

TKP4105/TKP4110
Air separation by membranes
Rapport

Audun F. Buene Elise Landsem
audunfor@stud.ntnu.no elisel@stud.ntnu.no

Gruppe B19
Veileder: Karen Nessler Seglem
Laboratorie: K4-317
Utført: 12. september 2012

Sammendrag

I dette forsøket ble syntetisk luft separert ved hjelp av oksygenselektive membraner. Forskjellige konfigurasjoner av fire membranmoduler ble testet, og forholdet mellom renhet og *recovery*, og mellom renhet og *cut rate* ble undersøkt. Forholdet mellom renhet og *recovery* ble funnet til å være tilnærmet negativt lineært. Det ble også utarbeidet to konfigurasjoner med den hensikt å optimalisere renheten av henholdsvis nitrogen og oksygen. For nitrogen ble det oppnådd en renhet på 99,1 % og for oksygen på 39,3 %.

Innhold

1 Innledning	3
2 Teori	4
2.1 Membraner	4
2.2 Separasjon	5
3 Eksperimentelt	6
3.1 Fremgangsmåte	6
3.2 Apparatur	7
4 Resultater	8
4.1 Konfigurasjon 1 - 4	8
4.2 Optimaliserte konfigurasjoner	10
4.2.1 Konfigurasjon 5	10
4.2.2 Konfigurasjon 6	12
5 Diskusjon	13
5.1 <i>Cut rate</i>	13
5.2 Konfigurasjon 2, 3 og 4	13
5.3 Renhet vs. <i>recovery</i> av N ₂	14
5.4 Renhet av O ₂	15
5.5 Feilkilder	16
5.6 Forbedring av separasjonen	16
6 Konklusjon	17
A Eksempelutregning fra eksperimentelle data	19
B Kjemikaliekort	21
C Konfigurasjonsoversikter	22
D Excelark/notater fra labdagen	29

1 Innledning

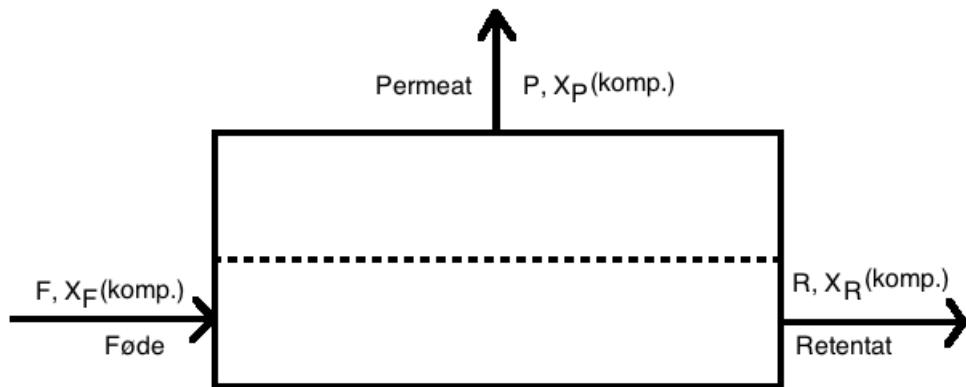
Dette eksperimentet ble utført som en del av faget TKP4105 *Separasjonsteknikk* ved NTNU, høsten 2012. Hensikten var å studere hvilke parametre som påvirker separasjonen av syntetisk luft, ved ulike konfigurasjoner av oksygenselektive *hull-fiber*-membranmoduler av polysulfon.

Etter at fire gitte konfigurasjoner var testet ble det i tillegg gjort et forsøk på å predikere to optimale konfigurasjoner for å oppnå høy renhet av henholdsvis nitrogengass i retentatstrømmen og oksygengass i permeatstrømmen.

2 Teori

2.1 Membraner

Membraner kan sees på som et kjemikaliaspesifikt filter. I dette forsøket skal det brukes en membran som separerer oksygen og nitrogen fra en luftstrøm. I industrien brukes disse membranene til å oppnå høy renhet av nitrogen. De hule membranene som benyttes pakkes i såkalte *hullfibermoduler*, som er den mest effektive pakke-måten for membraner med tanke på membranareal per volum. Membranmaterialet er polymeren polysulfon, og måten membranen er fremstilt på gjør den til en tett membran. En skjematiske skisse av en membran er vist i Figur 2.1.



Figur 2.1: Prinsippskisse av en membran med navngitte strømmer og fraksjoner. F er føde, P permeat og R retentat. Disse har benevning [mL/s]. Mofraksjoner er oppgitt som x med tilhørende indekser av hvilken strøm de beskriver.

Strømmen som skal separeres kalles for fødestrøm. Strømmen av gass som har gått gjennom membranen kalles for permeat, mens strømmen som ikke går gjennom membranen kalles retentat.

2.2 Separasjon

Separasjonen i membranen skjer som følge av oksygen og nitrogens forskjellige permeabiliteter i membranmaterialet. Permeabiliteten for en gass, P_i , gjennom en membran kan bestemmes fra:

$$P_i = D_i \cdot S_i \quad (2.1)$$

hvor D_i er diffusiviteten av gassen og S_i er løseligheten av gassen i membranmaterialet, polysulfon.

Membranen er O₂-selektiv, som betyr at oksygen har høyere permeabilitet enn nitrogen i den bestemte membranen. Selektiviteten, α , kan beregnes som et forholdstall mellom de aktuelle gassenes permeabiliteter:

$$\alpha = \frac{P_{O_2}}{P_{N_2}} \quad (2.2)$$

For at luften skal separeres over membranen, er det nødvendig med en viss drivkraft. Denne drivkraften kommer av at gassmolekylene har høyere partialtrykk på retentatsiden enn på permeatsiden. Denne forskjellen i partialtrykk kan økes ved å øke trykket på retentatsiden, noe som kan oppnås ved å delvis stenge ventiler i retentatstrømmen. Dette vil føre til at en større del av fødestrømmen passerer membranen. Fraksjonen av fødestrømmen som passerer membranen kalles for *cut rate*, θ og er gitt ved følgende uttrykk:

$$\theta = \frac{P}{F} \quad (2.3)$$

hvor P og F er henholdsvis strømningsraten til permeat og fødestrøm.

For å kunne si noe om hvor effektiv en membran er under gitte forutsetninger er *recovery* definert. Dette er et mål på hvor mye av ønsket komponent som befinner seg i produktstrømmen i forhold til i fødestrømmen.

$$R_i = \frac{\text{molfraksjon av komp. } i \text{ i produktstrømmen} \cdot \text{volumstrøm produktstrøm}}{\text{molfraksjon av komp. } i \text{ i fødestrømmen} \cdot \text{volumstrøm fødestrøm}}$$

For å kunne regne på et membransystem er det nødvendig å sette opp en total massebalanse.

$$F = P + R \quad (2.4)$$

Ved å se på kun én av komponentene, for eksempel nitrogen, kan man sette opp enda en massebalanse:

$$F \cdot x_F(N_2) = P \cdot x_P(N_2) + R \cdot x_R(N_2) \quad (2.5)$$

3 Eksperimentelt

3.1 Fremgangsmåte

Forsøket ble gjennomført på basis av beskrivelsen i utdelt dokument, *Air separation by membranes*^[1]. Kjemikaliekort og risikovurdering er vedlagt i Appendiks B. For hver konfigurasjon ble følgende fremgangsmåte fulgt:

Først ble det sjekket at forbindelsen mellom gassylinderen og oppsettet var tett, før ventilen ble åpnet. Deretter ble hovedfødeventilen åpnet. Trykket ut fra gassylinderen ble holdt konstant på 5 bar for alle testene, men på grunn av ekspansjon i røret ved overgangen til apparaturopsettet var det reelle fødetrykket lavere. Fødetrykkene ble avlest fra trykkmåler PIII, og ble notert i notatene fra labdagen vist i Appendiks D. Ut fra hvilken konfigurasjon som ble testet, ble de respektive ventilene for føde-, retentat- og permeatstrømmene justert, som vist i strømningsskjemaene i Appendiks C.

Strømningsratene for permeat og retentat ble målt ved hjelp av en strømningsmåler, og oksygenkonsentrasjonen i permeatstrømmen ble avlest med en oksygenanalysator. Relative endringer i trykk på forskjellige steder i apparaturet ble observert. For konfigurasjon 1, 5 og 6 ble *Cut rate* variert ved å variere hvor mye ventilene var åpnet, fra helt åpne og deretter gradvis stenge de igjen. Hvilke ventilene som ble variert for de ulike konfigurasjonene kan sees fra strømningsskjemaene i Appendiks C. Etter at forsøkene var utført, ble hovedventilen på gassflasken samt resten av ventilene stengt.

Måling av den totale retentatstrømmen i konfigurasjon 6 måtte gjøres i to steg. Fra Appendiks C, Figur C.6 og C.7 kan det sees at retentatstrømmene fra henholdsvis modul 1 og 4 sendes ut av apparaturen når den andre retentatstrømmen sendes ut som retentat der strømningsraten måles. Dermed må det utføres to målinger, en for hver retentatstrøm. Dette ble oppnådd ved å variere ventil 19 mellom sine to posisjoner. Deretter ble de to strømningsratene addert for å finne den totale retentatstrømmen til konfigurasjonen. Permeatstrømmen fra denne konfigurasjonen ble ikke påvirket av variasjonene utført med ventil 19. Ettersom strømmenes sammensetning ble bestemt fra målinger på permeatstrømmen, var det ikke mulig å bestemme sammensetningen i hver av de to retentatstrømmene separat. Høyest mulig renhet av oksygen i permeatstrømmen ble forsøkt funnet ved å variere *cut rate* for begge modulene.

3.2 Apparatur

Fire forskjellige konfigurasjoner var oppgitt i oppgaven. I tillegg ble det foreslått to konfigurasjoner med hensikt å optimere renheten av nitrogengass i retentatstrømmen, samt renheten av oksygen i permeatstrømmen. Konfigurasjonene er vist i Appendiks C, samt beskrevet i punktene under:

- K1: En enkelt modul
- K2: To moduler i parallel mht. retentat
- K3: To moduler i serie mht. retentat
- K4: To moduler i parallel, som igjen er i serie med en tredje, mht. retentat
- K5: Optimalisert for renest mulig N₂-gass: fire moduler i serie mht. retentat
- K6: Optimalisert for renest mulig O₂-gass: to moduler i serie mht. permeat

4 Resultater

En oversikt over alle målinger er vedlagt som Appendiks D og et eksempel på utregning av resultatene er vist i Appendiks A. Ligningene som er blitt benyttet er beskrevet i Avsnitt 2.2.

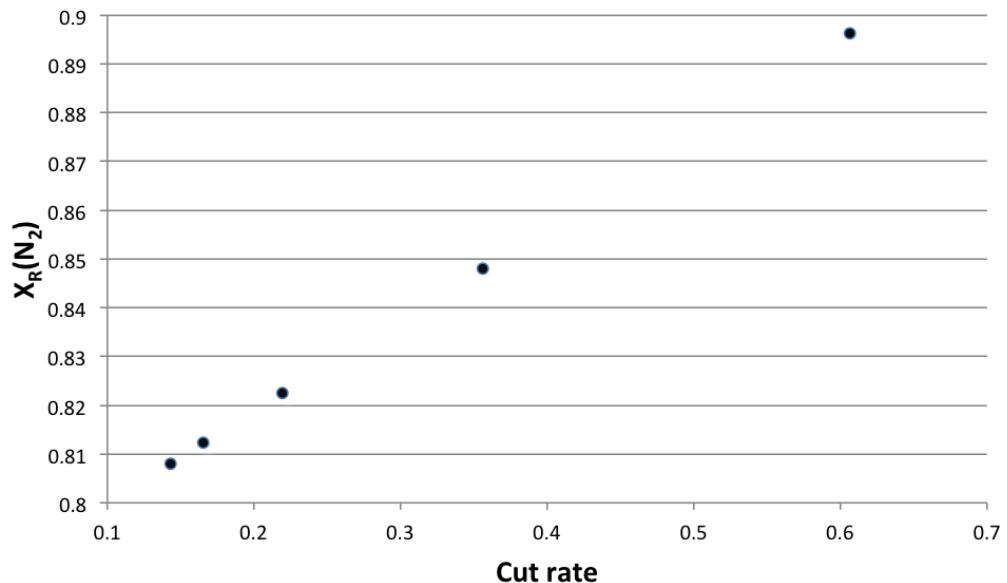
4.1 Konfigurasjon 1 - 4

De relevante resultatene for konfigurasjonene 1-4 er vist i Tabell 4.1.

Tabell 4.1: Målte verdier for molfraksjon av oksygen i permeatet, $x_P(O_2)$ og utregnede verdier for *cut rate*, θ , og molfraksjon av nitrogen i retentatet, $x_R(N_2)$ for konfigurasjon 1-4.

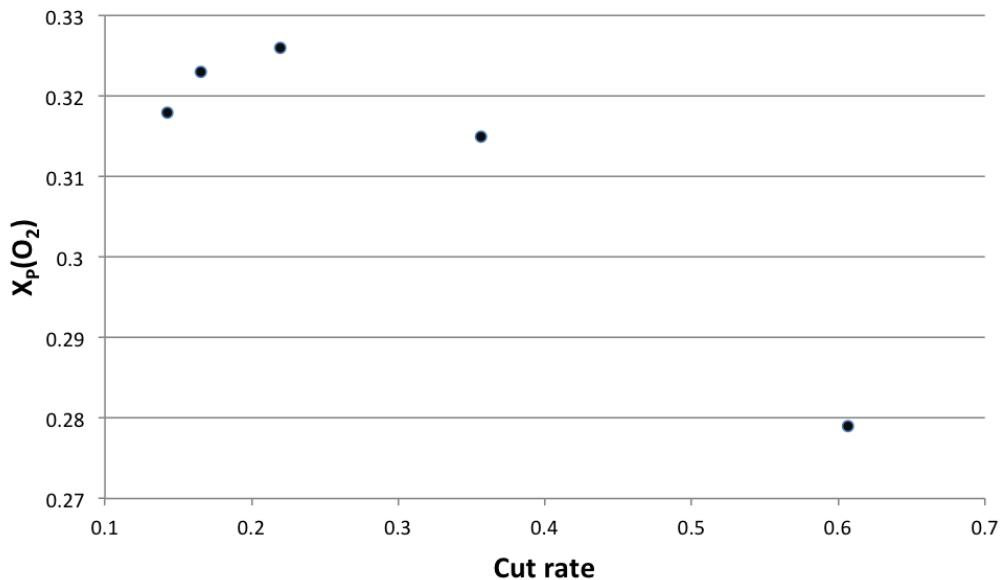
Konfig.	θ	$x_R(N_2)$	$x_P(O_2)$
K1	0,1429	0,8080	0,318
	0,1651	0,8124	0,323
	0,2194	0,8226	0,326
	0,3562	0,8481	0,315
	0,6064	0,8963	0,279
K2	0,1897	0,8132	0,309
K3	0,1921	0,8131	0,307
K4	0,2437	0,8180	0,297

I Figur 4.1 er renhet av nitrogen i retentatstrømmen plottet som funksjon av *cut rate* for konfigurasjon 1.



Figur 4.1: Molfraksjon av nitrogen i retentatstrømmen, $x_R(N_2)$, som funksjon av *cut rate* for konfigurasjon 1.

I Figur 4.2 er renhet av oksygen i permeatstrømmen plottet som funksjon av *cut rate* for konfigurasjon 1.



Figur 4.2: Molfraksjon av oksygen i permeatstrømmen, $x_P(O_2)$, som funksjon av *cut rate* for konfigurasjon 1.

For konfigurasjon 1 ble det også observert hvilke trykkendringer som oppstod som følge av endret *cut rate*. Den generelle tenden var at trykket på fødesiden økte med økende *cut rates*. Observasjoner av trykkendringer er notert i Appendiks D.

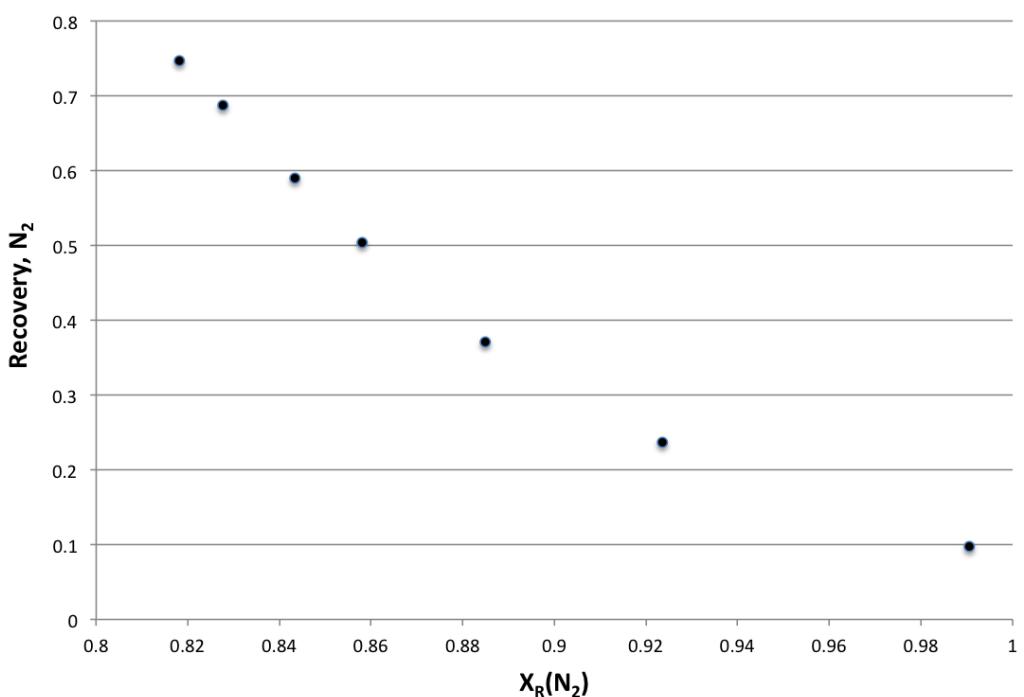
4.2 Optimaliserte konfigurasjoner

4.2.1 Konfigurasjon 5

For konfigurasjon 5 var målet å oppnå høy grad av renhet for nitrogen i retentatstrømmen. Konfigurasjonen som ble valgt var at alle fire modulene var koblet i serie, med tanke på retentatstrømmene. Det ble utført syv målinger, og *recovery* og renhet ble beregnet ut fra disse. De relevante resultatene er vist i Tabell 4.2. Sammenhengen mellom *recovery* og renhet av nitrogen er vist grafisk i Figur 4.3. Figuren viser at det er en negativ, tilnærmet lineær sammenheng mellom renhet og *recovery*.

Tabell 4.2: Utregnede verdier for *cut rate*, molfraksjon av nitrogen i retentatet, $x_R(N_2)$ og *recovery* av N_2 for konfigurasjon 5.

Cut rate	$x_R(N_2)$	Recovery, N_2
0,279	0,818	0,747
0,344	0,828	0,687
0,447	0,843	0,590
0,536	0,858	0,504
0,669	0,885	0,371
0,797	0,924	0,237
0,922	0,991	0,098



Figur 4.3: *Recovery* av N_2 som funksjon av molfraksjonen av N_2 oppnådd i retentatstrømmen, $x_R(N_2)$, for konfigurasjon 5.

4.2.2 Konfigurasjon 6

Konfigurasjon 6, designet for å gi høy renhet av oksygen, ble utformet med to moduler i serie med hensyn på permeat. Dette var eneste mulige konfigurasjon for å få permeatstrømmene i serie. Det ble utført fem målinger, og de relevante resultatene er vist i Tabell 4.3.

Tabell 4.3: Målte verdier for molfraksjon av oksygen i permeatet, $x_P(O_2)$ og utregnede verdier for *cut rate* for konfigurasjon 5.

Cut rate	$x_P(O_2)$
0,023	0,379
0,037	0,361
0,027	0,371
0,240	0,324
0,120	0,393

5 Diskusjon

5.1 *Cut rate*

Konfigurasjon 1, bestående av en modul, ble i hovedsak brukt til å studere hvordan separasjonen over en membranmodul påvirkes når *cut rate* endres. Ettersom trykket over membranen øker når *cut rate* økes, ble også sammenhengen mellom drivkraft og separasjon undersøkt. Fra Tabell 4.1 kan man se en tydelig trend som følge av endringene i *cut rate*, nemlig at renheten av nitrogengass i retentatstrømmen øker med økende *cut rate*, helt til hele fødestrømmen tvinges gjennom membranen. Dette er vist grafisk i Figur 4.1.

Renheten av oksygen i permeatstrømmen vil først øke som følge av høyere *cut rate*. Dette skyldes en høyere drivkraft over membranen. Dette vil igjen gi oksygen en relativt sett høyere transport gjennom membranen enn nitrogen, da membranen allerede er oksygenselektiv. Når *cut rate* når et visst nivå, vil en større andel av nitrogengassen passere membranen. Siden fødestrømmen inneholder relativt sett mer N_2 enn O_2 , vil økende *cut rate* føre til at molfraksjonen av O_2 i permeatstrømmen går ned, til tross for at mengden O_2 går opp. Dette er vist i Figur 4.2, og et tydelig maksimumspunkt for renhet av oksygen i permeatstrømmen observeres. Dette ser ut til å forekomme når *cut rate* har en verdi rundt 0,24 for konfigurasjon 1.

5.2 Konfigurasjon 2, 3 og 4

Konfigurasjon 2 bestod av to moduler i parallel, konfigurasjon 3 av to moduler i serie mens konfigurasjon fire bestod av to moduler i parallel som var i serie med en siste modul. Fra Tabell 4.1 vises det at alle disse konfigurasjonene gav en høyere renhet av N_2 i retentatstrømmen, enn konfigurasjon 1. På grunn av varierende *cut rate* for de fire konfigurasjonene er grunnlaget for sammenligning av disse resultatene noe svakt. Likevel, ettersom første måling for konfigurasjon 1 og målingene for konfigurasjon 2, 3 og 4 ble foretatt med alle relevante ventiler åpne, er det resultatene fra disse målingene som er mest hensiktsmessig å sammenlikne.

To moduler i parallel gav en høyere renhet av nitrogen i retentatstrømmen enn kun én modul. Dette indikerer at fødestrømmen er for stor for kun én modul, da to moduler i parallel ikke skal gi et renere produkt enn én modul med riktig skalert fødestrøm. Dette skyldes at drivkraften for permeasjonen avhenger av partialtrykket til hver enkelt komponent, og partialtrykket vil ikke endres selv om fødestrømmen deles opp.

To moduler i serie med hensyn på retentatet gav også en høyere renhet av nitrogen sammenliknet med kun én modul. Dette resultatet var som forventet da dette vil rense produktstrømmen to ganger. Ved sammenlikning av konfigurasjon 2 og 3 observeres det at renheten faller marginalt fra parallel til serie. Dette var ikke forventet, men tatt i betraktning at fødestrømmen var for stor for én modul, kan det tenkes at serie ville gitt høyere renhet, hadde fødestrømmen vært skalert noe ned.

Konfigurasjon 4 underbygger antakelsen om at en overdimensjonert fødestrøm gir noe uventede resultater med tanke på serie mot parallel, da den gav høyere renhet enn to moduler i serie, som vist i Tabell 4.1. Hadde fødestrømmen vært riktig proporsjonert, skulle konfigurasjon 4 gitt samme resultat som konfigurasjon 3.

5.3 Renhet vs. *recovery* av N₂

Konfigurasjon 5 bestod av fire moduler i serie med hensyn på retentatet. Denne konfigurasjonen ble valgt delvis på grunnlag av observasjoner gjort fra de fire foregående konfigurasjonene og delvis på grunn av oppsettets restriksjoner. Fra disse konfigurasjonene kunne det tenkes at fødestrømmen først burde blitt separert over to moduler i parallel, for deretter å la retentatet fortsette i serie. Ettersom oppsettet ikke tillot en slik konfigurasjon, ble det heller valgt å ha fire moduler i serie. Fra Tabell 4.2 konstateres det at denne konfigurasjonen gav en høyere renhet enn konfigurasjon 1-4. Likevel ser man at første måling for konfigurasjon 5, der alle de relevante ventilene var helt åpne, gav en renhet av nitrogen i retentatstrømmen tilnærmet lik renheten oppnådd for konfigurasjon 4. Dette kan bety at en konfigurasjon hvor man først har to moduler i parallel, og retentatet renses deretter i

to nye moduler i serie, kunne ha gitt en enda bedre resultat, som tidligere foreslått.

Det ble observert at *recovery* faller når renheten øker som følge av økt *cut rate*, og ut fra Figur 4.3 kan denne sammenhengen antas tilnærmet negativt lineær. Det betyr at man må ofre renhet om man vil ha høy *recovery* og motsatt. For konfigurasjon 5 med en *cut rate* på 0,922 ble det oppnådd en renhet av nitrogen i retentatstrømmen på 99,1 %, og da var verdien for *recovery* på 0,098. Dette viser at en høy renhet av nitrogen er mulig, men at man da får svært lavt utbytte.

Balansen mellom renhet og *recovery* er interessant for industrien, siden membraneparasjoner benyttes innenfor for eksempel både medisin og oljeindustrien. I enkelte sammenhenger vil renhet ha høyere prioritet enn *recovery*, som f.eks. i produksjon av ren inert gass. Innenfor forurensende industrier er det stort fokus på rensing av eksosgasser, og både økonomiske og miljømessige hensyn må tas. Utfordringen ligger i å finne en optimal balanse mellom *recovery* og renhet, slik at separasjonen optimaliseres til de krav som stilles.

5.4 Renhet av O₂

Konfigurasjon 6 som bestod av to moduler i serie med hensyn på permeat, var designet med tanke på å utvinne renest mulig oksygengass. Med denne konfigurasjonen ble det oppnådd en oksygenfraksjon på 0,393 i permeatstrømmen ved en *cut rate* på 0,120, som vist i Tabell 4.3. Dette resultatet ble oppnådd ved prøving og feiling ved å skru på henholdsvis ventil 11 og 18. Ut fra dataene vist i Appendiks D ble det ikke funnet noen generell trend mellom justering av ventiler og oppnådd renhet av oksygen i permeatstrømmen. Det antas at en høyere renhet kunne vært oppnåelig, ved å gjøre flere, systematiske målinger. Flere målinger kunne gitt et godt grunnlag for en dataanalyse av resultatene, som igjen kunne gitt en god indikasjon for optimale driftsbetingelser.

Oppsettets begrensede fleksibilitet gjorde at måling av strømningsraten i retentatstrømmen måtte gjøres i to steg. I tillegg var det komplisert å justere de enkelte modulenes *cut rate* for å oppnå høyest mulig renhet av oksygen. Dersom man får

forholdsvis rent oksygen, men med lav strømningsrate, fra første modul, vil denne strømmen ikke ha tilstrekkelig trykk til å separeres over neste modul. Derfor må *cut rate* over første modul justeres, slik at man oppnår høyest mulig renhet ut av andre modul. Justeringen av *cut rate* kunne vært forenklet ved å koble permeatstrømmen fra andre modul til vakuum. Dette ville gitt en relativt sett høyere trykkforskjell over andre modul, slik at permeatstrømmen fra første modul ikke trenger like høy strømningsrate og kan dermed være renere. Alternativt kan det installeres en kompressor mellom de to modulene.

Det er naturlig at det er vanskelig å oppnå høy renhet av O₂ med dette oppsettet, da det primært er laget for å produsere nitrogengass. Produksjon av oksygen med slike membraner vil være svært kostbart og med lavt utbytte. Derfor produseres oksygen industrielt ved kjøleprosesser og destillasjon, ikke ved membranseparasjon^[3].

5.5 Feilkilder

Permeatstrømmene fra moduler i serier blandes, og herfra beregnes molfraksjoner av oksygen og nitrogen i retentatet. Svakheten ved oppsettet er at de ulike permeatstrømmene med ulik sammensetning bidrar alle til den totale permeatstrømmen, hvor oksygenfraksjonen avleses. Dette gjør utregningene unøyaktige. Det vil i tillegg være feilkilder forbundet med standardavvik i verdiene fra måleinstrumentene.

5.6 Forbedring av separasjonen

For å gjøre separasjonen bedre i dette eksperimentet kunne man hatt et oppsett som tillot resirkulering, både for retentat og permeat. Dette ville gitt en høyere renhet med færre moduler. I tillegg burde oppsettet tillatt at man kunne ha mer enn to moduler i serie for produksjon av oksygen.

Som tidligere nevnt, kunne vakuum blitt benyttet for å oppnå høyt nok trykk i permeatstrømmen fra første modul, og dermed unngå unødvendig høye *cut rates* over denne modulen i konfigurasjon 6. Samme problem kunne blitt løst ved bruk av kompressorer mellom modulene. Man kan også tenke seg at det hadde vært

mulig å benytte andre typer membraner for å optimalisere separasjonen. Bruk av ekspansjon- og reduksjonsventiler kan også tenkes å ha en effekt på separasjonen.

6 Konklusjon

I dette forsøket ble separasjon av luft ved hjelp av oksygenselektive membraner, samt hvilke parametere som påvirker denne prosessen, undersøkt. I konfigurasjon 1 ble det konstatert at økt *cut rate* fører til høyere renhet samt lavere *recovery* av nitrogen i retentatstrømmen. Siden en endring av *cut rate* medfører en tilsvarende endring i trykk over membranen, vil en endring i trykk ha samme påvirkning som en endring i *cut rate*. Fra konfigurasjon 2 ble det observert at to moduler i parallelle gav høyere renhet av nitrogen enn én enkelt modul. Konfigurasjon 3 viste at to moduler i serie gav en relativt lik renhet som ble oppnådd i konfigurasjon 2. Konfigurasjon 4 gav høyere renhet av nitrogen enn de tre foregående konfigurasjonene. Resultatene fra de fire første konfigurasjonene underbygde alle teorien om at fødestrømmen var overdimensjoner for én modul. For å oppnå høy renhet ble det konstatert at en seriekonfigurasjon var gunstigst i dette oppsettet. Det ble oppnådd en renhet på 99,1 % for nitrogen ved en *cut rate* på 0,922 og 39,3 % for oksygen ved en *cut rate* på 0,120.

Eksperimentet var svært lærerikt og gav god innsikt i membranseparasjon av gasser. Prinsippene kan enkelt overføres til andre typer membranseparasjoner som for eksempel dialyse.

Trondheim, 26. oktober 2012

Elise Landsem

Audun F. Buene

Referanser

- [1] IKP Felleslab; *Air separation by membranes*, laboratorieoppgave.
- [2] YaraPraxair; *Sikkerhetsdatablad syntetisk luft*, http://app.ecoonline.no/documents/msds/1002288/285_4760451.pdf
- [3] Store norske leksikon - Flytende luft, http://snl.no/flytende_luft, lest 23.10.2012 kl 18.

A Eksempelutregning fra eksperimentelle data

I dette forsøket er det antatt at fødestrømmen kun består av nitrogen og oksygen. Det ble også antatt at nitrogen og oksygen er ideelle gasser. Likninger brukt er vist og forklart i teorideelen, i Avsnitt 2.2.

Følgende data ble avlest for konfigurasjon 1, måling nr. 5:

- Volumstrøm av retentatet: $R = 92,5 \text{ ml/s}$
- Volumstrøm av permeatet: $P = 142,5 \text{ ml/s}$
- Molfraksjon av oksygen i fødestrømmen: $x_F(\text{O}_2) = 0,21$
- Molfraksjon av oksygen i permeatstrømmen: $x_P(\text{O}_2) = 0,279$

Fødestrømmen kan beregnes fra:

$$F = R + P = 92,5 \frac{\text{mL}}{\text{s}} + 142,5 \frac{\text{mL}}{\text{s}} = \underline{\underline{235 \frac{\text{mL}}{\text{s}}}} \quad (\text{A.1})$$

Molfraksjon av nitrogen i fødestrømmen er gitt ved:

$$x_F(\text{N}_2) = 1 - x_F(\text{O}_2) = 1 - 0,21 = \underline{\underline{0,79}} \quad (\text{A.2})$$

Volumstrømmen av nitrogen i permeatet kan bestemmes slik:

$$P(\text{N}_2) = [1 - x_P(\text{O}_2)] \cdot P = (1 - 0,279) \cdot 142,5 \frac{\text{mL}}{\text{s}} = \underline{\underline{102,74 \frac{\text{mL}}{\text{s}}}} \quad (\text{A.3})$$

mens volumstrømmen av nitrogen i fødestrømmen kan bestemmes fra molfraksjonen:

$$F(\text{N}_2) = F \cdot x_F(\text{N}_2) = 235 \frac{\text{mL}}{\text{s}} \cdot 0,79 = \underline{\underline{185,65 \frac{\text{mL}}{\text{s}}}} \quad (\text{A.4})$$

Volumstrømmen av nitrogen i retentatet kan beregnes fra en massebalanse for N_2 over hele systemet:

$$R(\text{N}_2) = F(\text{N}_2) - P(\text{N}_2) = 185,65 - 102,74 = \underline{\underline{82,91 \frac{\text{mL}}{\text{s}}}} \quad (\text{A.5})$$

Molfraksjonen av N₂ i retentatstrømmen bestemmes slik:

$$x_R(N_2) = \frac{R(N_2)}{R} = \frac{82,91 \frac{\text{mL}}{\text{s}}}{92,5 \frac{\text{mL}}{\text{s}}} = \underline{0,896} \quad (\text{A.6})$$

Til slutt kan *recovery* av N₂ beregnes:

$$R_{N_2} = \frac{x_R(N_2) \cdot R}{x_F(N_2) \cdot F} = \frac{0,896 \cdot 92,5 \frac{\text{mL}}{\text{s}}}{0,79 \cdot 235 \frac{\text{mL}}{\text{s}}} = 0,4466 = \underline{\underline{44,66\%}} \quad (\text{A.7})$$

Cut rate, θ , for systemet er gitt som:

$$\theta = \frac{P}{F} = \frac{142,5 \frac{\text{mL}}{\text{s}}}{235 \frac{\text{mL}}{\text{s}}} = \underline{\underline{0,6064}} \quad (\text{A.8})$$

B Kjemikaliekart

Data nødvendig for utfylling av kjemikaliekart er hentet fra *ECO Online*^[2].



SINTEF



NTNU
Norges teknisk-
naturvitenskapelige
universitet

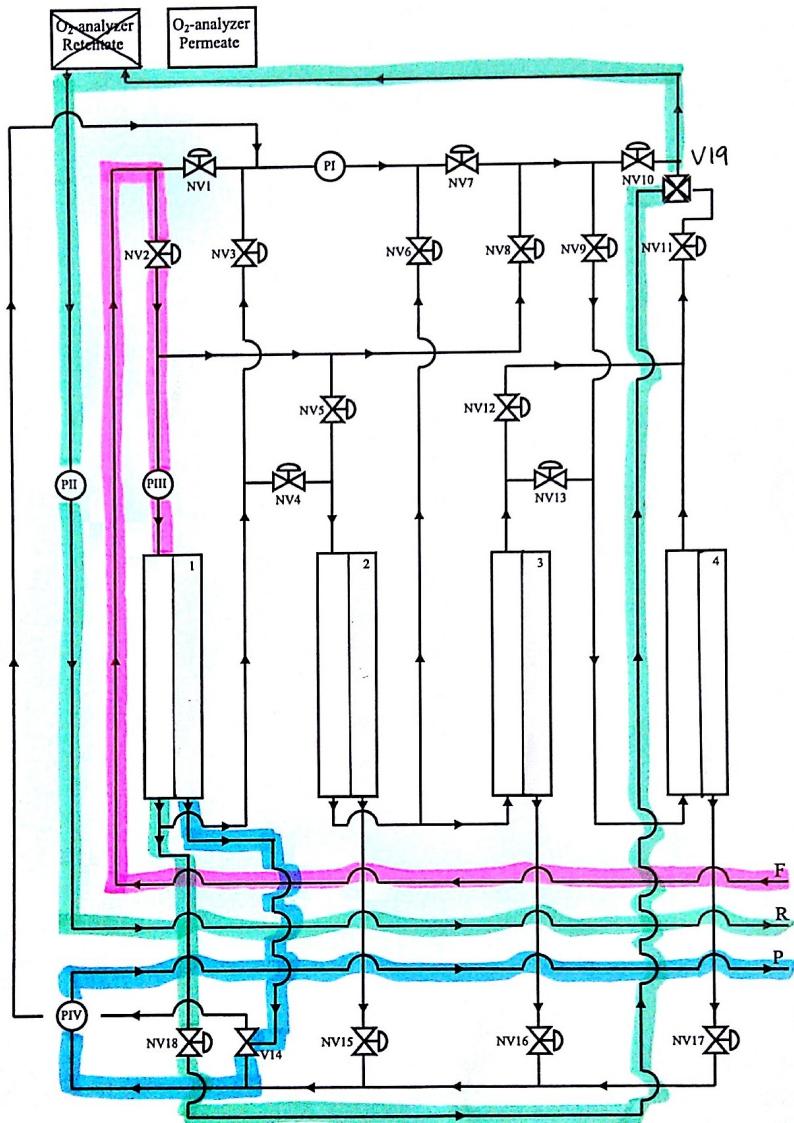
Kjemikaliekart

	STOFFNAVN <i>Syntetisk luft</i>			FORMEL $O_2 + N_2$	HELSEFARE <i>Ingen kjente betydelige virkninger eller kritiske farer.</i>
FYSIKALSKE DATA	Smelte.pkt	Kritisk temp for N_2	Tetthet N_2	BRANNFARE Ikke brannfarlig	
	-189°C	-146.9°C	0.00125 g/cm ³	REAKSJONSFARE -	
VERNETILTAK				ADMINISTRATIV NORM -	
HELSEFARE Innånding Svelging Hud Øyne	Ingen generelle helsefarer Bruk av øyevern er anbefalt.			BRANNSLUKKING <i>Ikke brannfarlig, se an andre kjemikalier involvert.</i> MERKNADER -	
FØRSTEHJELP	ØYNE - HUD -	SVELGING - INNÅNDING -			

SPESIELLE MERKNADER R8 – Brannfarlig ved kontakt med brennbare stoffer.	
SPILL/ RESTER	Ikke miljøfarlig. Beholderen må ikke punkteres eller brennes. Avhendes i henhold til gjeldende lokale og nasjonale lovverk.
LAGRING	Oppbevares i originale kontainere beskyttet mot fall. Emballasjen skal holdes tett lukket. Oppbevar beholderen på et kjølig, godt ventilert sted. Holdes atskilt fra syrer, baser, reduksjonsmidler og brennbart materiale.

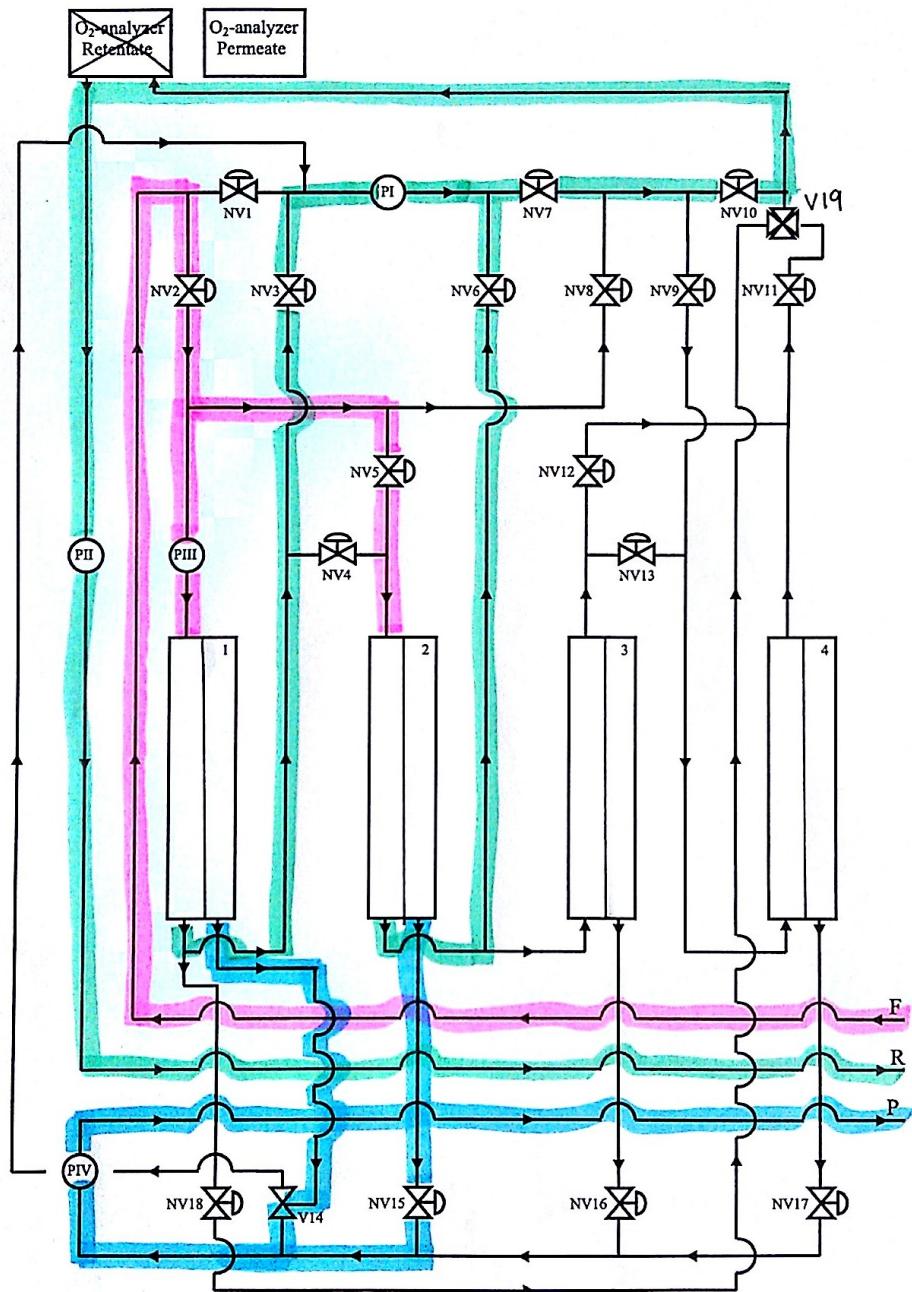
C Konfigurasjonsoversikter

I Figur C.1 er flytskjema for konfigurasjon 1 vist.



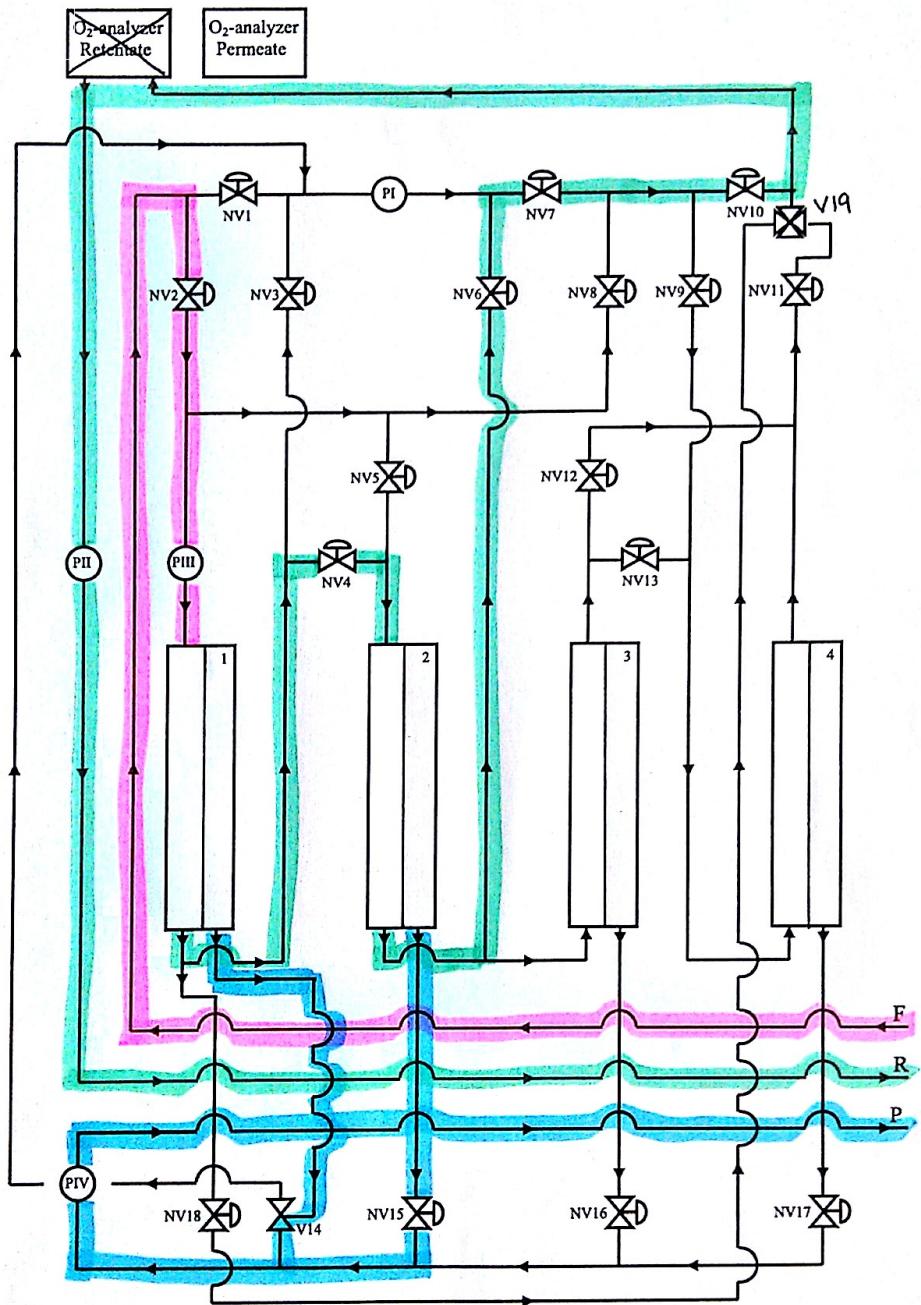
Figur C.1: Flytskjema for konfigurasjon 1, som består av en enkelt modul. Fødestrømmen er markert med rosa farge, retentatet med turkis og permeat med blått.

I Figur C.2 er flytskjema for konfigurasjon 2 vist.



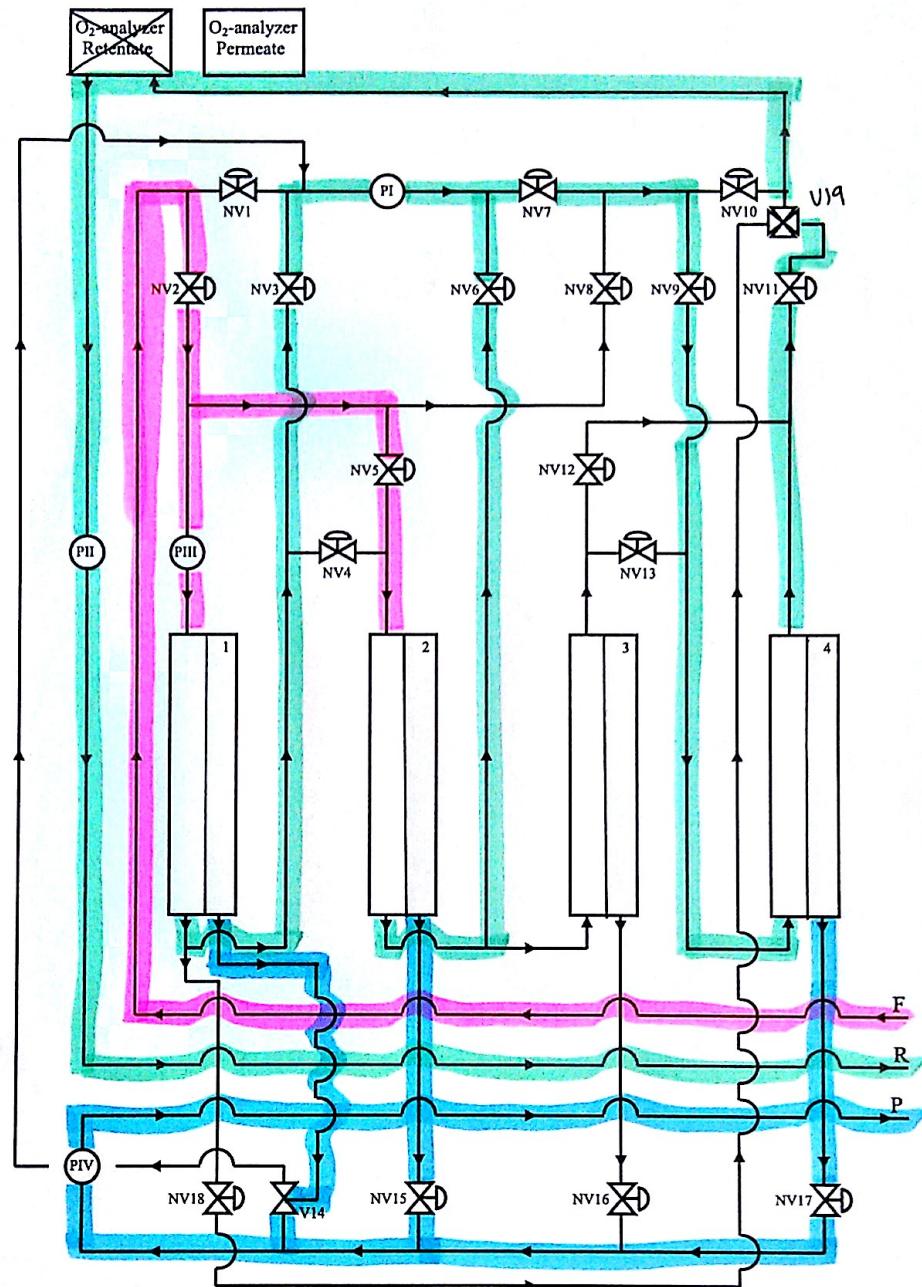
Figur C.2: Flytskjema for konfigurasjon 2, som består av to moduler i parallell. Fødestrømmen er markert med rosa farge, retentatet med turkis og permeat med blått.

I Figur C.3 er flytskjema for konfigurasjon 3 vist.



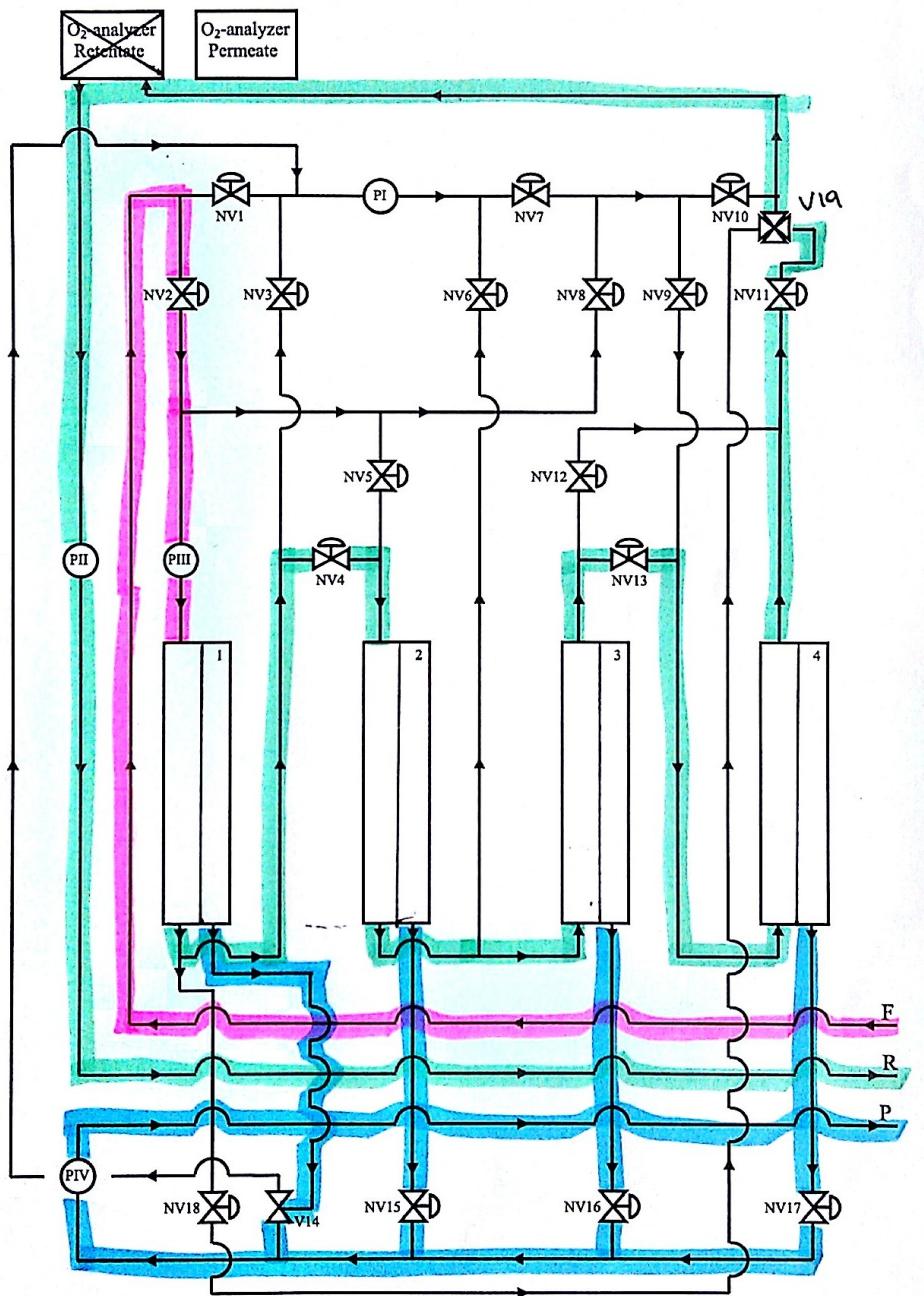
Figur C.3: Flytskjema for konfigurasjon 3, som består av to moduler i serie. Fødestrømmen er markert med rosa farge, retentatet med turkis og permeat med blått.

I Figur C.4 er flytskjema for konfigurasjon 4 vist.



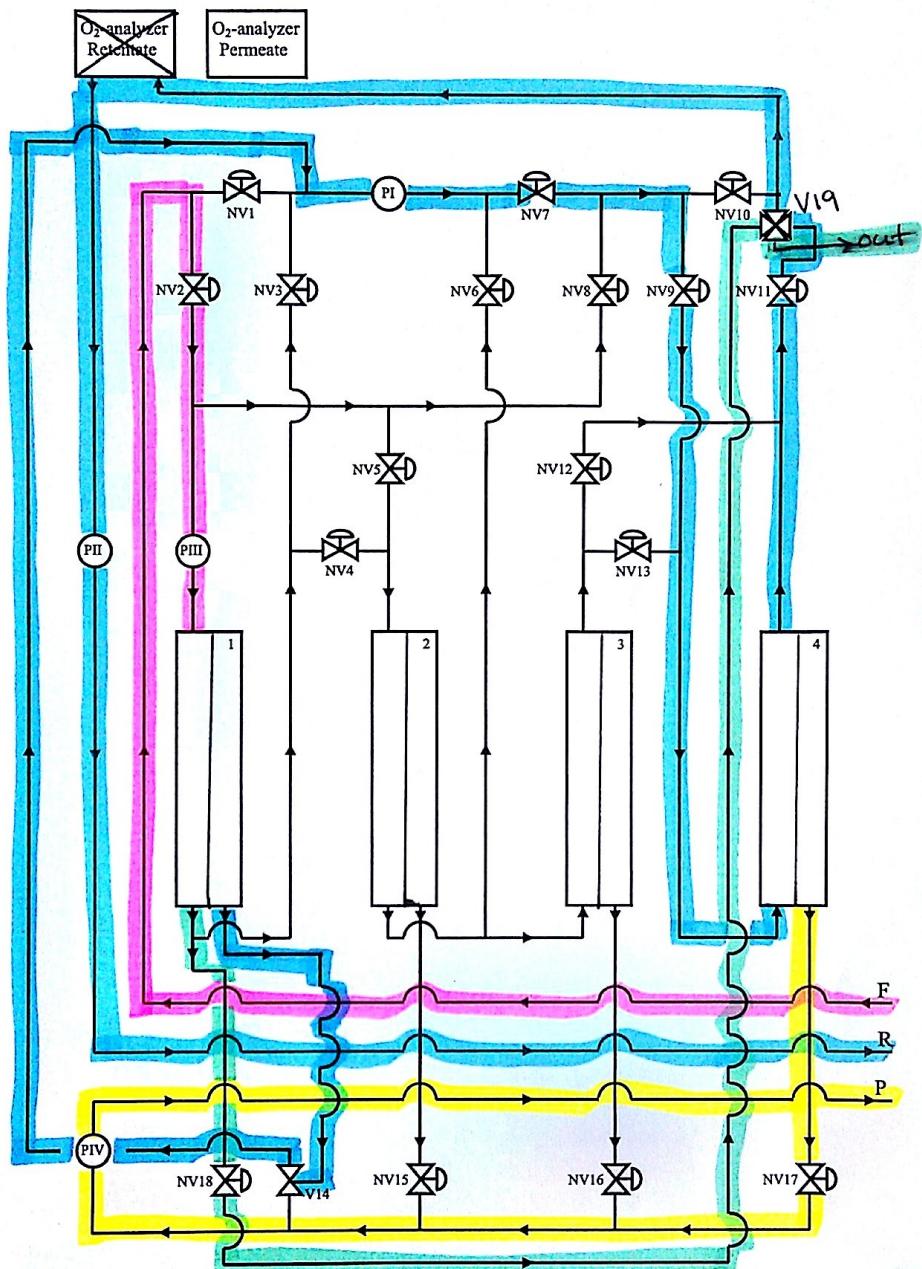
Figur C.4: Flytskjema for konfigurasjon 4, som består av to moduler i parallel, som igjen er i serie med en tredje modul. Fødestrømmen er markert med rosa farge, retentatet med turkis og permeat med blått.

I Figur C.5 er flytskjema for konfigurasjon 5 vist.



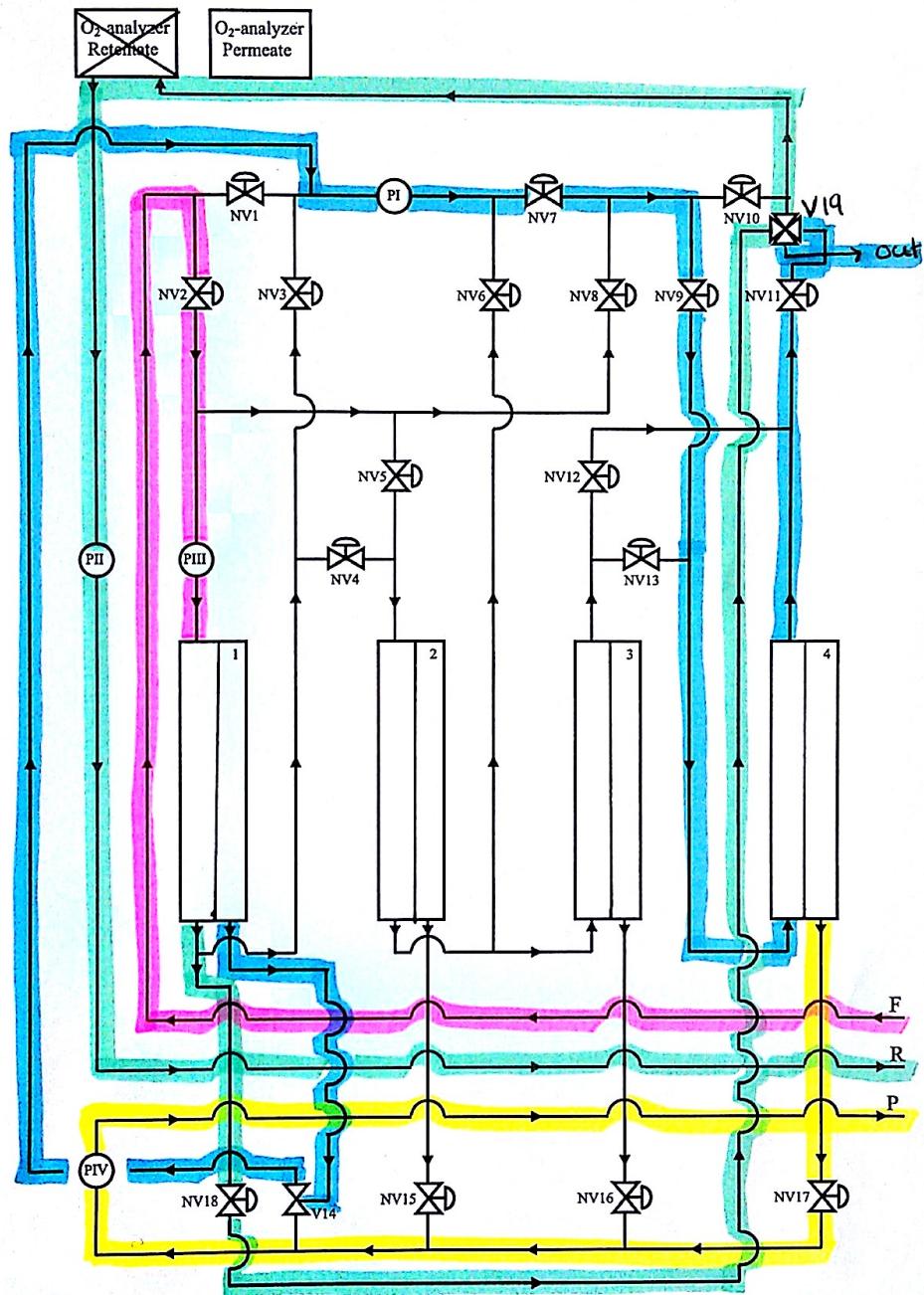
Figur C.5: Flytskjema for konfigurasjon 5, som består av fire moduler i serie. Fødestrømmen er markert med rosa farge, retentatet med turkis og permeat med blått.

I Figur C.6 er flytskjema for konfigurasjon 6a vist.



Figur C.6: Flytskjema for konfigurasjon 6a, som består av to moduler i serie med hensyn på permeatet. Her måles retentatstrømmen fra modul 4. Fødestrømmen er markert med rosa farge, retentatet med blå og turkis, og permeat med gult.

I Figur C.7 er flytskjema for konfigurasjon 6b vist.



Figur C.7: Flytskjema for konfigurasjon 6b, som består av to moduler i serie med hensyn på permeatet. Her måles retentatstrømmen fra modul 1. Fødestrømmen er markert med rosa farge, retentatet med blå og turkis, og permeat med gult.

D Excelark/notater fra labdagen

Vedlagt er en kopi av regnearkene slik de ble utfylt på labdagen. Ventiler og trykkmålere som er nevnt ved navn er vist i flytskjemaene i Appendix C. Figur D.1 viser excelarket for konfigurasjon 1.

Air Separation LAB		Kjente verdier (Fyller inn)	
Konfigurasjon 1		Beregnes av oppgitte data	
Måling #	F [mL/s]	R [mL/s]	P [mL/s]
1	560	480	80
2	545	455	90
3	490	382.5	107.5
4	365	235	130
5	235	92.5	142.5
Cut rate, θ [-] x (N2) P [-] x (N2) F [-] O2 F [mL/s]	O2 P [mL/s]	N2 F [mL/s]	N2 P [mL/s]
0.142857143	0.682	0.79	117.6
0.165137615	0.677	0.79	114.45
0.219387755	0.674	0.79	102.9
0.356164384	0.685	0.79	76.65
0.606382979	0.721	0.79	49.35
i ret.			
O2 R [mL/s]	N2 R [mL/s]	x (O2) R [-] x (N2) R [-]	Rec. N2 [-]
92.16	387.84	0.192	0.808 0.87667269
85.38	369.62	0.18764835	0.81235165 0.85848334
67.855	314.645	0.17739869	0.82260131 0.81282614
35.7	199.3	0.15191489	0.84808511 0.69117392
9.5925	82.9075	0.1037027	0.8962973 0.44657959
måling # Kommentar til trykk			
1	PIII: 3, PIV: 0,3, PII: 0,005		
2	Ikke så stor endring		
3	PIII: 4,3, PIV: 0,5,		
4	PIII: 4, PIV: 0,47		
5	PIII: 4,6, PIV: 0,5		

Trykksfall fra inn til første PIII ca. Halve

Figur D.1: Excelark fra labdagen for konfigurasjon 1. F betegner føde, P permeat og R retentat. $x(i)Y$ er molfraksjon av komponent i i strøm Y. Gjeldende siffer er ikke tatt hensyn til, og flytskjemaet for konfigurasjon 1 er vist i Appendix C, Figur C.1.

Figur D.2 viser excelarket for konfigurasjon 2 og 3.

Air Separation LAB		Kjente verdier (Fyller inn)	
Konfigurasjon 2		Beregnes av oppgitte data	
Måling # F [mL/s] R [mL/s] P [mL/s] x (O2) P [-] x (O2) F [-]			
1	580	470	110 0.309 0.21
Cut rate, θ [-] x (N2) P [-] x (N2) F [-] O2 F [mL/s] O2 P [mL/s] N2 F [mL/s] N2 P [mL/s]			
0.189655172	0.691	0.79	121.8 33.99 458.2 76.01
i ret.			
O2 R [mL/s]	N2 R [mL/s]	x (O2) R [-]	x (N2) R [-]
87.81	382.19	0.18682979	0.81317021 0.83411174
måling # Kommentar til trykk			
1	PIII: 2,25, PIV: 0,4, PI: 2,5		
Ser at det er bedre med 2 moduler, pga for stor strøm for en modul alene			
Air Separation LAB		Kjente verdier (Fyller inn)	
Konfigurasjon 3		Beregnes av oppgitte data	
Måling # F [mL/s] R [mL/s] P [mL/s] x (O2) P [-] x (O2) F [-]			
1	572.5	462.5	110 0.307 0.21
Cut rate, θ [-] x (N2) P [-] x (N2) F [-] O2 F [mL/s] O2 P [mL/s] N2 F [mL/s] N2 P [mL/s]			
0.192139738	0.693	0.79	120.225 33.77 452.275 76.23
i ret.			
O2 R [mL/s]	N2 R [mL/s]	x (O2) R [-]	x (N2) R [-]
86.455	376.045	0.18692973	0.81307027 0.8314521
måling # Kommentar til trykk			
1	PIII:2,5 , PIV: 0,4 , PI:2,4		
Bedre enn 1 modul fordi det renses to ganger Ca likt som 2 stk i parallel			

Figur D.2: Excelark fra labdagen for konfigurasjon 2 og 3. F betegner føde, P permeat og R retentat. $x(i)Y$ er molfraksjon av komponent i i strøm Y. Gjeldende siffer er ikke tatt hensyn til, og flytskjemaet for konfigurasjon 2 og 3 er vist i Appendix C, Figur C.2 og Figur C.3.

Figur D.3 viser excelarket for konfigurasjon 4.

Air Separation LAB		Kjente verdier (Filles inn)				
Konfigurasjon 4		Beregnes av oppgitte data				
Måling # F [mL/s] R [mL/s] P [mL/s] x (O₂) P [-] x (O₂) F [-]						
1	595	450	145	0.297	0.21	
Cut rate, θ [-] x (N₂) P [-] x (N₂) F [-] O₂ F [mL/s] O₂ P [mL/s] N₂ F [mL/s] N₂ P [mL/s]						
0.243697479	0.703	0.79	124.95	43.065	470.05	101.935
i ret.						
O₂ R [mL/s]	N₂ R [mL/s]	x (O₂) R [-] x (N₂) R [-]	Rec. N₂ [-]			
81.885	368.115	0.1819667	0.81803333	0.783140091		
måling #		Kommentar til trykk				
1		PIII: 2,4 ,PIV: 0,5, PI: 2,5				

Figur D.3: Excelark fra labdagen for konfigurasjon 4. F betegner føde, P permeat og R retentat. x(i)Y er molfraksjon av komponent i i strøm Y. Gjeldende siffer er ikke tatt hensyn til, og flytskjemaet for konfigurasjon 4 er vist i Appendix C, Figur C.4.

Figur D.4 viser excelarket for konfigurasjon 5.

Air Separation LAB						
Konfigurasjon 5			Kjente verdier (Fyller inn) Beregnes av oppgitte data			
Måling #	F [mL/s]	R [mL/s]	P [mL/s]	x (O2) P [-]	x (O2) F [-]	
1	582.5	420	162.5	0.283	0.21	
2	552.5	362.5	190	0.282	0.21	
3	497.5	275	222.5	0.276	0.21	
4	452.5	210	242.5	0.269	0.21	
5	400	132.5	267.5	0.257	0.21	
6	357.5	72.5	285	0.244	0.21	
7	320	25	295	0.227	0.21	
Cut rate, θ [-] x (N2) P [-] x (N2) F [-] O2 F [mL/s] O2 P [mL/s] N2 F [mL/s]						
0.278969957	0.717	0.79	122.325	45.9875	460.175	
0.343891403	0.718	0.79	116.025	53.58	436.475	
0.447236181	0.724	0.79	104.475	61.41	393.025	
0.535911602	0.731	0.79	95.025	65.2325	357.475	
0.66875	0.743	0.79	84	68.7475	316	
0.797202797	0.756	0.79	75.075	69.54	282.425	
0.921875	0.773	0.79	67.2	66.965	252.8	
i ret.						
N2 P [mL/s]	O2 R [mL/s]	N2 R [mL/s]	x (O2) R [-]	x (N2) R [-]	Rec. N2 [-]	
116.5125	76.3375	343.6625	0.181756	0.818244048	0.74680828	
136.42	62.445	300.055	0.1722621	0.827737931	0.6874506	
161.09	43.065	231.935	0.1566	0.8434	0.59012785	
177.2675	29.7925	180.2075	0.141869	0.858130952	0.50411218	
198.7525	15.2525	117.2475	0.1151132	0.884886792	0.37103639	
215.46	5.535	66.965	0.0763448	0.923655172	0.2371072	
228.035	0.235	24.765	0.0094	0.9906	0.09796282	
måling #	Kommentar til trykk					
1	PIII: 2,3, PIV: 0,6, PI: 0					
2	PIII: 2,6, PIV: 0,7, PI: 0					
3	PIII: 3, PIV: 0,8					
4	PIII: 3,2, PIV: 1					
5	PIII: 3,5, PIV: 1,1					
6	PIII: 3,7, PIV: 1,2					

OBS: resirkulering av permeat mulig hvis renhet veldig viktig

Figur D.4: Excelark fra labdagen for konfigurasjon 5. F betegner føde, P permeat og R retentat. $x_i Y$ er molfraksjon av komponent i i strøm Y . Gjeldende siffer er ikke tatt hensyn til, og flytskjemaet for konfigurasjon 5 er vist i Appendix C, Figur C.5.

Figur D.5 viser excelarket for konfigurasjon 6.

Air Separation LAB							
Konfigurasjon 6			Kjente verdier (Fylles inn)				
Måling #	F [mL/s]	R [mL/s]	P [mL/s]	x (O2) P [-] x (O2) F [-]			
1	322,5	315	7,5	0,379	0,21		
2	267,5	257,5	10	0,361	0,21		
3	280	272,5	7,5	0,371	0,21		
4	240	182,5	57,5	0,324	0,21		
5	270	237,5	32,5	0,393	0,21		
Cut rate, θ [-] x (N2) P [-] x (N2) F [-] O2 F [mL/s] O2 P [mL/s] N2 F [mL/s] N2 P [mL/s]							
0,0233	0,621	0,79	67,725	2,8425	254,775		
0,0374	0,639	0,79	56,175	3,61	211,325		
0,0268	0,629	0,79	58,8	2,7825	221,2		
0,2396	0,676	0,79	50,4	18,63	189,6		
0,1204	0,607	0,79	56,7	12,7725	213,3		
i ret. i per.							
O2 R [mL/s]	N2 R [mL/s]	x (O2) R [-] x (N2) R [-]	Rec. N2 [%]	Rec. O2 [%]			
64,8825	250,1175	0,206	0,794	0,9817	0,3148		
52,565	204,935	0,2041	0,7959	0,9698	0,6426		
56,0175	216,4825	0,2056	0,7944	0,9787	0,3549		
31,77	150,73	0,1741	0,8259	0,795	21,2545		
43,9275	193,5725	0,185	0,815	0,9075	7,3211		
R mod 1 R mod 4 P mod 1 P mod 4							
1	195	120	7,5	7,5 2, 3 skrudde på 18			
2	135	122,5	10	10			
3	152,5	120	7,5	7,5			
4	157,5	25	57,5	57,5 4,5, på 11			
5	152,5	85	32,5	32,5			
6				skrudde på 18			
måling #	Kommentar til trykk						
1							
2	PI: 0,5						
3	PI: 0,8						
4	PI: 2,5						
5							

OBS: blir litt merkelig resultat pga. Permeatstrømmer samles og analyseres sammen.

Figur D.5: Excelark fra labdagen for konfigurasjon 6. F betegner føde, P permeat og R retentat. $x_i Y$ er molfraksjon av komponent i i strøm Y . Gjeldende siffer er ikke tatt hensyn til, og flytskjemaene for konfigurasjon 6 er vist i Appendix C, Figur C.6 og Figur C.7.