

**OPTIMASI DESAIN KOLOM *PRESSURE SWING*
DISTILLATION DENGAN MELIBATKAN
PEMILIHAN TEKANAN DAN *HEAT*
INTEGRATION UNTUK PEMISAHAN THF-AIR**

Laporan Penelitian

Disusun untuk memenuhi tugas akhir guna mencapai gelar
sarjana di bidang ilmu Teknik Kimia

oleh:

Catherine Widjaja (6141901002)

Ashila Maitsa (6141901108)

Pembimbing:

Herry Santoso, S.T., M.T.M., Ph.D.

Yansen Hartanto, S.T., M.T.



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN**

2023



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN**

LEMBAR PENGESAHAN

Nama : Catherine Widjaja

NPM : 6141901002

Nama : Ashila Maitsa

NPM : 6141901108

Judul : Optimasi Desain Kolom *Pressure Swing Distillation* dengan Melibatkan Pemilihan Tekanan dan *Heat Integration* untuk Pemisahan THF-Air

CATATAN :

Telah diperiksa dan disetujui,

Bandung, 1 Februari 2023

Pembimbing 1

Herry Santoso, S.T., M.T.M., Ph.D.

Pembimbing 2

Yansen Hartanto, S.T., M.T.



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN**

LEMBAR REVISI

Nama : Catherine Widjaja

NPM : 6141901002

Nama : Ashila Maitsa

NPM : 6141901108

Judul : Optimasi Desain Kolom *Pressure Swing Distillation* dengan Melibatkan Pemilihan Tekanan dan *Heat Integration* untuk Pemisahan THF-Air

CATATAN :

Koreksi skematis untuk *full integration* (dengan tidak adanya reboiler kolom 1),

Efek penambahan panas dari kolom 2 ke kolom 1 serta efeknya pada perubahan tekanan,

Alasan optimasi diperlukan pada simulasi,

Kondisi optimum dan desain detail di kesimpulan

Kompromi tidak adanya *design specification* LPC pada kemurnian produk

Telah diperiksa dan disetujui,

Bandung, 1 Februari 2023

Penguji 1

Dr. Ir. Budi Husodo Bisowarno, M.Eng

Penguji 2

Arenst Andreas Arie, S.T., S.Si., M.Sc., Ph.D



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN**

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Catherine Widjaja

NPM : 6141901002

Nama : Ashila Maita

NPM : 6141901108

dengan ini menyatakan bahwa laporan penelitian dengan judul

**OPTIMASI DESAIN KOLOM *PRESSURE SWING DISTILLATION* DENGAN
MELIBATKAN PEMILIHAN TEKANAN DAN *HEAT INTEGRATION* UNTUK
PEMISAHAN THF-AIR**

adalah hasil pekerjaan saya dan seluruh ide, pendapat atau materi dari sumber lain telah dikutip dengan cara penulisan referensi yang sesuai.

Pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya dan jika pernyataan ini tidak sesuai dengan kenyataan, maka saya bersedia menanggung sanksi sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Bandung, 17 Januari 2023



Catherine Widjaja
(6141901002)



Ashila Maita
(6141901108)

INTISARI

Distilasi merupakan metode pemisahan yang digunakan secara komersial dalam industri kimia. Berbagai penelitian telah membuktikan bahwa distilasi efektif dalam memisahkan berbagai campuran. Namun, distilasi konvensional tidak dapat memisahkan campuran azeotrop seperti campuran Tetrahidrofuran (THF) dan air. Salah satu perkembangan distilasi yang mampu menangani masalah tersebut adalah *Pressure Swing Distillation* (PSD). Komposisi azeotrop bergeser secara signifikan seiring dengan perubahan tekanan pada kedua kolom PSD, sehingga pemisahan mampu menghasilkan produk dengan kemurnian tinggi. Selain permasalahan terkait campuran azeotrop, distilasi juga dikenal sebagai salah satu proses dengan tingkat konsumsi energi yang tinggi. Permasalahan tersebut dapat diatasi dengan adanya integrasi panas pada sistem baik secara *partial* maupun *full*. Perbedaan tekanan pada kedua kolom PSD juga membuka peluang untuk mengaplikasikan integrasi panas pada sistem tersebut. Integrasi panas dapat meminimalisasi konsumsi energi PSD sehingga mampu menghasilkan *Total Annual Cost* (TAC) yang minimum dengan memenuhi target kemurnian produk. Dengan melihat kedua permasalahan tersebut, pemilihan tekanan menjadi parameter penting yang harus dipertimbangkan.

Pada penelitian ini dilakukan simulasi sistem PSD dalam pemisahan THF-Air. Simulasi dilakukan dalam kondisi tunak dengan menggunakan simulator *Aspen Plus*. Selain itu, integrasi panas diaplikasikan pada sistem tersebut baik secara *partial* dan *full*. Proses simulasi dilanjutkan dengan optimasi sistem secara bertahap dengan beberapa variabel optimasi, seperti tekanan, jumlah tahap, letak masukan umpan, dan letak masukan *recycle*. Optimasi sistem dilakukan dengan tujuan mendapatkan tekanan optimal dengan desain kolom yang sesuai. TAC dari ketiga konfigurasi yang telah optimal dibandingkan untuk mendapatkan nilai yang paling minimum. Konfigurasi PSD dengan TAC minimum dapat dijadikan spesifikasi desain yang menguntungkan baik secara proses maupun ekonomi.

Tekanan optimum pada *Low Pressure Column* (LPC) berada pada tekanan vakum yaitu 0,6 bar, sedangkan tekanan optimum *High Pressure Column* (HPC) berada pada tekanan tinggi yaitu 11 bar. Desain kolom *Partial heat integration* memiliki konfigurasi kolom NT1=19, NF1=14, NR1=11, NT2=13, NF2=3. Sementara pada *full heat integration*, konfigurasi kolomnya adalah NT1=15, NF1=12, NR1=11, NT2=14, NF2=3. Konfigurasi PSD dengan *full heat integration* setelah optimasi memiliki TAC sebesar \$708.765,0073 yang menunjukkan bahwa konfigurasi ini lebih ekonomis dibandingkan dengan *partial heat integration* yang memiliki nilai TAC sebesar \$802.436,316.

Kata kunci: distilasi, *heat integration*, *Pressure Swing Distillation*, Tetrahidrofuran, *Total Annual Cost*

ABSTRACT

Distillation is used commercially as a separation method in the chemical industry. Several studies have proved that distillation is an effective method and can be applied widely for separating a mixture. However, conventional distillation cannot separate azeotropic mixtures such as Tetrahydrofuran (THF) and water because of their volatility. Development and modification of distillation have been created to handle this problem and one of them is pressure swing distillation. Azeotrope composition is strongly affected by changing column pressure. Therefore, separation using pressure swing distillation produces high-purity products. Besides its problem of separating azeotrope, distillation is known as a process that consumes high energy. That problem can be solved by adding heat integration, both partial heat integration and full heat integration. Heat integration is a method to transfer heat from the condenser as a heat source to the reboiler as a heat sink. Different pressure in PSD columns opens up opportunities for applied heat integration. Heat integration could significantly decrease energy consumption in PSD and reduce Total Annual Cost until its minimum value with the target of purity product. By looking at those issues, optimal pressure for each column will be an important parameter that must be considered.

This research aims to determine the initial design of pressure swing distillation for separating the azeotropic THF-water mixture using Aspen Plus, choose the optimal pressure, compare the heat integration effect both in partial and full, and optimize pressure swing distillation design by using TAC as an objective function. Optimization will be done in a sequential method with several variables, such as the number of stages, feed stage, and recycle stage. PSD configuration with minimum TAC can be used as an economical design specification.

The optimal pressure is set at 0,6 bar for Low Pressure Column (LPC) and 11 bar for High Pressure Column (HPC). Optimization of PSD with partial heat integration results in column design with variables $NT_1=19$, $NF_1=14$, $NR_1=11$, $NT_2=13$, and $NF_2=3$. While optimization of PSD with full heat integration results in column design with variables of $NT_1=15$, $NF_1=12$, $NR_1=11$, $NT_2=14$, and $NF_2=3$. Optimization PSD with full heat integration is more economical than PSD with partial heat integration. The result shows that full heat integration PSD has a TAC value of \$708.765,0073, which is lower than it is for partial heat integration with a TAC value of \$802.436,316.

Keywords: distillation, heat integration, Pressure Swing Distillation, Tetrahydrofuran, Total Annual Cost

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan penelitian yang berjudul “Optimasi Desain Kolom *Pressure Swing Distillation* dengan Melibatkan Pemilihan Tekanan dan *Heat Integration* untuk Pemisahan THF-Air” dengan tepat waktu. Laporan penelitian ini disusun untuk memenuhi salah satu tugas akhir guna mencapai gelar sarjana Strata-1 Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Katolik Parahyangan.

Penulis menyampaikan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah mendukung penulis selama penyusunan laporan penelitian, yaitu:

1. Bapak Herry Santoso, S.T., M.T.M., Ph.D. dan Bapak Yansen Hartanto, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan pengarahan berupa ilmu pengetahuan, waktu, dan saran selama proses penyusunan laporan penelitian ini;
2. Orang tua dan keluarga penulis atas doa dan dukungan yang telah diberikan;
3. Teman-teman penulis yang telah memberikan saran, semangat, dan dukungan;
4. Semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyusunan laporan penelitian dan tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa laporan penelitian ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak agar dapat menjadi sarana perbaikan penulis dalam penyusunan laporan penelitian berikutnya. Akhir kata, penulis mengucapkan terima kasih dan berharap laporan penelitian ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Bandung, 17 Januari 2023

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
SURAT PERNYATAAN	iii
LEMBAR REVISI.....	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR SIMBOL	xiii
INTISARI.....	xv
<i>ABSTRACT</i>	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tema Sentral	2
1.3. Identifikasi Masalah.....	3
1.4. Premis	3
1.5. Hipotesis	4
1.6. Tujuan Penelitian	4
1.7. Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Distilasi	5
2.2. Menara Distilasi	7
2.3. Azeotrop.....	8
2.3.1. Azeotrop Positif.....	9
2.3.2. Azeotrop Negatif.....	10
2.4. Pemisahan Campuran Azeotrop.....	10
2.4.1. Distilasi Azeotropik.....	10
2.4.2. Distilasi Ekstraktif.....	11

2.4.3. <i>Pressure Swing Distillation</i>	12
2.5. <i>Heat Integration Distillation Column</i>	14
2.5.1. <i>Heat Pump</i>	15
2.5.2. <i>Secondary Reflux and Vaporization</i>	16
2.6. Tetrahidrofuran	18
2.7. Pemisahan THF-Air dengan <i>Pressure Swing Distillation</i>	19
2.8. Simulator Aspen Plus.....	23
2.8.1. Metode Pintas	23
2.8.2. Metode Eksak	24
2.9. Aspek Ekonomi.....	26
BAB III METODE PENELITIAN	28
3.1. Tahap Penelitian.....	28
3.1.1. Simulasi dan Validasi Model Kolom <i>Pressure Swing Distillation</i>	28
3.1.2. Desain Kolom dan Optimasi Sistem	30
3.2. Analisis Ekonomi.....	31
3.2.1. Biaya Alat.....	32
3.2.2. Biaya Energi	34
3.3. Analisis Sistem.....	35
3.4. Prosedur Penelitian	36
3.5. Lokasi dan Jadwal Kerja Penelitian.....	38
BAB IV PEMBAHASAN	41
4.1. Simulasi <i>Pressure Swing Distillation</i> tanpa <i>Heat Integration</i>	41
4.2. Simulasi Tekanan.....	43
4.3. <i>Partial Heat Integration</i>	48
4.3.1. Simulasi <i>Pressure Swing Distillation</i> dengan <i>Partial Heat Integration</i>	48
4.4.2. Optimasi <i>Pressure Swing Distillation</i> dengan <i>Partial Heat Integration</i>	49
4.4. <i>Full Heat Integration</i>	61

4.4.1. Simulasi <i>Pressure Swing Distillation</i> dengan <i>Full Heat Integration</i>	61
4.4.2. Optimasi <i>Pressure Swing Distillation</i> dengan <i>Full Heat Integration</i>	63
4.5. Perbandingan Hasil Simulasi <i>Pressure Swing Distillation</i>	79
4.5.1. Pengaruh Penerapan Integrasi Panas.....	79
4.5.2. Pengaruh Pemilihan Tekanan.....	80
4.5.3. Pengaruh Optimasi	80
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	85
5.1. Kesimpulan	85
5.2. Saran	85
DAFTAR PUSTAKA.....	86
LAMPIRAN CONTOH PERHITUNGAN	89

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Distilasi Konvensional.....	6
Gambar 2.2. Zona <i>Rectifying</i> dan <i>Stripping</i>	8
Gambar 2.3. (a) Kurva Tekanan terhadap Komposisi Azeotrop Positif, (b) Kurva Temperatur terhadap Komposisi Azeotrop Positif	9
Gambar 2.4. (a) Kurva Tekanan terhadap Komposisi Azeotrop Negatif, (b) Kurva Temperatur terhadap Komposisi Azeotrop Negatif.....	10
Gambar 2.5. Skema Distilasi Azeotropik	11
Gambar 2.6. Skema Distilasi Ekstraktif	12
Gambar 2.7. Skema <i>Pressure Swing Distillation</i>	13
Gambar 2.8. (a) <i>Mechanical Vapor Recompression</i> (MVR), (b) <i>Direct Vapor Recompression</i>	16
Gambar 2.9. <i>Secondary Reflux and Vaporization Distillation</i>	17
Gambar 2.10. Struktur Molekul Tetrahidrofuran	18
Gambar 2.11. Mekanisme Pembentukan Tetrahidrofuran dari 1,4-butanediol	19
Gambar 2.12. Perbandingan TAC Distilasi Ekstraktif dan PSD	20
Gambar 2.13. Campuran Azeotrop THF-Air pada Tekanan 1,01 bar	21
Gambar 2.14. Campuran Azeotrop THF-Air pada Tekanan 7,09 bar	22
Gambar 3.1. <i>Flowsheet</i> PSD tanpa <i>Heat Integration</i>	30
Gambar 3.2. <i>Flowsheet</i> PSD dengan <i>Partial Heat Integration</i>	30
Gambar 3.3. <i>Flowsheet</i> PSD dengan <i>Full Heat Integration</i>	31
Gambar 4.1. Simulasi Azeotrop THF-Air pada Tekanan 1,01 bar.....	41
Gambar 4.2. Simulasi Azeotrop THF-Air pada Tekanan 7,9 bar	42
Gambar 4.3. Pengaruh Tekanan Kolom 1 terhadap Biaya Energi.....	44
Gambar 4.4. Pengaruh Tekanan Kolom 1 terhadap Biaya Alat	45
Gambar 4.5. Pengaruh Tekanan Kolom 1 terhadap TAC.....	46
Gambar 4.6. Pengaruh Tekanan Kolom 2 terhadap Biaya Energi.....	46
Gambar 4.7. Pengaruh Tekanan Kolom 2 terhadap Biaya Alat	47
Gambar 4.8. Pengaruh Tekanan Kolom 2 terhadap TAC.....	48
Gambar 4.9. Konfigurasi PSD dengan <i>Partial Heat Integration</i>	49
Gambar 4.10. Pengaruh Jumlah Tahap Kolom 1 terhadap Biaya Energi.....	50
Gambar 4.11. Pengaruh Jumlah Tahap Kolom 1 terhadap Biaya Alat.....	51

Gambar 4.12. Pengaruh Jumlah Tahap Kolom 1 terhadap TAC.....	51
Gambar 4.13. Pengaruh Letak Masukan Umpan Kolom 1 terhadap Biaya Energi.....	52
Gambar 4.14. Pengaruh Letak Masukan Umpan Kolom 1 terhadap Biaya Alat.....	53
Gambar 4.15. Pengaruh Letak Masukan Umpan Kolom 1 terhadap TAC.....	54
Gambar 4.16. Pengaruh Letak Masukan <i>Recycle</i> Kolom 1 terhadap Beban <i>Reboiler</i> dan Kondensor	54
Gambar 4.17. Pengaruh Letak Masukan <i>Recycle</i> Kolom 1 terhadap Biaya Energi.....	55
Gambar 4.18. Pengaruh Letak Masukan <i>Recycle</i> LPC terhadap Biaya Alat.....	56
Gambar 4.19. Pengaruh Letak Masukan <i>Recycle</i> Kolom 1 terhadap Biaya TAC.....	56
Gambar 4.20. Pengaruh Jumlah Tahap Kolom 2 terhadap Biaya Energi.....	57
Gambar 4.21. Pengaruh Jumlah Tahap Kolom 2 terhadap Biaya Alat.....	58
Gambar 4.22. Pengaruh Jumlah Tahap Kolom 2 terhadap TAC.....	58
Gambar 4.23. Pengaruh Letak Masukan Umpan Kolom 2 terhadap Biaya Energi.....	59
Gambar 4.24. Pengaruh Letak Masukan Umpan Kolom 2 terhadap Biaya Alat.....	59
Gambar 4.25. Pengaruh Letak Masukan Umpan Kolom 2 terhadap TAC.....	60
Gambar 4.26. Konfigurasi PSD dengan <i>Full Heat Integration</i>	61
Gambar 4.27. Aplikasi Fortran pada <i>Full Heat Integration</i>	62
Gambar 4.28. Definisi Komponen Fortran pada <i>Full Heat Integration</i>	62
Gambar 4.29. Pengaturan <i>Vary</i> pada Fortran	63
Gambar 4.30. Pengaruh Jumlah Tahap Kolom 1 terhadap Biaya Energi.....	64
Gambar 4.31. Pengaruh Jumlah Tahap Kolom 1 terhadap Kebutuhan Energi HPC.....	65
Gambar 4.32. Pengaruh Jumlah Tahap Kolom 1 terhadap Biaya Alat.....	66
Gambar 4.33. Pengaruh Jumlah Tahap Kolom 1 terhadap TAC.....	66
Gambar 4.34. Pengaruh Letak Masukan Umpan Kolom 1 terhadap Biaya Energi.....	67
Gambar 4.35. Pengaruh Letak Masukan Umpan Kolom 1 terhadap Biaya Alat.....	68
Gambar 4.36. Pengaruh Letak Umpan Kolom 1 terhadap Kerja <i>Reboiler</i>	68
Gambar 4.37. Pengaruh Letak Masukan Umpan Kolom 1 terhadap TAC.....	69
Gambar 4.38. Pengaruh Letak <i>Recycle</i> Kolom 1 terhadap Biaya Energi.....	70
Gambar 4.39. Pengaruh Letak <i>Recycle</i> Kolom 1 terhadap Biaya Alat.....	70
Gambar 4.40. Pengaruh Letak <i>Recycle</i> Kolom 1 terhadap Kerja <i>Reboiler</i>	71
Gambar 4.41. Pengaruh Letak <i>Recycle</i> Kolom 1 terhadap TAC.....	72
Gambar 4.42. Pengaruh Jumlah Tahap Kolom 2 terhadap Beban <i>Reboiler</i> dan Kondensor Kolom 2	73

Gambar 4.43. Pengaruh Jumlah Tahap Kolom 2 terhadap Biaya Energi.....	73
Gambar 4.44. Pengaruh Jumlah Tahap Kolom 2 terhadap Biaya Alat.....	74
Gambar 4.45. Pengaruh Jumlah Tahap Kolom 2 terhadap TAC.....	74
Gambar 4.46 . Pengaruh Letak Masukan Umpan Kolom 2 terhadap Biaya Energi.....	75
Gambar 4.47. Pengaruh Letak Masukan Umpan Kolom 2 terhadap Beban Kerja HPC.....	76
Gambar 4.48. Pengaruh Letak Masukan Umpan Kolom 2 terhadap Kerja <i>Reboiler</i>	76
Gambar 4.49. Pengaruh Letak Masukan Umpan Kolom 2 terhadap Biaya Alat.....	77
Gambar 4.50. Pengaruh Letak Masukan Umpan Kolom 2 terhadap Beban Kondensor	78
Gambar 4.51. Pengaruh Letak Masukan Umpan Kolom 2 terhadap TAC.....	78
Gambar 4.52. Perbandingan TAC Konfigurasi PSD Hasil Simulasi dengan Literatur.....	80
Gambar 4.53. Perbandingan Aspek Ekonomi pada Pengaruh Integrasi Panas	81
Gambar 4.54. Perbandingan Aspek Ekonomi pada Beberapa Konfigurasi PSD Literatur .	82
Gambar 4.55. Perbandingan Aspek Ekonomi dengan Literatur pada Pengaruh Integrasi Panas	83
Gambar 4.56. Perbandingan Ekonomi Konfigurasi PSD tanpa dan dengan Optimasi.....	84
Gambar 4.57. Perbandingan Ekonomi Konfigurasi PSD dengan Literatur pada Pengaruh Optimasi	85

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Properti Fisik THF	19
Tabel 2.2. Aturan Depresiasi UU Republik Indonesia No.17 Tahun 2000.....	26
Tabel 3.1. Spesifikasi Awal <i>Pressure Swing Distillation</i> tanpa <i>Heat Integration</i>	28
Tabel 3.2. Nilai Parameter dalam Penentuan Luas Perpindahan Panas <i>Reboiler</i> dan Kondensor	33
Tabel 3.3. Nilai CEPCI Tahun 2008 dan 2022	34
Tabel 3.4. Harga <i>Steam</i> sebagai Sumber Panas Untuk <i>Reboiler</i>	35
Tabel 3.5. Rencana Kerja Penelitian	38
Tabel 4.1. Hasil Simulasi <i>Pressure Swing Distillation</i> tanpa <i>Heat Integration</i>	42
Tabel 4.2. Hasil Simulasi Tekanan LPC dan HPC	43
Tabel 4.3. Temperatur Distilat LPC	44
Tabel 4.4. Pengaruh NF1 terhadap <i>Reflux Rate</i> pada <i>Partial Heat Integration</i>	53
Tabel 4.5. Pengaruh NR1 terhadap <i>Reflux Rate</i> pada <i>Partial Heat Integration</i>	55
Tabel 4.6. Pengaruh NF2 terhadap <i>Reflux Rate</i> pada <i>Partial Heat Integration</i>	60
Tabel 4.7. Kondisi Operasi dan Desain Optimal PSD dengan <i>Partial Heat Integration</i>	60
Tabel 4.8. Pengaruh NF1 terhadap <i>Reflux Rate</i> pada <i>Full Heat Integration</i>	67
Tabel 4.9. Pengaruh NR1 terhadap <i>Reflux Rate</i> pada <i>Full Heat Integration</i>	71
Tabel 4.10. Pengaruh NF2 terhadap <i>Reflux Rate</i> pada <i>Full Heat Integration</i>	77
Tabel 4.11. Kondisi Operasi dan Desain Optimal PSD dengan <i>Full Heat Integration</i>	79

DAFTAR SIMBOL

A_C	= kebutuhan luas perpindahan panas kondensor, m^2
A_E	= kebutuhan luas perpindahan panas penukar panas, m^2
A_R	= kebutuhan luas perpindahan panas <i>reboiler</i> , m^2
B1	= produk bawah LPC
B2	= produk bawah HPC
D1	= distilat LPC
D2	= distilat HPC
D_c	= diameter dalam kolom, m
H_c	= tinggi kolom,
L_c	= tinggi kolom, m
L_{c1}	= tinggi kolom LPC, m
L_{c2}	= tinggi kolom HPC, m
M	= <i>air leakage rate</i> , lb/h
NT	= jumlah tahap kolom
NT1	= jumlah tahap LPC
NT2	= jumlah tahap HPC
NF	= tahap masukan umpan
NF1	= tahap masukan umpan ke LPC
NF2	= tahap masukan umpan ke HPC
NR	= tahap masukan <i>recycle</i>
NR1	= tahap masukan <i>recycle</i> ke LPC
P	= tekanan, bar
P1	= tekanan LPC, bar
P2	= tekanan HPC, bar
P_A	= tekanan uap komponen A, bar
P_A^0	= tekanan uap murni komponen A, bar
Q_c	= beban kondensor, kJ/s
Q_E	= beban penukar panas, kJ/s
Q_{HI}	= beban penukar panas <i>heat integration</i> , kJ/s
Q_R	= beban <i>reboiler</i> , kJ/s
Q_{R1}	= beban <i>reboiler</i> LPC, kJ/s

Q_{R2}	= beban <i>reboiler</i> HPC, kJ/s
RR	= rasio refluks
T	= temperatur, K, °C
ΔT_{LMTD}	= perbedaan temperatur antara <i>steam</i> dengan <i>reboiler</i> , K
ΔT_R	= perbedaan temperatur antara <i>steam</i> dengan <i>reboiler</i> , K
ΔT_C	= perbedaan temperatur antara <i>cooling water</i> dengan kondensor, K
U_c	= koefisien perpindahan panas kondensor, kJ/s.K.m ²
U_E	= koefisien perpindahan panas penukar panas, kJ/s.K.m ²
U_R	= koefisien perpindahan panas <i>reboiler</i> , kJ/s.K.m ²
V_c	= volume kolom distilasi, m ³

Singkatan:

CEPCI	= <i>Chemical Engineering Plant Cost Index</i>
DPHE	= <i>Double Pipe Heat Exchanger</i>
HIDiC	= <i>Heat Integration Distillation Column</i>
HPC	= <i>High Pressure Column</i>
LPC	= <i>Low Pressure Column</i>
MVR	= <i>Mechanical Vapor Recompression</i>
NRTL	= <i>Non-Random Two-Liquid</i>
PBP	= <i>Payback Period</i>
PSD	= <i>Pressure Swing Distillation</i>
PTMEG	= <i>Polytetramethylene-glycol</i>
SRV	= <i>Secondary Reflux and Vaporization</i>
TAC	= <i>Total Annual Cost</i>
THF	= Tetrahydrofuran

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Tetrahidrofuran (THF) merupakan cairan tak berwarna yang banyak digunakan karena peranan pentingnya sebagai produk serbaguna (LyondellBasell, 2011). Keunggulannya itu membuat THF dapat diaplikasikan baik sebagai pelarut, produk intermediet, maupun produk akhir siap pakai. Industri polimer dan farmasi merupakan contoh dari industri yang melibatkan THF dalam proses produksinya (Ji Ram, dkk., 2019). Luasnya aplikasi THF pada berbagai industri menunjukkan bahwa THF bernilai ekonomis sehingga dalam jangka waktu 2021-2025, Mordor Intelligence memprediksi kenaikan penjualan sebesar 6% untuk pasar global THF.

Dalam memperoleh THF dengan kemurnian yang tinggi, proses produksinya perlu ditinjau secara mendalam. Salah satu proses produksi yang banyak digunakan hingga menyumbang 40% produksi THF pada tahun 2021 adalah proses reppe (Li, 2021). Proses ini melibatkan reaksi antara asetilen dan formaldehid yang menghasilkan 1,4-butanediol dan dilanjutkan sintesis THF-Air dengan menggunakan katalis asam. Namun, hasil sintesis THF-Air dari 1,4-butanediol merupakan campuran azeotrop yang tidak dapat dipisahkan dengan distilasi konvensional. Pemisahan campuran azeotrop tidak dapat dipisahkan dikarenakan pada suatu kondisi ketika campuran azeotrop dipanaskan, komposisi uap azeotrop akan setara dengan komposisi cairnya.

Salah satu proses pemisahan yang digunakan untuk campuran azeotrop adalah *pressure swing distillation*. *Pressure swing distillation* terdiri dari dua kolom yang beroperasi pada tekanan berbeda sehingga memungkinkan untuk memisahkan campuran azeotrop. Dengan adanya perbedaan tekanan pada kedua kolom yang sebanding dengan perbedaan temperatur, terbuka peluang untuk dapat mengaplikasikan integrasi panas pada konfigurasi *pressure swing distillation*. Integrasi panas yang ditambahkan pada kolom distilasi dapat dilakukan dengan memanfaatkan kalor kondensor baik secara *partial* maupun *full* guna menghemat energi yang dibutuhkan dalam pengoperasian kolom distilasi.

Pemisahan THF-Air menggunakan *pressure swing distillation* telah diteliti sebelumnya oleh Luyben & Chien (2010) dengan fungsi objektif berupa *Total Annual Cost*. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa PSD dengan *full heat integration* memiliki nilai TAC yang lebih rendah 6,25% dari PSD dengan *partial heat integration*. Namun, Luyben & Chien tidak melakukan optimasi pada penelitiannya sehingga pada tahun 2018, Christanto dan

Mulyadi mengembangkan penelitian tersebut dengan optimasi desain kolom. Christanto dan Mulyadi (2018) melakukan optimasi secara simultan dan bertahap terhadap jumlah tahap, letak masukan umpan, dan letak masukan *recycle* pada PSD dengan *partial* dan *full heat integration*. Berdasarkan penelitian tersebut, nilai TAC pada *partial heat integration* lebih rendah 0,827% dari PSD dengan *full heat integration*. Namun, kedua penelitian tersebut tidak melibatkan variabel tekanan pada proses optimasinya. Padahal PSD berprinsip pada perbedaan tekanan, sehingga tekanan yang optimal dapat mempermudah proses pemisahan THF-Air dan nilai TAC yang diperoleh lebih minimum.

Konfigurasi PSD tersebut dapat disempurnakan dengan melakukan optimasi sistem yang mampu mengurangi konsumsi energi, biaya investasi, dan biaya *maintenance*. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut yang melibatkan pemilihan tekanan pada PSD untuk sistem THF-Air. Penelitian ini akan difokuskan lebih lanjut mengenai pemisahan THF-Air menggunakan *pressure swing distillation* dengan mengoptimalkan tekanan dan desain kolom guna memperoleh keuntungan yang tinggi dalam aspek ekonomi. Proses optimasi tersebut melibatkan fungsi objektif berupa TAC dan *constraint* berupa kemurnian THF dan air.

1.2. Tema Sentral

Distilasi sebagai salah satu metode pemisahan campuran telah banyak dilakukan, tetapi distilasi konvensional tidak mampu memisahkan campuran azeotrop seperti campuran THF-Air. Selain itu, konsumsi energi proses distilasi yang besar seringkali menjadi fokus permasalahan bagi industri kimia. Salah satu perkembangan distilasi yang mampu menangani masalah tersebut adalah *pressure swing distillation*. Pemilihan tekanan kedua kolom pada sistem PSD mampu membuka peluang dalam meminimalisasi konsumsi energi dengan *total annual cost* minimum. Namun, studi mengenai simulasi PSD dengan pemilihan tekanan dan desain kolom yang optimum masih terbatas. Berdasarkan permasalahan tersebut, fokus utama dari penelitian ini adalah mempelajari konfigurasi PSD dengan dan tanpa *heat integration* serta melibatkan berbagai variabel optimasi seperti tekanan, jumlah tahap, letak masukan umpan, dan letak masukan *recycle*.

1.3. Identifikasi Masalah

Beberapa masalah yang teridentifikasi dan akan dikaji dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh pemilihan tekanan kedua kolom terhadap nilai TAC?
2. Bagaimana pengaruh desain kolom terhadap nilai TAC? (Desain kolom berupa diameter, tinggi kolom, jumlah tahap, letak umpan, dan letak *recycle*)
3. Bagaimana perbandingan nilai TAC antara konfigurasi *pressure swing distillation* tanpa *heat integration*, *partial heat integration*, dan *full heat integration*?
4. Apakah konfigurasi *pressure swing distillation* dalam pemisahan THF-Air dengan *heat integration* lebih ekonomis daripada konfigurasi tanpa *heat integration*?

1.4. Premis

Beberapa literatur dari studi pustaka yang berkaitan dengan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Model kolom distilasi dengan simulator *Aspen Plus* adalah model RadFrac (Ghughe, dkk., 2017)
2. Model termodinamika yang mampu menghasilkan kurva T-xy campuran azeotrop THF-Air adalah NRTL (Christanto & Mulyadi, 2018).
3. Kolom pertama dioperasikan pada 1,01 bar untuk *low pressure column* (LPC) dan 7,9 bar untuk *high pressure column* (HPC) (Christanto dan Mulyadi, 2018).
4. Konfigurasi distilasi dilengkapi dengan kondensor total dan *reboiler kettle* (Christanto dan Mulyadi, 2018).
5. Campuran Tetrahidrofur (THF) dan air mampu membentuk *minimum-boiling azeotrope* dengan komposisi 82,3% mol THF pada 1,01 bar dan 63,9% mol THF pada 7,9 bar (Christanto dan Mulyadi, 2018).
6. Spesifikasi produk hasil pemisahan campuran THF-Air adalah 1 ppm THF sebagai produk bawah LPC dan 1 ppm air sebagai produk bawah HPC (Christanto dan Mulyadi, 2018).
7. Umpan pemisahan THF-air dengan PSD memiliki laju alir sebesar 2000 kmol/jam dengan komposisi 6% mol THF dan temperatur 35°C (Christanto dan Mulyadi, 2018).
8. Laju alir *recycle* dari kolom HPC ke LPC sebesar 149,5 kmol/jam dengan komposisi 65,3% dan temperatur 136°C (Christanto dan Mulyadi, 2018).

9. Jumlah tahap, letak tahap umpan, dan letak tahap *recycle* untuk kolom LPC secara berurutan adalah 17, 14, dan 13 (Christanto dan Mulyadi, 2018).
10. Jumlah tahap, letak tahap umpan, dan letak tahap *recycle* untuk kolom HPC secara berurutan adalah 17 dan 6 (Christanto dan Mulyadi, 2018).
11. Integrasi panas pada *pressure swing distillation* dilakukan secara *partial* dan *full* (Christanto dan Mulyadi, 2018).
12. Optimasi dilakukan secara bertahap untuk masing-masing konfigurasi (Christanto dan Mulyadi, 2018).
13. Pabrik diasumsikan beroperasi selama 8000 jam/tahun atau setara dengan $2,88 \times 10^7$ detik/tahun (Christanto dan Mulyadi, 2018).

1.5. Hipotesis

Beberapa hipotesis yang berkaitan dalam identifikasi masalah adalah sebagai berikut:

1. Pemilihan tekanan yang optimal menghasilkan TAC yang minimum
2. Optimasi variabel desain mampu menghasilkan TAC yang minimum.
3. Nilai TAC pada PSD dengan *full heat integration* < *partial heat integration* < tanpa *heat integration*.
4. Konfigurasi *pressure swing distillation* dengan *heat integration* mampu mereduksi energi hingga 40% dibandingkan tanpa *heat integration*.

1.6. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh pemilihan tekanan kedua kolom terhadap nilai TAC.
2. Mengetahui pengaruh desain kolom optimal terhadap nilai TAC.
3. Membandingkan nilai TAC antara konfigurasi PSD tanpa *heat integration*, *partial heat integration*, dan *full heat integration*.

1.7. Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan beberapa manfaat, yaitu:

1. Bagi mahasiswa, untuk mengetahui perkembangan distilasi terlebih untuk campuran azeotrop yang memerlukan perlakuan khusus.
2. Bagi ilmuwan, untuk menyajikan referensi tambahan mengenai simulasi dan desain proses *pressure swing distillation* dengan *heat integration* dalam pemisahan THF-Air. Selain itu, ilmuwan dapat mengembangkan penelitian lebih lanjut guna menghasilkan penelitian yang lebih unggul pada masa yang akan datang.

3. Bagi industri, untuk memberikan metode alternatif dalam pemisahan campuran THF-Air yang mampu diaplikasikan secara komersial. Selain itu, industri dapat mengembangkan PSD lebih lanjut yang lebih hemat energi dengan keuntungan yang maksimum.