengan teknik lain, *electrospinning* mampu mensintesis bahan berserat dengan luas permukaan dan porositas yang lebih tinggi, lebih fleksibel, dapat memberikan respon baik terhadap lingkungan sekitar, serta mampu mengontrol pelepasan senyawa terikat (L. Li et al., 2018).

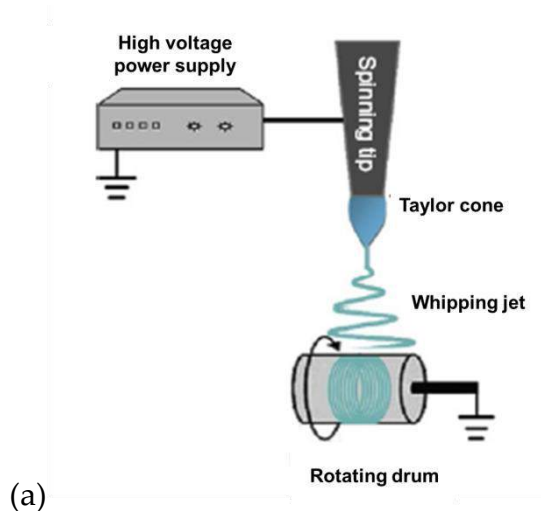
Electrospinning memiliki prinsip kerja yang melibatkan tegangan listrik tinggi, medan listrik, dan fenomena elektrohidrodinamik. Tegangan listrik tinggi diterapkan pada larutan polimer yang disimpan dalam tabung suntik, lalu melewatkannya melalui medan listrik yang kuat, sehingga larutan memiliki muatan yang tinggi (Wahyudi & Sugiyana, 2011). Fenomena elektrohidro-dinamik menyebabkan meniskus cair pada ujung jarum berubah bentuk menjadi kerucut Taylor dan mengeluarkan jet cair bermuatan menuju kolektor (Long et al., 2019). Selama perjalanan jet cair, pelarut menguap dan serat nano memadat akibat gerakan mencambuk (putaran spiral) yang terjadi. Mekanisme kerja *electrospinning* dapat dibagi menjadi tiga tahap, yaitu tahap inisiasi, tahap elongasi, dan tahap solidifikasi (Garg et al., 2011).

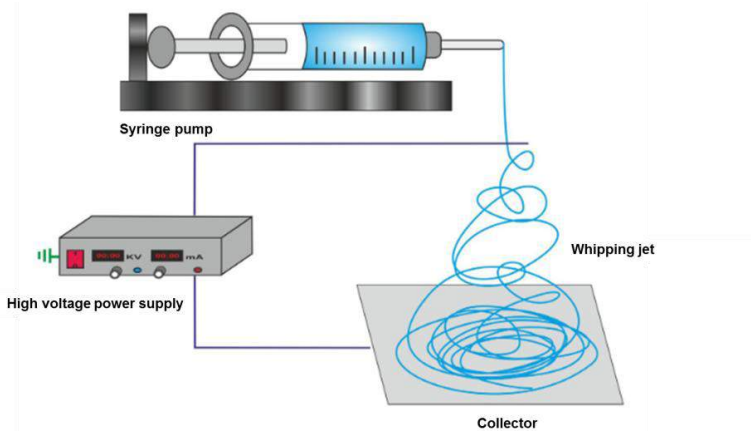
- a. Tahap inisiasi, larutan polimer mulai terbentuk menjadi jet cair bermuatan setelah tegangan listrik

tinggi mencapai nilai kritis yang dapat mengalahkan tegangan permukaan larutan.

- b. Tahap elongasi, jet cair bermuatan mengalami peregangan dan penipisan akibat gaya elektrostatis dan gaya aerodinamik selama perjalanan menuju kolektor.
- c. Tahap solidifikasi, serat nano terbentuk setelah pelarut menguap sepenuhnya dari jet cair bermuatan. Prinsip kerja *electrospinning* dipengaruhi oleh beberapa parameter yang dapat memodifikasi karakteristik serat nano yang dihasilkan.

Skema proses elektrospinning dapat dilihat pada Gambar 5.18 berikut :





(b)

Gambar 5. 18 Skema proses electrospinning (a) *Electrospinning* menggunakan kolektor drum berputar (Yuan et al., 2017). (b) *Electrospinning* menggunakan pengumpul kolektor *ground* (Aman Mohammadi et al., 2020).

Proses *electrospinning* melibatkan beberapa langkah, antara lain:

1. Persiapan larutan: Polimer dilarutkan dalam pelarut yang sesuai untuk membentuk larutan yang homogen.
2. Pemilihan *spinneret*: *Spinneret* yang tepat dipilih tergantung pada struktur serat yang diinginkan, seperti *spinneret* tunggal, koaksial, atau sisi demi sisi.
3. Pengaturan parameter: Beberapa parameter yang dapat diatur dalam *electrospinning* meliputi kecepatan aliran

larutan, tegangan yang diterapkan, jarak antara *spinneret* dan kolektor, serta suhu dan kelembaban lingkungan.

4. Pembentukan serat: Larutan polimer dialirkan melalui *spinneret* dan medan listrik yang diterapkan menyebabkan larutan tersebut membentuk serat-serat yang sangat tipis saat jatuh ke kolektor.
5. Pengeringan dan pengumpulan: Serat-serat yang terbentuk dikumpulkan pada kolektor yang sesuai dan kemudian dikeringkan untuk menghasilkan serat nanofiber yang kering.

Teknik *electrospinning* memiliki beberapa keuntungan dan kelemahan yang perlu dipertimbangkan. Keuntungan teknik *electrospinning* adalah kemampuannya untuk menghasilkan serat dengan diameter yang sangat kecil; dapat mengendalikan ukuran, bentuk, dan orientasi serat; kemudahan dalam pengoperasian dan perawatan peralatan; fleksibilitas dalam pemilihan bahan polimer; dan konsistensi dalam distribusi ukuran dan morfologi serat nano (Wahyudi & Sugiyana, 2011; Waresindo, 2019). Keuntungan lain dari *electrospinning* adalah keserbagunaannya dalam memproses untuk membuat serat dari berbagai jenis material dengan sifat yang berbeda-beda, dan dapat diaplikasikan pada berbagai bidang seperti rekayasa jaringan, pengobatan regeneratif, enkapsulasi molekul bioaktif, filtrasi udara dan air, dan lain-lain.

Namun, teknik *electrospinning* juga memiliki beberapa kelemahan yang perlu diperhatikan. Kelemahan teknik *electrospinning* yaitu membutuhkan tegangan listrik tinggi yang dapat menimbulkan bahaya bagi operator dan lingkungan; kesulitan dalam menghasilkan serat dengan diameter yang seragam dan teratur; serta memiliki sensitivitas terhadap kondisi lingkungan seperti kelembaban dan suhu (Waresindo, 2019). Keuntungan dan kelemahan teknik *electrospinning* dapat diatasi dengan melakukan beberapa modifikasi pada proses atau peralatan *electrospinning*.

Beberapa modifikasi yang dapat dilakukan untuk mengontrol sifat-sifat serat elektrospon menurut Bhattarai et al. (2018) adalah:

1. Memodifikasi variabel proses (voltase yang diberikan, laju aliran larutan, dan jarak antara kapiler bermuatan dan pengumpul), seperti menggunakan jarum ganda atau jarum banyak untuk meningkatkan produktivitas; menggunakan kolektor berputar atau berbentuk untuk menghasilkan serat nano yang beralignmen atau berbentuk tertentu;
2. Memodifikasi sifat larutan polimer (konsentrasi, berat molekul, viskositas, tegangan permukaan, volatilitas pelarut, konduktivitas, dan densitas muatan permukaan) seperti menggunakan larutan polimer campuran atau koaksial untuk menghasilkan serat

nano komposit atau inti-kulit; menggunakan larutan polimer emulsi atau suspensi untuk menginkorporasikan partikel atau molekul bioaktif ke dalam serat nano; menggunakan medan listrik tambahan atau bantuan mekanis untuk mengontrol orientasi dan porositas serat nano; serta menggunakan parameter proses yang optimal untuk mengurangi efek lingkungan.

Teknik *electrospinning* memiliki banyak pengaplikasian dan hasil yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai kebutuhan. Pengaplikasian teknik *electrospinning* adalah untuk membuat serat nano yang dapat digunakan di berbagai bidang seperti rekayasa jaringan, pengobatan regeneratif, enkapsulasi molekul bioaktif, filtrasi udara dan air, konversi dan penyimpanan energi, sensor optik dan kimia, bahan elektroda dan *biological scaffolds* (Senthamizhan et al., 2017; D. L. Yang et al., 2022). Pengaplikasian lainnya adalah untuk membuat membran nanofiber selulosa asetat dengan aktivitas antibakteri sebagai hemodialisis kreatinin (Wahyudi & Sugiyana, 2011). Hasil yang didapat dari teknik *electrospinning* adalah serat nano yang homogen, kontinyu, dan seragam dari diameter submikron hingga ukuran nanometer serta banyak teknik pemrosesan yang berbeda (D. L. Yang et al., 2022). Hasil lainnya adalah membran nanofiber selulosa asetat dengan ukuran pori sebesar 1 μm ,

kekuatan mekanik sebesar 0.00245 MPa, regangan sebesar 2.1209, dan Modulus Young sebesar 1.15777×10^{-5} GPa (Wahyudi & Sugiyana, 2011).

Teknik *electrospinning* memiliki beberapa tantangan dan prospek masa depan yang perlu diperhatikan. Tantangan teknik *electrospinning* adalah untuk meningkatkan resolusi, produktivitas, dan stabilitas proses pembuatan serat nano, serta untuk mengatasi masalah keselamatan dan lingkungan yang terkait dengan penggunaan tegangan listrik tinggi dan pelarut organik (D. L. Yang et al., 2022). Selain itu, tantangan lainnya adalah mengembangkan metode-metode baru yang dapat menghasilkan serat nano dengan struktur dan fungsi yang lebih kompleks dan canggih, seperti serat nano komposit, serat nano berpori, serat nano bergradasi, serat nano berbentuk bintang, dan serat nano berbentuk heliks (D. L. Yang et al., 2022). Menurut (Partheniadis et al., 2020), beberapa tantangan *electrospinning* adalah terbatasnya potensi dalam proses pembuatan serat nano. Hal tersebut berkaitan dengan tingkat produksi yang rendah dan pemanfaatan jarum sebagai pemintal. Tantangan lain yaitu dapat menghasilkan masalah kesehatan dan keselamatan karena penggunaan larutan polimer yang mudah menguap. Penggunaan larutan polimer yang mudah menguap ini dapat membatasi skalabilitas proses pada tingkat industri.

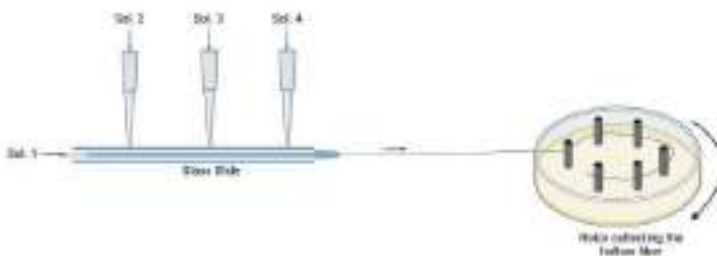
Mengingat *electrospinning* menjadi salah satu teknik yang paling populer dalam pembuatan bahan nanofibrous, teknik ini dianggap memiliki peluang yang baik di masa yang akan datang. Menurut (Baghali et al., 2021), *electrospinning* telah banyak digunakan di berbagai bidang aplikasi karena sifat intrinsiknya seperti porositas tinggi, luas permukaan yang besar, konektivitas yang baik, keterbasahan, dan kemudahan fabrikasi dari berbagai bahan. Prospek masa depan teknik *electrospinning* adalah untuk memanfaatkan potensi serat nano yang dihasilkan untuk berbagai aplikasi yang lebih luas dan inovatif, seperti bahan konduktif, bahan optik, bahan magnetik, bahan katalitik, bahan sensorik, bahan aktuatorik, bahan *self-healing*, bahan smart, dan bahan multifungsi (D. L. Yang et al., 2022). Prospek lainnya adalah untuk menggabungkan teknik *electrospinning* dengan teknik-teknik lain yang dapat meningkatkan kinerja dan fungsionalitas serat nano, seperti *3D printing*, *forcespinning*, *nozzleless electrospinning*, *coaxial electrospinning*, *emulsion electrospinning*, dan *core-shell electrospinning* (D. L. Yang et al., 2022).

5.4 Microfluidic Spinning

Microfluidic adalah teknik yang mampu untuk membuat bahan rekayasa seperti serat. Seperti proses *wet spinning*, *microfluidic spinning* dikembangkan lebih dari 17 tahun yang lalu. Metode produksi serat melalui *microfluidic*

spinning ini untuk pertama kalinya mencatat bahwa Teknik ini dapat memproduksi serat mikro secara terus menerus dimana aliran larutan dan diameter akhir *microfiber* sangat terkendali (Afshin et al., 2022)

Teknik fabrikasi pada *spinning* ini mempunyai kapasitas untuk menghasilkan *hollow fiber* dengan presisi yang tinggi sehingga membuat sejumlah kecil dari cairan polimer. Untuk jenis *spinning* kapiler berbasis *microfluidic devices* yang digunakan. Pada *device* ini hanya bisa memvariasikan angka kapiler berkisar dua atau lebih kapiler. Untuk memproduksi serat ini, terdapat 4 solusi yaitu, larutan pertama memiliki air suling dan natrium karboksimetil selulose, solusi kedua terdiri dari natrium alginat dan bromeosin, solusi ketiga memiliki air dan polietilen glikol, solusi keempat memiliki kalsium klorida anhidrat. (Vohra et al., 2023a)



Gambar 5. 39 Penyiapan Eksperimental untuk Menghasilkan *Hollow fiber* menggunakan *Microfluidic Spinning* (Vohra et al., 2023a)

Dibandingkan dengan metode *spinning* lainnya, teknologi *microfluidic spinning* menggabungkan teknologi *microfluidic* dengan reaksi kimia dan menggunakan chip *microfluidic* untuk mencapai control aliran yang tepat. Solusi fase dalam menggunakannya karakteristik aliran laminar mengalir sepanjang arah aliran cairan di saluran *microchip*, *microfluidic* tanpa menyentuh dinding bagian dalam *microchannel*. Itu mengalami transformasi fisik atau kimia untuk menghasilkan serat padat di dalam *microchannel* atau setelah penyemprotan (Mengfan Zhang et al., 2022)

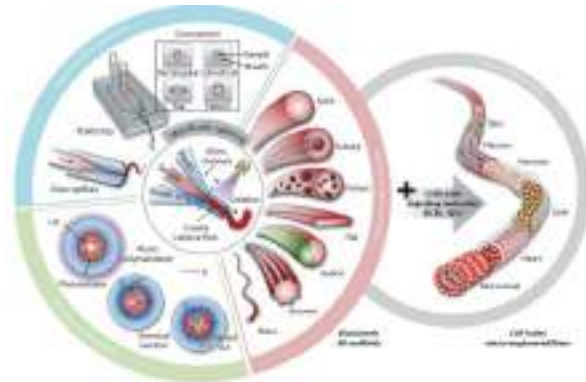
Salah satu keunggulan *microfluidic spinning* teknologi berakhir teknologi *spinning* lainnya adalah serat dengan geometri kompleks dapat dicapai hanya dengan mengontrol aliran laju, jenis larutan yang digunakan dan konsentrasi larutan. Secara khusus, laju alir dapat diubah dengan mengontrol tabel basah saluran mikro, misalnya, melapisinya dengan agen hidrofobik atau hidrofilik. Dengan kontrol yang baik ini proses, berbagai serat dengan beberapa bentuk penampang (seperti lingkaran, berongga, cangkang inti, berbentuk T, berbentuk U) dan struktur (seperti lurus, gelombang, dan spiral) telah diperoleh dengan luar biasa (Zhang dkk, 2022).

Dalam proses tipikal *microfluidic spinning*, cairan sampel terdiri dari prekursor polimer yang dimasukkan ke port input tingkat terpisah. Dengan merancang berbagai *microchannels*, cairan prekursor polimer dapat dibentuk

menjadi pola yang dapat dibuat dimana jari – jari cairan dapat dimodulasi dengan tepat oleh dimensi saluran mikro dan laju aliran fluida. Kemudian cairan sampel berbentuk dipadatkan untuk melestarikan yang dirancang membentuk dan menghasilkan serat dengan konfigurasi geometri yang berbeda, dimana reaksi pengerasan cepat sangat diperlukan untuk mengontrol dan mengembalikan bentuk serat yang diinginkan (Du et al., 2019).

Selama dekade terakhir, *microfluidic spinning* telah muncul sebagai metode canggih untuk fabrikasi serat dengan bentuk dan ukuran yang beragam tanpa menggunakan alat atau fasilitas yang rumit. Dalam ulasan ini menjelaskan perkembangan teknik berbasis *microfluidic spinning* saat ini untuk produksi serat skala mikro dan nano berdasarkan metode pemadatan, platform, geometri, atau biomaterial yang berbeda. Aplikasi serat yang muncul sebagai perancah *bottom-up* seperti enkapsulasi sel atau panduan untuk digunakan dalam penelitian rekayasa jaringan dan praktik klinis. Struktur disiapkan menggunakan dikendalikan pola dan bantalan morfologi berpori dan dikendalikan ukuran serat telah digunakan sebagai perancah. Bahan biologis, termasuk sel, dapat dengan mudah dimasukkan ke dalam serat yang disiapkan menggunakan teknologi *microfluidic*. Perkembangan terbaru yang menarik di bidang sistem pemintalan mikrofluida adalah demonstrasi perancah berserat kode fisikokimia

berdasarkan kalsium alginat. Teknologi *microfluidic spinning* muncul sebagai alat canggih untuk berbagai aplikasi dalam rekayasa jaringan dan biologi sel (Jun et al., 2014).

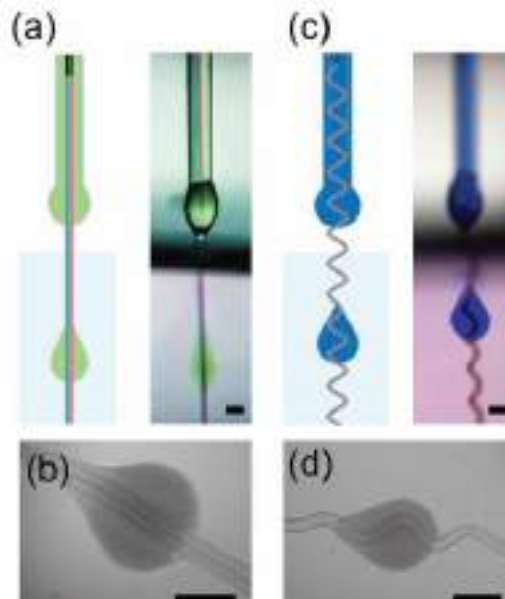


Gambar 5. 40 Tinjauan tentang berbagai metode microfluidic spinning yang digunakan untuk membuat serat, bersama dengan aplikasi rekayasa jaringan serat (Jun et al., 2014)

Teknologi *microfluidic spinning* digunakan untuk menyiapkan bahan berserat dari aspek pembentukan prinsip, geometri, dan aplikasi. Dengan mengontrol kondisi termasuk konsentrasi reagen, laju aliran, viskositas, dan metode *curing*, merancang *chip* pemintalan khusus, dan dilengkapi dengan strategi pemadatan yang sesuai, ini dapat secara efektif mengontrol ukuran, struktur, dan komposisi bahan dari serat. Ini memiliki prospek aplikasi yang luas

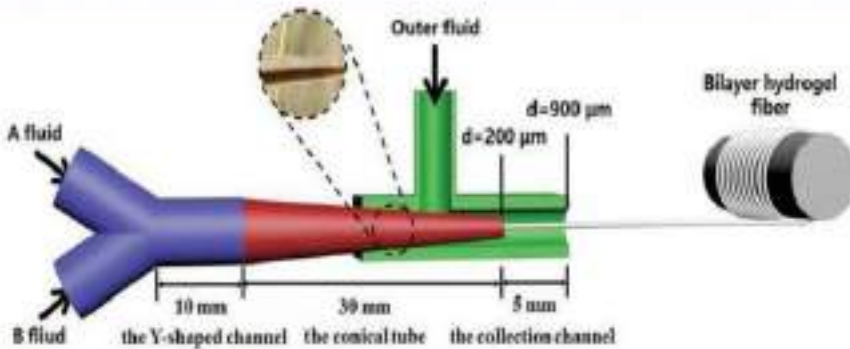
dalam rekayasa jaringan, pelepasan obat, elektronik fleksibel, dan bidang lainnya. Meskipun keunggulan unik yang disebutkan di atas telah terkenal pada teknologi *microfluidic spinning*, beberapa tantangan masih perlu diatasi (Mengfan Zhang et al., 2022).

Saat ini, teknik *microfluidic* telah berhasil digunakan untuk menghasilkan knotted *microfiber* dengan mengaplikasikan fase minyak atau gas-fase untuk generasi bola bahan pada *microfiber*. Dengan keuntungan dari operasi cairan yang tepat, proses fabrikasi sangat terkendali. Serat yang dihasilkan dipamerkan lebih banyak fungsi, seperti kristal koloid induksi perakitan, pengkodean tetesan, dan generasi sel *array microcarrier*. Jarak simpul dan ukuran serat dapat dikontrol dengan mudah dengan mengatur laju aliran. Spindel, belahan dan serat mikro berongga yang diikat kelopak dihasilkan dengan mengubah desain sistem *microfluidic spinning*. Selain itu, saluran Janus perfusi dan saluran heliks juga dibuat di dalam serat mikro yang diikat menggunakan pemintalan yang berbeda kepala. Manfaat dari proses pemintalan bebas minyak, sel bisa langsung dikemas dalam serat mikro yang diikat dan dikultur (R. Xie et al., 2018).



Gambar 5. 21 Skematik ilustrasi (kanan) dan gambar waktu nyata (kiri) dari proses microfluidic spinning untuk serat mikro yang diikat spindel dengan saluran Janus (Afshin et al.) dan saluran helical (d). skala tekanan: 500 μm (R. Xie et al., 2018)

Teknologi *microfluidic spinning* adalah teknik yang terinspirasi oleh fenomena alam laba-laba atau ulat sutera yang memintal sutera. Dapat juga dinyatakan sebagai jenis *Solution Blow Spinning* (SBS) sistem. Namun, pemintalan mikrofluida (Gambar 5.21), kombinasi dari *wet spinning* dan teknologi *microfluidic*, telah digunakan untuk memproduksi serat mikro dengan struktur unik (MKR et al., 2021).



Gambar 5. 22 Teknologi *Microfluidic Spinning* (MKR et al., 2021)

Sebagian besar polimer alami yang dapat dipintal menjadi serat memanfaatkan *microfluidic spinning* dibuat dalam lingkungan berair, yang mencegah denaturalisasi selama proses produksi. Jumlah kecil (50uL) yang dibutuhkan untuk produksi serat adalah hal lain keuntungan dari fabrikasi serat *microfluidic*. Pembuatan proses dapat dilakukan dalam kondisi sekitar. *Microfluidic spinning* juga memiliki kepekaan yang rendah terhadap faktor operasi dan begitu juga tingkat reproduktifitas yang tinggi. Teknologi *microfluidic spinning* telah terbukti metode yang efektif untuk memproduksi serat hidrogel dengan sangat besar menjanjikan dalam rekayasa jaringan (MKR et al., 2021).

Strategi *microfluidic spinning* adalah disajikan untuk pembuatan mikrofiber heliks dan superheliks

darigelombang (λ), dan amplitudo (A) dari serat mikro ini dapat sangat dikontrol. Serat mikro heliks menunjukkan elongasi dan potensi yang luar biasa aplikasi dalam mikroaktuator elastis responsif magnetik (H. Yang et al., 2019).

Teknologi *microfluidic spinning* menggabungkan keunggulan teknologi *microfluidic* dan teknologi *spinning*, dan dapat merancang dan membuat serat mikro kompleks yang sulit direalisasikan secara konvensional teknologi *spinning*. Melalui pengaturan aliran fluida skala mikro yang tepat dan penggunaan aliran laminar karakteristik fluida dalam saluran mikro, teknologi *microfluidic spinning* memiliki berbagai aplikasi dalam biomedis, elektronik fleksibel, kimia analitik dan bidang lainnya. Alat pemintal dan mekanisme penyembuhan teknologi *microfluidic spinning* diperkenalkan secara sistematis, dan persiapannya metode, karakteristik struktural dan aplikasi serat multi-struktur seperti serat padat/berpori, *hollow fiber* / inti-cangkang, serat janus / dua komponen / multi-komponen, serat gelendong dan serat spiral (Bo et al., 2023).

5.5 Teknik Lain

Teknik lain yang digunakan dalam fabrikasi membran yaitu:

a. *Solution Blow Spinning* (SBS)

Solution Blow Spinning (SBS) adalah strategi terukur lainnya untuk pembuatan serat nano di mana udara terkompresi digunakan untuk pembentukan serat. Metode SBS telah dikembangkan untuk mengatasi batasan-batasan yang berbeda dari prosedur ES tradisional, misalnya, komplikasi dalam penyiapan serat nano in situ dan kebutuhan akan potensi listrik yang tinggi. Prosedur SBS bermanfaat untuk menyiapkan serangkaian serat nano dan mikrofiber dari larutan polimer. Sistem ini dikembangkan dengan memanfaatkan komponen teknik peniupan lelehan dan elektrospinning, sebagai teknologi alternatif untuk menghasilkan jaring serat nano dan mikrofiber yang memiliki diameter yang hampir identik dengan yang dihasilkan oleh prosedur ES dengan keuntungan memiliki tingkat produksi serat (diperkirakan oleh tingkat injeksi polimer) beberapa kali lebih besar (K. Xie et al., 2019).

b. *Magic Angle Spinning* (MAS)

Magic Angle Spinning (MAS) dari NMR telah dikembangkan sebagai teknik biologi struktural yang dapat diterapkan secara umum, yang mampu melengkapi NMR keadaan cair, kristalografi sinar-X dan mikroskop elektron. Prosedur ini masih jauh dari rutinitas, dan misalnya digunakan hanya untuk protein transmembran yang sangat sedikit, penentuan struktur lengkap oleh MAS NMR telah dilakukan dan dilaporkan dalam lapisan ganda lipid (Schubeis et al., 2018).

c. *Dry-jet wet-quench spinning*

Seperti disebutkan sebelumnya, proses pemintalan *dry-jet/wet-quench* digunakan untuk membentuk membran. Selama pemintalan, larutan yang mengandung polimer, atau *dope*, dan *bore fluid* diekstrusi bersama melalui cetakan berbentuk annular, yang disebut '*spinneret*'. Selama melewati celah udara, bagian terluar dari serat mengeras menjadi kulit selektif integral yang tipis, karena penguapan yang cepat dari komponen cairan yang mudah menguap dari *dope*. Setelah memasuki *quench bath*, terjadi pemisahan fasa, membentuk lapisan berpori yang terdiri dari sebagian besar serat, yang kemudian dikumpulkan pada wadah *take-up* (Babu et al., 2018).

BAB VI

APLIKASI MEMBRAN

HOLLOW FIBER

6.1 Pengolahan Air

Kelangkaan serta penurunan kualitas air tawar disertai dengan kebutuhan air yang terus meningkat dari masyarakat ataupun industri merupakan pendorong diperlukannya teknologi pengolahan air yang ramah lingkungan serta berkualitas. Salah satu teknologi pengolahan air tersebut yaitu "teknologi membran". Keuntungan dari teknologi membran diantaranya lebih baik dalam hal penjernihan air karena dapat membuat air benar-benar bersih dengan kualitas terbaik, desain modul membran sangat sederhana, kompak, mudah dioperasikan dan tidak membutuhkan peralatan tambahan dalam jumlah banyak. Memperbesar atau memperkecil skala pengoperasian merupakan hal yang mudah dilakukan. Dengan sifat modular yang dimilikinya maka peningkatan skala proses membran dapat dilakukan dengan hanya menambah modul membran termasuk peralatan bantunya.

Dalam aplikasinya untuk pengolahan air, penggunaan membran tidak membutuhkan penambahan bahan-bahan kimia (koagulan, flokulan) sehingga ramah bagi lingkungan.

Metode lain untuk pengolahan air bersih yang menjanjikan keunggulan dari segi kualitas air yang dihasilkan adalah dengan teknik filtrasi membran. Teknik pemisahan dengan teknologi membran telah berkembang dan diaplikasikan secara luas dalam industri pengolahan air sebagai alternatif pengolahan konvensional seperti; koagulasi, sedimentasi, dan filtrasi dengan media pasir.

Aplikasi membran untuk memproduksi air dalam jumlah besar akan jauh lebih menguntungkan jika dibandingkan dengan proses konvensional. Pada sektor pengolahan air, pengembangan teknologi EDI (*electrodeionization*) merupakan terobosan dalam proses produksi air ultra-murni yang sangat efisien. Keunggulan lain yang juga ditunjukkannya adalah kemampuannya yang sangat baik dalam pemisahan ion-ion lemah seperti silika, *boreon*, karbondioksida, dan amonia dari air. Perkembangan yang sangat pesat juga dijumpai pada pengembangan kontaktor *hollow fiber*.

1. Membran *Hollow Fiber Direct Nanofiltration* (HFDNF) sebagai Teknologi Pengolahan Air Gambut

Kandungan warna yang terkandung dalam air gambut sulit dihilangkan dengan teknologi instalasi pengolahan air konvensional, karena teknologi ini

tidak mampu secara optimal melakukan penyaringan terhadap partikel NOM yang berukuran jauh lebih kecil daripada porositas saringan pasir. Modifikasi IPA Konvensional untuk menurunkan kandungan warna dalam air gambut membutuhkan konsumsi bahan kimia koagulan dan flokulan yang sangat tinggi; sehingga meningkatkan Harga Pokok Produksi (HPP) air minum; namun dari sisi kualitas belum dapat mencapai baku mutu yang diharapkan.

Teknologi yang cocok untuk diterapkan dengan memanfaatkan teknologi penyaringan menggunakan membran *Hollow Fiber Direct Nanofiltration* (HFDNF) yang memiliki porositas < 1 nm dan MWCO < 800 Dalton. Ukuran porositas yang dimiliki HFNF membran diharapkan dapat menyaring NOM yang menyebabkan kandungan warna dalam air gambut. Pengaplikasian membran *Hollow Fiber Direct Nanofiltration* (HFDNF) dalam berbagai kebutuhan pengolahan air di antaranya:

- a. Pengolahan air minum
 - Pengolahan air berwarna / air gambut
 - Menurunkan kandungan kesadahan
 - Menurunkan kandungan *Total Organic Carbon* (TOC) atau mikropolutan

- b. Pengolahan air untuk kebutuhan proses industri
 - Menurunkan kandungan warna dalam limbah industri
 - *Recovery* NaOH
- c. Pengolahan air limbah
- d. *Re-use* air limbah cair

2. **Aplikasi Membran *Hollow Fiber* Polietersulfon/2-(Metakriloilosi) Etil Posporil Klorin untuk Pengolahan Air Sumur**

Kualitas air sumur masyarakat di beberapa wilayah telah melampaui standar baku mutu air yang sesuai dengan standar kesehatan. Air sumur mengandung padatan terlarut sampai tiga kali lebih tinggi dari standar baku mutu. Untuk menciptakan air sumur yang sesuai standar baku mutu diperlukan pengaplikasian teknologi membran. Teknologi membran telah diperkenalkan secara luas sebagai teknik yang menjanjikan untuk produksi air bersih dengan kualitas tinggi.

Salah satu metode pengolahan air bersih yang menjanjikan keunggulan dari segi kualitas air yang dihasilkan adalah dengan teknik filtrasi membran. Teknik pemisahan dengan teknologi membran telah berkembang dan diaplikasikan secara luas dalam

industri pengolahan air sebagai alternatif pengolahan konvensional seperti; koagulasi, sedimentasi, dan filtrasi dengan media pasir. Aplikasi membran untuk memproduksi air dalam jumlah besar akan jauh lebih menguntungkan jika dibandingkan dengan proses konvensional.

Berikut hasil analisis air sumur sebelum dan setelah perlakuan dengan pengaplikasian membran *hollow fiber* pengolahan air sumur menjadi air bersih terhadap beberapa parameter kualitas air dipaparkan pada Tabel 6.1.

Tabel 6. 1 Kualitas air sumur sebelum dan sesudah filtrasi dengan membran

Parameter kualitas air	Standar*	Sampel air sumur	Hasil penyaringan dengan membran			
			UF1	UF2	UF3	UF4
Kekeruhan (mg/L)	25	11,8	2,25	1,95	5,12	2,6
TDS (mg/L)	1500	3965	1090	1080	1175	1040
pH	6,5-8,5	7,0	7,53	7,40	7,36	7,49
CaCO ₃ (mg/L)	500	420	96,0	84,0	60	72,0
Klorida (mg/L)	250	1180	334	351,45	376,3	358,55
NO ₂ (mg/L)	10	4,9	0,32	0,61	0	0,83
NO ₃ (mg/L)	1	0,32	0,05	0,045	0,03	0,075
Total Coliform	0	2970	0	0	0	0
<i>E. coli</i>	0	735	0	0	0	0

*Standar baku mutu kualitas air, Peraturan Kementerian Kesehatan : 907/MENKES/SE/VII/2002

Tabel 6.1 menunjukkan bahwa sampel air sumur memiliki total zat padat terlarut yang melampaui nilai baku mutu, kandungan klorida nilainya hampir 5 kali lebih besar dari standar baku mutu, mengandung garam yang cukup tinggi. Setelah dilakukan proses pengaplikasian membran *hollow fiber* didapatkan bahwa

semua parameter kualitas air dapat diturunkan sampai dibawah standar baku mutu sesuai permenkes nomor 907/MENKES/SK/VII/2002.

6.2 Pengolahan Air Limbah

Air limbah adalah air yang tidak bersih dan mengandung berbagai zat yang dapat membahayakan manusia dan makhluk hidup lainnya dan lazimnya muncul karena hasil aktivitas manusia, baik dari industri maupun dari rumah tangga. Dengan konsentrasi dan intensitas tertentu, kehadiran limbah dapat berdampak negative terhadap lingkungan dan juga kesehatan manusia sehingga perlu dilakukan penanganan dan pengolahan terhadap limbah sebelum limbah dibuang ke lingkungan.

Perkembangan industri berlangsung sangat pesat, seperti pada bidang minyak dan gas, *petrochemical*, farmasi, sehingga menyebabkan produksi air limbah yang berminyak. Perkembangan populasi dan ekonomi yang pesat juga memicu peningkatan permintaan air bersih, terutama pada daerah yang miskin air. Maka dari itu, sumber air yang tersedia lama-kelamaan tidak bisa memenuhi kebutuhan air untuk generasi-generasi masa depan.

Salah satu solusi untuk menghadapi masalah ini adalah dengan menggunakan ulang air, di mana untuk mencapai proses tersebut diperlukan adopsi teknologi

lanjutan, seperti teknologi membrane. Pasar teknologi membrane sedang mengalami era yang berkembang secara pesat dikarenakan penelitian dan pengembangan yang terus-menerus oleh akademisi dan industri privat. Terlebih lagi, teknologi membrane baru-baru ini telah diperkenalkan sebagai Teknik yang efisien untuk memisahkan campuran minyak/air, karena prosesnya yang efektif untuk menghilangkan tetesan-tetesan minyak ketika dibandingkan teknologi konvensional.

Pada sektor pengolahan air, pengembangan teknologi EDI (*electrodeionization*) merupakan terobosan dalam proses produksi air ultra-murni yang sangat efisien. Keunggulan lain yang juga ditunjukkannya adalah kemampuannya yang sangat baik dalam pemisahan ion-ion lemah seperti silika, *boreon*, karbondioksida, dan amonia dari air. Perkembangan yang sangat pesat juga dijumpai pada pengembangan kontaktor *hollow fiber*, khususnya untuk pengolahan limbah brine MSF. Teknologi ini memungkinkan untuk melakukan proses produksi air murni dan garam dalam satu tahap dari limbah brine MSF.

Kelangkaan maupun penurunan kualitas air tawar disertai dengan kebutuhan air yang terus meningkat baik dari masyarakat maupun industri merupakan pendorong diperlukannya teknologi pengolahan air yang berkualitas sekaligus ramah lingkungan. Pengolahan air dengan demikian merupakan peluang besar bagi aplikasi teknologi

membran. Sebagai teknologi yang relatif baru, proses membran menawarkan keuntungan-keuntungan yang tidak didapat dari proses konvensional. Salah satu keuntungan dari aplikasi teknologi membran adalah rendahnya energi yang digunakan. Pemisahan yang berbasis membran tidak berdasarkan hasil kesetimbangan fasa yang menggunakan banyak energi.

Membran *hollow fiber* sebagai salah satu jenis membrane asimetris yang memiliki fluks oksigen sangat tinggi. Asimetris membrane memiliki lapisan tipis tetapi padat yang didukung oleh lapisan berpori. Lapisan padat bertanggung jawab atas separasi sementara lapisan berpori bertanggung jawab untuk memberikan dukungan kuat pada lapisan padat dengan permeabilitas tinggi fluks (Bunga, 2018).

Penerapan teknologi ini dalam skala yang cukup signifikan juga telah dilakukan di sejumlah industri di Indonesia. Potensi lainnya adalah pengolahan air gambut yang tersebar di Kalimantan Tengah, Kalimantan Selatan, Sumatera Selatan, Riau, dan Jambi. Kendala utama yang dihadapi masyarakat di daerah ini adalah ketersediaan air bersih yang layak dikonsumsi sebagai air minum. Sumber yang paling mungkin hanyalah air hujan atau dari hulu sungai yang berpuluh-puluh kilometer jaraknya karena itu perlu diupayakan teknologi yang dapat mengolah air gambut menjadi air bersih, dimana hal ini dapat diatasi dengan teknologi RO.

Selain ditujukan untuk memenuhi kebutuhan masyarakat, pihak industri juga merupakan pihak yang membutuhkan air dalam proses produksinya. Industri mikroelektronik misalnya membutuhkan air dengan kualitas sangat tinggi atau dikenal sebagai air ultramurni. Selain proses RO, proses membran lain yaitu EDI (elektrodeionisasi) merupakan proses yang umum digunakan di industri mikroelektronik. Industri farmasi dan medis juga merupakan industri yang kerap menggunakan proses membran dalam pengolahan airnya. Air yang digunakan untuk industri farmasi/medis umumnya adalah air dengan kemurnian yang sangat tinggi. Air digunakan dalam formula obat-obatan, losion, cairan pembersih, dan krim. Selain itu air juga merupakan komponen utama fluida intravena yang digunakan untuk menggantikan fluida tubuh alami pada pasien yang menderita penyakit tertentu. Keberadaan kontaminan di dalam formulasi tersebut dapat menimbulkan efek samping yang tidak diinginkan, dan mengganggu karakteristik kimia pengobatan, atau bahkan memberikan efek yang membahayakan pasien. Hemodialisis juga merupakan aplikasi medis yang membutuhkan air dengan kemurnian yang sangat tinggi. Proses membran yang biasa digunakan adalah NF, UF, dan RO.

Serta industri *pulp* dan Kertas yang merupakan industri yang cukup penting untuk keperluan pendidikan, perkantoran, dan pengemasan dalam perindustrian.

Kebutuhan pulp dan kertas di Indonesia terus mengalami peningkatan seiring dengan pemakaian kertas. Proses yang membutuhkan air yaitu pada persiapan kayu, pemasakan, pencucian pulp, bleaching, pengangkutan, pengenceran, dan pembentukan. Penggunaan air pada industri berdampak pada limbah cair yang dihasilkan.

Industri mempunyai dampak negatif yang besar pada lingkungan. Limbah cair industri merupakan cairan buangan yang terdiri dari zat-zat organik dan polutan yang berbahaya bagi manusia. Teknologi pengolahan limbah industri sekarang ini banyak menggunakan proses kimia dan proses biologi. Proses-proses tersebut memerlukan biaya operasional yang besar dan lahan yang luas. Teknologi membran mempunyai potensi untuk pengolahan limbah cair industri, karena teknologi membran ini memiliki keunggulan seperti : prosesnya sederhana, hemat energi, tidak perlu bahan kimia dan mutu hasil olahan lebih baik (Siti Agustina., 2006).

Membran ultrafiltrasi (UF) merupakan membran dimana tekanan hidrostatis akan membuat cairan menembus lapisan semipermeabel dimana padatan serta air dengan berat molekul berat akan tertahan membran. Ultrafiltrasi memiliki kemampuan untuk memisahkan virus, protein, partikulat, koloid, silika, dan warna. Ultrafiltrasi yang menggunakan bahan dasar polimer memiliki kemampuan untuk tahan terhadap bahan kimia dan

temperatur, memiliki efek *fouling* rendah bila dilakukan pre-treatment sebelumnya.

Ultrafiltrasi sering diaplikasikan dalam memisahkan minyak dari limbah, pengolahan produk dairy, pembuatan antibiotik, menghilangkan endotoksin dan pirogen, pemekatan dan purifikasi gelatin serta jus, pemrosesan ekstrak tumbuhan, pengecatan electrocoat, dan masih banyak lagi. MF dan UF cenderung memiliki distribusi ukuran pori yang besar. Semakin besar *Pore Size Distribution* (PSD) yang dimiliki oleh membran, semakin besar kemungkinan terjadinya *fouling* karena akan terjadinya disproporsinasi fluks yang menyebabkan pori akan rentan tertutup oleh partikel (Natasha., 2016).

Salah satu membran yang baik untuk digunakan dalam pengolahan air limbah adalah *polyethersulfone* (PES) membran. *Polyethersulfone* adalah bahan yang banyak digunakan dalam pembuatan membran asimetris karena kinerjanya yang baik, mekanik yang tinggi kekuatan dan stabilitas termal yang tinggi. PES banyak digunakan pada ultrafiltrasi, osmosis balik dan pervaporasi membran.

Baku mutu air limbah adalah ukuran batas atau kadar unsur pencemar dan/atau jumlah unsur pencemar yang ditenggang keberadaannya dalam air limbah yang akan dibuang atau dilepas ke dalam media air dari suatu usaha dan/atau kegiatan.

Tabel 6. 2 Baku mutu air limbah bagi usaha dan/atau kegiatan (Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia, 2014)

Parameter	Kadar Paling Tinggi
BOD	60 mg/L
COD	150 mg/L
TSS	50 mg/L
Fenol Total	0,5 mg/L
Krom Total (Cr)	1,0 mg/L
Amonia total (NH ₃ -N)	8,0 mg/L
Sulfida (sebagai S)	0,3 mg/L
Minyak dan lemak	3,0 mg/L
pH	6,0-9,0
Debit limbah	100 m ³ /ton produksi tekstil

Membran *hollow fiber* ultrafiltrasi polisulfon untuk pengolahan limbah cair songket. Pengolahan limbah cair songket berlangsung secara kontinu selama variasi waktu (1 jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam). Umpan dialirkan masuk ke dalam *housing filter*. Limbah cair songket difiltrasi oleh zeolite dan karbon aktif sebagai *pre-treatment* dan dialirkan oleh pompa peristaltic dengan laju air 100 ml/menit ke membran *hollow fiber* ultrafiltrasi polisulfon. Keran umpan masuk ke membrane dan keran *retentate* diatur untuk mengatur tekanan umpan masuk ke membran (5 psig, 10 psig, 15 psig). Retentat keluaran membran polisulfon dialirkan bersama ke wadah umpan. Setelah waktu filtrasi selesai,

pompa dimatikan dan volume permeat diukur (Dahlan et al., 2019).

Proses yang dilakukan pada cara konvensional yaitu dengan mengalih limbah cair songket yang melewati penyaringan yang berisi berbagai arang aktif, zeolite dan bentonite. Tujuan perlakuan ini yaitu untuk mengetahui kemampuan tiap-tiap bahan *filter* dalam mengolah limbah cair songket tanpa menggunakan bantuan membran. Metode yang dilakukan yaitu dengan membuat alat saringan sederhana yang terdiri dari busa dan bahan *filter* yang masing-masing setebal 4 cm. Proses penyaringan dilakukan dengan mengalirkan limbah cair songket sebanyak 1 liter secara vertikal searah dengan gaya gravitasi. Kendala yang dapat terjadi dalam pengolahan limbah cair songket dengan cara konvensional adalah penyusunan busa dan bahan *filter* yang tidak padat, sehingga dapat menyebabkan bahan filter terikut keluar bersama air keluaran *sand filter*.

Syauqiah et al. menggunakan membran *hollow fiber* PVDF-TiO₂ untuk pengolahan limbah sasirangan. TDS, konduktivitas dan daya serap warna pada air limbah diuji sebelum dan sesudah pengolahan. Penelitian ini dilakukan dengan menggabungkan proses pervaporasi dan fotokatalitik. Air limbah sasirangan dimasukkan ke dalam tabung reaksi. Kemudian membrane *hollow fiber* dicelupkan ke dalam air limbah sasirangan. Konsentrasi TiO₂ 0, 0,5, 1, 1,5 dan 2,5%

ditambahkan ke dalam air limbah sasirangan. Kemudian air limbah sasirangan disinari dengan sinar UV selama 1 jam.

Tabel 6. 3 Karakteristik air limbah sasirangan

Parameter	Nilai sampel	Standar mutu Pergub Kalsel No. 36 Tahun 2008	Satuan
Warna (UV380 nm)	0,76	-	Cm ⁻¹
Kekeruhan	74,7	1-5	NTU
TDS (<i>total dissolved solid</i>)	118,27	2000	Mg/L
Daya konduksi	176,53	400	mS

Menurut tabel diatas, dapat dilihat bahwa TDS (*total dissolved solid*) dan parameter konduktivitas masih memenuhi baku mutu air Peraturan Gubernur Kalimantan Selatan Nomor 36 Tahun 2008, namun parameter lain seperti persentase komponen berbahaya yang ditunjukkan oleh kekeruhan air limbah masih belum memenuhi syarat sesuai dengan standar air limbah tekstil.

Kinerja pervaporasi-fotokatalitik membran *hollow fiber* untuk air limbah sasirangan berdasarkan fluks air dan penolakan warna menunjukkan bahwa fluks air terbaik dari fotokatalitik membrane *hollow fiber* adalah 4,3516 kg m⁻²h¹ pada 2,5% TiO₂ *catalyst*. Selanjutnya, penolakan warna meningkat seiring dengan kenaikan konsentrasi TiO₂. Peningkatan TiO₂ pada fotokatalisis berpengaruh terhadap peningkatan parameter rejeksi (warna). Dengan

penambahan konsentrasi TiO_2 dari 0,5 menjadi 2,5% TiO_2 , penolakan warna juga meningkat.

Total Dissolved Solid (TDS) pada berbagai konsentrasi TiO_2 menunjukkan penolakan TDS pada air limbah sasirangan setelah TiO_2 diaplikasikan. TDS tertinggi sebesar 98,86 mg/L pada 0% dan terendah sebesar 2,345 mg/L pada 2,5% katalis. Secara keseluruhan, hasil ini membuktikan bahwa proses ini layak mengolah air limbah sasirangan untuk memenuhi baku mutu limbah tekstil. TDS dapat dihilangkan dengan menggabungkan proses fotokatalitik dan pervaporasi membran.

Konduktivitas (mS) pada berbagai konsentrasi TiO_2 menunjukkan bahwa konduktivitas memiliki kecenderungan yang sama dengan TDS dimana konduktivitas menurun dengan meningkatnya konsentrasi TiO_2 . Paling atas konduktivitas pada katalis 0% sebesar 147,56 mS dan terendah sebesar 3,5 mS pada katalis 2,5%. Proses fotokatalitik cenderung membuat membrane lebih selektif dan juga meningkatkan laju reaksi katalis TiO_2 untuk menurunkan konduktivitas. Konduktivitas dari perembesan memenuhi baku mutu limbah tekstil. Kesimpulan dari penelitian ini adalah membrane *hollow fiber* dengan pervaporasi-fotokatalitik dapat diaplikasikan untuk mengolah air limbah sasirangan. Fluks air tertinggi sebesar $4,3516 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ diperoleh untuk katalis TiO_2 2,5%. Proses penggabungan ini mencapai penolakan warna 98,02%, nilai

TDS 2,345 mg/L, dan konduktivitas 3,5 mS untuk katalis TiO₂ 2,5%. Kehadiran TiO₂ dalam fotokatalitik secara signifikan menurunkan warna, TDS dan konduktivitas. Fotokatalitik juga dapat mengurangi *fouling* membran.

6.3 Industri

Saat ini aplikasi membran telah merambah ke berbagai industri diantaranya industri logam (pengambilan kembali logam), industri makanan, bioteknologi (pemisahan, pemurnian, sterilisasi, pengambilan produk samping), serta industri kulit dan tekstil (pengambilan kembali bahan kimia dan panas). Pada industri pulp dan kertas, membran berperan dalam pengambilan serat dan bahan kimia dan sebagai pengganti proses evaporasi. Industri-industri lainnya yang juga telah menerapkan teknologi membran adalah industri berbasis proses kimia (pemisahan materi organik, pemisahan gas), industri farmasi dan kesehatan (organ buatan, *control release*, fraksionasi darah, sterilisasi, pemurnian air) dan proses penanganan limbah.



Gambar 6. 1 Pemanfaatan Membran *Hollow fiber*

Saat ini aplikasi membran telah merambah ke berbagai industri diantaranya industri logam (pengambilan kembali logam), industri makanan, bioteknologi (pemisahan, pemurnian, sterilisasi, pengambilan produk samping), serta industri kulit dan tekstil (pengambilan kembali bahan kimia dan panas). Pada industri pulp dan kertas, membran berperan dalam pengambilan serat dan bahan kimia dan sebagai pengganti proses evaporasi. Industri-industri lainnya yang juga telah menerapkan teknologi membran adalah industri berbasis proses kimia (pemisahan materi organik, pemisahan gas), industri farmasi dan kesehatan (organ buatan, *control release*, fraksionasi

darah, sterilisasi, pemurnian air) dan proses penanganan limbah.

Di sisi lain, membran *hollow fiber* juga digunakan dalam industri makanan, seperti penyaringan protein dan anggur. (Schopf et al., 2021) membandingkan efisiensi fraksinasi protein susu menggunakan membran *hollow fiber*, membran *tubular ceramic*, dan membran nanofiltrasi. Membran *hollow fiber* yang dikembangkan memiliki kemasapan membran yang tinggi kepadatan membran yang tinggi dan kecenderungan pengotoran yang rendah dengan tetap mempertahankan fraksinasi yang sangat baik. Untuk memfraksinasi protein susu, kelompok penelitian yang sama menemukan bahwa panjang optimum untuk PES adalah 0,6 m untuk mencapai fluks tertinggi dan transmisi protein *whey*. Selain itu, Giacobbo et al. (2017) memanfaatkan membran *hollow fiber* untuk memulihkan antioksidan senyawa antioksidan, yaitu polifenol dan polisakarida, dari limbah kilang anggur.

Baru-baru pendekatan untuk teknik persiapan *hollow fiber* telah dikembangkan untuk meminimalkan bahan kimia atau pelarut dan penggunaan energi. Metode yang dilaporkan adalah peleburan/larutan penguat homogen yang terintegrasi, antarmuka pemintalan-pemintalan leleh (MS-S) pemisahan fase dan metode pemintalan listrik, metode-metode ini sangat menjanjikan untuk fabrikasi yang ramah lingkungan (Y. Zhang et al., 2018).

Namun, membran *hollow fiber* menunjukkan beberapa keterbatasan dalam hal gas dan cairan pemisahan. Untuk pemisahan gas, sebagian besar membran polimer menghadapi pertukaran antara permeabilitas dan selektivitas (Park, 2017). Fenomena ini secara signifikan terkait dengan ketidakseragaman distribusi elemen volume bebas, yang memungkinkan berbagai macam gas berdifusi melalui membran. Penuaan fisik dan plastisasi merupakan tantangan yang dihadapi selama pemisahan gas (C.-C. Chen et al., 2011).

Pengembangan membran *hollow fiber* berkinerja tinggi dengan struktur yang ideal properti sangat diperlukan. Umumnya, membran *hollow fiber* disiapkan untuk: (1) merumuskan larutan obat bius, (2) ekstrusi larutan obat bius melalui pemintal, (3) koagulasi serat setelah melewati celah udara tertentu melalui inversi fasa, (4) pengumpulan, pencucian dan pengeringan serat pintal, dan (5) perawatan pasca (jika diperlukan). Proses inversi fasa telah diterapkan secara luas selama fabrikasi membran *hollow fiber* karena skalabilitas dan kesederhanaannya untuk produksi skala besar (Baker, 2012). Inversi fase diperkenalkan melalui beberapa faktor, di mana NIPS dan TIPS adalah yang paling banyak yang paling umum. Pemisahan fase dalam NIPS dan TIPS disebabkan oleh perubahan komposisi setelah diperkenalkannya nonsolvent dan perubahan suhu. TIPS

telah banyak digunakan untuk membuat membran dari polimer semikristalin (Matsuyama et al., 2021).

Pada sektor pengolahan air, pengembangan teknologi EDI (*electrodeionization*) merupakan terobosan dalam proses produksi air ultra-murni yang sangat efisien. Keunggulan lain yang juga ditunjukkannya adalah kemampuannya yang sangat baik dalam pemisahan ion-ion lemah seperti silika, *boreon*, karbondioksida, dan amonia dari air. Perkembangan yang sangat pesat juga dijumpai pada pengembangan kontaktor *hollow fiber*, khususnya untuk pengolahan limbah brine MSF. Teknologi ini memungkinkan untuk melakukan proses produksi air murni dan garam dalam satu tahap dari limbah *brine* MSF.

Dalam dunia industri penanganan air limbah sangatlah mengkhawatirkan mengingat saat ini ketersediaan air tawar semakin langka. Sementara di sisi lain, pertumbuhan industri juga terus meningkat akibatnya limbah yang dihasilkan juga kian bertambah. Keterbatasan teknologi pengolahan limbah menyebabkan efluen yang dihasilkan memiliki kualitas yang jauh dari standar baku mutu limbah padahal pengolahan limbah sendiri merupakan komponen yang cukup mahal. Oleh karena itu diperlukan suatu sistem pengolahan limbah dengan konsep *re-use* (pemanfaatan kembali), dimana dalam hal ini dapat dipenuhi oleh teknologi membran. Penggunaan teknologi membran dalam pengolahan limbah menggeser anggapan

“limbah sebagai cost” menjadi “limbah sebagai profit”. Konsep pemanfaatan kembali yang ditawarkan oleh teknologi membran terbukti dapat menghasilkan keuntungan diantaranya penghematan dari segi biaya operasional (air, listrik, bahan kimia, dll). Hal ini tentunya memberikan implikasi positif tidak saja bagi pihak industri karena proses menjadi hampir selalu menguntungkan (*profitable*) tetapi juga bagi kelestarian lingkungan yang selama ini acapkali terabaikan

Kelangkaan maupun penurunan kualitas air tawar disertai dengan kebutuhan air yang terus meningkat baik dari masyarakat maupun industri merupakan pendorong diperlukannya teknologi pengolahan air yang berkualitas sekaligus ramah lingkungan. Pengolahan air dengan demikian merupakan peluang besar bagi aplikasi teknologi membran. Sebagai teknologi yang relatif baru, proses membran menawarkan keuntungan-keuntungan yang tidak didapat dari proses konvensional. Salah satu keuntungan dari aplikasi teknologi membran adalah rendahnya energi yang digunakan. Pemisahan yang berbasis membran tidak berdasarkan hasil kesetimbangan fasa yang menggunakan banyak energi.

Desalinasi merupakan salah satu cara untuk mengatasi kebutuhan air tawar. Di dunia, kapasitas desalinasi total pada tahun 1971 adalah 1,5 juta m³ /hari dan pada tahun 1995, kapasitas total ini meningkat hingga 20,3

juta m³ /hari dengan 11.000 instalasi yang tersebar di 120 negara di dunia. Sekitar 50% kapasitas ini berada di Teluk Persia dengan 30%-nya terdapat di Arab Saudi. Plant desalinasi terbesar terletak di kompleks Al Jubail Phase II yang telah berproduksi sejak tahun 1982 menghasilkan hampir 1 juta m³/hari. Proses membran misalnya RO (reverse osmosis) dapat digunakan pada proses desalinasi air laut dan air payau untuk menghasilkan air tawar. Di Amerika Serikat terdapat sekitar 1900 unit desalinasi dengan kapasitas lebih dari 15% produksi dunia. Sebagian besar produksi dilakukan dengan menggunakan proses membran RO khususnya untuk pengolahan air payau maupun air permukaan.

Indonesia sendiri memiliki potensi untuk menggunakan proses membran sebagai sarana desalinasi, terutama mengingat banyaknya sumber air tawar yang kini mulai terintrusi air laut sehingga berubah menjadi air payau misalnya di kota-kota besar seperti Jakarta dan Surabaya. Seperti telah disebut sebelumnya, negara-negara lain seperti Arab Saudi dan Amerika Serikat telah memiliki unit desalinasi air payau berbasis membran. Beberapa unit desalinasi di Arab Saudi terletak di Buwayb dan Salbukh, sementara di Amerika, berlokasi di Sanibel Island dan Florida. Unit Buwayb memiliki kapasitas sebesar 45.000 ton/hari, menggunakan modul spiral wound dengan tingkat perolehan 89,9% dan konsumsi energi total 3,6 kWh/ton

produk. Adapun Salbukh memiliki kapasitas 38.500 ton/hari, menggunakan modul membran *hollow fiber*, dengan tingkat perolehan 88,2% dan konsumsi energi total 3,12 kWh/ton produk. Kedua unit di atas dioperasikan dengan tekanan rendah yaitu 27,6 bar.

Penerapan teknologi ini dalam skala yang cukup signifikan juga telah dilakukan di sejumlah industri di Indonesia. Potensi lainnya adalah pengolahan air gambut yang tersebar di Kalimantan Tengah, Kalimantan Selatan, Sumatera Selatan, Riau, dan Jambi. Kendala utama yang dihadapi masyarakat di daerah ini adalah ketersediaan air bersih yang layak dikonsumsi sebagai air minum. Sumber yang paling mungkin hanyalah air hujan atau dari hulu sungai yang berpuluh-puluh kilometer jaraknya karena itu perlu diupayakan teknologi yang dapat mengolah air gambut menjadi air bersih, dimana hal ini dapat diatasi dengan teknologi RO.

Reverse Osmosis (RO) adalah salah satu teknologi yang dikomersialkan paling efektif dalam air dan air limbah perawatan. Tidak seperti teknologi UF dan NF, teknologi RO dapat memisahkan ion monovalent seperti ion natrium (Na^+) dan ion klorida (Cl^-) dari air atau air limbah) dan ion klorida (Cl^-) dari air atau air limbah melalui membran semipermeabel. Dibandingkan dengan FO, perawatan RO dilengkapi dengan eksternal yang lebih tinggi tekanan dari tekanan osmotik, memaksa molekul air mengalir ke arah

yang berlawanan arah. Oleh karena itu, dibandingkan dengan pengolahan air atau air limbah konvensional lainnya dan desalinasi air laut, RO hemat energi dalam menghasilkan air tawar berkualitas tinggi karena membran dengan permeabilitas dan selektivitas tinggi (Elimelech et al., 2011). Yang dkk. mensintesis membran *hollow fiber* komposit film tipis (TFC) dengan lapisan selektif PA bebas cacat untuk osmosis balik air payau.

Selain desalinasi, membran *hollow fiber* RO juga digunakan untuk pengolahan air limbah pada industri farmasi (C. Liu et al., 2022). Mensintesis membran RO *antifouling* melalui strategi iradiasi sederhana untuk mencangkokkan polimer hidrofilik pada permukaan membran tanpa memerlukan katalis dan inisiator. Membran PA dengan konsentrasi pengubah polivinil alkohol (PVA) 1,0% menunjukkan hidrofilik yang luar biasa sifat hidrofilik dan penolakan garam yang tinggi. Karena hidrofilisitas dan kekasaran membran, laju penurunan fluks *irreversibel* dan FRR membran adalah 1,7% dan 98,3%, masing-masing. Membran bahkan memiliki efisiensi penghilangan *foulant* yang tinggi (misalnya, kebutuhan oksigen kimiawi 99,5%) dalam pengolahan limbah pabrik farmasi yang sebenarnya setelahnya operasi terus menerus selama 28 hari. Untuk memanen lebih banyak air dan meningkatkan konsentrasi air garam RO, osmosis terbalik yang dibantu secara osmotik (OARO) telah dikembangkan (Chen, 2018). Berbeda dengan

teknik RO normal, OARO adalah proses yang digerakkan oleh tekanan yang menggabungkan prinsip-prinsip FO dan RO Askari et al. (2021), yang sering beroperasi pada tekanan yang sangat tinggi yang sebagian besar membran yang dikomersialkan tidak dapat melakukannya (Peters et al., 2019).

Pada penelitian Askari dkk. mengembangkan membran *hollow fiber* TFC yang terdiri dari lapisan PA pada permukaan bagian dalam berongga PES substrat *hollow fiber* (Askari et al., 2021). Membran yang disintesis menunjukkan PWP sekitar 3 LMH/bar dan penolakan NaCl sebesar 97,5% hingga 98% untuk desalinasi air payau pada 20 bar. Jadi untuk mempelajari kekuatan mekanik membran, parameter struktural dan tekanan burst digunakan di mana nilai optimal masing-masing adalah 795 μm dan 95 bar.

Selain ditujukan untuk memenuhi kebutuhan masyarakat, pihak industri juga merupakan pihak yang membutuhkan air dalam proses produksinya. Industri mikroelektronik misalnya membutuhkan air dengan kualitas sangat tinggi atau dikenal sebagai air ultramurni. Selain proses RO, proses membran lain yaitu EDI (*elektrodeionisasi*) merupakan proses yang umum digunakan di industri mikroelektronik. Industri farmasi dan medis juga merupakan industri yang kerap menggunakan proses membran dalam pengolahan airnya.

Air yang digunakan untuk industri farmasi/medis umumnya adalah air dengan kemurnian yang sangat tinggi. Air digunakan dalam formula obat-obatan, losion, cairan pembersih, dan krim. Selain itu air juga merupakan komponen utama fluida intravena yang digunakan untuk menggantikan fluida tubuh alami pada pasien yang menderita penyakit tertentu. Keberadaan kontaminan di dalam formulasi tersebut dapat menimbulkan efek samping yang tidak diinginkan, dan mengganggu karakteristik kimia pengobatan, atau bahkan memberikan efek yang membahayakan pasien. Hemodialisis juga merupakan aplikasi medis yang membutuhkan air dengan kemurnian yang sangat tinggi. Proses membran yang biasa digunakan adalah NF, UF, dan RO.

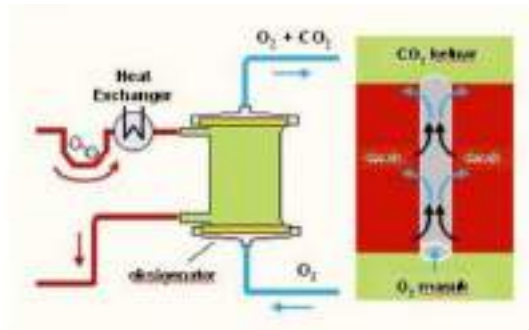
Membran NF *hollow fiber* telah banyak digunakan dalam berbagai aplikasi seperti pengolahan air limbah (Choi et al., 2019). Industri makanan dan minuman, industri kimia dan petrokimia, dan biorefinery. Teknologi deposisi dinamis diperkenalkan untuk mengembangkan membran yang kuat di bawah pemantauan kinerja waktu nyata. Wang dkk. mensintesis membran NF *hollow fiber* bermuatan negatif melalui dinamika pengendapan sol zirkonium dioksida (ZrO_2) pada substrat polimida P84[®]. Membran yang disintesis menunjukkan kekuatan mekanik yang sangat baik dan mampu menahan tinggi tekanan sambil mempertahankan penolakan natrium sulfat (Na_2SO_4) yang

tinggi sebesar 93,4% karena hidrofilitas tinggi dan muatan negatif. Selain itu, ini menunjukkan penolakan yang tinggi >90% terhadap antibiotik dan obat-obatan tradisional Tiongkok seperti polifenol teh, puerarin, tetrasiklin, dan rifampisin.

Q. Wang et al. (2020) mensintesis membran bermuatan positif menggunakan kitosan laktat melalui antarmuka polimerisasi. Dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, membran ini menunjukkan penolakan magnesium klorida ($MgCl_2$) dan seng klorida ($ZnCl_2$) yang sedikit lebih tinggi (misalnya 95,1%) dan 95,7%, masing-masing) karena permukaan membran yang bermuatan positif. Selain itu ia memiliki potensi tinggi untuk industrialisasi karena polimerisasi antarmuka yang pendek waktu dan penggunaan kitosan laktat yang murah, tidak beracun, dan ramah lingkungan.

Membran ultrafiltrasi (UF) merupakan membran dimana tekanan hidrostatis akan membuat cairan menembus lapisan semipermeabel dimana padatan serta air dengan berat molekul berat akan tertahan membran. Ultrafiltrasi memiliki kemampuan untuk memisahkan virus, protein, partikulat, koloid, silika, dan dye. Ultrafiltrasi yang menggunakan bahan dasar polimer memiliki kemampuan untuk tahan terhadap bahan kimia dan temperatur, memiliki efek *fouling* rendah bila dilakukan pre-treatment sebelumnya.

Ultrafiltrasi sering diaplikasikan dalam memisahkan minyak dari limbah, pengolahan produk dairy, pembuatan antibiotik, menghilangkan endotoksin dan pirogen, pemekatan dan purifikasi gelatin serta jus, pemrosesan ekstrak tumbuhan, pengecatan *electrocoat*, dan masih banyak lagi. Studi kasus di bidang Kesehatan, pemanfaatan membrane *hollow fiber* adalah dalam proses oksigenator darah, organ buatan, *plasmapheresis*, dan pada industri farmasi lainnya.



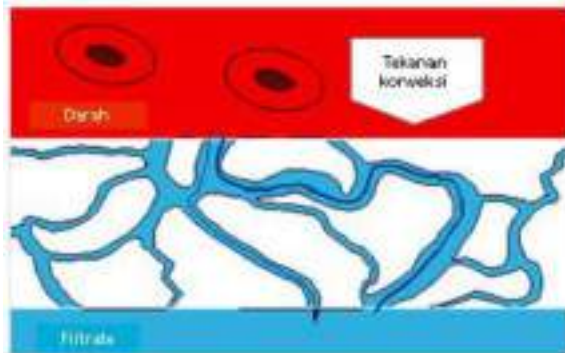
Gambar 6. 2 Prinsip Kerja Oksigenator

Oksigenator darah adalah peralatan yang berfungsi sebagai paru-paru buatan, berfungsi untuk menjaga kandungan oksigen dalam tubuh pasien selama operasi pembedahan jantung. Modul membran yang digunakan adalah *hollow fiber contractor*, dimana pada sisi shell dialirkan darah dan pada sisi lumen dialirkan udara dengan kandungan oksigen yang tinggi. Proses yang terjadi dalam oksigenator adalah darah mengasorbsi oksigen dan

melepaskan karbon dioksida melalui membran. Keunggulan dari oksigenator antara lain desain *hollow fiber* yang kompak meminimalkan keperluan transfuse darah selama operasi.

Sedangkan pada proses pembuatan organ buatan membrane dikombinasikan dengan sel-sel hidup untuk membentk organ-organ bio-hibrid. Membran berfungsi sebagai penghalang yang mengisolasi sel-sel hidup sebagai bentuk pertahanan terhadap pendatang dalam tubuh manusia dan membran juga berfungsi sebagai perangkat kultivasi sel pankreas di permukaan luar membran tubular *semipermeable*, untuk mengembangkan pancreas buatan yang mampu mengembalikan fungsi fisiologis insulin. Membran *hollow fiber* untuk mengkultivasi sel-sel *hybridoma* yang dapat menghasilkan antibodi-antibodi *monoclonal*.

Selanjutnya, pada *plasmapheresis* atau pemisahan plasma dari sel-sel darah. Plasma yang diperoleh umumnya lebih lanjut untuk menghasilkan komponen murni seperti albumin atau faktor anti-hemofilik. Aplikasinya digunakan sebagai sumber plasma untuk bank darah, untuk terapi kanker payudara, kelainan metabolis, detoksifikasi dan lain-lain.



Gambar 6. 3 *Plasmapheresis*

Teknik *plasmapheresis* yang biasa digunakan adalah dengan teknik konvensional yaitu berupa sentrifugasi serta tingkat lebih lanjut yaitu pemisahan dengan membran. Keunggulan pemisahan dengan membran antara lain didapatkan kualitas plasma yang lebih tinggi, prosedur yang lebih efisien dan aman serta biaya yang lebih rendah. Pada industri farmasi penggunaan membran diantaranya penghilangan virus, pemisahan, pemurnian, dan pemekatan antibiotik, produksi oksigen medis dan lain-lain.

BAB VII

PENUTUP

Membran adalah suatu lapisan tipis antara dua fasa fluida yaitu fasa umpan (*feed*) dan fasa permeat yang bersifat sebagai penghalang (*barrier*) terhadap suatu spesi tertentu, yang dapat memisahkan zat dengan ukuran yang berbeda serta membatasi transport dari berbagai spesi berdasarkan sifat fisik dan kimianya. Proses membran adalah proses penyaringan atau pemisahan suatu zat dengan memanfaatkan tekanan atau energi potensial. Membran diproduksi dalam berbagai bentuk, seperti *plate and frame*, *hollow fiber*, *spiral wound* dan tubular.

Setiap tipe modul memiliki konfigurasi yang berbeda yang berdasarkan pada *packing density*, kemudahan dalam perawatan, biaya modul, volume *hold up* dan kualitas *pretreatment*. Berdasarkan jenis material yang digunakan, membran diklasifikasikan menjadi membran organik (misalnya polimer) dan anorganik. Berdasarkan ukuran yang digunakan membran diklasifikasikan menjadi mikrofiltrasi (MF), ultrafiltrasi (UF), nanofiltrasi (NF), *reverse osmosis* (RO).

Konversi polimer menjadi fiber dikenal sebagai *spinning*. *Hollow fiber Spinning* (HF) yaitu teknologi yang melibatkan produksi berkelanjutan dari *fiber* tunggal dan ganda melalui ekstrusi melalui *spinneret* yang kemudian kembali ke keadaan padat (melalui pemadatan). Pilihan proses fabrikasi tergantung pada pemilihan polimer dan struktur film yang diinginkan. Film dapat dibuat menggunakan berbagai metode termasuk inversi fase, *melt extrusion*, *interfacial polymerization*, *controlled stretching*, *electro-spinning*, and *track etching*.

Keuntungan dari teknologi membran di antaranya lebih baik dalam hal penjernihan air karena dapat membuat air benar-benar bersih dengan kualitas terbaik, desain modul membran sangat sederhana, kompak, mudah dioperasikan dan tidak membutuhkan peralatan tambahan dalam jumlah banyak. Metode lain untuk pengolahan air bersih yang menjanjikan keunggulan dari segi kualitas air yang dihasilkan adalah dengan teknik filtrasi membran. Telah banyak teknologi umum yang digunakan dalam pengolahan air limbah seperti klarifikasi, filtrasi, dan bioteknologi pengolahan air limbah.

Aplikasi membran telah merambah ke berbagai industri diantaranya industri logam, industri makanan, bioteknologi, serta industri kulit dan tekstil, industri pulp dan kertas. Industri-industri berbasis proses kimia, industri

farmasi dan kesehatan (organ buatan, *control release*, fraksinasi darah, sterilisasi, dan proses penanganan limbah.

ACKNOWLEDGMENT

Penulis mengucapkan terima kasih kepada teman-teman M²ReG (Materials and Membranes Research Group) yaitu Aida, Ermila, Fidela, Fathya, Giovani, Hastati, Iben, Odoy, Ratu, Rahma, Sekar, Rifani, Rahmat, Syahid, Santi, Sultan, Yassa, Yunida, Zakia, Ziqri, Rhafiq, Aulia, Zahra dan Fitri yang telah berkontribusi dan bekerja keras demi terselesainya penulisan buku ini.

Muthia mengucapkan terima kasih atas support dari Hibah Penelitian Dosen Wajib Meneliti PNBPN ULM 2023, Hibah PTUPT tahun 2023 [026/E5/PG.02.00.PL/2023], Hibah Tesis Magister tahun 2023 [130/E5/PG.02.00.PL/2023] Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, Riset dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia dan Hibah Sawit tahun 2022 [PRJ- 371/DPKS/2022].

HALAMAN INDEX

A

Air limbah, 41, 42, 273, 282
anorganik, 47, 66, 76, 82,
125, 141, 142, 154, 157,
158, 305

D

Densitas, 30
Desalinasi, 292
Difusi, 63
Dope, 166, 167

E

Ekstrusi, 161
Electrospinning, 236, 246,
248

F

Flat Sheet, 16
Fotokatalitik, 285
Fouling, 26, 91
FTIR, 93, 94, 95, 96, 112,
113

H

Hollow Fiber, iii, 24, 25, 33,
35, 45, 94, 96, 99, 104,
108, 124, 133, 160, 256,
270, 305

I

industri, 21, 26, 35, 85, 89,
91, 92, 97, 99, 105, 126,
127, 149, 153, 184, 187,
198, 205, 209, 212, 254,
267, 268, 270, 271, 273,
274, 275, 276, 277, 278,
285, 286, 287, 290, 291,
293, 296, 297, 299, 303,
306

K

Koagulasi, 183
Konfigurasi, 15, 44
Kristalinitas, 63

M

Melt Spinning, 228
Microfluidic Spinning, 255,
256, 262
Mikrofiltrasi, 34, 38, 46, 47,
305

N

Nanofiltrasi, 35, 38, 44, 46,
47, 305

P

Pelarut, 183, 195, 196, 211,
242
Pemintalan, 106
Permeabilitas, 24, 38, 46,
103, 175, 176
Polimer, 47, 125, 135, 138,
162, 163, 179, 180, 210,
220, 231, 249
pretreatment, 15, 42, 119,
305

R

Rejeksi, 48
Reverse Osmosis, 35, 38,
46, 47

S

Selulosa Asetat, 132
SEM, 57, 67, 101, 103, 113,
117, 142, 201
Spinneret, 164, 179, 211,
212, 236, 249
Spiral Wound, 23, 45

T

Tubular, 26, 45, 48

U

Ultrafiltrasi, 34, 44, 46, 47,
278, 279, 299, 300, 305
Umpan, 25, 239, 281

V

Viskositas, 51, 167, 216,
241

TENTANG PENULIS



Muthia Elma memulai karirnya sebagai dosen di Fakultas Teknik, Universitas Lambung Mangkurat (ULM) sejak 2002. Pendidikan sarjananya diperoleh dari Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Riau, kemudian melanjutkan program Master di Ecole Des Mines De Nantes, Prancis. Selanjutnya gelar Doktor diperoleh dari School of Chemical Engineering the University of Queensland, Australia. Selain menjadi dosen, Muthia memiliki pengalaman bekerja di beberapa universitas, seperti: Universitas Riau dan di FIMLAB (*Inorganic Laboratory and Film Laboreatory*), Chemical Engineering School, University of Queensland, Australia. Serta pernah bekerja di beberapa perusahaan seperti; Gaz de France Prancis, PDAM Banjar Kalimantan Selatan, dll. Selama mengajar di ULM, Muthia pernah menjabat sebagai Kepala *Laboreatorium* Operasi Teknik, *Laboreatorium* Teknologi Proses, Fakultas Teknik - ULM, Ketua Program Magister Teknik Kimia - FT - ULM dan sebagai Wakil Direktur Bidang Umum dan Keuangan Progam Pascasarjana ULM. Saat sekarang sebagai Sekretaris Dewas Pengawas

BLU Universitas Lambung Mangkurat. Muthia telah berhasil melakukan beberapa penelitian dan pengabdian kepada masyarakat baik dari dalam (DRPM, BRG) dan luar negeri (ANU, Australia Awards). Muthia juga telah menulis beberapa buku bahan ajar dan buku-buku tentang teknologi membran.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdel-Fatah, M. A. (2018). Nanofiltration systems and applications in wastewater treatment: Review article. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 3077-3092. doi:10.1016/j.asej.2018.08.001
- Abdelhafiz, M., Shalaby, A. S., & Hussein, A. K. (2022). Preparation and characterization of bioactive polyvinylpyrrolidone film via electrospinning technique. *Microscopy Research and Technique*, 85(10), 3347-3355.
- Abid, M. B., Wahab, R. A., Abdelsalam, M., Gzara, L., & Moujдин, I. A. (2023). Desalination technologies, membrane distillation, and electrospinning, an overview. *Heliyon*, e12810.
- Afshin, A., Azadeh, N., Maryam, S., Mohammadreza, N., & domello, A. J. (2022). Microfluidic-assisted fiber production: Potentials, limitations, and prospects. *Biomicrofluidics*.
- Ahmad, A. L., Otitoju, T. A., & Ooi, B. S. (2018). Hollow fiber (HF) membrane fabrication: A review on the effects of solution spinning conditions on morphology and performance. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. Retrieved from doi.org/10.1016/j.jiec.2018.10.005.
- Ahmad, A. L., Otitoju, T. A., & Ooi, B. S. (2019). Hollow fiber (HF) membrane fabrication: A review on the effects of solution spinning conditions on morphology and performance. *Journal of industrial and engineering chemistry*, 70, 35-50.
- Aini, A. P. (2016). Pengolahan Air dengan Membran Karbon Nanomaterial. *Bandung Institute of Technology*.

- Alimah, S., & Ariyanto, S. (2012). STRATEGI KONTROL FOULING PADA DESALINASI REVERSE OSMOSIS (RO).
- Aliyu, U. M. (2021). *Application of kaolin-based synthesized zeolite membrane systems in water desalination.*
- Aman Mohammadi, M., Hosseini, S. M., & Yousefi, M. (2020). Application of electrospinning technique in development of intelligent food packaging: A short review of recent trends. *Food Science & Nutrition*, 8(9), 4656-4665.
- Aroon, M., Ismail, A., Matsuura, T., & Montazer-Rahmati, M. (2010). Performance studies of mixed matrix membranes for gas separation: A review. *Separation and Purification Technology*, 75(3), 229-242.
- Asaadi, A. (2019). *Dry-Jet Wet Spinning of Technical and Textile Filament Fibers from a Solution of Wood Pulp and Waste Cotton in an Ionic Liquid.* Finland: Aalto University.
- Askari, M., Liang, C. Z., Choong, L. T. S., & Chung, T.-S. (2021). Optimization of TFC-PES hollow fiber membranes for reverse osmosis (RO) and osmotically assisted reverse osmosis (OARO) applications. *Journal of Membrane Science*, 625, 119156.
- Babu, V. P., Kraftschik, B. E., & Koros, W. J. (2018). Crosslinkable TEGMC asymmetric hollow fiber membranes for aggressive sour gas separations. *Journal of Membrane Science*, 558, 94-105.
- Baghali, M., Jayathilaka, W., & Ramakrishna, S. (2021). The role of electrospun nanomaterials in the future of energy and environment. *Materials*, 14(3), 558.
- Baker, R. W. (2012). *Membrane technology and applications:* John Wiley & Sons.

- Bhattacharai, R. S., Bachu, R. D., Boddu, S. H., & Bhaduri, S. (2018). Biomedical applications of electrospun nanofibers: Drug and nanoparticle delivery. *Pharmaceutics*, 11(1), 5.
- Bieda, M., Bouchard, F., & Lasagni, A. F. (2015). Two-Photon Polymerization of a Branched Hollow Fiber Structure with predefined Circular Pores. *Journal of Photochemistry and Photobiology A : Chemistry*. doi:<http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.jphotochem.2015.12.012>
- Bo, Z., Xili, H., & Lijun, Q. (2023). Microfluidic spinning technology and flexible wearable application of multi-structure microfluidic fiber. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 40.
- Borisov, I., Bazhenov, S., Vasilevsky, V., Bakhtin, D., Balynin, A., Yushkin, A., . . . Volkov, A. (2020). *Asymmetric hollow-fiber filtration membranes based on insoluble polyimide (R-BAPB): Influence of coagulation bath on porous structure*. Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series.
- Borisov, I., Vasilevsky, V., Matveev, D., Ovcharova, A., Volkov, A., & Volkov, V. (2019). Effect of temperature exposition of casting solution on properties of polysulfone hollow fiber membranes. *Fibers*, 7(12), 110.
- Bunga H Nasyirahul, Sajidah, N., Silvana Dwi, Utomo, W. P., Iqbal, R. M., Hartanto, D., Othman, M., . . . Fansuri, H. (2018). *Preparation and characterization of dual-layer hollow fibre catalyst membrane for oxygen transport*. Paper presented at the AIP Conference Proceedings.
- Chen, C.-C., Qiu, W., Miller, S. J., & Koros, W. J. (2011). Plasticization-resistant hollow fiber membranes for CO₂/CH₄ separation based on a thermally crosslinkable polyimide. *Journal of Membrane Science*, 382(1-2), 212-221.
- Chen, X., Wang, M., & Zhou, Q. (2007). Effects of Process Parameters on the Properties of Polyacrylonitrile

- Nanofibers Produced by Dry-Jet Wet Spinning. *Journal of Applied Polymer Science*, 104(2), 1026-1037.
- Cheng, D., Zhao, L., Li, N., Smith, S. J., Wu, D., Zhang, J., . . . Batten, M. P. (2019). Aluminum fumarate MOF/PVDF hollow fiber membrane for enhancement of water flux and thermal efficiency in direct contact membrane distillation. *Journal of Membrane Science*, 588, 117204.
- Chia, Y., Lia, T., Wang, B., Wu, Z., & Lia, K. (2017). Morphology, performance and stability of multi-bore capillary La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_{3-δ} oxygen transport membranes. *Journal of Membrane Science*, 529, 224-233.
- Choi, J., Dorji, P., Shon, H. K., & Hong, S. (2019). Applications of capacitive deionization: Desalination, softening, selective removal, and energy efficiency. *Desalination*, 449, 118-130.
- Chung, T.-S., & Feng, Y. (2021). *Hollow fiber membranes: Fabrication and applications*: Elsevier.
- Dai, Z., Ansaloni, L., & Deng, L. (2016). Recent advances in multi-layer composite polymeric membranes for CO₂ separation: A review. *Green Energy & Environment*, 1(2), 102-128.
- Dittrich, J., Gnirss, R., Peter-Fröhlich, A., & Sarfert, F. (1996). Microfiltration of municipal wastewater for disinfection and advanced phosphorus removal. *Water Sci. Technology*, 34, 125–131.
- Dortmundt, D., & Doshi, K. (2019). Recent developments in CO₂ removal membrane technology. *UOP LLC*, 1.
- Du, X. Y., Li, Q., Wu, G., & Su, C. (2019). Multifunctional Micro/Nanoscale Fibers Based on Microfluidic Spinning Technology. *Advanced Materials*.
- Dutta, M., Bhattacharjee, S., & De, S. (2020). Separation of reactive dyes from textile effluent by hydrolyzed polyacrylonitrile hollow fiber ultrafiltration quantifying the transport of

- multicomponent species through charged membrane pores. *Separation and Purification Technology*, 234, 116063.
- Elimelech, M., & Phillip, W. A. (2011). The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment. *science*, 333(6043), 712-717.
- Elma, M., Mahmud, M., Akhbar, A., Suryani, L., Mustalifah, F. R., Rahma, A., . . . Baity, N. (2020). APLIKASI MEMBRAN SILIKA-PEKTIN UNTUK DESALINASI AIR PAYAU. *Jukung (Jurnal Teknik Lingkungan)*, 6(1).
- Elma, M., Pratiwi, A. E., Rahma, A., Rampun, E. L. A., Mahmud, M., Abdi, C., . . . Bilad, M. R. (2022). Combination of coagulation, adsorption, and ultrafiltration processes for organic matter removal from peat water. *Sustainability*, 14(1), 370.
- Elma, M., Suparsih, D. R., & Annahdliyah, S. (2019). Performasi Organo Silica Membrane menggunakan Metode Sol-Gel. *Konversi*, 8(1).
- Elma, M., Yacou, C., Costa, J. C. D. d., & Wang, D. K. (2013). Performance and Long Term Stability of Mesoporous Silica Membranes for Desalination. *Journal Membranes*, 3(3), 15.
- Fane, A., Tang, C., & Wang, R. (2011). Membrane Technology for Water: Microfiltration, Ultrafiltration, Nanofiltration, and Reverse Osmosis [Press release]
- Fang, H., Gao, J., Wang, H., & Chen, C. (2012). Hydrophobic Porous Alumina Hollow Fiber for Water Desalination via Membrane Distillation Process. *Journal of Membrane Science*, 403, 41-46.
- Fatihah, S. W. (2017). Aplikasi Perovskit CaTiO₃ dalam Teknologi Membran. *Institut Teknologi Sepuluh Nopember*.
- Feng, L., Liu, S., Luan, Y., Li, Y., & Zhang, Q. (2021). *Dry Spinning of Continuous Graphene Oxide/TPU Composite Fibers with*

- Excellent Strength and Toughness*. Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series.
- Figoli, A. (2022). *Hollow Fibers and Nanofibers in Membrane Science: Preparation, Characterization, and Applications*. Singapore: Jenny Stanford Publishing.
- Galiano, F., Song, X., Marino, T., Boerrigter, M., Saoncella, O., Simone, S., . . . Figoli, A. (2018). Novel photocatalytic PVDF/Nano-TiO₂ hollow fibers for environmental remediation. *Polymers*, 10(10), 1134.
- Garg, K., & Bowlin, G. L. (2011). Electrospinning jets and nanofibrous structures. *Biomicrofluidics*, 5(1), 013403.
- Giacobbo, A., Meneguzzi, A., Bernardes, A. M., & de Pinho, M. N. (2017). Pressure-driven membrane processes for the recovery of antioxidant compounds from winery effluents. *Journal of Cleaner Production*, 155, 172-178.
- Goh, K. S., Chong, J. Y., Chen, Y., Fang, W., Bae, T.-H., & Wang, R. (2020). Thin-Film Composite Hollow Fibre Membrane For Low Pressure Organic Solvent Nanofiltration. *Journal of Membrane Science*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117760>
- Goh, P. S., & Ismail, A. F. (2018). A review on inorganic membranes for desalination and wastewater treatment. *Journal Desalination*, 21.
- Han, G., Wan, C., & Chung, T.-S. (2018). Hollow-Fiber Membranes for Salinity Gradient Processes. In. Singapore: National University of Singapore.
- Han, N., Zhang, W., Guo, W., Xie, S., Zhang, C., Zhang, X., . . . Liu, S. (2021). Novel oxygen permeable hollow fiber perovskite membrane with surface wrinkles. *Separation and Purification Technology*, 261, 118295.

- Hu, T., Zhou, H., Peng, H., & Jiang, H. (2018). Nitrogen production by efficiently removing oxygen from air using a perovskite hollow-fiber membrane with porous catalytic layer. *Frontiers in chemistry*, 6, 329.
- Ichwan, M., & Irawan, B. (2011). TINJAUAN TENTANG TEKNOLOGI ELECTROSPINNING PADA PROSES PEMBUATAN SERAT NANOFIBERS. *Texere*, 9. doi:10.53298/texere.v9i1.24
- Ismail, N., Salleh, W., Ismail, A., Hasbullah, H., Yusof, N., Aziz, F., & Jaafar, J. (2020). Hydrophilic polymer-based membrane for oily wastewater treatment: A review. *Separation and Purification Technology*, 233, 116007.
- Jeon, S., Karkhanechi, H., Fang, L.-F., Cheng, L., Ono, T., Nakamura, R., & Matsuyama, H. (2018). Novel preparation and fundamental characterization of polyamide 6 self-supporting hollow fiber membranes via thermally induced phase separation (TIPS). *Journal of Membrane Science*, 546, 1-14.
- Ji, D., Gao, Y., Wang, W., Feng, H., Chen, K., & Xiao, C. (2022). Green preparation of PVDF hollow fiber membranes with multiple pore structure via melt spinning method for oil/water separation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(5), 108337.
- Jim, K., Fane, A., Fell, C., & Joy, D. (1992).] Fouling mechanisms of membranes during protein ultrafiltration. *Journal of membrane science*, 68(1-2), 79-91.
- Jun, Y., Kang, E., Chae, S., & Lee, S. H. (2014). Microfluidic spinning of micro- and nano-scale fibers for tissue engineering. *Royal Society of Chemistry*.
- Karami, Z., Behzad, T., & Azarafza, M. (2020). Mechanical Properties and Morphology of PLA/PEG Electrospun

- Nanofiber Membranes. *Journal of Macromolecular Science., Part A*, 57(5), 301-311.
- Karmakar, S., Bhattacharjee, S., & De, S. (2018). Aluminium fumarate metal organic framework incorporated polyacrylonitrile hollow fiber membranes: spinning, characterization and application in fluoride removal from groundwater. *Chemical Engineering Journal*, 334, 41-53.
- Kayvani Fard, A., McKay, G., Buekenhoudt, A., Al Sulaiti, H., Motmans, F., Khraisheh, M., & Atieh, M. (2018). Inorganic membranes: Preparation and application for water treatment and desalination. *Materials*, 11(1), 74.
- Khair, M. (2011). SINTESIS METAL ORGANIC FRAMEWORK (MOF) UNTUK PENYIMPAN HIDROGEN. *EKSAKTA*, 1(1).
- Khan, I. U., Othman, M. H. D., Ismail, A., Matsuura, T., Hashim, H., Nordin, N. A. H. M., . . . Jilani, A. (2018). Status and improvement of dual-layer hollow fiber membranes via co-extrusion process for gas separation: A review. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 52, 215-234.
- Kim, I. M., Yoo, M. K., & Kim, K. J. (2013). Preparation and Characterization of Cotton Linter Based Regenerated Cellulose Fiber by Dry Jet-wet Spinning. *Journal of the Korean Society of Textile Engineering.*, Vol. 50, No. 1.
- Kim, J. K., Ha, C. R., & Lee, S. B. (2017). Effect of fiber drawing rate on the structure and properties of dry jet-wet spun cellulose fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 134, 44708.
- Krisnandika, V. E. (2017). Produksi nanofiber dan aplikasinya dalam pengolahan air. *Institut Teknologi Bandung*.
- Kumar, M., Rao, S., Isloor, A. M., Ibrahim, G. S., Ismail, N., Ismail, A. F., & Asiri, A. M. (2019). Use of cellulose acetate/polyphenylsulfone derivatives to fabricate

- ultrafiltration hollow fiber membranes for the removal of arsenic from drinking water. *International journal of biological macromolecules*, 129, 715-727.
- Lau, H. S., Lau, S. K., Soh, L. S., Hong, S. U., Gok, X. Y., Yi, S., & Yong, W. F. (2022). State-of-the-art organic-and inorganic-based hollow fiber membranes in liquid and gas applications: Looking back and beyond. *Membranes*, 12(5), 539. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/35629866>. doi:10.3390/membranes12050539
- Lestari, K. R. (2020). *Teori Dasar Membran*. Jakarta Selatan: LP UNAS.
- Lestari, W. C., Ningtiar, E. S., Irianto, M. Y., & Widiastuti, N. (2021). Potensi Pengembangan Membran Polimer Hidrofilik untuk Produksi Biodiesel Berbasis Mikroalga. *SPECTA Journal of Technology*, 5(2), 115-122.
- Li, G., Kujawski, W., V'alek, R., & Koter, S. (2020). A review - The development of hollow fibre membranes for gas separation processes. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. Retrieved from 10.1016/j.ijggc.2020.103195.
- Li, J., Pan, Y., Wu, C., Sun, F., & Wei, T. (2017). Processing of advanced thermoelectric materials. *Science China Technological Sciences*, 60, 1347-1364.
- Li, L., Wang, H., Chen, M., Jiang, S., Jiang, S., Li, X., & Wang, Q. (2018). Butylated hydroxyanisole encapsulated in gelatin fiber mats: Volatile release kinetics, functional effectiveness and application to strawberry preservation. *Food Chemistry*, 269, 142-149.
- Li, W., Yang, Z., Zhang, G., Fan, Z., Meng, Q., Shen, C., & Gao, C. (2014). Stiff metal-organic framework-polyacrylonitrile hollow fiber composite membranes with high gas

- permeability. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(7), 2110-2118.
- Liu, C., Guo, Y., Zhou, Y., Yang, B., Xiao, K., & Zhao, H.-Z. (2022). High-hydrophilic and antifouling reverse osmosis membrane prepared based an unconventional radiation method for pharmaceutical plant effluent treatment. *Separation and Purification Technology*, 280, 119838.
- LIU, H.-Y., LI, Z.-M., YAO, Y.-J., & KO, F. K. (2016). ANALYTICAL MODELLING OF DRY-JET WET SPINNING.
- Liu, X., Zhang, J., Huang, L., & Tang, R. C. (2018). Fabrication of hydrogel microfibers by dry-jet wet spinning for tissue engineering. *Materials Science and Engineering. C*, 93, 232-242.
- Liu, Y., Wei, Y., Su, J., Zhang, L., Cui, X., & Jin, L. (2020). Surface-modified PVA/PVDF hollow fiber composite membrane for air dehumidification. *Journal of Materials Science*, 55, 5415-5430.
- llouze, E., Tahri, N., & Amar, R. B. (2012). Enhancement of textile wastewater treatment process using Nanofiltration. *Desalination Journal*(286), 16–23.
- Long, Y.-Z., Yan, X., Wang, X.-X., Zhang, J., & Yu, M. (2019). Electrospinning: the setup and procedure. In *Electrospinning: Nanofabrication and applications* (pp. 21-52): Elsevier.
- Lu, K.-J., Wang, P., & Chung, T.-S. (2021). Hollow fiber membranes for membrane distillation applications. In *Hollow Fiber Membranes* (pp. 495-521): Elsevier.
- Mahreni, Ristianingsih, Y., & Suhascaryo, N. (2020). *Sintesis dan Aplikasi Material Baru Kerangka Logam Organik (Metal Organic Frammework, MOF)* (Vol. 1). Yogyakarta: Lembaga

Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat UPN Veteran Yogyakarta.

- Matsuyama, H., Karkhanechi, H., & Rajabzadeh, S. (2021). Polymeric membrane fabrication via thermally induced phase separation (TIPS) method. In *Hollow Fiber Membranes* (pp. 57-83): Elsevier.
- Matveev, D., Kutuzov, K., & Vasilevsky, V. (2020). Effect of draw ratio on the morphology of polysulfone hollow fiber membranes. *Membranes and Membrane Technologies*, 2, 351-356.
- Meulenbergh, W. A., Schulze-Küppers, F., Deibert, W., Gestel, T. V., & Baumann, S. (2019). Ceramic Membranes: Materials – Components – Potential Applications. *ChemBioEng Reviews*, 6(6), 8. doi:<https://doi.org/10.1002/cben.201900022>
- Mishra, N. K., Patil, N., Yi, S., Hopkinson, D. H., Grunlan, J. C., & Wilhite, B. A. (2021). Highly selective hollow fiber membranes for carbon capture via in-situ layer-by-layer surface functionalization. *Journal of Membrane Science*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119381>
- MKR, K., MN, H., AB, S., & HA, B. (2021). A Study on Microfluidic Spinning Technology (MST) Used for Micro Fibre Fabrication. *Austin Publishing Group*, 6.
- Modi, A., & Bellare, J. (2019). Efficiently improved oil/water separation using high flux and superior antifouling polysulfone hollow fiber membranes modified with functionalized carbon nanotubes/graphene oxide nanohybrid. *Journal of environmental chemical engineering*, 7(2), 102944.
- Mohammadi, T., & Esmaeelifar, A. (2004). Wastewater treatment using ultrafiltration at a vegetable oil factory. *Desalination Journal*(166), 329–337.

- Mubashir, M., Yeong, Y. F., Lau, K. K., & Chew, T. L. (2019). Effect of spinning conditions on the fabrication of cellulose acetate hollow fiber membrane for CO₂ separation from N₂ and CH₄. *Polymer Testing*, 73, 1-11.
- Muhamad, N., Makhtar, S. N. N. M., Abdullah, N., Pauzi, M. Z. M., Mahpoz, N. M. a., Othman, M. H. D., . . . Rahman, M. A. (2021). Composite zeolite hollow fiber membrane for the removal of nickel using forward osmosis. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101806.
- Mulder, M. (1996). *Basic Principle og Membrane Technology*. Netherlands: Kluwer Academic Publisher.
- Mulder, M., & Mulder, J. (1996). *Basic Principles of Membrane Technology*: Springer Science & Business Media.
- Nakajima, T., Kajiwar, K., & McIntyre, J. E. (1994). *Advanced fiber spinning technology*: Woodhead Publishing.
- Nazarian, M., Mansourizadeh, A., & Abbasi, M. (2019). Preparation of blend hydrophilic polyetherimide-cellulose acetate hollow fiber membrane for oily wastewater treatment. *Journal of Applied Membrane Science & Technology*, 23(3).
- OGLI, M. K. A., & IBRAGIMOVICH, K. R. (2020). Research Fabrication Of Fibers And Films. *JournalNX*, 6(11), 247-250.
- Othman, M. H. D., Hubadillah, S. K., Adam, M. R., Ismail, A. F., Rahman, M. A., & Jaafar, J. (2017). Silica-Based Hollow Fiber Membrane for Water Treatment. In *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes* (pp. 157-180): Elsevier.
- Owida, H. A., Moh'd, B. A.-h., & Al Takrouri, M. (2022). Designing an Integrated Low-cost Electrospinning Device for Nanofibrous Scaffold Fabrication. *HardwareX*, 11, e00250.

- Ozipek, B., & Karakas, H. (2014). Wet spinning of synthetic polymer fibers. In *Advances in filament yarn spinning of textiles and polymers* (pp. 174-186): Elsevier.
- Paglireo, M., Khayet, M., García-Payo, C., & García-Fernández, L. (2021). Hollow fibre polymeric membranes for desalination by membrane distillation technology: A review of different morphological structures and key strategic improvements. *Desalination*, 516. Retrieved from doi.org/10.1016/j.desal.2021.115235.
- Pagnola, M. R., Vivero, J. U., & Marrugo, A. G. (2018). Magnetic Materials by Melt Spinning Method, Structural Characterization, and Numerical Modeling. In *New Uses of Micro and Nanomaterials*: IntechOpen.
- Pandele, A. M., Serbanescu, O. S., & Voicu, S. I. (2020). Polysulfone composite membranes with carbonaceous structure. synthesis and applications. *Coatings*, 10(7), 609.
- Parani, S., & Oluwafemi, O. S. (2021). Membrane distillation: Recent configurations, membrane surface engineering, and applications. *Membranes*, 11(12), 934.
- Partheniadis, I., Nikolakakis, I., Laidmäe, I., & Heinämäki, J. (2020). A mini-review: Needleless electrospinning of nanofibers for pharmaceutical and biomedical applications. *Processes*, 8(6), 673.
- Pauzan, M. A. B., Hubadillah, S. K., Kamal, S. N. E. A. M., Othman, M. H. D., Puteh, M. H., Kurniawan, T. A., . . . Kadir, S. H. S. A. (2021). Novel ceramic hollow fibre membranes contactor derived from kaolin and zirconia for ammonia removal and recovery from synthetic ammonia. *Journal of Membrane Science*, 638. Retrieved from 10.1016/j.memsci.2021.119707.
- Peechmani, P., Othman, M. H. D., Kamaludin, R., Puteh, M. H., Jaafar, J., Rahman, M. A., . . . Gallagher, J. (2021). High flux

- polysulfone braided hollow fiber membrane for wastewater treatment role of zinc oxide as hydrophilic enhancer. *Journal of environmental chemical engineering*, 9(5), 105873.
- Peters, C. D., & Hankins, N. P. (2019). Osmotically assisted reverse osmosis (OARO): Five approaches to dewatering saline brines using pressure-driven membrane processes. *Desalination*, 458, 1-13.
- Petricic, I., Korenak, J., Povodnik, D., & Hélix-Nielsen, C. (2015). A feasibility study of ultrafiltration/reverse osmosis (UF/RO)-based wastewater treatment and reuse in the metal finishing industry. *Journal Clean Prod*(101), 292–300.
- Plisko, T. V., Bilyukevich, A. V., Zhao, L., Huang, W., Volkov, V. V., & Huang, Z. (2021). Formation of polysulfone hollow fiber membranes using the systems with lower critical solution temperature. *Fibers*, 9(5), 28.
- Pradhana, E., Elma, M., Othman, M., Huda, N., Ul-haq, M., Rampun, E. L., & Rahma, A. (2021). *The functionalization study of PVDF/TiO₂ hollow fibre membranes under vacuum calcination exposure*. Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series.
- Probst, H., Katzer, K., Nocke, A., Hickmann, R., Zimmermann, M., & Cherif, C. (2021). Melt spinning of highly stretchable, electrically conductive filament yarns. *Polymers*, 13(4), 590.
- Putri, I. S. (2023). *PENGARUH TEGANGAN ELECTROSPINNING PADA PEMBENTUKAN SERAT NANO TITANIUM DIOKSIDA (TiO₂)*. FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM,
- Qin, J.-J., Gu, J., & Chung, T.-S. (2001). Effect of wet and dry-jet wet spinning on the shear-induced orientation during the formation of ultrafiltration hollow fiber membranes. *Journal of Membrane science*, 182(1-2), 57-75.

- Qiu, P., & Mao, C. (2010). Biomimetic branched hollow fibers templated by self-assembled fibrous polyvinylpyrrolidone structures in aqueous solution. *ACS nano*, 4(3), 1573-1579.
- Racar, M., Obajdin, K., Dolar, D., & Košutić, K. (2020). Pretreatment for the reclamation of rendering plant secondary effluent with NF/RO: UF flat sheet versus UF hollow fiber membranes. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22(2), 399-408.
- Rackley, S. A. (2017). Membrane separation systems. 187-225. doi:10.1016/b978-0-12-812041-5.00008-8
- Rahma, A., Elma, M., Kusumawati, U., & Dony, N. (2022). Novel Multi-Channel Coated Silica Based Membranes Applied for Peat Water Ultrafiltration. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 100(3), 13.
- Raji, Y. O., Othman, M. H. D., Nordin, N. A. H. S. M., Adam, M. R., Tai, Z. S., Usman, J., & Ismail, A. F. (2020). Surface matrix functionalization of ceramic-based membrane for oil-water separation: A mini-review. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 37, 1631-1641.
- Rautenbach, R., Linn, T., & Eilers, L. (2000). Treatment of severely contaminated waste water by a combination of RO, high-pressure RO and NF – Potential and limits of the process. *J. Membr. Sci.*(174), 231–241.
- Rodriguez-Mozaz, S., Ricart, M., Köck-Schulmeyer, M., Guasch, H., Bonnineau, C., Proia, L., . . . Mater., J. H. (2015). Pharmaceuticals and pesticides in reclaimed water: Efficiency assessment of microfiltration–reverse osmosis (MF–RO) pilot plant. (282), 165–173.
- Rong, C., & Shen, B. (2018). Nanocrystalline and nanocomposite permanent magnets by melt spinning technique. *Chinese Physics B*, 27(11), 117502.

- Ruckdashel, R., & Shim, E. (2020). Effects of melt spinning parameters on polypropylene hollow fiber formation. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 15, 1558925019899680.
- Ryšánek, P., Benada, O., Tokarský, J., Syrový, M., Čapková, P., & Pavlík, J. (2019). Specific structure, morphology, and properties of polyacrylonitrile (PAN) membranes prepared by needleless electrospinning; Forming hollow fibers. *Materials Science and Engineering: C*, 105, 110151.
- Salahi, A., Badrnezhad, R., Abbasi, M., Mohammadi, T., & Rekabdar, F. (2011). Oily wastewater treatment using a hybrid UF/RO system. *Desalin. Water Treat.*, 28, 75–82.
- Saputra, H., & Rosjidi, M. (2004). Pembuatan dan Karakterisasi Membran Zeolit. *Jurnal Zeolit Indonesia*, 3(2), 62-67.
- Sari, P., Gunawan, T., Salleh, W. N. W., Ismail, A. F., & Widiastuti, N. (2019). *Simple method to enhance O₂/N₂ separation on P84 co-polyimide hollow fiber membrane*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Sasmiasi, W. (2017). Oksida Perovskit dan Peningkatan Konduktivitas Ion Perovskit pada Membran. *Institut Teknologi Sepuluh Nopember*.
- Satoh, R., Morinaga, T., & Sato, T. (2022). Novel Dry Spinning Process of Natural Macromolecules for Sustainable Fiber Material-1-Proof of the Concept Using Silk Fibroin. *Materials*, 15(12), 4195.
- Satyabama. (2019). Unit III - Membrane Separation [Press release]
- Schopf, R., Schmidt, F., & Kulozik, U. (2021). Impact of hollow fiber membrane length on the milk protein fractionation. *Journal of Membrane Science*, 620, 118834.
- Schubeis, T., Le Marchand, T., Andreas, L. B., & Pintacuda, G. (2018). 1H magic-angle spinning NMR evolves as a

- powerful new tool for membrane proteins. *Journal of Magnetic Resonance*, 287, 140-152.
- Senthamizhan, A., Balusamy, B., & Uyar, T. (2017). Electrospinning: A versatile processing technology for producing nanofibrous materials for biomedical and tissue-engineering applications. In *Electrospun materials for tissue engineering and biomedical applications* (pp. 3-41): Elsevier.
- Seyedin, S., Romano, M. S., Minett, A., & Razal, J. M. (2015). Towards the Knittability of Graphene Oxide Fibres. *Scientific Reports.*, 5. doi:10.1038/srep14946
- Shang, L., Yu, Y., Liu, Y., Chen, Z., Kong, T., & Zhao, Y. (2019). Spinning and applications of bioinspired fiber systems. *ACS nano*, 13(3), 2749-2772.
- Shere, W., Jasion, G. T., Fokoua, E. N., & Poletti, F. (2022). Understanding the impact of cladding modes in multi-mode hollow-core anti-resonant fibres. *Optical Fiber Technology*, 71.
- Shirsat, A. R., & Shinde, A. (2016). Effect of Wet-Spinning Parameters and Spin-Finish Application on Production of Polyacrylonitrile Precursor for Carbon Fibre Production.
- Shirvan, A. R., Nouri, A., & Sutti, A. (2022). A perspective on the wet spinning process and its advancements in biomedical sciences. *European Polymer Journal*, 111681.
- Sholeha, N. A. (2017). REVIEW Karakteristik Pori pada Zeolit: Modifikasi dan Aplikasi. *IPB University*.
- Smith, A. B., Johnson, C. D., & Anderson, R. T. (2022). Effects of Fiber Take-Up Speed on Morphology and Mechanical Properties of Dry-Jet Wet Spun Fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(18). doi:10.1002/app.49764
- Spatz, J., Micoulet, A., & Sharifikolouei, E. (2021). Apparatus and method of manufacturing metallic or inorganic fibers

- having a thickness in the micron range by melt spinning.
In: Google Patents.
- Sridhar, S. (2019). *Membrane Technology: Sustainable Solutions in Water, Health, Energy, and Environmental Sectors*. Great Britain: Taylor and Francis Group.
- Sulaiman, M., & Ling, C. K. (2014). Membrane Ultrafiltration Of Treated Palm Mill Effluent *Jurnal Teknologi*, 4, 113-120.
- Sun, X., Wang, C., Li, Y., Wang, W., & Wei, J. (2015). Treatment of phenolic wastewater by combined UF and NF/RO processes. *Desalination Journal*(355), 68–74.
- Syauqiah, I., Elma, M., Pradana, E. A., Ul-Haq, M. D., Rampun, E. L. A., Rahma, A., . . . Kamelia, Y. Hollow fiber membrane applied for Sasirangan wastewater desalination integrated with photocatalysis and pervaporation set-up. In: Elsevier.
- Tan, C. J., Lee, J. J. L., Ang, B. C., Andriyana, A., Chagnon, G., & Sukiman, M. S. (2019). Design of polyurethane fibers: Relation between the spinning technique and the resulting fiber topology. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(26), 47706.
- Temesgen, S., Rennert, M., Tesfaye, T., & Nase, M. (2021). Review on spinning of biopolymer fibers from starch. *Polymers*, 13(7), 1121.
- Thanh, B. X., & Nguyen, H.-H. (2019). Review on membrane module configurations used for membrane distillation process. *GeoScience Engineering*, 65(1), 1-10.
- Tian, Q., Xu, Z., Liu, Y., Fang, B., Peng, L., Xi, J., . . . Gao, C. (2017). Dry spinning approach to continuous graphene fibers with high toughness. *Nanoscale*, 9(34), 12335-12342.
- Tsai, H.-A., Hsu, C.-Y., Huang, S.-H., Lee, K.-R., Hung, W.-S., Hu, C.-C., & Lai, J.-Y. (2018). The preparation of polyelectrolyte/hydrolyzed polyacrylonitrile composite

- hollow fiber membrane for pervaporation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 91, 623-633.
- Tuan, S., Chen, Z., Li, S., Chen, H., & Li, Y. (2020). High-performance cellulosic filament fibers prepared via dry-jet wet spinning from ionic liquids. *Cellulose*, 27(6), 3383-3394.
- Turken, T., Sengur-Tasdemir, R., Ates-Genceli, E., Tarabara, V. V., & Koyuncu, I. (2019). Progress on reinforced braided hollow fiber membranes in separation technologies: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 32, 100938.
- Vandekar, V. D. (2015). Manufacturing of hollow fiber membrane. *Int J Sci Res*, 4, 1990-1993.
- Vocht, M. P., Beyer, R., Thomasic, P., Müller, A., Ota, A., Hermanutz, F., & Buchmeiser, M. R. (2021). High-performance cellulosic filament fibers prepared via dry-jet wet spinning from ionic liquids. *Cellulose*, 28, 3055–3067.
- Vohra, A., Raturi, P., & Hussain, E. (2023a). Scope of using hollow fibers as a medium for drug delivery.
- Vohra, A., Raturi, P., & Hussain, E. (2023b). Scope of using hollow fibers as a medium for drug delivery. 169-213. doi:10.1016/b978-0-323-96117-2.00013-3
- Wafiroh, S., Abdulloh, A., & Widati, A. A. (2021). Cellulose acetate hollow fiber membranes from banana stem fibers coated by tio2 for degradation of waste textile dye. *Chem Chem Technol*, 15, 291-298.
- Wahyudi, T., & Sugiyana, D. (2011). Pembuatan serat nano menggunakan metode electrospinning. *Arena tekstil*, 26(1).
- Wan, C. F., Yang, T., Lipscomb, G. G., Stookey, D. J., & Chung, T.-S. (2017). Design and Fabrication of Hollow Fiber Membrane Modules. *Journal of Membrane Science*, 538, 96-107.

- Wan, C. F., Yang, T., Lipscomb, G. G., Stookey, D. J., & Chung, T.-S. (2017). Design and Fabrication of Hollow Fiber Membrane Modules. *Journal of Membrane Science*, 97-107.
- Wang, C., Yu, J., Liu, J., & Zhao, J. (2020). Preparation and Characterization of Cellulose Microfibers by Dry-Jet Wet Spinning. *Cellulose*, 27(7), 3793-3803.
- Wang, J., Zheng, L., Wu, Z., Zhang, Y., & Zhang, X. (2016). Fabrication of Hydrophobic Flat Sheet and Hollow Fiber Membranes from PVDF and PVDF-CTFE for Membrane Distillation. *Journal of Membrane Science*, 497(1), 183-193.
- Wang, L., Cappelle, K., Santos, D., Broeck, J. V., Smagghe, G., & Swevers, L. (2019). Short-term persistence precedes pathogenic infection: Infection kinetics of cricket paralysis virus in silkworm-derived Bm5 cells. *Journal of insect physiology*, 115, 1-11.
- Wang, P., Zhu, H., & Yu, G. (2020). Effect of solution and drying temperature on the mechanical properties of dry-jet wet spun cellulose fibers. *Fibers and Polymers*, vol. 21, 335-341.
- Wang, Q., Lu, T.-D., Yan, X.-Y., Zhao, L.-L., Yin, H., Xiong, X.-X., . . . Sun, S.-P. (2020). Designing nanofiltration hollow fiber membranes based on dynamic deposition technology. *Journal of Membrane Science*, 610, 118336.
- Wang, S., Bai, J., Innocent, M. T., Wang, Q., Xiang, H., Tang, J., & Zhu, M. (2022). Lignin-based carbon fibers: Formation, modification and potential applications. *Green Energy & Environment*, 7(4), 578-605.
- Wang, Y., Chen, X., Zhang, J., Yin, J., & Wang, H. (2009). Investigation of microfiltration for treatment of emulsified oily wastewater from the processing of petroleum products. *Desalination Journal*(249), 1223–1227.

- Waresindo, W. (2019). Review Fabrikasi Nanofiber menggunakan alat Electrospinning, Rotary Forcespinning dan Nozzeless Electrospinning.
- Weisser, P., Barbier, G., Richard, C., & Drean, J.-Y. (2016). Characterization of the coagulation process: wet-spinning tool development and void fraction evaluation. *Textile Research Journal*, 86(11), 1210-1219.
- Wieland, M., Arne, W., Marheineke, N., & Wegener, R. (2019). Modeling and simulation of curved fibers in dry spinning scenarios. *Results in Applied Mathematics*, 3, 100013.
- Wieland, M., Arne, W., Marheineke, N., & Wegener, R. (2020). Industrial dry spinning processes: algorithmic for a two-phase fiber model in airflows. *Journal of Mathematics in Industry*, 10(1), 1-22.
- Wijayanti, I. D., Mølmen, L., Denys, R. V., Guzik, M. N., Gorsse, S., & Yartys, V. (2021). Studies of the effect of melt spinning on the electrochemical properties of the AB₂ Laves phase alloys. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES)*, 5(1).
- Wu, P., Jiang, L. Y., & Hu, B. (2018). Fabrication of Novel PVDF/P(VDF-co-HFP) Blend Hollow Fiber Membranes for DCMD. *Journal of Membrane Science*. Retrieved from doi.org/10.1016/j.memsci.2018.09.015.
- Wu, W., Zhang, X., Qin, L., Li, X., Meng, Q., Shen, C., & Zhang, G. (2020). Enhanced MPBR with polyvinylpyrrolidone-graphene oxide/PVDF hollow fiber membrane for efficient ammonia nitrogen wastewater treatment and high-density *Chlorella* cultivation. *Chemical Engineering Journal*, 379, 122368.
- Wypyssek, D., Kalde, A. M., Pradellok, F., & Wessling, M. (2021). In-situ Investigation of Wetting Patterns in Polymeric

- multibore Membranes via Magnetic Resonance Imaging. *Journal of Membrane Science*, 622.
- Wypysek, D., Rall, D., Neef, T., Jarauta, A., Secanell, M., & Wessling, M. (2021). How does Porosity Heterogeneity affect the Transport properties of multibore filtration membranes. *Journal of Membrane Science*.
- Xie, K., Fu, Q., Qiao, G. G., & Webley, P. A. (2019). Recent progress on fabrication methods of polymeric thin film gas separation membranes for CO₂ capture. *Journal of Membrane Science*, 572, 38-60.
- Xie, R., Xu, P., Liu, Y., Li, L., Luo, G., Ding, M., & Liang, Q. (2018). Necklace-Like Microfibers with Variable Knots and Perfusable Channels Fabricated by an Oil-Free Microfluidic Spinning Process. *Advanced Materials*.
- Xu, Y. M., Japip, S., & Chung, T.-S. (2020). UiO-66-NH₂ incorporated dual-layer hollow fibers made by immiscibility induced phase separation (I2PS) process for ethanol dehydration via pervaporation. *Journal of Membrane Science*, 595, 117571.
- Yang, D., Fadeev, A., Adams, P. N., & Mattes, B. R. (2001). *Controlling macrovoid formation in wet-spun polyaniline fibers*. Paper presented at the Smart Structures and Materials 2001: Electroactive Polymer Actuators and Devices.
- Yang, D. L., Faraz, F., Wang, J. X., & Radacsi, N. (2022). Combination of 3D printing and electrospinning techniques for biofabrication. *Advanced Materials Technologies*, 7(7), 2101309.
- Yang, H., & Guo, M. (2019). Bioinspired Polymeric Helical and Superhelical Microfibers via Microfluidic Spinning. *Macromolecular Chemistry and Physics*.
- Yao, M., Ren, J., Akhter, N., Woo, Y. C., Tijing, L. D., Kim, S.-H. K., & Shon, H. K. (2019). Improving membrane distillation

- performance: Morphology optimization of hollow fiber membranes with selected non-solvent in dope solution. *Chemosphere*, 230, 117-126. Retrieved from doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.049.
- Yordanov, D. (2010). Preliminary study of the efficiency of ultrafiltration treatment of poultry slaughterhouse wastewater. *Bulg. J. Agric. Sci.*, 16, 700–704.
- Yuan, H., Zhou, Q., & Zhang, Y. (2017). Improving fiber alignment during electrospinning. *Electrospun nanofibers*, 125-147.
- Zhang, H., Li, B., Sun, D., Miao, X., & Gu, Y. (2018). SiO₂-PDMS-PVDF Hollow Fiber Membrane with High Flux for Vacuum Membrane Distillation. *Desalination*, 429(1), 33-43.
- Zhang, H. Z., Li, B., Sun, D. S., Miao, X., & Gu, Y. (2018). SiO₂-PDMS-PVDF hollow fiber membrane with high flux for vacuum membrane distillation. *Desalination*, 429, 33-43. Retrieved from doi.org/10.1016/j.desal.2017.12.004.
- Zhang, L., Yang, Z., Feng, X., Cao, J., Yu, T., Tian, D., & Yao, S. (2019). Vibration of an axially moving jet in a dry spinning process. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 38(3-4), 1125-1131.
- Zhang, M., Peng, X., Fan, P., Zhou, Y., & Xiao, P. (2022). Recent Progress in Preparation and Application of Fibers Using Microfluidic Spinning Technology. *Macromolecular Chemistry and Physics*.
- Zhang, M., Wu, G., & Chen, L. (2017). High-performance cellulosic filament fibers prepared via dry-jet wet spinning from ionic liquids. *Journal of Materials Science*, 52(17).
- Zhang, T., Elma, M., Xie, F., Motuzas, J., Zhang, X., & Wang, D. K. (2018). Rapid thermally processed hierarchical titania-based hollow fibres with tunable physicochemical and photocatalytic properties. *Separation and Purification Technology*, 206, 99-106.

- Zhang, X., Liu, L., Cai, H., L, Z., & Li, Z. Y. (2019). High-performance cellulosic filament fibers prepared via dry-jet wet spinning from ionic liquids. *Carbohydrate Polymers*.
- Zhang, Y., Huang, W., & Yang, J. (2018). Preparation and Characterization of Cellulose Microfibers by Dry-Jet Wet Spinning. *Cellulose, vol. 25*, hal. 4223-4234.
- Zhao, C., Wang, Z., Li, D., Kollo, L., Luo, Z., Zhang, W., & Prashanth, K. G. (2020). Cu-Ni-Sn alloy fabricated by melt spinning and selective laser melting: A comparative study on the microstructure and formation kinetics. *Journal of Materials Research and Technology, 9(6)*, 13097-13105.
- Zhong, D., Zhou, J., & Wang, Y. (2021). Hollow-fiber membranes of block copolymers by melt spinning and selective swelling. *Journal of membrane science, 632*, 119374.

GLOSARIUM

- Air Gambut** : merupakan air yang mengandung banyak bahan organik sisa tumbuhan dan tergolong air permukaan
- Air Limbah** : air yang dihasilkan setelah penggunaan air tawar, air baku, di berbagai penerapannya atau proses yang disengaja.
- Anorganik** : istilah untuk benda/senyawa yang bukan berasal dari makhluk hidup
- Asimetrik** : benda/obyek yang memiliki sisi yang tidak seimbang
- Bore Fluid*** : disebut juga sebagai *inner coagulant*, sebagai koagulan bagian dalam yang termasuk salah satu bahan yang mempengaruhi morfologi dan struktur lapisan kulit bagian dalam (sisi lumen).
- Crossflow*** : teknik aliran searah terjadi saat fluida (air umpan) mengalir dalam satu arah tegak lurus terhadap permukaan

- Hollow fiber membrane* : membran yang dibuat dengan betuk seeat berongga (*Hollow fiber*) yang mengandung penghalang semi-permeabel
- Densitas : kerapatan atau kepadatan material
- Desalinasi : Desalinasi adalah proses yang menghilangkan komponen mineral dari air yang mengandung garam.
- Desorpsi : proses fisik dengan zat yang sebelumnya teradsorpsi dilepaskan dari permukaan.
- Difusi : peristiwa pindahnya suatu zat dalam pelarut dari konsentrasi tinggi menuju konsentrasi rendah
- Driving Force* : gaya dorong/ daya penggerak
- Dope* : Sistem polimer/pengencer yang cukup untuk membentuk campuran lelehan homogen, yang akan didinginkan untuk menginduksi pemisahan fasa
- Ekstraksi : proses pemisahan zat atau komponen tertentu dari suatu campuran atau bahan mentah
- Ekstrusi *Dope* : proses untuk membuat *dope* dengan penampang tetap

Electrospinning: metode produksi fiber yang menggunakan gaya listrik untuk menarik benang bermuatan larutan polimer atau polimer meleleh hingga diameter serat dalam urutan beberapa ratus nanometer.

Elektrodialisis : teknik untuk pengangkutan ion garam dari satu fluida melalui membran penukar ion menuju fluida lain di bawah pengaruh perbedaan potensial listrik yang digunakan.

Elongasi : sebuah pengujian mekanikal pemeluran/pemanjangan suatu benda dan bukan sebuah elastisitas.

Filtrat : material atau substrat yang melewati filter/saringan

Flat Sheet membrane : membran dengan bentuk konfigurasi lembaran/datar yang berbahan dasar polimer

Fotokatalitik : suatu kombinasi antara fotokimia dan katalis pada proses reaksi

Fouling : akumulasi material/ zat tertentu yang tidak diinginkan pada suatu permukaan padat/pori

- FTIR : Fourier Transform Infra-Red adalah alat instrument yang difungsikan untuk analisa gugus fungsi suatu zat molekul dengan menjabarkan struktur senyawa kimia.
- Hidrofilik : molekul yang tertarik pada molekul air (suka air) dan cenderung larut oleh air
- Hidrofobik : sifat fisik dari molekul yang menolak dari massa air (tidak suka air), kebalikan dari hidrofilik
- Hidrokarbon Aromatik : hidrokarbon yang terkandung ikatan tunggal dan atau ikatan ganda di antara atom-atom karbonnya
- Hidrostatik : ilmu yang mempelajari karakteristik fluida/cairan saat diam
- Interdifusi : proses pertukaran atom difusi melintasi dua material yang bersinggungan.
- Inversi fasa : adalah proses dimana polimer diubah dari bentuk larutan menjadi bentuk padatan secara terkontrol.
- Konfigurasi : bentuk; wujud (untuk menggambarkan obyek atau benda)

- Kristalinitas : tingkat tatanan struktural dalam suatu benda padat
- Microfluidic Spinning* : salah satu teknik dalam pembuatan fiber pada membran dengan ukuran dan bentuk yang beragam
- Organik : bahan/ material yang berasal dari makhluk hidup
- Permeabilitas : kemampuan membran meloloskan air pada saat operasi membran
- Permeat : suatu fluida/zat yang melewati filter
- Pervaporasi : teknik yang digunakan untuk proses pemisahan suatu zat dengan dasar pemisahan penguapan sebagian zat melalui membran
- Polimer : material/bahan utama dalam proses polimerisasi
- Pretreatment* : suatu pra perlakuan pada sampel/ bahan yang dilakukan sebelum percobaan/ penelitian dimulai
- Koagulasi : suatu proses penggumpalan suatu partikel koloid dengan adanya penambahan bahan kimia.

- Reverse Osmosis* : proses pemurnian air yang menggunakan embrane embrane able untuk memisahkan molekul air dari zat lain.
- Rejeksi : kemampuan embrane dalam melakukan penyisihan terhadap suatu zat/molekul tertentu
- Selektifitas Membran : kemampuan embrane dalam memisahkan suatu partikel dari campurannya
- SEM : *Scanning Electron Microscope* adalah alat yang digunakan untuk mengetahui morfologi suatu benda/partikel penyusun dari objek.
- Simetris : benda/obyek yang memiliki sisi yang seimbang
- Sintering : proses pemadatan dan pembentukan massa material padat dengan tekanan atau panas tanpa melelehkannya ke titik cair.
- Solvent* : pelarut, merupakan zat yang melarutkan zat lain untuk membentuk suatu larutan
- Spinneret* : alat yang digunakan dalam proses pembuatan serat fiber

- Spiral Wound* : salah satu jenis konfigurasi membran, yang terdiri dari membran, spacer umpan, spacer permeat, dan tabung permeat
- Syringe* : salah satu alat yang digunakan untuk memasukkan cairan/gas dengan sistem berkala dan teratur secara otomatis.
- Tekanan Osmotik : tekanan minimum yang perlu diterapkan pada suatu larutan untuk mencegah aliran masuk dari pelarut murninya melintasi membran semipermeabel.
- Umpan : atau disebut juga *feed water* pada membran. Merupakan fluida atau zat cair yang digunakan dalam proses operasi
- Viskositas : kekentalan suatu fluida/ zat cair

