

## Aplikasi Membran Teknologi Untuk Pengolahan Limbah Air dan Penghilangan Polutan di Udara

INDAH PRIHATININGTYAS D.S<sup>1\*</sup>, TAMRIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Mulawarman, Jl. Sambaliung no.9, Kampus Gunung kelua, Samarinda, Kalimantan Timur

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mulawarman, Jl. Sambaliung no.9, Kampus Gunung kelua, Samarinda, Kalimantan Timur

\* alamat email korespondensi: indah.unmul@gmail.com; Indah.ft@ft.unmul.ac.id

Informasi Artikel	Abstrak/Abstract
Kata Kunci: Pencemaran lingkungan; pengolahan limbah air; penghilangan polutan udara; teknologi membran	Pencemaran lingkungan bukanlah fenomena baru namun menjadi masalah terbesar dunia. Masalah pencemaran lingkungan telah menjadi masalah global baik negara ekonomi maju dan berkembang karena menjadi penyebab utama morbiditas dan mortalitas lingkungan. Kegiatan manusia melalui urbanisasi, industrialisasi, pertambangan, dan eksplorasi menjadi penyebab utama pencemaran lingkungan global. Sejumlah besar zat fisik, kimia berbahaya, agen biologis menyebabkan pencemaran air dan udara telah diidentifikasi sebagai potensi ancaman terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Beberapa teknologi dan proses pengolahan limbah air dan penanganan polutan udara telah dikembangkan untuk mencapai tingkat kualitas yang dibutuhkan. Tulisan ini bertujuan untuk mengeksplorasi teknologi membran yang menjadi salah satu teknologi dan proses yang menarik untuk diaplikasikan karena kemampuan dalam penyisihan yang tinggi dengan biaya rendah. Teknologi membran dengan proses-prosesnya seperti: mikrofiltrasi (MF), ultrafiltrasi (UF), nanofiltrasi (NF), osmosis balik (RO), elektrodialisis (ED), membran distilasi (MD), pervaporasi (PV), membran permeasi uap, membran kontaktor dan membran bioreaktor (MBR) telah digunakan untuk mengolah air limbah dan penangkapan serta penghilangan polutan udara. Dalam dekade terakhir, sintesis membran dan proses modifikasi membran dengan bahan material baru telah dikembangkan untuk meningkatkan kinerja membran dalam proses pengolahan limbah air dan penanganan serta penghilangan polutan berbahaya dari gas buang.
<i>Keywords: Environmental pollution,; wastewater treatment; air pollutants removal; membrane technology.</i>	<i>Environmental pollution is not a new phenomenon but it is the world's biggest problem. The problem of environmental pollution has become a global problem in both developed and developing countries because it is a major cause of environmental morbidity and mortality. Human activities through urbanization, industrialization, mining and exploration are the main causes of global environmental pollution. A large number of hazardous physical, chemical, biological agents cause water and air pollution which have been identified as potential threats to the environment and human health. Several technologies and processes for wastewater treatment and air pollutant removal have been developed to achieve the required quality level. Among the various technologies and processes available, "membrane technology" is one of the most attractive technologies and processes to apply due to its high removal capability at low cost. Membrane technology with processes such as: microfiltration (MF), ultrafiltration (UF), nanofiltration (NF), reverse osmosis (RO), electrodialysis (ED), distillation membrane (MD), pervaporation (PV), vapor permeation membrane, membrane contactor and membrane bioreactors (MBR) have been used for wastewater treatment and air pollutant capture and removal. In the last decades, membrane synthesis and membrane modification processes with new materials have been developed to improve membrane performance in wastewater treatment processes and removal of harmful pollutants from exhaust gases.</i>

### PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir, perkembangan urbanisasi dan industrialisasi sangat pesat dan memberikan dampak negatif

yang serius pada lingkungan, khususnya yaitu pencemaran air [1], [2] dan udara [3]–[5]. Hal ini dikarenakan sejumlah limbah air dan gas berbahaya atau yang mengandung polutan dibuang langsung ke lingkungan tanpa pengolahan. Pencemaran air dikarenakan badan

air terkontaminasi oleh air limbah yang mengandung bahan kimia, sampah atau mikroorganisme yang berupa bakteri dan parasit. Air limbah mengacu pada limbah cair yang berasal dari rumah tangga, rumah sakit, pertanian, pabrik atau industri [6], [7]. Adapun pencemaran udara diakibatkan oleh polusi udara karena adanya polutan yang ada di udara. Menurut laporan Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) bahwa enam besar polutan udara, yaitu polusi berupa partikel, ozon permukaan tanah, karbon monoksida, sulfur oksida, nitrogen oksida, dan timbal [5]. Sebagian besar polusi udara berasal dari penggunaan dan produksi energi melalui pembakaran bahan bakar fosil seperti, batu bara, gas atau gas alam, dari asap kendaraan, aktifitas pabrik, pembangkit listrik dan lainnya. Pada umumnya ada dua jenis polusi udara yaitu *smog* dan jelaga. *Smog* disebut sebagai ozon permukaan tanah yang terjadi ketika emisi dari pembakaran bahan bakar fosil bereaksi dengan sinar matahari. Adapun jelaga dikenal sebagai partikel kecil yang merupakan bahan kimia, tanah, asap, debu, atau allergen dalam bentuk gas atau padatan yang dibawa oleh udara.

Dampak pencemaran air terhadap kesehatan manusia adalah munculnya beberapa penyakit seperti diare [8], gastrointestinal [8], kolera, trachoma, schistosomiasis, dan cacangan [7]. Sedangkan dampak pencemaran udara mengakibatkan munculnya beberapa penyakit seperti: Penyakit Paru Obstruktif Kronis (PPOK), batuk, sesak napas, mengi, asma, penyakit pernapasan. Sedangkan pada jangka panjang dapat menyebabkan sakit asma kronis, insufisiensi paru, penyakit kardiovaskular, dan mortalitas kardiovaskular [5].

Pengolahan limbah air dan polutan gas sebelum dibuang ke lingkungan perlu dilakukan untuk melindungi kesehatan masyarakat dari berbagai ancaman penyakit, mencegah kerusakan lingkungan dan untuk menjaga pasokan air bersih yang sangat diperlukan untuk kegiatan sehari-hari. Air limbah sebelumnya diolah dengan proses tradisional dengan melakukan proses terintegrasi yaitu untuk menghilangkan padatan, bahan organik, dan nutrisi dari air limbah. Untuk air limbah dengan spesifikasi tertentu maka kombinasi proses fisik, kimia, dan biologis umumnya digunakan secara berurutan. Beberapa proses yang digunakan untuk mengolah air limbah antara lain: adsorpsi, fotodegradasi, koagulasi-flokulasi, pertukaran ionik, pengendapan, pemisahan biologis dan membran [9]. Polutan udara dapat dikurangi dengan menggunakan

aplikasi teknologi seperti insinerator, *trap or settling chamber* [10], presipitator elektrostatik, pemisah siklon, sistem reduksi katalitik selektif, filter kain, biofilter, scrubber dan membran [11], [12].

Teknologi membran merupakan teknologi untuk memisahkan campuran bahan, seperti air limbah, air asin, dan limbah gas yang mengandung polutan udara. Teknologi ini menawarkan keunggulan signifikan dibandingkan teknologi lainnya karena menawarkan pemisahan dengan efisiensi tinggi, peralatan sederhana, penghematan energi, dan operasi suhu normal, tanpa polusi sekunder. Teknologi membran juga dapat meminimalkan penggunaan bahan kimia perawatan, produksi residu, dan konsumsi energi.

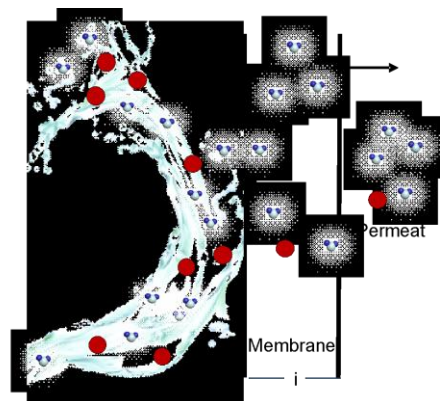
## METODE

Pada penulisan artikel ini, metode yang digunakan adalah dengan melakukan studi literatur.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Membran

Membran secara definitif dijelaskan sebagai suatu lapisan tipis yang berada di antara dua fasa yaitu fasa umpan dan fasa permeat yang memiliki fungsi sebagai pemisah yang selektif (Gambar 1). Fasa umpan atau konsentrat dimana komponen tertahan sedangkan fasa permeat dimana komponen yang lolos melalui membran. Pemisahan pada membran dicapai karena membran mempunyai sifat selektif dimana membran mampu melewatkan suatu komponen dan menahan komponen lain.



**Gambar 1** Proses pemisahan pada membran

Pemisahan yang terjadi pada membran disebabkan karena perbedaan koefisien difusi,

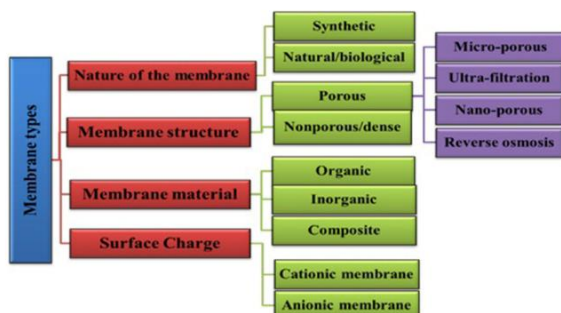
perbedaan potensial listrik, perbedaan tekanan, atau perbedaan konsentrasi. Proses membran yang menggunakan perbedaan tekanan sebagai gaya dorong (*driving force*) adalah mikrofiltrasi (MF), ultrafiltrasi (UF), nanofiltration (NF), reverse osmosis (RO), dan piezodialisis. Sedangkan proses membran yang menggunakan perbedaan konsentrasi adalah pemisahan gas, pervaporasi (PV), membran cair, dialisis, pemisahan berdasarkan perbedaan suhu yaitu membran distilasi (MD), termo-osmosis, dan proses pemisahan berdasarkan perbedaan potensial listrik adalah elektrodialisis (ED) [13]. Tabel 1 menyajikan proses membran yang menggunakan perbedaan tekanan sebagai *driving force*

**Tabel 1** Proses-proses membran menggunakan perbedaan tekanan sebagai *driving force* [14].

Membrane Process	* MWCO (kilo Dalton)	Retained Diameters (µm)	Pressure Required (bar)	Membrane Type	Average Permeability (L/m <sup>2</sup> h bar)	Solutes Retained
MF	100-500	10 <sup>-1</sup> -10	1-3	Porous, asymmetric or symmetric	500	Bacteria, fat, oil, grease, colloids, organics, micro-particles
UF	20-150	10 <sup>-3</sup> -1	2-5	Micro porous, asymmetric	150	Proteins, pigments, oils, sugar, organics, microplastics
NF	2-20	10 <sup>-3</sup> -10 <sup>-2</sup>	5-15	tight porous, asymmetric, thin film composite	10-20	Pigments, sulfates, divalent cations, divalent anions, lactose, sucrose, sodium chloride
RO	0.2-2	10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-3</sup>	15-75	Semi porous, asymmetric, thin film composite	5-10	All contaminants including monovalent ions

\* MWCO = Molecular weight cut off.

Membran diklasifikasikan berdasarkan material (membran alam dan sintetik), morfologi (membran asimetrik dan simetrik), kerapatan pori (membran berpori dan tidak berpori), fungsi (untuk proses reverse osmosis, ultrafiltrasi, mikrofiltrasi, pervaporasi, dialisa, dan elektrodialisa, struktur (membran homogeny dan heterogen), dan bentuknya (membran datar, spiral dan tubular) [13]. Kategori atau klasifikasi membran secara umum dijelaskan sesuai Gambar 2.



**Gambar 2** Diagram skematik yang mewakili berbagai kategori membran yang digunakan dalam industri pengolahan air limbah [14].

## Aplikasi Membran Pada Pengolahan Limbah Air

Pencemaran lingkungan diakibatkan oleh limbah air tidak hanya membahayakan kesehatan masyarakat namun juga dapat menyebabkan kerusakan lingkungan. Oleh karena itu diperlukan proses untuk mengolah limbah sehingga volume air limbah dapat diminimalkan. Saat ini, perkembangan teknologi membran telah sampai pada bidang lingkungan [14] yang memungkinkan melakukan pengolahan limbah dalam bentuk aplikasi langsung. Aplikasi membran pada pengolahan limbah cair sebagai sistem pengolahan limbah secara fisik yaitu sebagai unit filtrasi (non-biologis). Pada sistem ini, air limbah sebagai umpan akan dilewatkan pada membran, selanjutnya kontaminan akan terejeksi menjadi konsentrat sedangkan air akan lolos melewati membran dan keluar dalam bentuk permeat.

Proses membran yang umum digunakan untuk pengolahan limbah air, air payau dan air laut adalah MF, NF, UF dan RO [15]. Sedangkan untuk material membran, sebagian besar menggunakan material berbasis polimer namun material polisulfon dan polietersulfon, bersifat hidrofobik [16]. Membran polimer rentan penyumbatan pada pori pori membran yang mengakibatkan fouling [17] yang dapat menurunkan kinerja membran. Faktor-faktor yang menyebabkan fouling membran adalah adanya komponen anorganik atau mikroorganisme yang mengendap pada permukaan membran atau penyerapan zat terlarut yang menghalangi pori [18], yang menyebabkan fouling membran bersifat reversibel atau ireversibel [19]. Oleh karena itu, modifikasi membran polimer dilakukan untuk meningkatkan kinerjanya antara lain dengan pencangkakan, pencampuran dan penggabungan bahan nano seperti TiO<sub>2</sub> [20], ZnO [21], Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [22], tabung nano karbon [23], dan graphene oksida [24].

Membran teknologi telah diaplikasikan untuk pengolahan limbah air dari beberapa industri seperti :

### Pengolahan Air Limbah Industri

Membran diaplikasikan untuk menurunkan parameter yang umumnya menjadi ciri dari air limbah industri seperti COD, BOD, SS, amonium nitrogen (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N), logam berat, Ph, warna, kekeruhan, dan parameter biologis [25].

### Industri Makanan

Industri makanan yang memproduksi pati, jus buah, ikan, susu, ternak, sayuran, dan minuman. Limbah yang dihasilkan memiliki kandungan organik tinggi, selain itu ada senyawa lain yang muncul misalnya: fenol, karotenoid, pektin, laktosa, protein [26].

### Industri Pulp dan Kertas

Proses dalam industri pulp dan kertas menghasilkan sejumlah air limbah yang luar biasa. Membran filtrasi membran diaplikasikan untuk meningkatkan kinerja sistem pengolahan air limbah. Sistem MBR umumnya dapat mengekstraksi 82%–99% COD, dan kira-kira 100% SS pada waktu retensi hidrolis (HRT) periode 0,12–2,5 hari. Adapun proses dengan membran NF dapat menurunkan COD dan warna limbah sekitar 90% [27].

### Industri Tekstil

Pada industri pengolahan tekstil (TPI), air yang digunakan sangat intensif untuk pewarnaan, finishing agent, dan penghilangan kotoran. Kombinasi AnMBR dan metode aerobik MBR akan menjadi teknik yang digunakan dalam pengolahan air limbah TPI. Metode AnMBR digunakan untuk pemulihan energi sedangkan penggunaan MBR aerobik untuk menurunkan warna pada limbah [28]

### Industri Penyamakan Kulit

Sistem hibrida mineral MBR berbiaya rendah digunakan untuk mengolah limbah pada industri penyamakan untuk menghilangkan kromium. Kedepannya, AnMBR perlu diperimbangkan untuk pengolahan air limbah penyamakan kulit [29].

### Lindi TPA

Lindi mengandung bahan organik dan amonia nitrogen yang tinggi. Kandungan kimia lindi tergantung pada usia dan kematangan lokasi pembuangan. Komponen organik pada lindi yang berusia muda lebih tinggi dari lindi yang lama. Pengolahan lindi dilakukan dengan membran MBR, dan terapi RO [30]. Kombinasi MBR dan metode elektro-oksidasi dapat menurunkan COD dan NH + 4-N dan diikuti oleh detoksifikasi substansial [31].

### Air Limbah Farmasi

Limbah industri farmasi mengandung berbagai senyawa seperti sefalosporin. Membran MBR yang mengimplementasikan mikroorganisme khusus menjadi pesaing potensial dalam pengolahan limbah farmasi saat ini [32].

### Air Limbah Minyak Dan Petrokimia

Air limbah minyak dan petrokimia paling banyak mengandung sumber polutan berbahaya karena beracun. Air limbah ini bersumber dari proses seperti ekstraksi minyak mentah, penyulingan minyak, industri petrokimia, manufaktur logam, pelumas dan pendingin. Proses pengolahan yang dimodifikasi dari deemulsifikasi kimia menjadi proses UF disertai dengan Metode MBR digunakan untuk mengolah air limbah yang terkontaminasi minyak dengan kemampuan menyisihkan 90% COD dan full tar, grease, dan fenolik [33].

### Pengolahan air limbah perkotaan

Air limbah kota biasanya diolah untuk menghilangkan kontaminan yang tidak diinginkan dan biodegradasi bakteri dari bahan organik menjadi molekul yang lebih kecil (CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>, dll.) dengan adanya oksigen [25].

Tabel 2 menyajikan proses-proses membran yang diaplikasikan di berbagai industri untuk mengolah limbah air.

**Tabel 2** Aplikasi membran dalam mengolah limbah air [15].

Polutan	Membran	Kinerja	Ref.
Air berminyak	MF	Rijeksi aditif organik 90.2%	[34]
Air limbah pabrik zaitun	RO	Rijeksi COD 97.5–99.1% dan fluks permeate 24–32 L h <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>	[35]
Air limbah domestik	MF	Rijeksi total nitrogen dan phosphorus >97%	[36]
Nitrogen and phosphorus pada microalga	FO dan MF	Rijeksi untuk nitrogen 86–99% dan phosphorus 100%	[37]
Chlorophenol	RO	Peningkatan kinerja	[38]
Air limbah perkotaan dan industri	Membran dengan molecular weight cut-	Membran menunjukkan resistensi penuh terhadap fouling irreversibel dan	[39]



off (MWCO)	rijeksi pewarna yang tinggi
---------------	--------------------------------

### ***Aplikasi Membran Pada Penanganan Polusi Udara***

Telah dilaporkan bahwa membran memiliki potensi kinerja yang luar biasa dalam pemurnian. Aktivitas manusia yang telah mencemari atmosfer dan lingkungan memberikan tanggung jawab pada manusia untuk membersihkan bumi dari polutan dan menghindari generasi polutan polutan ini. Beberapa teknologi telah digunakan untuk menghilangkan partikulat di udara seperti chamber, siklon, scrubber, filter fisik dan metode presipitasi elektrostatik [11]. Kombinasi dari teknologi ini telah dikembangkan melalui filter udara *wet-electrostatic scrubbing* (WES) untuk meningkatkan efisiensi penghilangan kontaminan berupa partikel halus serta partikel ultrahalus ( $<0,2 \mu\text{m}$ ) [11].

Meskipun teknologi di atas telah diusulkan dengan keunggulannya masing-masing, teknologi filtrasi fisik adalah pilihan paling banyak untuk menghilangkan polutan udara karena sistem operasinya yang sederhana dan kebutuhan energi yang lebih rendah. Spektrum filter yang luas telah diproduksi secara komersial dengan berbagai pilihan mekanisme filtrasi dan karakteristik penurunan tekanan. Teknologi berbasis membran telah disepakati sebagai teknologi hijau yang memiliki potensi pembersihan dan pemurnian. Teknologi membran terus berkembang dengan munculnya varietas membran yang lebih baik seiring dengan perjalanan waktu. Polutan baik dalam fase padat, cair, dan gas dapat dipisahkan oleh membran [40].

Polutan partikulat dari berbagai ukuran dapat ditangkap oleh membran seperti  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ , kelembaban, sedangkan *volatile organic compounds* (VOCs) juga dapat dipisahkan dari udara dengan penerapan teknologi berbasis membran [40].

*Teknologi Membran dalam Pengendalian Sox-  
Nox.*

#### ***1) Membran Selective Catalytic Reduction***

Sistem reduksi katalitik selektif berbasis membran telah dikembangkan oleh para peneliti untuk mengurangi polusi  $\text{SO}_x$  dan  $\text{NO}_x$  di udara. Pada proses ini, dengan menggunakan katalis selektif,  $\text{NO}_x$  pertama-tama diubah menjadi  $\text{N}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$  dengan adanya  $\text{NH}_3$  sebagai agen pereduksi.  $\text{SO}_2$  diubah secara katalitik menjadi

$\text{SO}_3$ . Akhirnya melalui serangkaian reaksi, hasil produksi berupa amonium sulfat selanjutnya dipisahkan oleh membran selektif [40].

Teknologi reduksi katalitik selektif berbasis membran telah dikembangkan dengan baik untuk mengendalikan  $\text{SO}_x$  dan  $\text{NO}_x$  dalam produk pembakaran yang dihasilkan dari mesin, turbin, dan kendaraan berbahan bakar minyak berat. Membran pemisahan udara juga telah dikembangkan dan menghasilkan udara yang diperkaya nitrogen dan oksigen yang sesuai untuk digunakan dalam proses pembakaran bahan bakar. Sistem berbasis membran dengan kemampuan mereduksi emisi  $\text{NO}_x$  hingga 50% memiliki potensi yang menjanjikan dalam pengurangan polutan gas ini.

#### ***2) Membran Hollow Fiber Dalam Penghilangan $\text{SO}_2$ dari Gas Buang***

Gas buang dari pembangkit listrik dari batu bara mengandung komponen utama  $\text{CO}_2$  juga mengandung  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , dan Ar. Membran hollow fiber yang dilapisi dengan larutan hidrofilik telah dikembangkan untuk memisahkan  $\text{SO}_2$  dan  $\text{CO}_2$ . Material membran hollow fiber adalah polieter sulfon (PES) 18%, N-metil pyrrolidone (NMP) 77%, dan lithium chloride ( $\text{LiCl}$ ) 5%, dimana PES adalah bahan membran, NMP adalah pelarut, dan  $\text{LiCl}$  adalah aditif [41]. Selain itu, aditif lain yaitu EtOH (12,5%) digunakan dalam pembuatan membran PEI (25%) dengan pelarutnya adalah NMP (62,5%).

#### ***3) Teknologi Membran untuk Kontrol Volatile Organic Compounds (VOCs)***

Senyawa organik volatil (VOC) merupakan senyawa kimia yang dapat menguap pada suhu lingkungan atau ruangan. Paparan VOC dapat menyebabkan sakit kepala, mual, iritasi mata, tenggorokan dan bahkan dapat merusak ginjal, paru-paru, dan sistem saraf pusat. Yang termasuk dalam VOC adalah diklorometana, kloroform, bromometana, aseton, benzena, toluena, xilena, klorobenzena, 1,1,1-trikloroetana, 1,1,2-trikloroetana, dan tetrakloroetilena. Dua proses membran yang telah diaplikasikan untuk kontrol VOCs adalah pervaporasi (PV) dan membran distilasi (MD).

#### ***Teknologi membran untuk menangkap dan menyerap $\text{CO}_2$***

Diperkirakan pada abad terakhir konsentrasi CO<sub>2</sub> di atmosfer meningkat dari 275 hingga 387 ppm. Sedangkan dalam skenario bisnis, emisi CO<sub>2</sub> diproyeksikan meningkat, dari 9 Gt/tahun pada tahun 2000 menjadi 32 Gt/tahun pada tahun 2050. Adapun sumber CO<sub>2</sub> di udara adalah dari tanaman industri, pembangkit listrik termal berbasis bahan bakar fosil, pabrik, industri besi dan baja, industri semen, sektor transportasi menggunakan bahan bakar fosil atau biofuel, unit insinerasi untuk limbah padat, pembakaran gas metana batu bara yang tidak terkontrol, kebakaran hutan yang tidak terkontrol. CO<sub>2</sub> juga telah menjadi gas rumah kaca paling terkenal yang menyebabkan pemanasan global sehingga dianggap sebagai penyebab utama perubahan iklim yang disebabkan oleh manusia.

Teknologi konvensional berbasis penyerapan amina yang intensif energi dan mahal digunakan untuk menangkap CO<sub>2</sub> dari gas buang. Saat ini membran telah dikembangkan untuk menangkap CO<sub>2</sub> yang hemat energi dan berbiaya rendah [40].

Dalam sintesis membran untuk pemisahan gas, keempat jenis material utama yang digunakan yaitu, logam, zeolit, keramik, dan bahan polimer. Bahan polimer itu diantaranya cellulose acetate (CA), polimida (PI), bahan polisulfon, dan polietersulfon. Polimer lain yang juga telah digunakan secara luas adalah polimer karet seperti polietilen polimer berbasis oksida, polimer berbasis polivinil amina (PVAm), polidimetilsiloksan, membran berbasis alkohol polivinil (PVA) [11],[40].

Dalam bidang penyaringan udara, membran seperti membran mikrofiltrasi (MF) dan ultrafiltrasi (UF), yang memiliki ukuran pori antara 10 µm sampai dengan 0,01 µm [42] digunakan untuk menghilangkan polutan mikron (aerosol) dan sub-mikron atau ultrahalus [43].

Membran permeasi uap umumnya digunakan untuk menghilangkan senyawa organik uap, seperti hidrokarbon turunan halogen dan senyawa aromatik dari limbah gas industri. Beberapa peneliti menggunakan membran permeasi uap untuk menghilangkan VOC dari udara atau aliran udara limbah [44]

Sedangkan membran kontakor banyak digunakan untuk menangkap karbon dari berbagai sumber emisi dengan mekanisme absorpsi, baik absorpsi fisik maupun kimia. Membran kontakor membran telah diterapkan untuk menghilangkan gas asam dari gas buang, penyerapan NO<sub>x</sub> dari

pembakaran bahan bakar dan senyawa organik yang mudah menguap (VOC) [11].

Dalam pengolahan biologis, biofilter (BF) dan *biotrickling filter* (BTF) telah digunakan untuk menghilangkan gas beracun dan VOC, namun proses ini memiliki kurang baik untuk mengolah senyawa volatil yang larut dalam air. Membran bioreaktor (MBR) menjadi alternatif dari filter biologis konvensional karena menggabungkan proses ekstraksi polutan gas yang menyebar melalui pori membran selektif, dan biodegradasi polutan oleh mikroba yang menempel di sisi lain membran. Pada membran MBR, membran bertindak sebagai interfase antara polutan gas dan mikroba. Unit MBR tersedia dalam konfigurasi membran lembaran datar, tubular, dan serat berongga, yang dapat dengan mudah ditingkatkan skalanya. Membran MBR telah diaplikasikan untuk sekuestrasi CO<sub>2</sub> - NO<sub>x</sub>, baik dalam kondisi denitrifikasi (anoksik) maupun nitrifikasi (aerobik) [11].

## SIMPULAN

Dengan perkembangan industrialisasi dan urbanisasi selain memberikan kesejahteraan dan manfaat bagi manusia namun juga menghasilkan dampak buruk pada lingkungan yang mengancam kesehatan manusia. Hal ini disebabkan sejumlah besar air limbah dan gas buangan dari industri dan rumah tangga dibuang ke lingkungan alam. Berbagai macam polutan berbahaya dari limbah ini menyebabkan masalah lingkungan yang serius. Oleh karena itu, untuk melindungi lingkungan dimana akan berdampak pada kesehatan manusia maka perlu dilakukan penjernihan dan pengolahan air limbah dan gas buang. Teknologi membran sebagai metode pemisahan telah dikenal sebagai teknologi lingkungan yang efisiensi dan presisi. Teknologi membran secara bertahap merevolusi pengolahan air, air limbah dan gas buang yang mengandung polutan berbahaya di udara. Perkembangan teknologi membran semakin pesat dengan beberapa penelitian yang mencoba memodifikasi membran untuk meningkatkan kinerja membran, antara lain modifikasi pada bahan berserat, penyesuaian kondisi operasi selama proses dan memasukkan nanopartikel oksida logam (seperti Ag, TiO<sub>2</sub>, dan ZnO) ke dalam larutan polimer. Selain itu, peningkatan fabrikasi membran dengan mengurangi penggunaan bahan kimia berbahaya selama proses pembuatan juga dikembangkan dengan menggunakan pelarut ringan dan tidak beracun

serta biopolimer sebagai bahan bakunya. Namun, teknologi membran masih memiliki tantangan, antara lain masalah fouling dan permintaan energi yang tinggi dalam dorongan tekanan non-ekuilibrium dan kestabilan struktur membran. Beberapa tantangan ini mungkin dapat diatasi dengan proses *pre-treatment*, integrasi membran teknologi dengan *waste heat* industri, dan mengeksplorasi material- material baru yang sesuai dengan spesifikasi proses pemisahan.

## REFERENSI

- [1] P. Rajasulochana and V. Preethy, "Comparison on efficiency of various techniques in treatment of waste and sewage water – A comprehensive review," *Resour. Technol.*, vol. 2, no. 4, pp. 175–184, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.refffit.2016.09.004>.
- [2] D. Dutta, S. Arya, and S. Kumar, "Industrial wastewater treatment: Current trends, bottlenecks, and best practices," *Chemosphere*, vol. 285, p. 131245, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131245>.
- [3] X. Zhang et al., "Linking urbanization and air quality together: A review and a perspective on the future sustainable urban development," *J. Clean. Prod.*, vol. 346, p. 130988, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130988>.
- [4] L. Zhang, S. You, M. Zhang, and S. Zhang, "The effects of urbanization on air pollution based on a spatial perspective: Evidence from," no. November, 2022, doi: [10.3389/fenvs.2022.1058009](https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1058009).
- [5] I. Manisalidis, E. Stavropoulou, and A. Stavropoulos, "Environmental and Health Impacts of Air Pollution : A Review," vol. 8, no. February, pp. 1–13, 2020, doi: [10.3389/fpubh.2020.00014](https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014).
- [6] T. Deblonde, C. Cossu-Leguille, and P. Hartemann, "Emerging pollutants in wastewater: A review of the literature," *Int. J. Hyg. Environ. Health*, vol. 214, no. 6, pp. 442–448, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2011.08.002>.
- [7] L. Lin, H. Yang, and X. Xu, "Effects of Water Pollution on Human Health and Disease Heterogeneity : A Review," vol. 10, no. June, 2022, doi: [10.3389/fenvs.2022.880246](https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.880246).
- [8] M. M. Yassin, S. S. A. Amr, and H. M. Al-Najar, "Assessment of microbiological water quality and its relation to human health in Gaza Governorate, Gaza Strip," *Public Health*, vol. 120, no. 12, pp. 1177–1187, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2006.07.026>.
- [9] A. Zaher and N. Shehata, "Recent advances and challenges in management of urea wastewater: A mini review," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1046, no. 1, p. 12021, 2021, doi: [10.1088/1757-899X/1046/1/012021](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1046/1/012021).
- [10] G. A. Feather, B. T. Chen, G. A. Feather, and B. T. Chen, "Design and Use of a Settling Chamber for Sampler Evaluation Under Calm-Air Conditions Design and Use of a Settling Chamber for Sampler Evaluation Under Calm-Air Conditions," vol. 6826, 2010, doi: [10.1080/02786820300946](https://doi.org/10.1080/02786820300946).
- [11] A. A. I. A. S. Komaladewi, P. T. P. Aryanti, I. D. G. A. Subagia, and I. G. Wenten, "Membrane technology in air pollution control: prospect and challenge," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1217, no. 1, p. 12046, 2019, doi: [10.1088/1742-6596/1217/1/012046](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1217/1/012046).
- [12] S. S. Kalender, "Air Pollution Prevention Technologies BT - Handbook of Environmental Materials Management," C. M. Hussain, Ed. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 2871–2888. doi: [10.1007/978-3-319-73645-7\\_109](https://doi.org/10.1007/978-3-319-73645-7_109).
- [13] Mulder, M., *Basic Principles of Membrane Technology*. 2nd ed. 1996, Netherlands: Kluwer Academic Publisher.
- [14] E. O. E. and S. Rathilal, "Membrane Technologies in Wastewater Treatment :," *Membranes (Basel)*, vol. 10, no. 5, p. 89, 2020, [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/membranes1005089>.
- [15] A. Nqombolo, Mpupa, R. M. Moutloali, and

- P. N. Nomngongo, "Wastewater Treatment Using Membrane Technology," *Wastewater and Water Quality*. InTech, Aug. 29, 2018. doi: 10.5772/intechopen.76624
- [16] T. Marino, E. Blasi, S. Tornaghi, E. Di Nicolò, and A. Figoli, "Polyethersulfone membranes prepared with Rhodiasolv®Polarclean as water soluble green solvent," *J. Memb. Sci.*, vol. 549, pp. 192–204, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.12.007>.
- [17] F. Ahmed, B. S. Lalia, V. Kochkodan, N. Hilal, R. Hashaikeh, "Electrically conductive polymeric membranes for fouling prevention and detection: A review." *Desalination*, 391, 1-15, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.01.030>
- [18] S. Zinadini S, F. Gholami, "Preparation and characterization of high flux PES nanofiltration membrane using hydrophilic nanoparticles by phase inversion method for application in advanced wastewater treatment," *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*. Vol.3, no 1, p.232-235, 2016.
- [19] Q. Ding, H. Yamamura, N. Murata, N. Aoki, H. Yonekawa, A. Hafuka, Y. Watanabe, "Characteristics of meso-particles formed in coagulation process causing irreversible membrane fouling in the coagulation-microfiltration water treatment," *Water Research*, vol.101, p. 127-136, 2016.
- [20] E. Bet-Moushoul, Y. Mansourpanah, K. Farhadi, M. Tabatabaei, "TiO<sub>2</sub> nanocomposite based polymeric membranes: A review on performance improvement for various applications in chemical engineering processes," *Chemical Engineering Journal*, vol. 283, p. 29-46, 2016.
- [21] Y. H. Tan, P. S. Goh PS, A. F. Ismail, B. C. Ng, G. S. Lai, "Decolourization of aerobically treated palm oil mill effluent (AT-POME) using polyvinylidene fluoride (PVDF) ultrafiltration membrane incorporated with coupled zinc-iron oxide nanoparticles," *Chemical Engineering Journal*, vol. 308, p. 359-369, 2017.
- [22] J. Garcia-Ivars, M. I. Iborra-Clar, M. I. Alcaina-Miranda, J. A. Mendoza-Roca, L. Pastor-Alcañiz, "Surface photomodification of flat-sheet PES membranes with improved antifouling properties by varying UV irradiation time and additive solution pH," *Chemical Engineering Journal*, vol. 283, p. 231-242, 2016.
- [23] L. D. Tijing LD, Y. C. Woo, W. G. Shim, T. He, J. S. Choi, S. H. Kim, H. K. Shon, "Superhydrophobic nanofiber membrane containing carbon nanotubes for high-performance direct contact membrane distillation," *Journal of Membrane Science*, vol. 502, p. 158-170, 2016.
- [24] R. P. Pandey, G. Shukla, M. Manohar, V. K. Shahi, "Graphene oxide based nanohybrid proton exchange membranes for fuel cell applications: An overview," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 240, p.15-30, 2016
- [25] J. Jyoti, D. Alka, and S. J. Kumar, "Application of Membrane-Bio-Reactor in Waste-Water Treatment: A Review," vol. 3, no. 2, pp. 115–122, 2013.
- [26] J. Radjenovi, "Membrane Bioreactor (MBR) as an Advanced Wastewater Treatment Technology," vol. 5, no. November 2007, pp. 37–101, 2008.
- [27] S. P. Bera and M. Godhaniya, "Emerging and advanced membrane technology for wastewater treatment: A Emerging and advanced membrane technology for wastewater treatment: A review," no. September, 2021, doi: 10.1002/jobm.202100259.
- [28] M. C. Collivignarelli, A. Abbà, M. Carnevale Miino, and S. Damiani, "Treatments for color removal from wastewater: State of the art," *J. Environ. Manage.*, vol. 236, pp. 727–745, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.094>.
- [29] A. Ahmad, S. H. Mohd-setapar, S. Chuong, and A. Khatoun, "RSC Advances Recent advances in new generation dye removal technologies: novel search for approaches to reprocess wastewater," pp. 30801–30818, 2015, doi: 10.1039/c4ra16959j.



- [30] Koc-Jurczyk, Justyna. "Removal of Refractory Pollutants from Landfill Leachate Using Two-Phase System", *Water Environment Research*, vol. 86, no. 1, 2014, pp. 74–80. JSTOR, <http://www.jstor.org/stable/24584970>. Accessed 5 Aug. 2023
- [31] A. Babuponnusami and K. Muthukumar, "A review on Fenton and improvements to the Fenton process for wastewater treatment," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 557–572, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.10.011>.
- [32] T. Peters, "Membrane Technology for Water Treatment," no. 8, pp. 1233–1240, 2010, doi: [10.1002/ceat.201000139](https://doi.org/10.1002/ceat.201000139).
- [33] M. Takht Ravanchi, T. Kaghazchi, and A. Kargari, "Application of membrane separation processes in petrochemical industry: a review," *Desalination*, vol. 235, no. 1, pp. 199–244, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.10.042>.
- [34] Q. Chang et al., "Application of ceramic microfiltration membrane modified by nano-TiO<sub>2</sub> coating in separation of a stable oil-in-water emulsion," *J. Memb. Sci.*, vol. 456, pp. 128–133, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.01.029>.
- [35] Ochando Pulido, Javier Miguel, et al. "Analysis of the fouling build-up of a spiral wound reverse osmosis membrane in the treatment of two-phase olive mill wastewater," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 47, p. 403-408, 2016
- [36] K. Zuo et al., "Coupling microfiltration membrane with biocathode microbial desalination cell enhances advanced purification and long-term stability for treatment of domestic wastewater," *J. Memb. Sci.*, vol. 547, pp. 34–42, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.10.034>.
- [37] P. Praveen, J. Y. P. Heng, and K.-C. Loh, "Tertiary wastewater treatment in membrane photobioreactor using microalgae: Comparison of forward osmosis & microfiltration," *Bioresour. Technol.*, vol. 222, pp. 448–457, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.124>.
- [38] M. A. Al-Obaidi, J.-P. Li, C. Kara-Zaitri, and I. M. Mujtaba, "Optimisation of reverse osmosis based wastewater treatment system for the removal of chlorophenol using genetic algorithms," *Chem. Eng. J.*, vol. 316, pp. 91–100, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.12.096>.
- [39] P. Bengani-Lutz, R. D. Zaf, P. Z. Culfaz-Emecen, and A. Asatekin, "Extremely fouling resistant zwitterionic copolymer membranes with ~ 1nm pore size for treating municipal, oily and textile wastewater streams," *J. Memb. Sci.*, vol. 543, pp. 184–194, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.08.058>.
- [40] Parimal Pal., *Membrane-Based Technologies for Environmental Pollution Control*. 2020, Butterworth-Heinemann
- [41] K. Kim, J. Kim, and H. Lee, "Hollow fiber membrane process for SO<sub>2</sub> removal from flue gas," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 90, no. 3, pp. 423–431, Mar. 2015, doi: <https://doi.org/10.1002/jctb.4310>.
- [42] F. E. Ahmed, B. S. Lalia, and R. Hashaikeh, "A review on electrospinning for membrane fabrication: Challenges and applications," *Desalination*, vol. 356, pp. 15–30, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.09.033>
- [43] F. I. Khan and A. Kr. Ghoshal, "Removal of Volatile Organic Compounds from polluted air," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 13, no. 6, pp. 527–545, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(00\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(00)00007-3)
- [44] Rebollar-Perez G, Carretier E, Lesage N, Moulin P, "Volatile Organic Compound (VOC) Removal by Vapor Permeation at Low VOC Concentrations: Laboratory Scale Results and Modeling for Scale U," *Membranes*, vol.1(1), p. 80-90, 2011 <https://doi.org/10.3390/membranes1010080>