

## DAFTAR ISI

PERNYATAAN.....	iii
HALAMAN PERSETUJUAN.....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN.....	v
PRAKATA.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN.....	xvii
INTISARI.....	xx
ABSTRACT.....	xxi
1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Keaslian Penelitian.....	4
1.3 Manfaat Penelitian.....	7
1.4 Tujuan Penelitian.....	7
2 TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1 Terpentin.....	8
2.2 Katalis Cation Exchange Resin.....	11
2.3 Sintesis Bornil Ester dan Borneol.....	13
2.4 Studi Kinetika Reaksi Terpentin.....	16
2.5 Distilasi Reaktif.....	19
2.6 Analisis Termodinamika.....	20
3 LANDASAN TEORI.....	25
3.1 Mekanisme Reaksi Esterifikasi $\alpha$ -Pinene.....	25
3.2 Reaksi Katalitik Heterogen.....	27
3.3 Model Kinetika Reaksi.....	31
3.3.1 Model <i>Pseudohomogeneous – Irreversible – Lump Model</i> .....	31
3.3.2 Model Langmuir – Hinshelwood.....	33

3.3.3	Model <i>Reversible</i> per Komponen.....	33
3.4	Pemodelan pada Kolom Distilasi Reaktif .....	36
3.4.1	Model Equilibrium (EQ) .....	38
3.4.2	Model Non Equilibrium (NEQ) .....	42
3.5	Analisis Termodinamika .....	44
3.5.1	<i>Exergy loss</i> karena Perubahan Konsentrasi .....	45
3.5.2	<i>Exergy loss</i> karena Perubahan Fase .....	47
3.5.3	<i>Exergy loss</i> karena Perubahan Suhu. ....	48
3.5.4	<i>Exergy loss</i> karena Reaksi Kimia.....	48
4	HIPOTESIS .....	50
5	METODE PENELITIAN .....	51
5.1	Cakupan Penelitian .....	51
5.2	Proses <i>Batch</i> .....	52
5.2.1	Bahan.....	52
5.2.2	Rangkaian Alat.....	53
5.2.3	Cara Penelitian .....	53
5.2.4	Analisis Data .....	54
5.2.5	Interpretasi Data .....	55
5.3	Proses Kontinyu .....	58
5.3.1	Bahan.....	58
5.3.2	Rangkaian Alat.....	58
5.3.3	Cara Penelitian .....	60
5.4	Simulasi Proses Distilasi Reaktif .....	61
6	HASIL DAN PEMBAHASAN .....	62
6.1	Reaksi Esterifikasi Proses <i>Batch</i> .....	62
6.1.1	Pengaruh Kecepatan Pengadukan .....	64
6.1.2	Pengaruh Jenis Katalis .....	65
6.1.3	Pengaruh Konsentrasi Katalis .....	67
6.1.4	Pengaruh Rasio Reaktan .....	69
6.1.5	Pengaruh Suhu Reaksi .....	71
6.1.6	Penggunaan Kembali Katalis .....	73

6.2	Studi Kinetika Reaksi Esterifikasi Terpentin.....	76
6.2.1	Model Kinetika 1: <i>Pseudohomogeneous – Lump Model</i> .....	76
6.2.2	Analisis Regime .....	83
6.2.3	Model Kinetika 2: <i>Langmuir - Hinshelwood – Lump Model</i> .....	85
6.2.4	Model Kinetika 3: <i>Reversible – per Komponen</i> .....	86
6.3	Reaksi Saponifikasi Proses <i>Batch</i> .....	91
6.4	Esterifikasi Terpentin Secara Kontinyu .....	94
6.4.1	Penentuan Jumlah <i>Stage</i> pada Kolom Distilasi Reaktif.....	94
6.4.2	Pengaruh Konsentrasi Katalis .....	95
6.4.3	Pengaruh Rasio Reaktan .....	100
6.4.4	Pengaruh Kecepatan Aliran Umpan.....	102
6.5	Simulasi pada Kolom Distilasi Reaktif dengan ASPEN Plus.....	104
6.5.1	Simulasi metode penentuan sifat bahan dan campuran.....	104
6.5.2	Simulasi dengan Pendekatan Equilibrim dan Non <i>Equilibrium</i> .	107
6.6	Analisis Eksergi pada Kolom Distilasi Reaktif.....	112
6.6.1	<i>Base Case</i> .....	113
6.6.2	Pengaruh Rasio Refluks .....	123
6.6.3	Pengaruh Tekanan.....	127
6.6.4	Pengaruh Jumlah <i>Stage</i> Total.....	130
6.6.5	Pengaruh Letak <i>Stage</i> Umpan.....	134
7	KESIMPULAN .....	138
	DAFTAR PUSTAKA .....	140

## DAFTAR TABEL

Tabel 2-1.	Titik didih senyawa terpenin (Masten and Haneke, 2002) .....	8
Tabel 2-2.	Cakupan penelitian tentang terpenin yang telah dilakukan .....	22
Tabel 5-1.	Sifat-sifat fisis katalis ion-exchange resin (Dow Chemicals) .....	52
Tabel 6-1.	Hasil reaksi menggunakan terpenin dan $\alpha$ -pinene .....	62
Tabel 6-2.	Komposisi produk reaksi menggunakan berbagai tipe katalis .....	66
Tabel 6-3.	Konsentrasi situs asam katalis Amberlyst 15 wet .....	74
Tabel 6-4.	Konsentrasi senyawa pada reaksi terpenin dengan asam asetat ...	79
Tabel 6-5.	Nilai konstanta kecepatan reaksi Model 1a .....	79
Tabel 6-6.	Nilai konstanta kecepatan reaksi Model 1b .....	82
Tabel 6-7.	Nilai modulus Thiele ( $\phi$ ) dan effectiveness factor ( $\eta$ ) pada berbagai suhu .....	84
Tabel 6-8.	Nilai k pada berbagai suhu model Langmuir - Hinshelwood .....	85
Tabel 6-9.	Harga k pada berbagai suhu reaksi .....	87
Tabel 6-10.	Nilai A, E dan kesalahan relatif ( $R^2$ ) .....	89
Tabel 6-11.	Perbandingan nilai E .....	91
Tabel 6-12.	Hasil saponifikasi bornil asetat dengan larutan NaOH 20% .....	91
Tabel 6-13.	Konversi $\alpha$ -pinene dan selektivitas produk reaksi tanpa katalis ...	96
Tabel 6-14.	Konversi $\alpha$ -pinene dan selektivitas produk reaksi dengan katalis	96
Tabel 6-15.	Konversi $\alpha$ -pinene, selektivitas produk, dan <i>yield</i> bornil asetat pada berbagai konsentrasi katalis .....	98
Tabel 6-16.	Konversi $\alpha$ -pinene, selektivitas produk, dan <i>yield</i> bornil asetat pada berbagai rasio reaktan .....	100
Tabel 6-17.	Konversi $\alpha$ -pinene, selektivitas produk, dan <i>yield</i> bornil asetat pada berbagai kecepatan aliran umpan .....	102
Tabel 6-18.	Hasil simulasi pengaruh rasio reaktan terhadap konversi $\alpha$ -pinene dengan metode NRTL dan UNIQUAC .....	105

Tabel 6-19.	Hasil simulasi pengaruh rasio reaktan terhadap selektivitas produk asetat dengan metode NRTL dan UNIQUAC.....	106
Tabel 6-20.	Hasil simulasi pengaruh rasio reaktan terhadap konversi $\alpha$ - <i>pinene</i> dan selektivitas produk asetat metode EQ dan NEQ .....	108
Tabel 6-21.	Hasil simulasi pengaruh kecepatan umpan terhadap konversi $\alpha$ - <i>pinene</i> dan selektivitas produk asetat metode EQ dan NEQ.....	110
Tabel 6-22.	<i>Exergy loss</i> pada kolom distilasi reaktif (F = 100 kmol/jam) .....	116
Tabel 6-23.	Komposisi produk hasil atas dan bawah kolom distilasi reaktif pada berbagai <i>stage</i> total.....	134

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2-1.	Produk turunan $\alpha$ -pinene (Thiel and Hendricks, 2004).....	9
Gambar 2-2.	Penurunan energi aktivasi akibat keberadaan katalis.....	11
Gambar 2-3.	Struktur katalis Amberlyst .....	12
Gambar 2-4.	Tahapan proses pembuatan borneol .....	13
Gambar 2-5.	Skema reaksi isomerisasi (Findik and Gunduz, 1997).....	17
Gambar 2-6.	Skema reaksi isomerisasi (Grzona et al., 2005) .....	18
Gambar 2-7.	Teknologi distilasi reaktif .....	20
Gambar 3-1.	Mekanisme esterifikasi $\alpha$ – pinene (Liu et.al, 2008).....	25
Gambar 3-2.	Mekanisme difusi pada katalis padat .....	28
Gambar 3-3.	Ilustrasi perpindahan massa reaktan ke permukaan katalis.....	28
Gambar 3-4.	Hubungan antara <i>effectiveness factor</i> dengan <i>Thiele modulus</i> .....	29
Gambar 3-5.	Skema reaksi antara $\alpha$ -pinene (A) dan asam asetat (B) .....	34
Gambar 3-6.	Skema <i>overall</i> kolom distilasi reaktif .....	38
Gambar 3-7.	Skema pada zona reaksi .....	39
Gambar 3-8.	Skema pada <i>feed stage</i> .....	40
Gambar 3-9.	Skema condenser.....	41
Gambar 3-10.	Skema reboiler .....	41
Gambar 3-11.	Skema proses pada suatu <i>stage</i> untuk model NEQ.....	42
Gambar 3-12.	Fenomena proses transfer ke dalam fase cair.....	43
Gambar 3-13.	Model premixing pada suatu <i>stage</i> (Budiman and Ishida, 2004) .	45
Gambar 5-1.	Rangkaian alat untuk reaksi proses <i>batch</i> .....	53
Gambar 5-2.	Algoritma perhitungan konstanta kecepatan reaksi .....	57
Gambar 5-3.	Rangkaian alat distilasi reaktif untuk produksi bornil asetat .....	59
Gambar 5-4.	Kurva keseimbangan uap – cair metanol – air pada 1 atm .....	60
Gambar 6-1.	Perbandingan hasil reaksi dengan terpenin dan $\alpha$ -pinene .....	63
Gambar 6-2.	Konversi terpenin pada berbagai kecepatan pengadukan .....	64

Gambar 6-3.	Konversi $\alpha$ -pinene, selektivitas dan <i>yield</i> bornil asetat pada berbagai konsentrasi katalis .....	68
Gambar 6-4.	Konversi $\alpha$ -pinene dan selektivitas bornil asetat pada berbagai rasio reaktan .....	70
Gambar 6-5.	Konversi terpenin pada berbagai suhu reaksi .....	71
Gambar 6-6.	Selektivitas bornil asetat pada berbagai suhu reaksi .....	72
Gambar 6-7.	Konversi $\alpha$ -pinene dan selektivitas bornil asetat pada berbagai pengulangan pemakaian katalis.....	73
Gambar 6-8.	Distribusi senyawa pada reaksi terpenin dengan asam asetat selama waktu reaksi .....	77
Gambar 6-9.	Distribusi senyawa selama waktu reaksi pada berbagai suhu .....	78
Gambar 6-10.	Perbandingan antara C data dan C hitung untuk model 1a .....	81
Gambar 6-11.	Perbandingan Cdata dan Chitung untuk model 1b.....	83
Gambar 6-12.	Konsentrasi $\alpha$ -pinene hasil perhitungan dan data percobaan pada berbagai suhu reaksi.....	87
Gambar 6-13.	Perbandingan konsentrasi data percobaan dan hasil hitungan pada berbagai suhu .....	88
Gambar 6-14.	Pengaruh waktu reaksi terhadap konversi, selektivitas dan <i>yield</i> pada saponifikasi bornil asetat .....	92
Gambar 6-15.	Pengaruh suhu terhadap konversi, selektivitas dan <i>yield</i> pada reaksi saponifikasi bornil asetat.....	93
Gambar 6-16.	Penentuan jumlah stage seimbang pada kolom distilasi reaktif....	95
Gambar 6-17.	Konversi $\alpha$ -pinene dan <i>yield</i> produk reaksi tanpa katalis .....	97
Gambar 6-18.	Konversi $\alpha$ -pinene dan <i>yield</i> produk reaksi dengan katalis.....	97
Gambar 6-19.	Konversi $\alpha$ -pinene dan <i>yield</i> bornil asetat pada berbagai konsentrasi katalis .....	99
Gambar 6-20.	Selektivitas produk pada berbagai konsentrasi katalis.....	99
Gambar 6-21.	Konversi $\alpha$ -pinene dan <i>yield</i> bornil asetat pada berbagai rasio reaktan .....	101
Gambar 6-22.	Selektivitas produk pada berbagai rasio reaktan.....	101

Gambar 6-23. Konversi $\alpha$ -pinene dan yield bornil asetat pada berbagai kecepatan aliran umpan.....	103
Gambar 6-24. Selektivitas produk pada berbagai kecepatan aliran umpan .....	103
Gambar 6-25. Pengaruh rasio reaktan terhadap konversi $\alpha$ -pinene dengan menggunakan metode NRTL, SRK, PR, dan UNIQUAC .....	106
Gambar 6-26. Pengaruh rasio reaktan terhadap selektivitas produk asetat menggunakan metode NRTL dan UNIQUAC .....	107
Gambar 6-27. Pengaruh rasio reaktan terhadap konversi $\alpha$ -pinene dengan menggunakan metode EQ dan NEQ .....	109
Gambar 6-28. Pengaruh rasio reaktan terhadap selektivitas produk asetat menggunakan metode EQ dan NEQ .....	110
Gambar 6-29. Pengaruh kecepatan aliran umpan terhadap konversi $\alpha$ -pinene menggunakan metode EQ dan NEQ .....	111
Gambar 6-30. Pengaruh kecepatan aliran umpan terhadap selektivitas produk asetat menggunakan metode EQ dan NEQ .....	112
Gambar 6-31. Fraksi mol tiap komponen dalam fase uap pada setiap <i>stage</i> .....	113
Gambar 6-32. Fraksi mol tiap komponen dalam fase cair pada setiap <i>stage</i> .....	114
Gambar 6-33. Suhu fase uap dan fase cair pada setiap <i>stage</i> .....	115
Gambar 6-34. <i>Exergy loss</i> karena perubahan suhu pada setiap <i>stage</i> (R=1) .....	117
Gambar 6-35. <i>Exergy loss</i> karena reaksi kimia pada setiap <i>stage</i> (R=1).....	118
Gambar 6-36. <i>Exergy loss</i> karena pencampuran pada setiap <i>stage</i> (R=1).....	119
Gambar 6-37. <i>Exergy loss</i> karena perubahan fase pada setiap <i>stage</i> (R=1) .....	120
Gambar 6-38. <i>Exergy loss</i> total pada setiap <i>stage</i> (R=1).....	121
Gambar 6-39. Profil <i>exergy loss</i> pada setiap <i>stage</i> di sepanjang kolom (R=1) ..	122
Gambar 6-40. Pengaruh rasio refluks terhadap <i>yield</i> produk asetat.....	123
Gambar 6-41. Pengaruh rasio refluks terhadap <i>exergy loss</i> total.....	125
Gambar 6-42. Profil <i>exergy loss</i> pada setiap <i>stage</i> di sepanjang kolom (R=0.5)	126
Gambar 6-43. Pengaruh tekanan terhadap <i>yield</i> produk asetat.....	127
Gambar 6-44. Pengaruh rasio refluks terhadap konversi $\alpha$ -pinene pada berbagai tekanan operasi.....	128



Gambar 6-45. Pengaruh rasio refluks terhadap yield produk asetat pada berbagai tekanan operasi.....	129
Gambar 6-46. Pengaruh tekanan terhadap <i>exergy loss</i> total .....	130
Gambar 6-47. Pengaruh jumlah <i>stage</i> total terhadap <i>yield</i> produk asetat.....	131
Gambar 6-48. Pengaruh jumlah <i>stage</i> total terhadap <i>exergy loss</i> total .....	131
Gambar 6-49. Profil <i>exergy loss</i> total di setiap <i>stage</i> pada berbagai jumlah <i>stage</i> total.....	133
Gambar 6-50. Pengaruh letak <i>feed stage</i> terhadap <i>yield</i> produk asetat.....	135
Gambar 6-51. Pengaruh letak <i>stage</i> umpan terhadap <i>exergy loss</i> total.....	136
Gambar 6-52. Profil <i>exergy loss</i> pada setiap <i>stage</i> dengan <i>stage</i> umpan = 5 .....	137