

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Karakteristik Air Gambut

2.1.1 Karakteristik Air Gambut Secara Umum

Umumnya, karakteristik air gambut secara kualitatif umumnya, yaitu:

1. Kadar alkalinitas rendah
2. Air keruh dan berwarna merah kecoklatan
3. Kandungan garam mineral relatif tinggi
4. Tingkat keasaman tinggi (pH rendah)
5. Konsentrasi total karbon organik (TOC) tinggi akibat pelapukan bahan organik yaitu asam humik dan fulfik.

Warna coklat air gambut berasal dari zat-zat humus yang terdapat pada tanah dan gambut, merupakan zat polimer yang mengandung persenyawaan asam karboksil dan gugusan fenol. Sifat asam air gambut disebabkan oleh adanya tanah lempung mengandung sulfida, yang kemudian teroksidasi menjadi asam sulfat.

2.1.2. Karakteristik Air Gambut Secara Kuantitatif

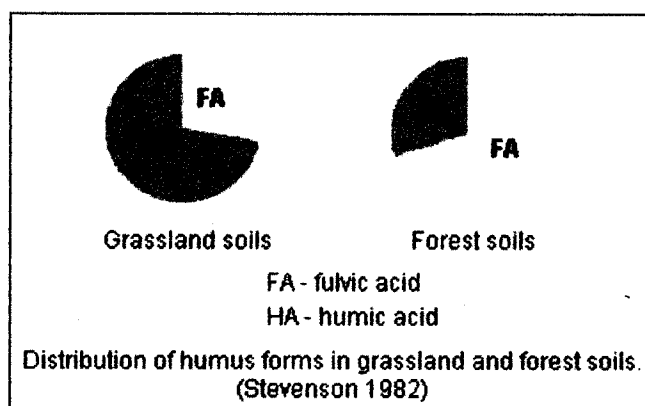
Komposisi air gambut berbeda-beda antara daerah satu daerah dengan daerah lain bergantung pada struktur tanah, ketebalan humus, dan umur humusnya. Sebagai contoh, disajikan karakteristik air gambut di Riau dan Jambi.

Tabel 2.1 Karakteristik Air Gambut Riau dan Jambi [6]

No	Parameter	Satuan	Air Gambut Riau	Air Gambut Jambi
1	PH	-	6.6	4.7-5
2	Warna	PtCo	225	70-85
3	Kekeruhan	NTU	6.21	32-50
4	Kesadahan	mg/L	12,9	15-17
5	Besi (Fe)	mg/L	1.04	1.2-1.29
6	Sulfat (SO ₄)	mg/L	0	9.5-9.8
7	Nilai KmnO ₄	mg/L	162.7	76-77

2.2. Karakteristik Humus dalam Air Gambut

Distribusi humus berbeda-beda tergantung pada kondisi tanah (lihat Gambar 2.1). Humus merupakan komponen penting dalam air gambut yang berupa molekul bioorganik. Humus sangat kompleks, terdiri dari berbagai kelas molekul dan mengandung kurang lebih 50 % karbon organik. Humus dibagi menjadi 3 bagian, yaitu *humic acid*, *humins*, dan *fulvic acid*. Perbedaan ketiga bagian ini terletak pada kelarutannya dalam air. *Fulvic acid* larut pada semua pH, *humic acid* larut pada pH lebih besar dari 2, sedangkan *humins* tidak larut dalam air.



Gambar 2.1 Komposisi humus pada *grassland* / lahan gambut [13]

2.2.1. Karakteristik Secara Kualitatif

Humic acid berukuran lebih besar dan mengandung lebih sedikit oksigen, lebih *fluorecent*, mengandung lebih banyak karbon dan derajat polimerisasinya lebih tinggi. *Fulvic acid* mengandung lebih sedikit polimer dan karbon, namun mengandung lebih banyak ikatan hidrogen dan oksigen. Jenis tanah sangat mempengaruhi komposisi *humic acid* dan *fulvic acid*. Warna *humic acid* antara coklat tua sampai hitam, warna *fulvic acid* antara kuning sampai kuning kecoklatan, sedangkan warna *humins* hitam

Secara kualitatif, perbandingan *fulvic acid* dan *humic acid* adalah sebagai berikut:

a. *Fulvic Acid*

1. reaktif
2. memiliki berat molekul rendah
3. biopolimer alifatik dan aromatik
4. struktur molekul acak
5. warnanya dari kuning muda sampai kuning kecoklatan
6. *Fulvic acid* cenderung untuk tidak teragregasi dan sifatnya tidak begitu menyerupai deterjen.

b. *Humic Acid*

1. sangat reaktif
2. memiliki berat molekul tinggi
3. biopolimer dan aromatik polifenolik
4. struktur molekul acak
5. warnanya coklat tua sampai hitam
6. Memiliki karakter seperti deterjen, terutama pada konsentrasi 5-10 ppm. Dalam air, *humic acid* akan membentuk "*pseudomicelles*" yang terdiri dari inti yang bersifat nonpolar dan permukaan yang bersifat polar dan larut dalam air.
7. Mampu melarutkan materi hidrofobik
8. Agregasi (pengelompokan) *humic acid* dipercepat oleh adanya ion positif dalam larutan, terutama ion multivalen dan kenaikan temperatur. Ion monovalen seperti Na^+ dan H^+ dapat mempercepat agregasi *humic acid* namun tidak secepat ion multivalen.
9. Pada pH yang rendah dan temperatur yang tinggi, sifat deterjen dari *humic acid* akan semakin terlihat.
10. Radiasi UV dapat membuat ukuran molekul *humic acid* lebih kecil dan tidak dapat membentuk *pseudomicelles*.
11. *Humic acid* dapat bereaksi dengan nutrien, logam *toxic*, radionuklida, dan halogen. Reaksi antara *humic acid* dan halogen akan menghasilkan senyawa karsinogenik seperti kloroform dan bromoform.
12. *Humic acid* mempunyai radikal bebas yang stabil yang dapat bereaksi dengan senyawa inorganik seperti Hg, Cr dan Pu.
13. *Humic acid* juga mampu untuk bereaksi dengan senyawa organik *anthropogenic* seperti hidrokarbon polycyclic aromatic.

Humic acid merupakan makromolekul aromatik yang kompleks dengan asam amino, gula amino, peptida, komponen alifatik. *Humic acid* juga mengandung ikatan OH, struktur quinone, nitrogen, ikatan oksigen dan kelompok COOH yang bervariasi dalam rantai aromatik. Sedangkan, *fulvic acid* mengandung aromatik, struktur alifatik, ikatan oksigen dan gugus fungsional.

2.2.2. Karakteristik Secara Kuantitatif

Ukuran makromolekul *humic acid* dan *fulvic acid* berkisar antara 60-500 A. Komposisi *humic acid* dan *fulvic acid* dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Komposisi *humic acid* dan *fulvic acid* [13]

Senyawa	% dry ash-free basis			
	C	H	O	N
<i>Fulvic acid</i>	44-49	3,5-5,0	44-49	2,0-4,0
<i>Humic acid</i>	52-62	3,0-5,5	30-33	3,5-5,0

2.3. Standar Kualitas Air

Pemerintah Republik Indonesia telah mengeluarkan Peraturan Pemerintah Nomor 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air dan Pengendalian Pencemaran Air. Pasal 8 menyatakan klasifikasi mutu air ditetapkan menjadi 4 (empat) kelas, yaitu :

- Kelas satu, air yang peruntukannya dapat digunakan untuk air baku air minum, dan atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut;
- Kelas dua, air yang peruntukannya dapat digunakan untuk prasarana/ sarana rekreasi air, pembudidayaan air tawar, peternakan, air untuk mengairi pertanian, dan atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut;
- Kelas tiga, air yang peruntukannya dapat digunakan untuk pembudidayaan air tawar, peternakan, air untuk mengairi pertanian, dan atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut;
- Kelas empat, air yang peruntukannya dapat digunakan untuk mengairi pertanian, dan atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut;

Kriteria Mutu air Berdasarkan PP No. 82 Tahun 2001 ditampilkan pada tabel 2.3 berikut ini.

Tabel 2.3. Kriteria Mutu Air Berdasarkan PP 82 Tahun 2001

PARAMETER	SATUAN	KELAS			
		I	II	III	IV
FISIKA					
Temperatur	°C	deviasi 3	deviasi 3	deviasi 3	deviasi 5
Residu terlarut	mg/L	1000	1000	1000	1000
Residu tersuspensi	mg/L	50	50	400	400
KIMIA ANORGANIK					
pH		6-9	6-9	6-9	5-9
BOD	mg/L	2	3	6	12
COD	mg/L	10	25	50	100
DO	mg/L	6	4	3	0
P	mg/L	0.2	0.2	1	5
NO ₃ sebagai N	mg/L	10	10	20	20
NH ₃ -N	mg/L	0.5	-	-	-
Arsen (As)	mg/L	0.05	1	1	1
Kobalt (Co)	mg/L	0.2	0.2	0.2	0.2
Barium (Ba)	mg/L	1	-	-	-
Selenium (Se)	mg/L	0.01	0.05	0.05	0.05
Kadmium (Cd)	mg/L	0.01	0.01	0.01	0.01
Khrom (IV)	mg/L	0.05	0.05	0.05	1
Tembaga (Cu)	mg/L	0.02	0.02	0.02	0.2
Besi (Fe)	mg/L	0.3	-	-	-
Timbal (Pb)	mg/L	0.03	0.03	0.03	1
Mangan (Mn)	mg/L	0.1	-	-	-
Raksa (Hg)	mg/L	0.001	0.002	0.02	0.0005
Seng (Zn)	mg/L	0.05	0.05	0.05	2
Klorida (Cl)	mg/L	600	-	-	-
Sianida (CN)	mg/L	0.02	0.02	0.02	-
Fluorida (F)	mg/L	0.5	1.5	1.5	-
Nitrit (NO ₂ -N)	mg/L	0.06	0.06	0.06	-
Sulfat (SO ₄)	mg/L	400	-	-	-
Khlorida bebas	mg/L	0.03	0.03	0.03	-
Belarang sebagai H ₂ S	mg/L	0.002	0.002	0.002	-
MIKROBIOLOGI					
-Fecal coliform	Jml/100ml	100	1000	2000	2000
-Total coliform	Jml/100ml	1000	5000	10000	10000
KIMIA ORGANIK					
Minyak dan lemak	Ug/L	1000	1000	1000	-
Detergen sbg MBAS	Ug/L	200	200	200	-

2.4. Pengolahan Air Gambut

2.4.1. Teknologi Konvensional

Teknologi konvensional yang umum digunakan dalam pengolahan air gambut meliputi koagulasi, flokulasi, sedimentasi, dan filtrasi multi media. Upaya penelitian secara konvensional antara lain ditampilkan di bawah ini.

A. Puslitbang Pemukiman pada tahun 1982

Penelitian menggunakan lempung *halotrochite* untuk menyerap dan mengendapkan warna air gambut di Kecamatan Gambut Propinsi Kalimantan Selatan. Lempung sebanyak 0,5 kg diperlukan untuk mengolah air gambut sebanyak 200 L (2500 mg/L) [6]. Proses pengolahan :

- a. Lempung dan air gambut diaduk selama 5 – 10 menit, dibiarkan mengendap selama 45–60 menit sehingga air gambut yang berwarna coklat menjadi tidak berwarna, karena zat organik dan zat warna terserap dan terkoagulasi serta mengendap bersama lempung.
- b. Proses penyaringan

Hasil penelitian ini dapat diterapkan pada skala kecil atau skala rumah tangga dengan teknologi sederhana, namun belum diterapkan dalam bentuk instalasi pengolahan dengan proses kontinyu.

Kelemahan proses ini, yaitu:

- a. Belum tersedianya bahan galian lempung *halothrocite* di pasaran.
- b. Sumber bahan galiannya tidak selalu berada pada daerah gambut.

B. Penelitian yang Dilakukan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Pengairan Tahun 1994 untuk Air Gambut di Kalimantan

Percobaan di laboratorium menggunakan alat Jar Test. Alat ini dapat mengolah air dengan proses pencampuran air dan bahan kimia koagulan dan penetral keasaman air [6].

Proses pengolahan:

- a. Penetralan awal dengan kapur.
- b. Koagulasi dengan alum

Pengadukan alum dan air baku dilakukan dengan putaran cepat 110-150 rpm selama 5 menit, dan pengadukan lambat 60-70 rpm selama 30 menit.

- c. Karbon aktif dicampurkan dengan bahan koagulan tersebut apabila diperlukan, yaitu untuk air gambut yang berwarna sangat coklat.

- d. Netralisasi akhir dengan kapur
- e. Penyaringan

Kelemahan proses ini, yaitu:

- a. Hasil penelitian menunjukkan bahwa air minum yang diperoleh memiliki kualitas yang memenuhi baku mutu air minum, kecuali kadar zat organik (nilai KMnO_4) yang pada umumnya masih tinggi.
- b. Terjadi peningkatan sedikit kadar Zn di dalam air yang telah diolah disebabkan bahan alum teknis mengandung Zn 0,26 mg/L dalam larutan baku alum 5 %.

2.4.2. Kelebihan dan Kelemahan Sistem Konvensional Secara Umum

Kelebihan dari pengolahan secara konvensional, antara lain:

- 1. Biaya cukup rendah dibandingkan dengan harga air bersih dari PDAM sehingga dapat terjangkau oleh masyarakat sekitar.
- 2. Instalasi dapat dibangun untuk skala kecil (pedesaan) maupun pada skala besar (perkotaan).
- 3. Air yang dihasilkan sudah memenuhi standar air minum sesuai dengan PP No. 82 tahun 2001.
- 4. Sederhana dan mudah dioperasikan.

Kelemahan dari pengolahan secara konvensional, antara lain:

- 1. Banyaknya bahan kimia yang digunakan sebanding dengan kadar warna, zat organik dan pH.
- 2. Proses ini hanya dapat dilakukan pada air gambut yang dibawah 200 PtCo unit, zat organik (nilai KMnO_4) dibawah 80 mg/L karena jika melebihi kadar tersebut maka pengolahan tidak ekonomis karena banyak memerlukan bahan kimia.
- 3. Kadar zat organik yang dihasilkan setelah proses pengolahan masih cukup tinggi.
- 4. Instalasi pengolahan air gambut harus tahan terhadap kondisi asam.
- 5. Sulitnya pengontrolan umpan kapur dan tawas.
- 6. Penambahan tawas dan kapur menyebabkan kenaikan kadar ion sulfat (SO_4^{2-}) dan kesadahan.
- 7. Zat organik dengan berat molekul rendah tidak dapat terkoagulasi. Untuk menghilangkan zat organik ini diperlukan proses adsorpsi dengan menggunakan karbon aktif. Namun, jika kadar karbon aktif yang ditambahkan lebih besar dari 10 mg/L maka biaya operasi menjadi mahal.

2.5. Pengolahan Air Gambut dengan Teknologi Membran

Teknologi membran merupakan teknologi baru dalam pengolahan air. Salah satu keunggulan dari metoda ini adalah kemurnian produk yang dihasilkan melebihi metode konvensional. Teknologi membran yang dapat digunakan dalam pengolahan air adalah *reverse osmosis* (RO), ultrafiltrasi (UF), dan nanofiltrasi (NF).

RO digunakan untuk memurnikan air yang kandungan garam inorganik-nya tinggi. Membran RO juga dapat menahan senyawa organik non-ionik seperti molekul fruktosa ($M_r = 180$) namun senyawa organik yang lebih kecil, misalnya etil alkohol ($M_r = 46$) tidak dapat ditahan oleh membran ini. Nanofiltrasi dapat merejeksi senyawa organik dengan berat molekul 300 – 1000 sedangkan rejeksi garam 15 – 90 %. Semakin besar ukuran pori membran maka semakin besar pula senyawa organik yang dapat melewati membran. Untuk senyawa organik dengan berat molekul lebih besar dari 1000, dapat digunakan ultrafiltrasi. Ultrafiltrasi mempunyai pori yang lebih besar. Keuntungan dari metode ini adalah biaya operasi lebih murah, membutuhkan membran yang lebih sedikit dan tekanan yang dibutuhkan lebih kecil. Biasanya ultrafiltrasi digunakan jika air mengandung banyak zat organik, sedangkan RO digunakan jika air mengandung banyak garam inorganik (misalnya sodium).

Penelitian tentang pengolahan air gambut dengan menggunakan membran RO telah dilakukan oleh I.G. Wenten, dkk, pada tahun 1998. Penelitian dilakukan dengan menggunakan seperangkat peralatan reverse osmosis yang terdiri dari modul membran spiral wound, pompa, tangki umpan, indikator tekanan, dan katup pengatur tekanan operasi. Air umpan yang digunakan adalah air gambut dari Riau.

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa peningkatan tekanan akan meningkatkan fluk dan rejeksi. Membran R-25A direkomendasikan untuk memberikan unjuk kerja pengolahan air gambut yang paling optimum dibandingkan kedua jenis membran lainnya, baik fluk ($30,04 \text{ L/m}^2\text{jam}$) maupun selektifitasnya (rejeksi = 99,33%) pada tekanan tinggi (30 bar). Namun mutu air yang dihasilkan dengan metode ini belum begitu memuaskan terutama bila dilihat dari bau air produk [14].

2.6. Reverse osmosis

2.6.1. Material Membran

Membran dapat dibuat dari berbagai material. Pembagian jenis material adalah sebagai berikut:

a. membran organik

membran jenis ini terdiri dari membran bermuatan dan membran tidak bermuatan. Membran tidak bermuatan terdiri dari membran *porous* dan membran *non-porous*. Contoh: selulosa asetat, poliamida, polisulfon, poliakrilonitril, polipropilen, dan sebagainya.

b. membran anorganik

membran jenis ini biasanya berpori. Contoh: keramik dan metal.

c. cair

material yang berupa cair, biasanya berupa *emulsion liquid membrane* (ELM).

Berdasarkan macam-macam sifat kimia dan fisika, hanya beberapa polimer yang sering digunakan sebagai material membran. Tabel D.6 memberikan karakteristik material membran yang sering digunakan.

Tabel 2.4 Material Membran

Material/polimer	Batasan pH pada 25°C	Temperatur max pada pH 7 (°C)	Resistensi terhadap klorin	Resistensi terhadap pelarut
Cellulose acetate	2-9	50	Cukup	Kurang
Polysulphone	0-14	80(100)	Cukup	Cukup
Polythersulphone	0-14	80(100)	Baik	Cukup/baik
Sulphonated polysulphone	2-12	60(80)	Cukup	Kurang
Polyvinilidinedifluoride	1-12	80(100)	Sangat baik	Baik
Polyamide	2-12	60	Kurang	Baik
Polyacrylonitrile	2-12	60	Baik	Cukup
Polyamideimide	2-9	50	Kurang	Baik
Polyimide	2-8	50	Kurang	Sangat baik
Fluorocopolymer	0-13	80(100)	Sangat baik	Cukup/baik
Regenerated cellulose	1-12	60	Cukup	Baik

Material membran *reverse osmosis* berupa material organik (polimer) yang bersifat hidrofilik, tidak bermuatan dan tidak berpori. Berikut ini akan dijelaskan mengenai karakteristik material membran *reverse osmosis*:

a. Material selulosa

Material ini merupakan salah satu material penting untuk pembuatan membran. Jenis yang sering digunakan adalah selulosa asetat, selulosa triasetat, selulosa tripropionat, etil selulosa, selulosa nitrat, dan ester campuran seperti selulosa asetat-butirat. Material

tersebut sering digunakan untuk pembuatan membran mikrofiltrasi, ultrafiltrasi, *reverse osmosis*, *gas separation*, dan dialisis. Selulosa bersifat hidrofilik tetapi tidak larut dalam air karena sifat kristalin dan ikatan hidrogen antara gugus hidroksil. Sifat penting fisika membran selulosa lainnya adalah derajat polimerisasi dengan nilai optimum 100-200 atau 100-300 yang akan menghasilkan BM sekitar 25.000-80.000.

b. Polisulfon (PS)

PS adalah hasil reaksi polimerik antara garam natrium bisphenol-A dan garam natrium di-*p-dichlorodiphenyl sulfone* dengan $T_g = 195\text{ }^{\circ}\text{C}$. PS memiliki stabilitas termal dan oksidatif yang baik, kekuatan dan fleksibilitas yang tinggi, tahan terhadap pH ekstrem, dan tidak dipengaruhi oleh kenaikan temperatur. PS dikarakteristik dengan adanya pengulangan unit struktur *diphenylene sulfone*. Polisulfon banyak digunakan untuk pembuatan membran ultrafiltrasi.

c. Poliakrilonitril (PAN)

PAN dikarakterisasi dengan adanya gugus nitril ($\text{C}\equiv\text{N}$) yang sangat polar dan tidak terlalu hidrofilik. Komonomer seperti vinil asetat atau metilmetakrilat sering ditambahkan untuk meningkatkan fleksibilitas rantai dan hidrofilitas. PAN memiliki ketahanan termal dan bahan kimia yang baik.

d. Polivinilidin-fluoride (PVDF)

PVDF dibuat secara *phase inversion*, memiliki ketahanan termal dan kimia yang baik serta tahan terhadap klorin dan pelarut organik, dan permukaan bersifat hidrofobik. PVDF larut dalam pelarut aprotik seperti diometilformamida, dimetilasetamida, dan trietilfosfat.

e. Politetrafluoroetilen (PTFE)

PTFE adalah polimer linier dengan atau tanpa cabang. Bentuk yang kompak dari fluorine menghasilkan molekul yang kuat dan agregat kristal yang bagus dengan nilai T_m yang tinggi dan stabilitas termal yang lebih baik dari PVDF. PTFE tidak larut dalam berbagai pelarut. BM dari PTFE biasanya tinggi ($400.000 < \text{BM} < 9.000.000$). Range BM yang lebih rendah terdiri dari polimer dispersi dengan karakter fibrilar menghasilkan membran dengan sifat mekanik yang unggul. Membran MF dari PTFE dapat dibuat dengan cara sintering dan stretching.

f. Poliamida (PA)

Polimer ini memiliki gugus amida ($-\text{CONH}-$) dan lebih disukai dibanding polimer alifatik karena memiliki kestabilan mekanik, termal, kimia, dan hidrolisis. Sifat-sifat poliamida ditentukan oleh gugus aromatik pada rantai utama yang dapat menurunkan

fleksibilitas rantai. Poliamida aromatik memiliki Tg sebesar 280 °C, lebih besar dari poliamida alifatik yang hanya 100 °C.

Berikut karakteristik membran komposit poliamida:

1. Lapisan selektif semipermeabel tipis menghasilkan fluk air yang tinggi.
2. Lapisan selektif semipermeabel yang nyaris sempurna menghasilkan selektifitas yang tinggi.
3. Mempunyai daya tahan yang baik terhadap proses kompaksi membran.
4. Memiliki daya tahan yang baik terhadap serangan bakteri.
5. Tidak sensitif terhadap kenaikan temperatur dan stabil terhadap larutan pencuci yang kuat pada temperatur tinggi.
6. Dapat dioperasikan pada rentang pH 2 - 12.
7. Memiliki rejeksi yang tinggi terhadap larutan organik.
8. Memiliki daya tahan fisik dan mekanik yang sangat baik.
9. Cukup sensitif terhadap air umpan yang mengandung klorin.

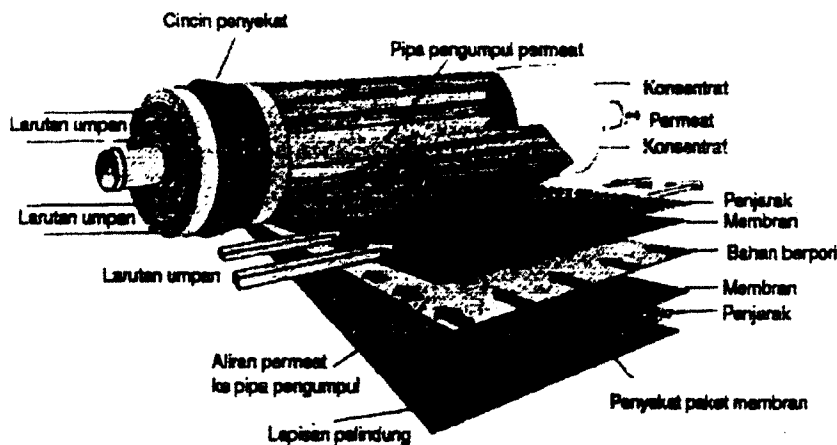
Membran komposit poliamida lebih dipilih karena mempunyai rejeksi garam yang tinggi, stabilitas biologi dan kimia yang tinggi, dan umur membran yang lama.

2.6.2 Modul Membran *Reverse Osmosis*

Ada dua jenis modul membran yang dipakai dalam sistem *reverse osmosis*, yaitu modul lilit spiral (*spiral wound*) dan modul serat berongga (*hollow fiber*).

A. Modul Lilit Spiral (*Spiral Wound*)

Modul lilit terdiri dari dua lembar membran datar, penjarak umpan, dan bahan berpori pengumpul permeat yang digulung membentuk silinder. Pada bagian tengah silinder terdapat pipa pengumpul permeat yang berfungsi untuk menampung aliran permeat dan mengalirkannya sebagai produk. Penjarak umpan merupakan suatu ayakan yang berfungsi untuk meningkatkan turbulensi aliran umpan pada permukaan membran. Dua lembar membran dan bahan berpori pengumpul permeat disatukan dengan lem, sedangkan penjarak umpan dibiarkan terbuka agar aliran umpan dapat masuk. Larutan umpan mengalir aksial sepanjang modul dalam celah yang terbentuk antara *spacer* dan membran. Skematik modul lilit spiral dapat dilihat pada Gambar 2.2 di bawah ini.



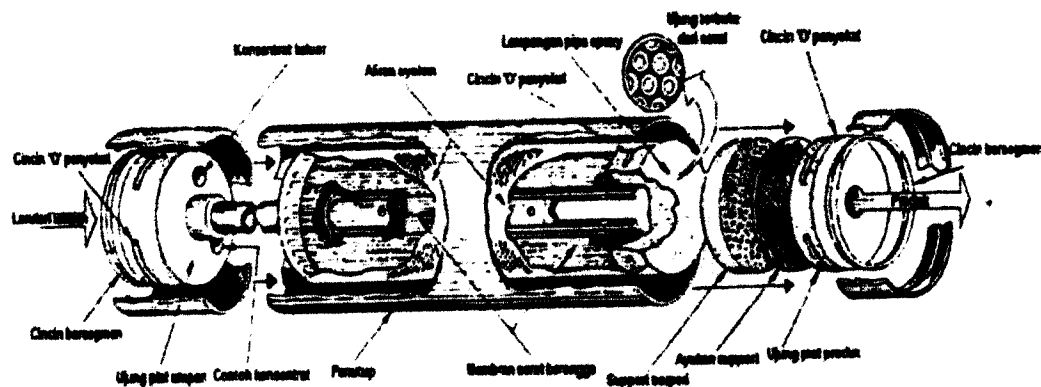
Gambar 2.2 Desain modul membran lilit spiral (*spiral wound*) [1]

Di dalam praktek industri modul membran lilit spiral (*spiral wound*) lebih banyak dipakai. Desain modul lilit spiral lebih diminati karena mampu mengurangi terjadinya fouling. Keuntungan lain dari modul ini adalah instalasi yang kompak, biaya instalasi dan penggantian yang murah, mempunyai laju alir permukaan yang tinggi, mereduksi efek polarisasi, mempunyai permeat yang tinggi, dan meningkatkan rejeksi garam.

Kelemahan dari modul lilitan spiral adalah resiko penyumbatan oleh partikel karena sempitnya jarak antara *spacer* dan adanya *dead space* antara ujung luar elemen spiral dengan bagian dalam *housing* silindris yang menimbulkan kesulitan dalam pembersihan sehingga mudah terkontaminasi oleh bakteri.

B. Modul Serat Berongga (*Hollow Fiber*)

Modul serat berongga merupakan bundel mampat ribuan serat halus yang diletakkan sejajar di sekitar inti distribusi air umpan. Untuk proses reverse osmosis, serat ditekan dari arah luar dan air produk mengalir melalui sisi dalam serat. Serat berongga dengan diameter yang sangat kecil mempunyai daya *self supporting* yang tinggi terhadap tekanan dari luar. Selanjutnya, penurunan tekanan sepanjang rongga serat dapat berkurang karena aliran permeat mempunyai laju alir yang lebih rendah dibandingkan aliran umpan. Skematik modul serat berongga dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Desain modul serat berongga

2.7. Prinsip Reverse Osmosis

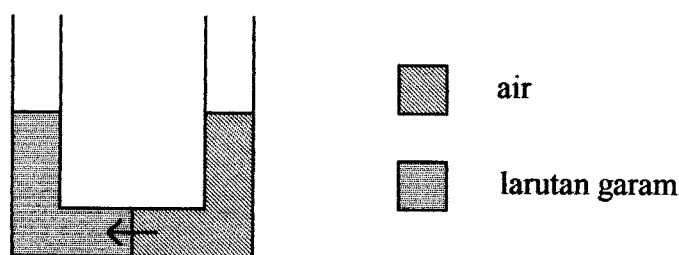
Membran *reverse osmosis* (RO) umumnya digunakan untuk memisahkan zat terlarut dengan berat molekul kecil dan memisahkan larutan cair yang mengandung zat organik dalam jumlah yang kecil. Pada proses ini, membran akan *permeable* terhadap air tetapi tidak terhadap garam dan spesi dengan berat molekul besar. Akibatnya membran hanya dilalui oleh pelarut sedangkan zat terlarut berupa garam maupun zat organik akan ditolak.

Secara ringkas terdapat tiga fenomena perpindahan massa pada membran dapat dijelaskan sebagai berikut:

a. Osmosis

Bila membran semipermeabel ditempatkan di antara air dan larutan garam, maka air akan bergerak melalui membran ke arah larutan garam secara alami. Fenomena ini disebabkan oleh adanya perbedaan potensial kimia antara kedua bagian tersebut, dengan potensial kimia air (μ_a) lebih besar daripada potensial kimia larutan garam (μ_g). Fenomena ini disebut osmosis.

Ilustrasi:



Gambar 2.4 Osmosis

b. Kestimbangan

Pergerakan air dari air murni ke larutan garam akan berhenti bila kesetimbangan potensial kimia telah tercapai. Pada keadaan kesetimbangan, perbedaan tekanan antara 2 bagian cairan di sisi membran sama dengan tekanan osmotik larutan garam.

Tekanan osmotik menurut persamaan van't Hoff adalah sebagai berikut:

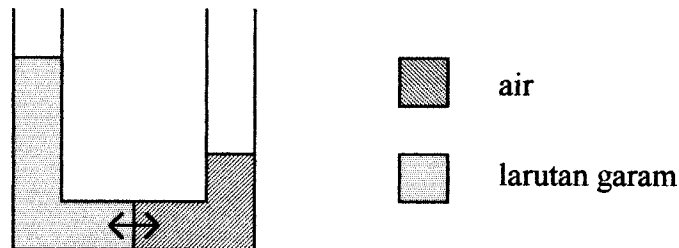
$$\pi_i = C_{Ai} R T \quad (1)$$

Keterangan:

- π_i = tekanan osmotik komponen i
- C_{Ai} = konsentrasi zat terlarut komponen i
- T = temperatur

Jadi besarnya tekanan yang harus diberikan pada bagian larutan garam untuk menghentikan aliran atau fluk air murni adalah sebesar tekanan osmotiknya.

Ilustrasi:



Gambar 2.5 Kestimbangan

c. *Reverse osmosis*

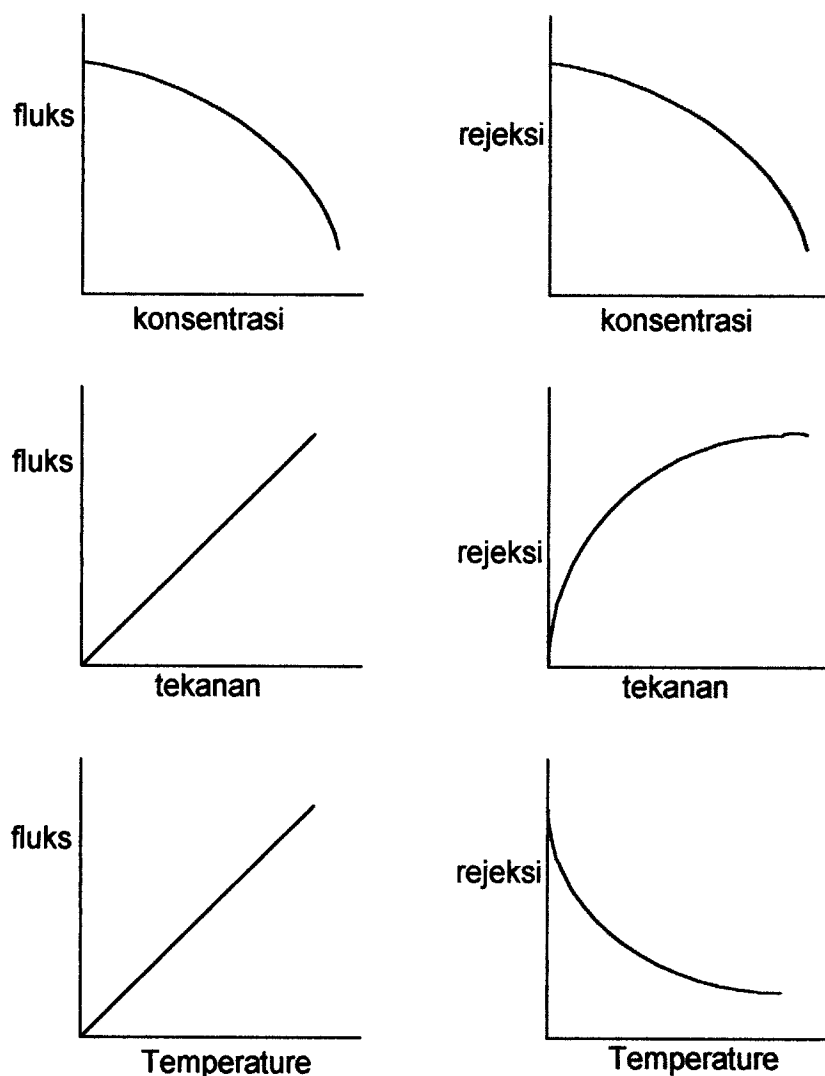
Apabila tekanan yang diberikan pada bagian larutan garam lebih besar daripada tekanan osmotiknya, maka arah aliran air akan berbalik (dari larutan garam ke air) seperti pada Gambar 3.6.

Ilustrasi:



Gambar 2.6 *Reverse osmosis*

Secara umum, proses *reverse osmosis* dapat diklasifikasikan menjadi 3, yaitu *Reverse Osmosis* tekanan tinggi (50-100 bar), *Reverse Osmosis* tekanan rendah (15-40 bar), dan nanofiltrasi atau *Loose Reverse Osmosis* (3-15 bar). *Reverse Osmosis* tekanan tinggi dapat digunakan untuk proses-proses yang menghasilkan rejeksi sangat tinggi terhadap zat-zat anorganik (bisa mencapai 99,9 % rejeksi NaCl) dan rejeksi menengah sampai tinggi dari zat organik berberat molekul rendah. Rejeksi zat organik bergantung pada tipe polimer membran, struktur, dan interaksi membran dengan zat terlarut. Rejeksi yang sangat tinggi diperlukan untuk pengolahan umpan dengan konsentrasi garam sangat tinggi seperti air laut. Untuk konsentrasi umpan yang lebih rendah seperti air payau dapat digunakan membran RO tekanan rendah dengan rejeksi berkisar antara 90-99 %. Pengaruh kondisi operasi terhadap fluk dan rejeksi dapat dilihat pada Gambar 3.7.



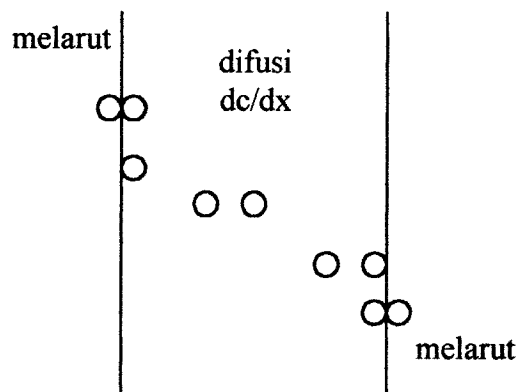
Gambar 2.7 Kurva Pengaruh Kondisi Operasi Terhadap Fluk dan Rejeksi

2.7.2 Pendekatan Peristiwa Perpindahan dalam *Reverse Osmosis*

Ada tiga pendekatan peristiwa perpindahan dalam RO yaitu:

a. Model membran tidak berpori (*solution-diffusion model*)

Model *solution-diffusion* mengasumsikan bahwa baik pelarut maupun zat terlarut akan terlarut pada permukaan membran *dense* homogen kemudian masing-masing akan berdifusi melalui membran dengan kecepatan difusi yang berbeda-beda berdasarkan gradien potensial kimia masing-masing komponen (lihat Gambar 3.8).



Gambar 2.8 Mekanisme *solution diffusion*

Menurut model *solution diffusion* yang diilustrasikan oleh Pusch, hubungan antara rejeksi dan fluk adalah sebagai berikut:

$$\frac{1}{R'} = 1 + \frac{D_{AM} K}{\Delta x} \frac{1}{J_v} \quad (2)$$

Keterangan:

- R' = *true* rejeksi (diasumsikan sama dengan *apparent rejection* (R) karena polarisasi konsentrasi kecil)
- D_{AM} = koefisien difusifitas zat terlarut
- K = koefisien partisi
- Δx = tebal membran nyata
- J_v = fluk pelarut

Model *solution diffusion* ini tidak memperhitungkan pengaruh tekanan operasi terhadap potensial kimia solut. Hubungan antara tekanan operasi dan potensial kimia solut dapat dilihat pada persamaan (3):

$$\Delta\mu_A = RT \ln \left(\frac{C_{A2}}{C_{A3}} \right) + \underline{V}_A \Delta P \quad (3)$$

Keterangan:

- μ = potensial kimia zat terlarut - V = volum molar parsial solut

Model yang memperhitungkan pengaruh tekanan terhadap potensial kimia solut adalah model *extended solution diffusion*. Menurut model ini hubungan antara rejeksi dan fluk adalah sebagai berikut:

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{1 - l_{AP} / C_{A2} l_P} + \frac{D_{AM} K}{\Delta x} \frac{1}{1 - l_{AP} / C_{A2} l_P} \frac{1}{J_V} \quad (4)$$

Keterangan:

- l_P = *pressure induced solute transport parameter*
 - l_{AP} = koefisien permeabilitas air

b. Model membran berpori (*perfenial sorption capillary model*)

Model membran berpori mengasumsikan bahwa mekanisme pemisahan dibatasi oleh fenomena permukaan dan transport fluida melalui pori. Lapisan selektif mempunyai sifat sangat hidrofilik sehingga permukaan membran dipenuhi oleh air dan kemudian terjadi penyerapan pada permukaan dan dalam pori membran. Adanya beda tekan, mendorong air di permukaan untuk mengalir melalui pori kapiler membran.

c. Model termodinamik irreversibel

Model termodinamika irreversibel mengasumsikan membran sebagai suatu *black box* dimana mekanisme perpindahan dan parameter-parameter membran tidak diperhitungkan. Model ini menghubungkan antara gaya-gaya yang bekerja pada sistem dengan fluk melalui membran.

Fluk pelarut dan fluk zat terlarut dipengaruhi oleh tekanan dan konsentrasi. Hubungan fluk pelarut dengan tekanan dapat dilihat pada persamaan (5) dan (6) [Parekh, 1988]:

$$J_V = N_B / C = l_P (\Delta P - \sigma \Delta \pi) \quad (5)$$

$$J_V = \frac{D_{BM} C_{BM} V_B}{RT \Delta x} (\Delta P - \Delta \pi) \quad (6)$$

Keterangan:

- J_V = fluk volume
- l_P = permeabilitas pelarut
- ΔP = beda tekanan operasi
- σ = koefisien refleksi (mencerminkan pengaruh beda tekanan pada fluk pelarut, untuk model *solution diffusion* $\sigma = 1$)
- $\Delta \pi$ = beda tekanan osmotik
- D_{BM} = koefisien difusifitas *solvent* pada membran
- C_{BM} = kandungan air pada membran
- R = tetapan gas
- N_B = fluk molar pelarut
- C = densitas molar air
- V_B = volume molar parsial air
- T = temperatur.
- Δx = tebal membran nyata

Sedangkan hubungan fluk zat terlarut dengan tekanan dan konsentrasi dapat dilihat pada persamaan (7), (8) dan (9) [Parekh, 1988].

$$N_A = \frac{D_{AM} K}{\Delta x} (C_{A2} - C_{A3}) \quad (7)$$

$$N_A = \omega \Delta \pi + (1 - \sigma)(C_{AM})_{in} J_V \quad (8)$$

Untuk model *solution diffusion*, $\sigma = 1$ sehingga persamaan (8) menjadi:

$$N_A = \omega \Delta \pi \quad (9)$$

Keterangan:

- D_{AM} = koefisien difusifitas solut pada membran
- K = koefisien partisi
- Δx = tebal membran nyata
- C_{A2} = konsentrasi solut pada permukaan membran
- C_{A3} = konsentrasi solut pada permeat
- N_A = fluk molar zat terlarut, $\text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$
- ω = *transport* parameter, $\text{mol/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$

Rejeksi pada membran hanya tergantung pada koefisien distribusi zat terlarut antara larutan dengan fasa membran dan difusitas zat terlarut pada fasa membran. Persamaan ini juga memprediksikan bahwa apabila tekanan osmotik umpan lebih tinggi, maka akan terjadi penurunan fluk air melalui membran.

Selektifitas membran atau koefisien rejeksi digambarkan dalam persamaan berikut ini:

$$R = \frac{C_f - C_p}{C_f} = 1 - \frac{C_p}{C_f} \quad (10)$$

Keterangan :

R = rejeksi garam

C_p = konsentrasi permeat

C_f = konsentrasi larutan bulk (apparent rejection)

2.7.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Proses Reverse Osmosis

Unjuk kerja membran dalam proses *reverse osmosis* dipengaruhi oleh konsentrasi umpan, tekanan operasi, laju alir massa umpan, temperatur operasi dan pH umpan. Pengaruh utama konsentrasi umpan yaitu terjadinya peningkatan tekanan osmotik larutan untuk konsentrasi yang meningkat. Meningkatnya konsentrasi ini akan mengakibatkan turunnya flux membran. Akibat dari naiknya tekanan osmotik dari larutan membuat tekanan kerja (*driving force*) akan bertambah. Efek utama dari peningkatan tekanan operasi adalah meningkatnya gaya pendorong untuk pelarut. Peningkatan tekanan operasi ini meningkatkan pemisahan (rejeksi) secara cepat hingga menuju titik yang konstan. Perubahan laju alir massa akan mempengaruhi koefisien perpindahan massa. Dengan peningkatan laju alir ini menyebabkan nilai flux dan rejeksi meningkat. Pengaruh penting dari kenaikan temperatur adalah peningkatan flux. Perubahan temperatur menyebabkan perubahan laju difusi melalui membran. Perubahan pH juga memberikan pengaruh terhadap membran. Apabila pH terlalu tinggi atau rendah akan merusak membran sehingga membran akan terdegradasi.