

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Pengertian Umum Tentang Membran Filtrasi

Membran adalah penghalang selektif antara dua fasa dan memiliki ketebalan yang berbeda-beda; ada yang tebal dan ada yang tipis, dan ada juga yang homogen dan heterogen. Pada dasarnya, membran terdiri dari dua jenis bahan: bahan alami (misalnya, kapas dan pulp) dan bahan sintetis (misalnya, bahan kimia seperti polimer) (Lestari, 2020).

Membran berperan dalam memisahkan material berdasarkan ukuran dan bentuk molekul. Zat dengan ukuran lebih besar dari pori membran akan tertahan, sementara yang lebih kecil dapat melewati membran. Teknologi filtrasi membran tidak hanya digunakan untuk proses pemisahan, tetapi juga dapat memekatkan serta memurnikan larutan yang melaluiinya. Larutan yang berhasil melewati membran disebut permeat, sedangkan yang tertahan disebut konsentrat. Oleh karena itu, sistem ini digolongkan sebagai teknologi ramah lingkungan. Proses pemisahannya dapat berlangsung secara terus-menerus dan efisien karena tidak memerlukan banyak energi. Seiring dengan sifatnya yang mudah terurai di alam, kini sedang dikembangkan penelitian mengenai pemanfaatan polimer alami sebagai bahan dasar membran. Salah satu polimer tersebut adalah PVA, yang dapat dimanfaatkan dalam pembuatan membran (Mulder, 1996).

Berdasarkan ukuran partikel dan massa molekul, pemisahan menggunakan membran diklasifikasikan menjadi empat jenis utama, yaitu mikrofiltrasi, ultrafiltrasi, nanofiltrasi, dan reverse osmosis. Pemisahan ini didasarkan pada gaya dorong seperti perbedaan tekanan, medan listrik, dan perbedaan konsentrasi. Gaya dorong ini menjadi ciri khas dari masing-masing metode pemisahan. Jenis pertama adalah membran untuk reverse osmosis, sedangkan jenis kedua dan ketiga juga terkait dengan proses osmosis terbalik (Lusiana & Prasetya, 2020).

B. Definisi membran

Membran adalah penghalang selektif antara dua fase yang heterogen atau homogen yang memiliki ketebalan dan ukuran pori tertentu yang memisahkan material (partikel, senyawa, molekul, ion, atau molekul) atau berdasarkan ukuran berat molekul (*cutoff*) dari umpan (bahan yang akan dipisahkan), dengan syarat ukuran pori-pori membran lebih kecil dari BM umpan Nasori (2016).

Oleh karena itu, membran berfungsi sebagai media penyaringan atau filter yang memiliki kemampuan untuk membedakan partikel, senyawa, molekul, dan ion dengan ukuran mulai dari 1 μm hingga 0,0001 μm (1 μm = mikrometer, micron = 0,001 mm). Sifat membran hampir identik dengan ketiga material tersebut ketika digunakan dalam penyaringan laboratorium konvensional atau biasa menggunakan kain kasa, kertas saring, atau whatman. Dalam metode pemisahan, membran adalah pembatas fisik (*furrier*) yang bekerja dengan prinsip perbedaan karakteristik ukuran partikel, senyawa, atau ion yang ingin dibuat atau dipisahkan dengan menggunakan tenaga berupa tekanan atau daya dorong (*driving force*) dengan berbagai jenis material dengan ukuran diameter pori tertentu (Malik dkk. 2013).

Tekanan dapat berupa potensial listrik, perubahan konsentrasi, atau perubahan suhu, bukan hanya tekanan fisik dalam bar atau atm. Membran dapat berbentuk *disc*, yang merupakan potongan kertas berbentuk lingkaran dengan diameter tertentu, atau filter roll, atau membran sheet, yang merupakan bentuk gulung membran (Li & Pustaka, 2017).

Struktur membran dapat beragam, termasuk homogen atau heterogen, bermuatan, bipolar, simetrik, asimetrik, berpori, padat, atau bermuatan, serta berbagai komposisi material yang digunakan untuk membentuk membran (Biron et al., 2018). Membran (*modul*) dapat diletakkan di tempat yang berbeda. Tempat ini dapat berupa plat papan rata dan frame, tabung (*tubular*), spiral, monolith, serat hampa, pipa kapiler, atau pipa kapiler (Kuriyel dkk., 2015). Menurut Biron et al. (2018), membran memiliki kemampuan untuk memisahkan bahan cair, gas, ion, molekul, atau partikel.

C. Klasifikasi membran

Membran diklasifikasikan berdasarkan berbagai faktor yang berkaitan dengan proses pemisahan. Mulder (1996) menggunakan berbagai faktor ini, termasuk proses pemisahan membran, material penyusunnya, geometri pori, dan fungsi dan kegunaannya.

D. Berdasarkan morfologinya

Membran dapat dibagi menjadi dua bagian berdasarkan morfologinya (Kesting. RE, 2000) yaitu:

a. *Membran Asimetris*

Membran jenis asimetris tersusun atas dua bagian, yaitu lapisan tipis yang berperan sebagai lapisan aktif dan lapisan pendukung di bawahnya. Pada membran ini, ukuran pori pada lapisan aktif lebih kecil dan tersusun lebih rapat dibandingkan dengan lapisan pendukung. Ketebalan lapisan aktif berkisar antara 0,2 hingga 1,0 μm , sementara lapisan pendukung yang berpori memiliki ketebalan sekitar 50 hingga 150 μm .

b. *Membran Simetris*

Membran simetris tidak memiliki lapisan kulit khusus dan memiliki ukuran serta distribusi pori yang seragam di seluruh permukaan. Umumnya, membran ultrafiltrasi memiliki ketebalan antara 10 hingga 200 μm , dan terdiri dari struktur asimetris dengan lapisan kulit yang padat di bagian permukaan. Struktur ini memungkinkan zat terlarut dalam cairan umpan tertahan di permukaan membran, sehingga mengurangi risiko penyumbatan di dalam pori-pori.

E. Berdasarkan geometri pori

Berdasarkan geometri porinya, membran dibedakan atas membran asimetrik dan simetrik :(Shokri & Yegani, 2012)

1. *Membran simetrik*

Membran ini memiliki pori-pori dengan ketebalan antara 10 hingga 200 μm

dan menunjukkan struktur pori yang seragam di seluruh bagiannya. Namun, efektivitasnya tergolong rendah karena pori-porinya mudah tersumbat, sehingga meningkatkan risiko fouling atau penyumbatan. Proses pembuatannya dilakukan dalam ruang tertutup yang telah dijenuhkan dengan pelarut. Penambahan pelarut dilakukan secara perlahan guna mempertahankan kestabilan konsentrasi, sehingga struktur membran yang terbentuk memiliki pori-pori yang merata dan seragam.

2. *Membran asimetrik*

Membran asimetris memiliki struktur dan ukuran pori yang bervariasi. Bagian atas membran yang berfungsi sebagai lapisan aktif memiliki ketebalan sekitar 0,1 hingga 1 μm , sedangkan bagian bawahnya yang berperan sebagai lapisan penyangga memiliki ketebalan antara 1 hingga 150 μm dan berpori besar. Karena bagian atasnya lebih padat dan tipis, membran ini menunjukkan selektivitas yang tinggi. Selain itu, membran asimetris juga mampu memberikan laju permeasi yang lebih besar. Proses penyaringan di permukaan membran ini menghasilkan laju filtrasi yang tinggi, dengan partikel-partikel yang tertahan di permukaannya. Jika dibandingkan dengan membran simetris pada ketebalan yang sama, membran asimetris menunjukkan efisiensi pemisahan yang jauh lebih baik. Hal ini disebabkan oleh kemungkinan penyumbatan pori oleh partikel yang melewati membran, yang berdampak pada penurunan kemampuan penyaringannya. (Nasori et al., 2023).

F. Berdasarkan ukuran pori atau fungsinya

Berdasarkan ukuran pori masing-masing jenis membran, membran dapat dikategorikan menjadi empat kategori: mikrofiltrasi, ultrafiltrasi, nanofiltrasi, dan reverse osmosis. Ini adalah cara membran berfungsi untuk memisahkan spesies.

a. Mikrofiltrasi (MF)

Mikrofiltrasi membran beroperasi pada tekanan yang relatif rendah, yakni kurang dari 2 bar, dan mampu memisahkan mikroorganisme, bakteri, serta partikel tersuspensi. Karena mikroorganisme dan polutan dalam air umumnya berukuran lebih dari 0,5 μm , maka membran mikrofiltrasi dengan ukuran pori rata-rata 0,5 μm efektif digunakan untuk menyaring serta memisahkan media

yang telah terkontaminasi (Moslehi & Mahdavi, 2019).

b. Ultrafiltrasi (UF)

Membran ultrafiltrasi memiliki pori-pori berukuran antara 2 hingga 100 nanometer dan bekerja pada tekanan operasi sekitar 1 sampai 10 bar. Jenis membran ini tergolong sebagai membran berpori yang efektif dalam menyaring partikel berukuran 0,01 hingga 1 mikron. Secara umum, membran ini digunakan untuk memisahkan zat koloid, bakteri, serta molekul berukuran besar. Membran ultrafiltrasi mampu memberikan pemisahan yang selektif dengan efisiensi tinggi dan tetap dapat digunakan pada suhu rendah (Yong et al., 2019). Selain itu, penggunaannya cukup luas, meliputi pengolahan air limbah, produksi air bersih, aplikasi di bidang bioteknologi, industri kimia, hingga pengolahan pangan (Isawi, 2019).

c. Nanofiltrasi (NF)

Membran nanofiltrasi memiliki pori-pori yang sangat kecil, yaitu kurang dari 2 nanometer, sehingga membutuhkan tekanan operasi antara 10 hingga 25 bar. Karena ukuran porinya berada pada skala nanometer, jenis membran ini mampu menghasilkan fluks permeat yang tinggi serta mampu menyaring molekul kecil dengan akurasi tinggi (Guo et al., 2019).

Nanofiltrasi termasuk teknologi membran yang tergolong baru dan sering dimanfaatkan untuk menghilangkan ion-ion polivalen (proses pelunakan air) serta senyawa organik, baik yang alami maupun sintetis. Selain itu, nanofiltrasi juga banyak diterapkan dalam industri pangan, seperti pada pengolahan produk susu, dan di industri tekstil untuk mengurangi kandungan garam, sehingga meningkatkan kualitas dan nilai produk (Wenten et al., 2012).

d. Reverse Osmosis (RO)

Membran reverse osmosis memiliki pori-pori sangat kecil, yaitu kurang dari 2 nanometer, sehingga membutuhkan tekanan operasi antara 15 hingga 80 bar (Wenten et al., 2012). Jenis membran ini efektif dalam menyaring berbagai jenis molekul, termasuk ion berukuran besar serta zat terlarut dengan berat molekul rendah seperti garam anorganik dan senyawa organik kecil. Karena kemampuannya dalam menghilangkan partikel dan ion dari air umpan, membran reverse osmosis banyak digunakan dalam proses pemurnian air dan desalinasi (Prayitno, 2020).

G. Berdasarkan homogenitas struktur dan pori

Berdasarkan homogenitas struktur dan pori, membran diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu membran simetrik dan membran asimetrik.

a. Membran Simetrik

Membran simetrik merupakan jenis membran yang hanya terdiri dari satu lapisan dengan ketebalan antara 10 hingga 200 mikrometer. Seluruh bagian dari membran ini memiliki ukuran pori dan tingkat kerapatan yang seragam, serta tidak dilengkapi dengan lapisan permukaan (skin layer) (Rusmaningsih et al., 2018). Terdapat dua tipe utama dalam kategori ini, yaitu membran berpori dan non-pori. Namun, efektivitas membran simetrik tergolong rendah karena pori-porinya cenderung lebih mudah tersumbat, yang berujung pada terjadinya fouling atau penurunan kinerja.

b. Membran Asimetrik

Membran asimetrik terdiri dari dua lapisan, yaitu lapisan aktif tipis di permukaan dan lapisan pendukung di bawahnya. Kedua lapisan ini memiliki ukuran dan kerapatan pori yang berbeda; pori-pori di bagian kulit (permukaan) lebih kecil dibandingkan dengan bagian pendukungnya. Lapisan pendukungnya memiliki struktur menyerupai jari (finger-like structure) (Rusmaningsih et al., 2018), dengan ketebalan antara 50 hingga 150 mikrometer, sedangkan lapisan kulit memiliki ketebalan sekitar 0,1 hingga 0,5 mikrometer. Proses pembentukan lapisan pendukung dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti suhu koagulasi, penggunaan zat aditif baik organik maupun anorganik, serta komposisi larutan pembentuk membran (Mulyati et al., 2017). Kinerja pemisahan pada membran asimetrik umumnya lebih baik dibandingkan dengan membran simetrik karena struktur pori yang lebih optimal dapat mencegah penyumbatan dan menjaga performa filtrasi.

H. Berdasarkan bentuknya

Membran berdasarkan bentuknya dapat dibedakan menjadi 4 :

1. Membran datar

Membran mempunyai penampang lebaran. Pada aplikasinya penggunaan membran datar dapat dilakukan melalui membran 1 lembar dan membran

datar tersusun

2. Membran spiral

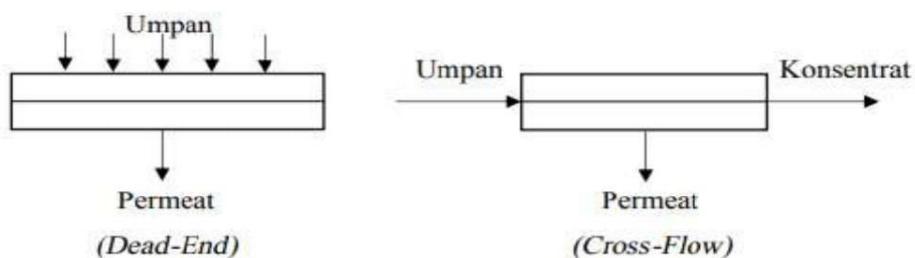
Merupakan membrane datar yang digulung dalam pipa dan dibentuk spiral.

3. Membran tubular

4. Membran serat berongga

I. Tipe Aliran Umpam

Secara umum, terdapat dua jenis konfigurasi aliran dalam proses pemisahan dengan membran, yaitu aliran langsung (Dead-End) dan aliran menyilang (Cross-Flow). Perbedaan antara kedua tipe proses ini dapat dilihat pada Gambar 0.1 berikut":



Gambar 2.1 Tipe Proses Pemisahan pada membrane (Mulder,1996)

Dalam proses filtrasi dengan aliran melintas, cairan umpan mengalir tegak lurus menuju permukaan membran, menyebabkan partikel menumpuk dan membentuk lapisan di permukaan membran. Kondisi ini dapat menyebabkan penurunan fluks dan efisiensi penyaringan (rejeksi). Sementara itu, pada sistem aliran silang (cross-flow), umpan mengalir sejajar dengan permukaan membran sehingga hanya sebagian partikel yang menumpuk di permukaan.

J. Karakteristik membran

Dalam rangka memahami mekanisme pemisahan menggunakan membran, perlu ditinjau karakteristik membran yang berkaitan dengan sifat fisik dan struktur membrannya, seperti kadar air, ukuran dan jumlah pori, luas permukaan, serta

ketebalan membran (Widyasmara, 2013).

K. Kandungan air

Kandungan air menggambarkan sejauh mana suatu polimer mampu menyerap air, yang dipengaruhi oleh keberadaan gugus hidrofilik dalam struktur rantainya. Polimer yang memiliki banyak gugus hidroksil cenderung bersifat hidrofilik. Kandungan air ini berperan dalam menentukan tingkat difusi zat yang menembus membran, karena air yang terikat pada membran dapat meningkatkan kelenturan rantai polimer. Akibatnya, molekul akan lebih mudah melewati membran melalui celah-celah di antara rantai polimer.

L. Ketebalan membran

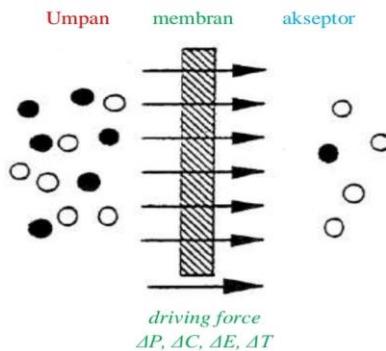
Ketebalan membran termasuk dalam karakteristik penting yang diukur untuk menentukan laju permeasi. Pengukuran ketebalan membran PVA dilakukan menggunakan mikrometer. Standar ketebalan membran untuk proses ultrafiltrasi berkisar antara 1 hingga 3 mm (Ma'ruf et al., 2015).

M. Luas membran

Ukuran luas membran yang dibuat disesuaikan dengan ukuran modul membran pada rancangan alat, dengan panjang dan lebar membran diukur secara manual menggunakan penggaris.

N. Prinsip pemisahan dengan membran

Membran adalah media tipis berpori yang bersifat semipermeabel dan digunakan untuk memisahkan partikel berukuran molekul (spesi) dalam suatu larutan. Proses pemisahan ini terjadi karena adanya perbedaan dalam ukuran pori, bentuk, struktur kimia, serta tingkat selektivitas membran. Penjelasan lebih lanjut mengenai mekanisme pemisahan dengan membran dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.2 Proses Pemisahan dengan Membran (Mulder, M, 1996).

Fase umpan terdiri dari berbagai komponen yang akan dipisahkan dalam sistem larutan, sementara fase akseptor merupakan sisi permeat, yaitu bagian yang dihasilkan dari proses pemisahan atau permeasi. Proses pemisahan ini berlangsung karena adanya gaya penggerak (driving force) yang menyebabkan molekul-molekul berdifusi melewati membran. Difusi ini dipicu oleh perbedaan tekanan (ΔP), konsentrasi (ΔC), energi (ΔE), dan suhu (ΔT). Pemisahan dalam teknologi membran terjadi akibat perbedaan kecepatan transpor spesies kimia yang melewati membran. Kecepatan transpor ini dipengaruhi oleh gaya dorong yang bekerja, mobilitas molekul, serta konsentrasi masing-masing komponen. Adapun faktor-faktor yang memengaruhi proses pemisahan dengan membran meliputi:

- Interaksi membran dengan larutan
- Tekanan
- Temperatur
- Konsentrasi polarisasi

Dalam penggunaannya, pemilihan membran didasarkan pada sifat-sifat sebagai berikut:

- Tahan terhadap fluktuasi suhu
- Memiliki ketahanan terhadap zat kimia
- Mudah dalam mendeteksi adanya kebocoran
- Proses penggantian dapat dilakukan dengan mudah
- Pemisahan berlangsung secara efisien

Prinsip dasar pemisahan menggunakan membran adalah dengan

memanfaatkan karakteristik membran, di mana dalam kondisi yang sama, jenis molekul tertentu akan berpindah dari satu fase fluida ke fase lainnya. Membran memiliki kecepatan perpindahan yang berbeda untuk tiap molekul, sehingga berfungsi sebagai penyaring selektif: hanya molekul tertentu yang dapat melewati, sementara molekul lain tertahan. Gaya pendorong (*driving force*) yang memungkinkan molekul menembus membran dapat berupa perbedaan suhu, tekanan, atau konsentrasi. Gaya ini dapat dihasilkan melalui penerapan tekanan tinggi atau tegangan listrik. Keberhasilan filtrasi membran ditentukan oleh dua faktor utama: selektivitas dan produktivitas. Selektivitas menunjukkan seberapa efektif pemisahan komponen dan biasanya dinyatakan dalam parameter *Retention* (untuk larutan) atau faktor pemisahan [*alpha*] (untuk campuran senyawa organik cair atau gas). Sementara itu, produktivitas menggambarkan jumlah volume atau massa fluida yang mampu melewati membran per satuan luas dan waktu, dengan satuan fluks. Kedua parameter tersebut selektivitas dan produktivitas sangat dipengaruhi oleh jenis membran yang digunakan.

O. Membran ultrafiltrasi

Proses membran merupakan teknik pemisahan dua atau lebih komponen dalam aliran fluida dengan memanfaatkan membran sebagai media penyaring. Membran bertindak sebagai penghalang selektif yang hanya memungkinkan molekul tertentu untuk melewati, sementara komponen lainnya tertahan (Mulder, 1996). Proses ini melibatkan fluida berupa cairan atau gas serta membutuhkan gaya dorong yang berasal dari perbedaan tekanan (ΔP), konsentrasi (ΔC), maupun energi (ΔE). Ultrafiltrasi (UF) adalah salah satu metode pemisahan berbasis membran yang mengandalkan perbedaan tekanan, dan sangat dipengaruhi oleh ukuran serta distribusi pori-pori membran. Proses ini efektif untuk menyaring partikel berukuran koloid, dengan tekanan operasi berkisar antara 1–5 bar dan kapasitas permeabilitas sebesar 10–50 liter per meter persegi per jam per bar. Teknologi membran ini dapat digunakan untuk memproduksi air bersih yang memenuhi standar air minum. Air baku dimasukkan ke dalam wadah berisi membran semi-permeabel dan diberi tekanan, sehingga terjadi pemisahan antara zat terlarut dan pelarut secara fisik. Hanya pelarut yang dapat melewati membran, sedangkan zat terlarut baik organik

maupun elektrolit akan tertahan (*direjeksi*), termasuk kontaminan seperti koloid yang disaring oleh pori-pori membran berdasarkan ukuran molekulnya. Membran ultrafiltrasi memiliki struktur yang berpori dan asimetris. Dibandingkan dengan metode pengolahan air konvensional, sistem membran memiliki beberapa keunggulan, seperti efisiensi energi yang lebih tinggi, mudah dioperasikan dalam skala kecil karena desainnya modular, serta tidak memerlukan kondisi ekstrem seperti suhu atau pH tertentu. Namun demikian, penggunaan membran juga memiliki keterbatasan, seperti potensi terjadinya fouling atau polarisasi konsentrasi yang dapat menurunkan kapasitas pengolahan air dan memengaruhi masa pakai membran (Agustina, 2006).

P. Keungulan dan Kekurangan Teknologi Membran

Jika dibandingkan dengan metode pemisahan lainnya, teknologi membran memiliki beberapa keunggulan, antara lain:

1. Pemisahan dapat dilakukan secara terus-menerus (*kontinu*).
2. Penggunaan energi relatif rendah.
3. Dapat dengan mudah dikombinasikan dengan teknologi pemisahan lain (teknologi hibrid).
4. Umumnya beroperasi pada kondisi yang tidak ekstrem (tekanan dan suhu sedang), serta karakteristik membrannya dapat dimodifikasi dengan mudah.
5. Mudah untuk diperluas skalanya (*up-scaling*) dan tidak memerlukan penambahan zat aditif.

Namun, dalam proses operasionalnya, terdapat beberapa kendala yang harus diperhatikan, seperti:

1. Terjadinya penyumbatan (*fouling*).
2. Usia pakai membran yang relatif singkat.
3. Kemampuan selektivitas yang kurang optimal.

Fouling atau penyumbatan merupakan permasalahan umum yang sering ditemui, yang disebabkan oleh akumulasi kontaminan pada permukaan maupun di dalam pori-pori membran dalam jangka waktu tertentu. Meskipun telah dilakukan *pre-treatment*, fouling tetap dapat terjadi. Jenis fouling sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti kualitas air baku, jenis dan bahan membran yang digunakan, serta desain dan kontrol proses.

Tiga tipe *fouling* yang umum terjadi adalah *fouling* oleh partikel, *fouling* biologis

(*biofouling*), dan pengendapan mineral (*scaling*). Kontaminasi ini menyebabkan peningkatan beban kerja sistem untuk menjaga performa membran tetap optimal secara kontinu. Pada titik tertentu, beban yang dibutuhkan menjadi terlalu besar dan membuat proses tidak lagi efisien secara ekonomi.

Upaya untuk mengurangi fouling dapat dilakukan dengan menaikkan pH sistem, menggunakan teknik backwash, dan penambahan disinfektan untuk menghambat pertumbuhan mikroorganisme. Sementara itu, untuk membersihkan fouling yang sudah terjadi, dapat digunakan metode *flushing* atau pembersihan kimia (*chemical cleaning*).

Q. Kerangka Teori

Tabel 2. 1 kerangka Teori

Input	Proses	Output
<ul style="list-style-type: none"> - Sistem IPAL - <i>Pre treatment</i> (bak equalisasi dan bak penangkap lemak) - <i>Secondary treatment</i>(bak pengendap awal/inlet, bak aerasi, bak pengedap akhir - <i>Tertiary treatment</i> (pompa air, tabung filter, mikrofiltrasi, outlet) 	<ul style="list-style-type: none"> - Kualitas Air - Inlet - Outlet - Sistem pengolahan air limbah, debit air, kualitas air limbah, lamanya waktu jenuh membran, analisis dampak Fauling 	<ul style="list-style-type: none"> - Memenuhi bak - Tempat bak - Jumlah air - Lama jenuh

Sumber (Mulder, M, 1996).

R. Kerangka Konsep

Tabel 2. 2 Kerangka Konsep

