

LAMPIRAN A PERHITUNGAN NERACA MASSA

Kapasitas produksi	: 50.000 ton/tahun
Waktu operasi	: 330 hari/tahun
Basis perhitungan	: 1 jam operasi
Konversi reaktor	: 86 %
Bahan baku	: NaCl dan H ₂ O
Produk	: Sodium Klorat (NaClO ₃)

$$\begin{aligned}\text{Kapasitas produksi} &= \frac{30.000 \text{ ton}}{1 \text{ tahun}} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \times \frac{1 \text{ tahun}}{330 \text{ hari}} \times \frac{1 \text{ hari}}{24 \text{ jam}} \\ &= 3787,879 \text{ kg/jam}\end{aligned}$$

Komposisi bahan baku pada *fresh feed* :

Bahan Baku Utama

Komposisi air Laut

Komponen	Konsentrasi (mol/kg)	Berat Molekul (kg/kgmol)	Berat (g/kg air laut)
NaCl	0,418491932	58,443	24,458
MgCl ₂	0,052800000	95,211	5,027
Na ₂ SO ₄	0,024085034	142,040	3,421
KCl	0,009356000	74,551	0,698
CaCl ₂	0,006185034	110,984	0,686
CaSO ₄	0,004114966	136,138	0,560
KBr	0,000844000	119,013	0,100
SrCl ₂	0,000091000	158,526	0,014
NaF	0,000068000	41,990	0,003
			34,968

A.G Dickson & C.Goyet (1994)

Bahan Baku Pendukung

a. Asam klorida (HCl)

Komponen	Fraksi Massa (%)
HCl	37
H ₂ O	63
Jumlah	100

b. Natrium dikromat (Na₂Cr₂O₇)

Komponen	Fraksi Massa (%)
Na ₂ Cr ₂ O ₇	86,2
H ₂ O	13,9
Jumlah	100

Komposisi Produk

Sodium Klorat (NaClO₃)

Komponen	Fraksi Massa (%)
NaCl	0,065
MgCl ₂	0,002
Na ₂ SO ₄	0,000
KCl	0,001
CaCl ₂	0,000
CaSO ₄	0,000
KBr	0,000
SrCl ₂	0,000
NaF	0,000
Na ₂ Cr ₂ O ₇	0,005
HCl	0,000
NaClO ₃ (k)	99,820
H ₂ O	0,108
Jumlah	100

Untuk menentukan neraca massa masing-masing komponen pada setiap alat, dapat dihitung dengan metoda penghitungan *backward* dari komposisi produk yang diinginkan.

Komponen	Fraksi Massa (%)	Berat (kg/jam)
NaCl	0,309	11,986
MgCl ₂	0,007	0,283
Na ₂ SO ₄	0,000	0,000
KCl	0,004	0,148
CaCl ₂	0,000	0,009
CaSO ₄	0,000	0,000
KBr	0,000	0,001
SrCl ₂	0,000	0,000
NaF	0,000	0,003
Na ₂ Cr ₂ O ₇	0,079	3,062
HCl	0,000	0,000
NaClO ₃ (k)	99,501	3.860,086
H ₂ O	0,100	3,882
Total	100,000	3.879,459

Diketahui data sebagai berikut :

Komponen	Berat Molekul (kg/kgmol)
NaCl	58,443
MgCl ₂	95,211
Na ₂ SO ₄	142,0395
KCl	74,5513
CaCl ₂	110,984
CaSO ₄	136,138
KBr	119,0133
SrCl ₂	158,526
NaF	41,98977
Na ₂ Cr ₂ O ₇	261,97
HCl	36,46
NaClO ₃	106,44
H ₂ O	18
NaClO	74,44
H ₂	2

Dimisalkan :

A = NaCl

LAMPIRAN A.NERACA MASSA

Prarancangan Pabrik Sodium Klorat dari Sodium Klorida dengan Kapasitas 30.000 Ton/Tahun

B	=	MgCl ₂
C	=	Na ₂ SO ₄
D	=	KCl
E	=	CaCl ₂
F	=	CaSO ₄
G	=	KBr
H	=	SrCl ₂
I	=	NaF
J	=	Na ₂ Cr ₂ O ₇
K	=	HCl
L	=	NaClO ₃
M	=	H ₂ O
N	=	NaClO
O	=	H ₂

Secara umum, persamaan neraca massa adalah sebagai berikut :

$$\{\text{Massa masuk}\} - \{\text{Massa keluar}\} + \{\text{Massa tergenerasi}\} - \{\text{Massa terkonsumsi}\} \\ = \{\text{Akumulasi massa}\}$$

(Himmelblau, 1996 : 144)

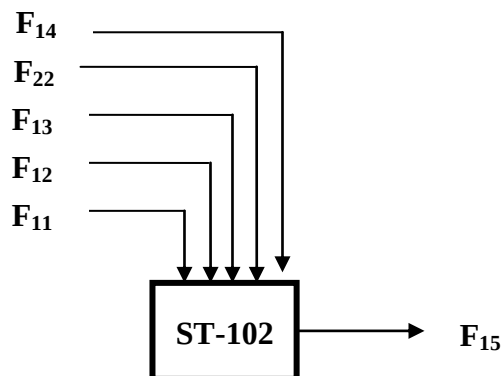
Perhitungan neraca massa pada masing-masing alat adalah sebagai berikut :

1. *Solution Tank (ST-102)*

Fungsi : Tempat pencampuran bahan baku yang berupa air laut yang mengandung

konsentrasi garam (NaCl) dengan zat aditif berupa sodium dikromat (Na₂Cr₂O₇) dan asam klorida (HCl), agar konsentrasinya sesuai dengan kondisi *Reaktor Elektrolisis (RE-201)*

Asumsi : Kadar garam yang diinginkan didalam solution tank setelah penambahan Na₂Cr₂O₇ dan HCl adalah sebesar 100 gram/liter. Na₂Cr₂O₇ konsentrasinya antara 2-8 gram/liter, sedangkan HCl diberikan untuk menjaga pH larutan sebesar 6,3 (B.V. Tilak , 1999)



Gambar A.1 Aliran Massa di sekitar *Solution Tank (ST-102)*

Dimana :

F11 = aliran bahan baku yang berupa air laut yang berasal dari *Nanofiltartion Membrane (NF-101)*

F12 = Sodium dikromat ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) yang berasal dari Solution Tank sodium dikromat (ST-101)

F13 = Aliran HCl yang berasal dari storage tank

F22 = Aliran Recycle yang berasal dari Centrifuge (CF-301)

F14 = Aliran air yang berasal dari utilitas

F15 = Aliran produk keluar dari Solution Tank (ST-102)

Neraca massa total :

$$F_{11} + F_{12} + F_{13} + F_{14} + F_{22} = F_{15} \dots\dots\dots(\text{A.1})$$

Di dalam Solution Tank terjadi pencampuran secara sempurna, sehingga sesuai dengan kondisi reactor elektrolisis RE-201 : Kadar NaCl = 100-120 gpl, Kadar $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ = 2-8 gpl dan HCl menjaga pH larutan sebesar 6,3-6,7.

Perhitungan neraca massa :

➤ NaCl

Konsentrasi keluaran reaktor yang diinginkan = 100 gpl (gram/liter)= 0,1 kg/L

Dengan menggunakan program *Goal Seek* dari Microsoft Excell didapatkan jumlah massa NaCl sebesar 2084,397 kg/jam (35,665 kgmol/jam) untuk mendapatkan konsentrasi sebesar 100 gpl.

➤ Aliran F₁₂ (Na₂Cr₂O₇)

Kadar NaCl keluaran solution tank yang diinginkan sebesar 2-8 gpl.

Kelarutan Na₂Cr₂O₇ pada suhu 50°C = 438,391 gram/100 gram air atau (Perry, 1999).

Dengan menggunakan program *Goal Seek* didapatkan jumlah Na₂Cr₂O₇ sebesar 4,169 kg dengan konsentrasi sebesar 4,623 gpl (memenuhi syarat).

Jumlah air yang dibutuhkan untuk melarutkan Na₂Cr₂O₇

$$= \frac{438,391}{100 \times 4169} = 18,276 \text{ kg / jam}$$

➤ H₂O

Jumlah massa air didapatkan dengan *trial and error* produk keluaran Solution Tank dengan program *Goal Seek*, sehingga didapatkan massa sebesar 20.448,103 kg/jam (1136,006 kgmol/jam)

➤ Aliran F₁₃ (HCl)

pH larutan yang diinginkan sebesar 6,3.

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+] \dots\dots\dots (\text{A.2})$$

6,3 = -log [H⁺] , akhirnya didapatkan konsentrasi H⁺ atau HCl sebesar 0,0000005011872 mol/L = 0,0000182732865 kg/L

Jumlah HCl yang dibutuhkan :

$$\text{Massa air total} = 18,276 + 20.448,103 = 20.446,379 \text{ kg/jam} = 20.446,379 \text{ L/jam.}$$

Sehingga, jumlah HCl yang diperlukan sebesar

$$= 0,0000182732865 \text{ kg/L} \times 20.446,379 \text{ L/jam.}$$

$$= 0,374 \text{ kg/jam}$$

Dari fraksi massa bahan baku HCl yang berupa 37% HCl dan 63% air, maka didapatkan massa air bawaan bahan baku HCl sebesar

$$= \frac{63}{37} \times 0,374 \text{ kg / jam} = 0,637 \text{ kg/jam}$$

➤ Aliran F₁₄ (H₂O)

Didapatkan dengan trial and error input aliran F_{11} , F_{12} , F_{13} , F_{20} dengan produk output Solution Tank yang diinginkan. Dengan program Goal Seek didapatkan jumlah air sebesar 15.505,891 kg/jam

Berdasarkan perhitungan neraca massa pada masing-masing komponen, maka dapat disusun tabel neraca massa komponen sebagai berikut :

Tabel A.1 Neraca massa di sekitar *Solution Tank (ST-102)*

Komponen	Input (kg/jam)					Output (kg/jam)
	Aliran 11	Aliran 12	Aliran 13	Aliran 14	Aliran 20	Aliran 15
NaCl	2.297,255				557,049	2.854,304
MgCl ₂	12,157				12,206	12,157
Na ₂ SO ₄	0,001				0,001	0,001
KCl	6,341				6,366	6,341
CaCl ₂	0,399				0,401	0,399
CaSO ₄	0,003				0,003	0,003
KBr	0,022				0,022	0,022
SrCl ₂	0,000				0,000	0,000
NaF	0,113				0,113	0,113
Na ₂ Cr ₂ O ₇	0,000	4,169			127,353	131,522
HCl	0,000		0,374		8,369	8,743
NaClO _{3 (l)}	0,000				6.686,328	6.686,328
H ₂ O	7.907,880	18,276	0,637	15.505,891	5.016,438	28.449,122
Total	10.224,171	22,444	1,011		12.414,651	38.149,054
	38.168,168					

Kadar NaCl keluaran *Solution Tank (ST-102)*

$$= \frac{2.854,304}{28.449,122} = 0,10033 \text{ kg/liter air}$$

$$= 100,330 \text{ gpl (memenuhi syarat)}$$

2. *Electrolytic Cell (RE-201)*

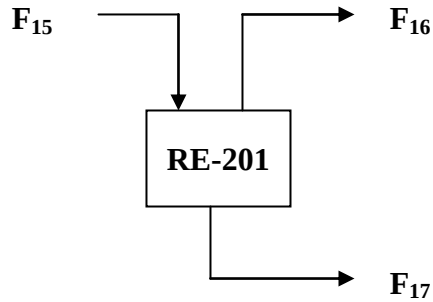
Fungsi : Tempat terjadinya reaksi pembentukan NaClO₃ dari NaCl dan H₂O secara elektrolisis

Asumsi : Konsentrasi NaClO₃ keluaran reaktor sebesar 400-550 gpl (B.V

Tilak,

1999)

Gambar :



Gambar A.2 Aliran Massa di sekitar *Reaktor Elektrolisis (RE-101)*

Dimana :

F_{15} = Umpan masuk reaktor yang berasal dari *Solution Tank (ST-102)* (kg/jam).

F_{16} = Produk samping keluaran reaktor yang berupa gas H_2 (kg/jam).

F_{17} = Produk utama keluaran reaktor (kg/jam).

Neraca massa total :

$$F_{15} = F_{16} + F_{17}$$

Konversi NaCl = 86 % (Lampiran A)

Selektivitas :

$NaClO_3$ = 95 %

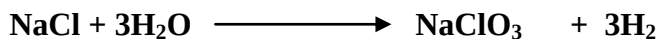
$NaClO$ = 5 %

Konversi NaCl menjadi $NaClO_3$ = 86 % x 95 % = 81,7 %

Konversi NaCl menjadi $NaClO$ = 86 % x 5 % = 4,3 %

Reaksi di dalam Reaktor

Reaksi (1)



Reaktan

$NaCl$ = 2.854,304 kg/jam = 48,839 kgmol

H_2O = 28.449,122 kg/jam = 1.580,507 kgmol

Bereaksi

$$\text{NaCl} = 48,839 \text{ kgmol} \times 81,7\% = 39,902 \text{ kgmol}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 3 \times 39,902 \text{ kgmol} = 119,705 \text{ kgmol}$$

Produk

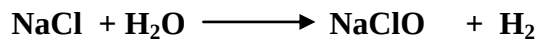
$$\text{NaClO}_3 = 39,902 \text{ kgmol} = 4.247,121 \text{ kg}$$

$$\text{H}_2 = 3 \times 39,902 \text{ kgmol} = 119,705 \text{ kgmol} = 239,409 \text{ kg}$$

Sisa

$$\text{NaCl} = 48,839 - 39,902 = 8,938 \text{ kgmol}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 1.580,507 - 119,705 = 1.460,802 \text{ kgmol}$$

Reaksi (2)**Jumlah mula-mula, sisa reaksi (1) :**

$$\text{NaCl} = 8,938 \text{ kgmol}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 1.460,802 \text{ kgmol}$$

Bereaksi

$$\text{NaCl} = 8,938 \text{ kgmol} \times 4,3\% = 0,384 \text{ kgmol}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,384 \text{ kgmol}$$

Produk

$$\text{NaClO} = 0,384 \text{ kgmol} = 28,608 \text{ kg}$$

$$\text{H}_2 = 0,343 \text{ kgmol} = 0,769 \text{ kg}$$

Sisa

$$\text{NaCl} = 8,938 \text{ kgmol} - 0,384 \text{ kgmol} = 8,553 \text{ kgmol} = 499,877 \text{ kg}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 1.460,802 \text{ kgmol} - 0,384 \text{ kgmol} = 1.460,418 \text{ kgmol} = 26.287,52 \text{ kg}$$

Tabel A.2 Neraca Massa di sekitar Reaktor Elektrolisis (RE-201)

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)	
	Aliran 15	Aliran 16	Aliran 17
NaCl	2.854,304	0,000	499,877
MgCl ₂	12,157		12,157
Na ₂ SO ₄	0,001		0,001
KCl	6,341		6,341
CaCl ₂	0,399		0,399

CaSO ₄	0,003		0,003
KBr	0,022		0,022
SrCl ₂	0,000		0,000
NaF	0,113		0,113
Na ₂ Cr ₂ O ₇	131,522	0,000	131,522
HCl	8,743	0,000	8,743
NaClO ₃	6.686,328	0,000	10.933,449
NaClO	28,608	0,000	28,608
H ₂ O	28.449,122	0,000	26.287,520
H ₂		240,178	
Total		240,178	37.908,756
	38.177,663	38.177,663	

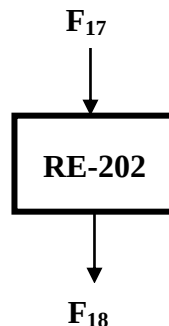
$$\text{Kadar NaClO}_3 = \frac{10.933,449 \text{ kg / jam}}{26.287,520 \text{ L / jam}} \times 1000 = 415,598 \text{ gpl (memenuhi syarat)}$$

3. *Dehypoing Reactor (RE-202)*

Fungsi : Untuk menghilangkan sisa NaClO sebagai reaksi samping dari pembentukan NaClO₃ dengan cara pemanasan di atas suhu 308 K

Asumsi : NaClO terkonversi 100 %

Gambar :



Gambar A.3 Aliran Massa di sekitar *Dehypoing Reactor (RE-202)*

Dimana :

F_{17} = Umpan Masuk reaktor berasal dari *Reaktor Elektrolisis (RE-201)*

F_{18} = Produk keluaran *Dehypoing Reactor (RE-202)* menuju *Evaporator (EV-301)*

Neraca massa total :

$$F_{16} = F_{17}$$

Reaksi yang terjadi**Mula-mula**

$$\text{NaClO} = 28,608 \text{ kg} = 0,384 \text{ kmol}$$

$$\text{Bereaksi} = 0,384 \text{ kmol}$$

Produk

$$\text{NaClO}_3 = \frac{1}{3} \times 0,384 \text{ kmol} = 0,128 \text{ kmol} = 13,635 \text{ kg}$$

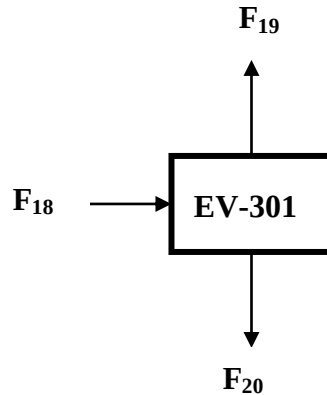
$$\text{NaCl} = \frac{2}{3} \times 0,384 \text{ kmol} = 0,256 \text{ kmol} = 14,974 \text{ kg}$$

Tabel A.4 Neraca Massa di sekitar Reaktor Dehypoing (RE-202)

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)
	Aliran17	Aliran 18
NaCl	499,877	514,851
MgCl ₂	12,157	12,157
Na ₂ SO ₄	0,001	0,001
KCl	6,341	6,341
CaCl ₂	0,399	0,399
CaSO ₄	0,003	0,003
KBr	0,022	0,022
SrCl ₂	0,000	0,000
NaF	0,113	0,113
Na ₂ Cr ₂ O ₇	131,522	131,522
HCl	8,743	8,743
NaClO ₃	10.933,449	10.947,084
NaClO	28,608	0,000
H ₂ O	26.287,520	26.287,520
Total	37.908,756	37.908,756

4. *Evaporator (EV-301)*

Fungsi : Menguapkan air supaya fraksi massa NaClO_3 mendekati titik jenuhnya sebesar 1999,8 gpl



Gambar A.4 Aliran Massa di sekitar *Evaporator (EV-301)*

Dimana :

F_{17} = Umpan masuk *evaporator* yang berasal dari *Reaktor Dehypoing (RE-202)*

F_{18} = Uap air keluaran *evaporator*

F_{19} = Aliran massa keluaran *evaporator* menuju *Crystallizer (CR-301)*

Neraca massa total :

$$F_{18} = F_{19} + F_{20}$$

Kelarutan NaClO_3 dalam air pada suhu 80°C = 1.999,8 gpl (Perry, 1999)

Penguapan air dilakukan sampai batas kejenuhan NaClO_3 . Jika melewati titik jenuh kelarutannya maka NaClO_3 akan menjadi kristal di dalam *evaporator*.

Neraca Komponen NaClO_3

Diinginkan kadar NaClO_3 output sebesar 1900 gpl

Dibuat asumsi awal untuk jumlah air yang diuapkan. Kemudian dengan menggunakan fasilitas goal seek Microsoft excel didapatkan :

$$\text{Kadar NaClO}_3 \text{ output} = \frac{\text{massa NaClO}_3}{\text{massa air output}} \times 100\%$$

$$= \frac{10.947,084}{4.958,945} \times 1000 = 1900 \text{ gpl}$$

Maka Jumlah air yang harus diuapkan evaporator sebesar

$$\begin{aligned} F_{M19} &= F_{M18} - F_{M20} \\ &= 26.287,520 - 4.958,945 \\ &= 21.328,575 \text{ kg} \end{aligned}$$

Tabel A.5 Neraca Massa di sekitar *Evaporator (EV-301)*

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)	
	Aliran 18	Aliran 19	Aliran 20
NaCl	514,851		514,851
MgCl ₂	12,157		12,157
Na ₂ SO ₄	0,001		0,001
KCl	6,341		6,341
CaCl ₂	0,399		0,399
CaSO ₄	0,003		0,003
KBr	0,022		0,022
SrCl ₂	0,000		0,000
NaF	0,113		0,113
Na ₂ Cr ₂ O ₇	131,522		131,522
HCl	8,743		8,743
NaClO ₃ (nk)	10.947,084		10.947,084
H ₂ O	26.287,520	21.328,575	4.958,945
Total	37.908,756	21.328,575	16.580,181
		37.908,756	

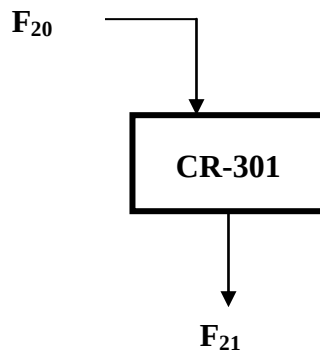
5. *Crystallizer (CR-301)*

Fungsi : Mengkristalisasikan sodium klorat dari larutan induknya, sehingga bisa

dengan mudah dipurifikasi.

Asumsi : Efisiensi kristalisasi sebesar 34% (Mc. Ketta 7 : 168)

Gambar :



Gambar A.5 Aliran Panas di sekitar *Crystallizer (CR-301)*

Dimana :

F_{20} = Umpan masuk kristalizer yang berasal dari *Evaporator (EV-301)*.

F_{21} = Produk keluaran kristalizer yang mengandung kristal sodium klorat.

Neraca Massa Total

$$F_{20} = F_{21}$$

Massa H_2O input = 4.958,945 kg/jam

Suhu masuk kristallizer = $80^{\circ}C$

Suhu keluar *Crystallizer* = $31^{\circ}C$ (Mc. Ketta 7)

Banyaknya kristal $NaClO_3$ yang terbentuk :

$$C = F \times \left(\frac{\% \text{ wt zat} - \% \text{ kelaru tan}}{1 - \% \text{ kelaru tan}} \right) \quad (\text{Chopey, N. :108})$$

Dimana :

C = berat kristal yang terbentuk

F = berat larutan

% wt = % berat zat dalam larutan

$$\begin{aligned}
 \text{Massa NaClO}_3 &= 10.947,084 \text{ kg/jam} \\
 \text{Massa total} &= 16.580,181 \text{ kg/jam} \\
 \% \text{ wt} &= \frac{10.947,084 \text{ kg/jam}}{16.580,181 \text{ kg/jam}} = 0,66
 \end{aligned}$$

Kelarutan NaClO₃ pada suhu 31°C = 125,81 gram/100 gram air

$$\% \text{ Kelarutan NaClO}_3 = \frac{125,81}{100 + 125,81} = 0,557$$

$$C = 16.580,181 \times \left(\frac{0,66 - 0,557}{1 - 0,557} \right) = 3.803,082 \text{ kg/jam}$$

Jumlah NaClO₃ terkristalkan = 3.860,082 kg/jam

Dan sisanya tidak terkristalkan sebanyak

$$\begin{aligned}
 \text{NaClO}_{3(\text{nk})} &= 10.947,084 \text{ kg/jam} - 3.860,086 \text{ kg/jam} \\
 &= 7.086,999 \text{ kg/jam}
 \end{aligned}$$

Tabel A.5 Neraca Massa di sekitar *Crystallizer* (CR-301)

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)
	Aliran 20	Aliran 21
NaCl	514,851	514,851
MgCl ₂	12,157	12,157
Na ₂ SO ₄	0,001	0,001
KCl	6,341	6,341
CaCl ₂	0,399	0,399
CaSO ₄	0,003	0,003
KBr	0,022	0,022
SrCl ₂	0,000	0,000
NaF	0,113	0,113
Na ₂ Cr ₂ O ₇	131,522	131,522
HCl	8,743	8,743
NaClO ₃ (k)	0,000	3.860,086
NaClO ₃ (nk)	10.947,084	7.086,999
H ₂ O	4.958,945	4.958,945
Total	16.580,181	16.580,181

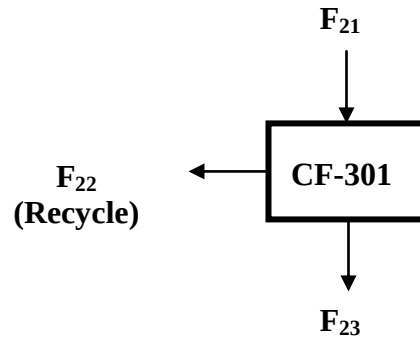
6. Centrifuge (CF-301)

Fungsi : Memisahkan kristal NaClO_3 dari larutan induknya

Asumsi : Kristal NaClO_3 akan keluar dengan konsentrasi 10 % *moisture*

(Saeman, 1912)

Gambar :



Gambar A.6 Aliran massa di sekitar *Centrifuge (CF-301)*

Dimana :

F_{21} = Umpan masuk centrifuge yang berasal dari *Crystallizer (CR-301)*

(kg/jam)

F_{22} = Aliran Recycle yang dikembalikan ke *Solution Tank (ST-102)* (kg/jam)

F_{23} = Produk keluaran centrifuge yang selanjutnya akan dibawa ke *Rotary*

Dryer (RD-301) (kg/jam)

Neraca Massa Total

$$F_{21} = F_{22} + F_{23}$$

Input : Aliran 21

Komponen	Input (F_{21}) kg/jam	Fraksi Massa
NaCl	514,851	0,031052179512
MgCl_2	12,157	0,000733210198
Na_2SO_4	0,001	0,000000074400
KCl	6,341	0,000382420369
CaCl_2	0,399	0,000024092636
CaSO_4	0,003	0,000000200618
KBr	0,022	0,000001320054
SrCl_2	0,000	0,000000000713
NaF	0,113	0,000006809923
$\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	131,522	0,007932452793
HCl	8,743	0,000527337162
NaClO_3 (k)	3.860,086	0,232813237662

NaClO ₃ (nk)	7.086,999	0,427437963641
H ₂ O	4.958,945	0,299088700319
Total	16.580,181	1,000000000000

Kristal NaClO₃ akan keluar dengan konsentrasi 10 % moisture (Saeman, 1912), sehingga

$$\text{NaClO}_3 (k) = 3.860,086 \text{ kg/jam}$$

$$\text{H}_2\text{O} = \frac{10}{100} \times 3.860,086 = 386,009 \text{ kg/jam}$$

Air yang terbawa kristal juga mengandung zat terlarut yang konsentrasinya sama dengan aliran 21.

Tabel A.6 Neraca Massa di sekitar *Centrifuge* (CF-301)

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)	
	Aliran 21	Aliran 23	Aliran 22
NaCl	514,851	11,986	502,864
MgCl ₂	12,157	0,283	11,874
Na ₂ SO ₄	0,001	0,000	0,001
KCl	6,341	0,148	6,193
CaCl ₂	0,399	0,009	0,390
CaSO ₄	0,003	0,000	0,003
KBr	0,022	0,001	0,021
SrCl ₂	0,000	0,000	0,000
NaF	0,113	0,003	0,110
Na ₂ Cr ₂ O ₇	131,522	3,062	128,460
HCl	8,743	0,204	8,540
NaClO ₃ (k)	3.860,086	3.860,086	0,000
NaClO ₃ (nk)	7.086,999	0,000	7.086,999
H ₂ O	4.958,945	386,009	4.572,936
Total	16.580,181	4.261,789	12.318,392
		16.580,181	

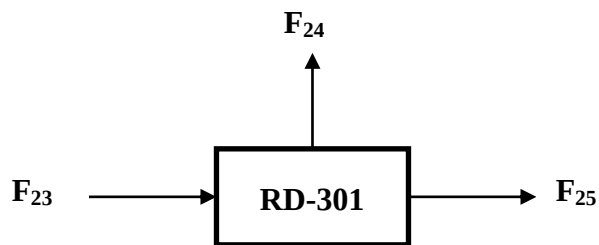
7. Rotary Dryer (RD-301)

Fungsi : Menghilangkan kadar air dan HCl produk

Asumsi: Tidak ada padatan yang menguap. Kandungan air sebelum masuk rotary dryer untuk kristal adalah 10 % w/w (Tabel 9.10 Walas, 1988 : 257).

Produk akhir diizinkan mengandung air sebesar 0,1 %

Gambar :



Gambar A.7 Aliran Massa di sekitar *Centrifuge (CF-301)*

Dimana :

F_{23} = Umpan masuk *Rotary Dryer* yang berasal dari *Centrifuge (CF-301)*
(kg/jam)

F_{24} = Uap air yang bercampur dengan udara panas yang berasal dari rotary dryer
(kg/jam)

F_{25} = Produk keluaran rotary dryer (kg/jam)

Neraca Massa Total

$$F_{23} = F_{24} + F_{25}$$

$$\text{Kandungan air } F_{23} = 386,009 \text{ kg}$$

$$\text{Kadar air } F_{23} = \frac{386,009 \text{ kg / jam}}{4.261,789 \text{ kg / jam}} \times 100\% = 9,057 \%$$

Di dalam rotary dryer ini, air dan HCl menguap.

Neraca massa komponen

➤ HCl

$$F_{23} \cdot X_{K23} = F_{24} \cdot X_{K24}$$

$$X_{K23} = 0,000047763 \text{ (sangat kecil)}$$

Asumsi: Komponen F_{24} mengandung 100% air, maka massa H_2O yang diuapkan didapatkan dengan cara *trial and error* menggunakan *Goal Seek Microsoft Excell*, dengan *variable* konstan berupa kadar air output rotary dryer sebesar 0,1%, sehingga didapatkan massa air yang harus diuapkan sebesar 382,127 kg/jam

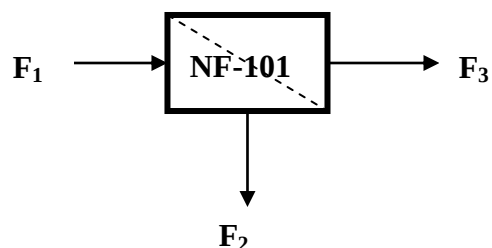
Tabel A.7 Neraca Massa di sekitar Rotary Dryer (RD-301)

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)	
	Aliran 23	Aliran 24	Aliran 25
NaCl	11,986		11,986
MgCl ₂	0,283		0,283
Na ₂ SO ₄	0,000		0,000
KCl	0,148		0,148
CaCl ₂	0,009		0,009
CaSO ₄	0,000		0,000
KBr	0,001		0,001
SrCl ₂	0,000		0,000
NaF	0,003		0,003
Na ₂ Cr ₂ O ₇	3,062		3,062
HCl	0,204	0,204	0,000
NaClO ₃ (k)	3.860,086		3.860,086
H ₂ O	386,009	382,127	3,882
Total	4.261,789	382,330	3.879,459
		4.261,789	

8. Nanofiltration Membran

Fungsi : Menghilangkan kation dan anion air laut selain NaCl

Gambar :



Gambar A.8 Aliran Massa di sekitar *Nanofiltration Membrane Stage 1th (NF-101-1)*

Dimana :

F_1 = Aliran masuk *Nanofiltration Membrane Stage 1th* yang berasal dari *Ultrafiltration Membrane (UF-101)* (kg/jam)

F_2 = Aliran output membran (*concentrate*) yang mengalami rejection (kg/jam)

F_3 = Aliran output membran yang lolos dari nanofiltration (permeate) (kg/jam)

➤ **Neraca Massa Total**

$$F_1 = F_2 + F_3$$

Tipe membran : *Dow Filmtec NF270-4040 Nanofiltration Membrane*

Specifications:	
Tipe membran	Polyamide Thin-Film Composite (TFC)
Suhu operasi maksimum	113°F (45°C)
Tekanan operasi maksimum	600 psi (41 bar)
Laju alir umpan maksimum	16,0 gpm (3,6 m ³ /hr)
Rentang pH, Operasi kontinyu	2-11
Rentang pH, pembersihan singkat	1-12 (30min)
Silt Density Index umpan maksimum	5 SDI
Batas toleransi Klorin bebas	<0.1 ppm**
Laju alir permeate	2,500 GPD (9.5 m ³ /day)*
Rejeksi stabil garam	>97.0%
MWCO (Molecular Weight Cut Off)	200 Dalton (Baker, 2004)
% Rejection	R=(0,7MW-3,5) (Baker, 2004)
Thickness	150 µm (Wagner, 2001)
Thin Film	1 µm (Wagner, 2001)
Diameter	4 Inches
Panjang	40 Inches
Tekanan aplikasi	70 psi (4,8 bar)
Luas permukaan aktif	82 ft ² (7,6 m ²)
Harga	US\$439.95

(<http://www.home-water-purifiers-and-filters.com>)

Komposisi Air Laut

Komponen	Konsentrasi (mol/kg)	Berat Molekul (Kg/kmol)	Berat(g/kg air laut)	% Rejection
NaCl	0,418	58,443	24,458	8

MgCl ₂	0,053	95,211	5,027	63,148
Na ₂ SO ₄	0,024	142,040	3,421	95,928
KCl	0,009	74,551	0,698	48,686
CaCl ₂	0,006	110,984	0,686	74,189
CaSO ₄	0,004	136,138	0,560	91,797
KBr	0,001	119,013	0,100	79,809
SrCl ₂	0,000	158,526	0,014	95,000
NaF	0,000	41,990	0,003	25,893
Total			34,968	

A.G Dickson & C.Goyet (1994)

➤ Percent Recovery

$$R = \frac{Q_p}{Q_f} \quad (\text{Pirnie, 2005})$$

Keterangan :

R = recovery membran (%)

Q_p = aliran filtrate yang melewati membran (kg/jam)

Q_f = aliran umpan masuk membran (kg/jam)

$$Q_f = Q_c + Q_p \quad (\text{Pirnie, 2005})$$

Q_f = aliran umpan masuk membran (kg/jam)

Q_c = aliran konsentrat keluar dari membran (kg/jam)

Q_p = aliran filtrate (permeate) keluar dari membran (kg/jam)

% Recovery = 50 % (<http://www.home-water-purifiers-and-filters.com/products.php>)

$$Q_f = 3,6 \text{ m}^3/\text{jam} = 3.672 \text{ kg/jam}$$

➤ Percent Rejection

$$R = 1 - \left(\frac{C_p}{C_f} \right) \times 100\%$$

Keterangan :

R = %Rejection

C_p = konsentrasi zat terlarut di dalam *permeate*

C_f = konsentrasi zat terlarut di dalam *feed*

TDS (*Total Dissolved Solids*) dalam air laut = 34,968 gram/kg air laut

➤ **Neraca massa Stage 1 untuk 1 membran**

$$Q_{f1} = 3.672 \text{ kg/jam}$$

$$Q_{p1} = 1.836 \text{ kg/jam}$$

$$Q_{c1} = 1.836 \text{ kg/jam}$$

Komponen	C _f	%Rejection	C _c	C _p	%X _{permeate}
NaCl	89,809	8,000	7,185	82,625	4,433
MgCl ₂	18,460	63,148	11,657	6,803	0,365
Na ₂ SO ₄	12,562	95,928	12,050	0,512	0,027
KCl	2,561	48,686	1,247	1,314	0,071
CaCl ₂	2,521	74,189	1,870	0,651	0,035
CaSO ₄	2,057	91,797	1,888	0,169	0,009
KBr	0,369	79,809	0,294	0,074	0,004
SrCl ₂	0,053	95,000	0,050	0,003	0,000
NaF	0,010	25,893	0,003	0,008	0,000
H ₂ O	3.543,598		1.771,799	1.771,799	95,056
Total	3.672,000		1.808,044	1.863,956	100,000

$$\begin{aligned} \text{TDS}_p &= \frac{\text{Total partikel kg / jam}}{1.863,956 \text{ kg / jam}} \times 1000 \text{ gram / kg} \\ &= 49,442 \text{ gram/kg permeate} \end{aligned}$$

$$\text{TDS}_f = 34,9680 \text{ gram/kg}$$

$$\text{TDS}_c = 20,0464 \text{ gram/kg}$$

➤ **Neraca Massa Stage 2 Untuk 1 membran**

$$Q_{f2} = 3.672 \text{ kg}$$

$$R = 50 \%$$

Komponen	C _f	%Rejection	C _c	C _p	%X _{permeate}
NaCl	162,771	8,000	13,022	149,749	7,875
MgCl ₂	13,402	63,148	8,463	4,939	0,260
Na ₂ SO ₄	1,008	95,928	0,967	0,041	0,002
KCl	2,589	48,686	1,261	1,329	0,070
CaCl ₂	1,282	74,189	0,951	0,331	0,017
CaSO ₄	0,332	91,797	0,305	0,027	0,001
KBr	0,147	79,809	0,117	0,030	0,002
SrCl ₂	0,005	95,000	0,005	0,000	0,000
NaF	0,015	25,893	0,004	0,011	0,001
H ₂ O	3.490,449		1.745,225	1.745,225	91,773

Total	3.672,000		1.770,318	1.901,682	100,000
-------	-----------	--	-----------	-----------	---------

$$\text{TDS}_{\text{permeate}} = 82,2730 \text{ gram/kg}$$

$$\text{TDS}_f = 49,4419 \text{ gram/kg}$$

$$\text{TDS}_c = 14,1747 \text{ gram/kg}$$

➤ **Neraca Massa Stage 3 Untuk 1 membran**

$$Q_{f3} = 3.672 \text{ kg}$$

$$R = 50 \%$$

Komponen	C_f	%Rejection	C_c	C_p	%X _{permeate}
NaCl	289,154	8,000	23,132	266,022	13,600
MgCl ₂	9,536	63,148	6,022	3,514	0,180
Na ₂ SO ₄	0,079	95,928	0,076	0,003	0,000
KCl	2,565	48,686	1,249	1,316	0,067
CaCl ₂	0,639	74,189	0,474	0,165	0,008
CaSO ₄	0,053	91,797	0,048	0,004	0,000
KBr	0,057	79,809	0,046	0,012	0,001
SrCl ₂	0,001	95,000	0,000	0,000	0,000
NaF	0,022	25,893	0,006	0,016	0,001
H ₂ O	3.369,894		1.684,947	1.684,947	86,142
Total	3.672,000		1.716,000	1.956,000	100,000

$$\text{TDS}_{\text{permeate}} = 138,575 \text{ gram/kg permeate}$$

$$\text{TDS}_f = 82,2730 \text{ gram/kg permeate}$$

$$\text{TDS}_c = 18,0964 \text{ gram/kg permeate}$$

➤ **Menghitung kadar Na₂SO₄ permeate**

Menghitung Kadar Logam Permeate

$$\text{Na}_2\text{SO}_4 = \frac{0,003 \text{ kg / jam}}{1956 \text{ kg / jam}} \times 1.000.000 \text{ ppm}$$

$$= 1,650 \text{ ppm (sudah memenuhi standar <25 ppm)}$$

➤ **Menghitung Kadar Logam Permeate Stage 3 Untuk 1 membran**

Komponen	m (kg)	BM	Jumlah mol (kgmol)	BM ion	Berat ion (kg)
MgCl ₂ (Mg ²⁺)	3,514	95,211	3,691E-02	24,310	0,897

Na ₂ SO ₄ (Na ⁺)	0,003	142,040	2,272E-05	23,000	0,001
KCl (K ⁺)	1,316	74,551	1,766E-02	39,100	0,690
CaCl ₂ (Ca ²⁺)	0,165	110,984	1,486E-03	40,000	0,059
CaSO ₄ (Ca ²⁺)	0,004	136,138	3,173E-05	40,000	0,001
KBr (K ⁺)	0,012	119,013	9,704E-05	39,100	0,004
SrCl ₂ (Sr ²⁺)	0,000	158,526	1,589E-07	87,620	0,000
NaF (Na ⁺)	0,016	41,990	3,866E-04	23,000	0,009
Total	5,031				1,662

$$\begin{aligned}\text{Total ion logam} &= \frac{1,662 \text{ kg}}{1.956 \text{ kg}} \times 1.000.000 \text{ ppm} \\ &= 849,515 \text{ ppm (belum memenuhi syarat } < 100 \text{ ppm)}\end{aligned}$$

Kadar ion logam masih di atas 100 ppm (Syarat kadar ion di dalam reaktor elektrolisis), maka harus dilakukan filtrasi membrane lebih lanjut dengan menambah nanofiltrasi membrane sampai stage 4.

➤ Neraca Massa Stage 4 Untuk 1 membran

$$Q_{f4} = 3.672 \text{ kg}$$

$$R = 50 \%$$

Komponen	C _f	%Rejection	C _c	C _p	%X _{permeate}
NaCl	499,403	8,000	39,952	459,451	24,160
MgCl ₂	6,598	63,148	4,166	2,431	1,279E-01
Na ₂ SO ₄	6,058E-03	95,928	5,812E-03	2,467E-04	1,297E-05
KCl	2,471	48,686	1,203	1,268	6,668E-02
CaCl ₂	0,310	74,189	0,230	7,989E-02	4,201E-03
CaSO ₄	0,008	91,797	7,444E-03	6,653E-04	3,498E-05
KBr	0,022	79,809	1,730E-02	4,377E-03	2,302E-04
SrCl ₂	0,000	95,000	4,492E-05	2,364E-06	1,243E-07
NaF	0,030	25,893	7,890E-03	2,258E-02	1,187E-03
H ₂ O	3.163,152		1.581,576	1.581,576	83,167
Total	3.672,000		1.627,166	2.044,834	107,528

$$\text{TDS}_{\text{permeate}} = 226,551 \text{ gram/kg permeate}$$

$$\text{TDS}_f = 138,5752 \text{ gram/kg permeate}$$

$$\text{TDS}_c = 28,0179 \text{ gram/kg permeate}$$

LAMPIRAN A. NERACA MASSA

Prarancangan Pabrik Sodium Klorat dari Sodium Klorida dengan Kapasitas 30.000 Ton/Tahun

➤ **Menghitung kadar Na₂SO₄ permeate**

Na₂SO₄ = 0,121 ppm (sudah memenuhi standar <25 ppm)

➤ **Menghitung Kadar Logam Permeate**

Komponen	m (kg)	BM	Jumlah mol (kgmol)	BM ion	Berat ion (kg)
MgCl ₂ (Mg ²⁺)	2,431	95,211	2,554E-02	24,310	0,621
Na ₂ SO ₄ (Na ⁺)	0,000	142,040	1,737E-06	23,000	0,000
KCl (K ⁺)	1,268	74,551	1,701E-02	39,100	0,665
CaCl ₂ (Ca ²⁺)	0,080	110,984	7,199E-04	40,000	0,029
CaSO ₄ (Ca ²⁺)	0,001	136,138	4,887E-06	40,000	0,000
KBr (K ⁺)	0,004	119,013	3,678E-05	39,100	0,001
SrCl ₂ (Sr ²⁺)	0,000	158,526	1,491E-08	87,620	0,000
NaF (Na ⁺)	0,023	41,990	5,378E-04	23,000	0,012
Total	3,807				1,329

Total ion = 97,071 ppm (sudah memenuhi syarat <100 ppm)

Tidak perlu penambahan stage nanofiltration membran.

➤ **Menghitung Jumlah Modul Membran**

Jumlah NaCl yang dibutuhkan keluaran stage 4 = 2.084,397 kg

NaCl yang dihasilkan 1 modul membran pada stage 4 = 459,451 kg

Stage 4

Jumlah modul membran stage 4 = $\frac{2.084,397 \text{ kg}}{459,451 \text{ kg/modul}} = 4,537$ buah

Dibulatkan menjadi = 5 buah modul

1 modul membran stage 4 memiliki

Q_p = 2.044,834 kg

Q_c = 1.627,166 kg

Q_f = 3.672,000 kg

Aliran Total Stage 4

Q_p stage 4 = 5 x 2.044,834 = 10.224,171 kg

$$Q_c \text{ stage 4} = 5 \times 1.627,166 = 8.135,829 \quad \text{kg}$$

$$Q_f \text{ stage 4} = 5 \times 3.672,000 = 18.360,000 \quad \text{kg}$$

Stage 3

$$Q_f \text{ stage 4} = Q_p \text{ stage 3} = 18.360,000 \quad \text{kg}$$

1 modul membran stage 3 memiliki

$$Q_p = 1.956,000 \quad \text{kg}$$

$$Q_c = 1.716,000 \quad \text{kg}$$

$$Q_f = 3.672,000 \quad \text{kg}$$

$$\text{Jumlah modul membran stage 3} = \frac{18.360 \text{ kg}}{1.956 \text{ kg / modul}} = 9,387 \quad \text{modul}$$

Dibulatkan menjadi = 10 modul

Aliran Total Stage 3

$$Q_p \text{ stage 3} = 10 \times 1.956,000 = 19.559,998 \quad \text{kg}$$

$$Q_c \text{ stage 3} = 10 \times 1.716,000 = 17.160,002 \quad \text{kg}$$

$$Q_f \text{ stage 3} = 10 \times 3.672,000 = 36.720,000 \quad \text{kg}$$

Aliran Total Stage 2

$$Q_f \text{ stage 3} = Q_p \text{ stage 2} = 36.720,000 \quad \text{kg}$$

1 modul membran stage 2 memiliki

$$Q_p = 1.901,682 \quad \text{kg}$$

$$Q_c = 1.770,318 \quad \text{kg}$$

$$Q_f = 3.672,000 \quad \text{kg}$$

$$\text{Jumlah modul membran stage 2} = \frac{36.720 \text{ kg}}{1.901,682 \text{ kg / modul}} = 19,309 \quad \text{modul}$$

Dibulatkan menjadi = 20 modul

Aliran Total Stage 2

LAMPIRAN A.NERACA MASSA

Prarancangan Pabrik Sodium Klorat dari Sodium Klorida dengan Kapasitas 30.000 Ton/Tahun

$$\begin{aligned} Q_p \text{ stage 2} &= 38.033,633 \text{ kg} \\ Q_c \text{ stage 2} &= 35.406,367 \text{ kg} \\ Q_f \text{ stage 2} &= 73.440,000 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$Q_f \text{ stage 2} = Q_p \text{ stage 1} = 73.440 \text{ kg}$$

1 modul membran stage 1 memiliki

$$\begin{aligned} Q_p &= 1.863,956 \text{ kg} \\ Q_c &= 1.808,044 \text{ kg} \\ Q_f &= 3.672,000 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\text{Jumlah modul membran stage 1} = \frac{73.440 \text{ kg}}{1.863,956 \text{ kg/modul}} = 39,400 \text{ modul}$$

Dibulatkan menjadi = 40 modul

Aliran Total Stage 1

$$\begin{aligned} Q_p \text{ stage 1} &= 40 \times 1.863,956 = 74.558,257 \text{ kg} \\ Q_c \text{ stage 1} &= 40 \times 1.808,044 = 72.321,743 \text{ kg} \\ Q_f \text{ stage 1} &= 40 \times 3.672,000 = 146.880,000 \text{ kg} \end{aligned}$$

Jumlah modul setiap stage

$$\text{Stage 1} = 40 \text{ buah}$$

$$\text{Stage 2} = 20 \text{ buah}$$

$$\text{Stage 3} = 10 \text{ buah}$$

$$\text{Stage 4} = 5 \text{ buah}$$

$$\text{Jumlah modul Total} = 75 \text{ buah}$$

➤ Neraca Massa Nanofiltration Membrane Stage 1

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)	
	Aliran 1	Aliran 2	Aliran 3
NaCl	3.592,380	287,390	3.304,989
MgCl ₂	738,386	466,274	272,112
Na ₂ SO ₄	502,480	482,018	20,463

LAMPIRAN A. NERACA MASSA

Prarancangan Pabrik Sodium Klorat dari Sodium Klorida dengan Kapasitas 30.000 Ton/Tahun

KCl	102,449	49,878	52,571
CaCl ₂	100,824	74,800	26,024
CaSO ₄	82,283	75,533	6,750
KBr	14,754	11,775	2,979
SrCl ₂	2,119	2,013	0,106
NaF	0,419	0,109	0,311
H ₂ O	141.743,905	70.871,953	70.871,953
Total	146.880,000	72.321,743	74.558,257
		146.880,000	

➤ **Neraca Massa Stage 2**

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)	
	Aliran 3	Aliran 4	Aliran 5
NaCl	3.304,989	260,434	2.994,986
MgCl ₂	272,112	169,255	98,776
Na ₂ SO ₄	20,463	19,335	0,821
KCl	52,571	25,211	26,572
CaCl ₂	26,024	19,017	6,616
CaSO ₄	6,750	6,103	0,545
KBr	2,979	2,342	0,592
SrCl ₂	0,106	0,099	0,005
NaF	0,311	0,079	0,227
H ₂ O	70.871,953	34.904,492	34.904,492
Total	73.440,000	35.406,367	38.033,633
		73.440,000	

➤ **Neraca Massa Stage 3**

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)	
	Aliran 5	Aliran 6	Aliran 7
NaCl	2.891,543	231,323	2.660,220
MgCl ₂	95,364	60,220	35,144
Na ₂ SO ₄	0,792	0,760	0,032
KCl	25,654	12,490	13,164
CaCl ₂	6,388	4,739	1,649
CaSO ₄	0,527	0,483	0,043
KBr	0,572	0,456	0,115
SrCl ₂	0,005	0,005	0,000

NaF	0,219	0,057	0,162
H ₂ O	33.698,936	16.849,468	16.849,468
Total	36.720,000	17.160,002	19.559,998
		36.720,000	

➤ **Neraca Massa Stage 4**

Komponen	Input (kg/jam)	Output (kg/jam)	
	Aliran 7	Aliran 8	Aliran 9
NaCl	2.497,016	199,761	2.297,255
MgCl ₂	32,988	20,831	12,157
Na ₂ SO ₄	0,030	0,029	0,001
KCl	12,356	6,016	6,341
CaCl ₂	1,548	1,148	0,399
CaSO ₄	0,041	0,037	0,003
KBr	0,108	0,087	0,022
SrCl ₂	0,000	0,000	0,000
NaF	0,152	0,039	0,113
H ₂ O	15.815,760	7.907,880	7.907,880
Total	18.360,000	8.135,829	10.224,171
		18.360,000	

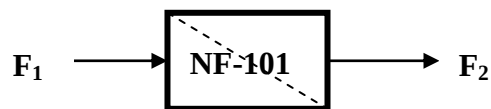
Neraca Massa 1 Sistem Nanofiltration Membrane (NF-101)

Komponen	Input	Output	
	1 (umpan)	2 (total Concentrate)	3 (stage 4 Permeate)
NaCl	3.592,380	978,909	2.297,255
MgCl ₂	738,386	716,581	12,157
Na ₂ SO ₄	502,480	502,142	0,001
KCl	102,449	93,595	6,341
CaCl ₂	100,824	99,705	0,399
CaSO ₄	82,283	82,157	0,003
KBr	14,754	14,660	0,022
SrCl ₂	2,119	2,117	0,000
NaF	0,419	0,284	0,113
H ₂ O	141.743,905	130.533,793	7.907,880
Total	146.880,000	133.023,941	10.224,171
		146.880,000	

9. Ultrafiltration Membrane (UF-101)

Fungsi : -Menurunkan Silt Density Index air laut dari 30 SDI menjadi < 5 SDI

- Menghilangkan pengotor air laut yang berupa partikel-partikel padatan terlarut yang yang bisa meningkatkan Fouling factor di Nanofiltration Membran (NF-101)



Gambar A.9 Aliran Massa di sekitar *Ultrafiltration Membrane (UF-101)*

Tipe membrane : DOW Ultrafiltration SFX-2880

Konfigurasi : Hollow Fiber

Jenis membrane : H-PVDF

Filtrate Flux @ 25°C : 40-120 L/m²/hr

Luas permukaan modul : 77 m²

<http://www.dowwaterandprocess.com/products/uf/index.htm> 2 Nov 2010

Diambil aliran filtrat sebesar 100 L/m²/hr = 102 kg/m²/hr

Jumlah filtrat yang dibutuhkan = 146.880,000 kg/jam

Jumlah filtrate setiap modul = 77 m² x 102 kg/m²/hr = 7.854,000 kg/jam

Jumlah modul yang dibutuhkan = $\frac{146.880}{7.854} = 18,701 \text{ modul} = 19 \text{ modul}$