

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Halaman Persetujuan Tim Promotor.....	iii
Pernyataan Bebas Plagiasi.....	iv
Prakata.....	v
Daftar Isi	vii
Daftar Tabel	ix
Daftar Gambar	xi
Daftar Lambang.....	xv
Intisari	xvii
<i>Abstract</i>	xviii
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan dan Batasan Masalah.....	4
1.3. Keaslian Penelitian	5
1.4. Tujuan Penelitian	6
1.5. Manfaat Penelitian	6
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Tinjauan Pustaka	7
2.1.1. Mikroalga	7
2.1.2. Komponen bioaktif pada <i>Spirulina platensis</i>	9
2.1.3. <i>Phycocyanin</i>	11
2.1.4. Metode ekstraksi <i>phycocyanin</i>	12
2.1.5. Metode <i>freezing-thawing</i>	16
2.1.6. Model <i>freezing-thawing</i>	18
2.1.6.1. Konduktivitas termal campuran	18
2.1.6.2. Densitas campuran	19
2.1.6.3. <i>Specific heat</i> campuran.....	20
2.2. Landasan Teori.....	20
2.2.1. Pemodelan <i>freezing</i>	22
2.2.2. Pemodelan <i>thawing</i>	28
2.2.3. Ekstraksi <i>phycocyanin</i>	28
2.2.4. Variabel-variabel yang berpengaruh	29
2.3. <i>Life cycle assessment</i> (LCA)	30
2.4. Hipotesis.....	33
BAB III. METODE PENELITIAN	34
3.1. Bahan	34
3.2. Alat	34
3.3. Jalannya penelitian	35
3.3.1. Pengeringan SP segar	35
3.3.2. Perendaman SP segar	36
3.3.3. Perendaman SP kering.....	37

3.4. Analisis hasil	37
3.5. Keseimbangan ekstraksi.....	38
3.6. Uji aktivitas antioksidan (metode DPPH)	38
3.7. Evaluasi model <i>freezing</i>	39
BAB IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	41
4.1. <i>Spirulina platensis</i>	41
4.2. Pengaruh kadar air	44
4.2.1. Pengeringan SP segar	44
4.2.2. Perendaman SP segar	49
4.2.3. Kendala penanganan bahan baku SP segar.....	51
4.2.4. Perendaman SP kering.....	55
4.3. Pengaruh waktu pembekuan.....	59
4.4. Pengaruh kecepatan pembekuan.....	60
4.5. Pengaruh perbandingan pelarut terhadap biomassa (S/B).....	64
4.6. Keseimbangan ekstraksi PC	66
4.7. Aktivitas antioksidan.....	69
4.8. Penyelesaian model matematis tahap <i>freezing</i>	69
4.8.1. Kinerja alat sensor dan perekam suhu	70
4.8.2. Simulasi proses <i>freezing</i> dengan Model 1.....	71
4.8.3. Simulasi proses <i>freezing</i> dengan Model 2.....	77
4.8.4. Model <i>freezing</i> yang dipilih.....	85
4.9. Penyelesaian model matematis tahap <i>thawing</i>	86
4.9.1. Simulasi proses <i>thawing</i> dengan Model 1	86
4.9.2. Simulasi proses <i>thawing</i> dengan Model 2	91
4.9.3. Model <i>thawing</i> yang dipilih.....	98
4.10. <i>Life cycle assessment</i> (LCA).....	98
4.10.1. Tujuan dan cakupan.....	98
4.10.2. Sistem produk ekstraksi PC dari SP	98
4.10.2.1. Sistem produk I.....	99
4.10.2.2. Sistem produk II	99
4.10.2.3. Sistem produk III.....	100
4.10.3. <i>Life cycle inventory</i> (LCI).....	101
4.10.3.1. <i>Life cycle inventory</i> Sistem Produk I	101
4.10.3.2. <i>Life cycle inventory</i> Sistem Produk II.....	102
4.10.3.3. <i>Life cycle inventory</i> Sistem Produk III	102
4.10.4. <i>Life cycle impact assessment</i> (LCIA).....	103
4.10.5. <i>Life cycle interpretation</i>	106
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	107
DAFTAR PUSTAKA	109
LAMPIRAN	117
Cuplikan data rekaman suhu	117
Program matlab untuk penyelesaian numeris (Model 1)	125
Program matlab untuk penyelesaian numeris (Model 2)	128
Beberapa tangkapan layar hasil analisis dengan OpenLCA 1.11.0	143

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1.	Rangkuman penelitian sejenis.....	5
Tabel 2.1	Beberapa spesies mikroalga dan kandungan gizinya.....	7
Tabel 2.2	Habitat, produk utama, dan aplikasi mikroalga	8
Tabel 2.3	Komposisi kimia per kg SP.....	10
Tabel 2.4	Analisis nilai gizi rerata <i>Spirulina</i> per 100 g.....	10
Tabel 2.5	Beberapa spesies mikroalga yang mengandung PC.....	12
Tabel 2.6	Kondisi operasi pada ekstraksi PC dari SP secara konvensional...	13
Tabel 2.7	Kondisi operasi pada ekstraksi PC dari SP secara ultrasonik.....	14
Tabel 2.8	Perbandingan beberapa metode <i>cell-disruption</i>	16
Tabel 2.9	Berbagai persamaan konduktivitas termal pada peristiwa <i>freezing-thawing</i>	19
Tabel 2.10	Beberapa persamaan untuk menghitung densitas campuran yang mengalami <i>freezing-thawing</i>	20
Tabel 2.11	Beberapa persamaan untuk menghitung <i>specific heat</i> campuran yang mengalami <i>freezing-thawing</i>	20
Tabel 4.1	Hasil analisis proksimat pada bahan baku SP kering.....	43
Tabel 4.2	Pengaruh kadar air (sebelum <i>freezing</i>) terhadap kadar PC hasil ekstraksi.....	45
Tabel 4.3	Pengaruh kadar air perendaman SP segar terhadap PC hasil ekstraksi	49
Tabel 4.4	Konsentrasi dan <i>yield</i> PC dari ampas SP yang diolah kembali melalui pengeringan oven.....	53
Tabel 4.5	Pengaruh waktu perendaman dan kadar air (sebelum <i>freezing</i>) terhadap PC hasil ekstraksi.....	55
Tabel 4.6	Perubahan suhu mendadak saat cairan mulai membeku pada air murni, SP 5% (<i>power medium</i>), dan SP 5% (<i>power maksimum</i>).....	62
Tabel 4.7	Kemiringan kurva pendinginan campuran SP-air suling.....	63
Tabel 4.8	Perbandingan hasil ekstraksi PC dari SP dengan penelitian lain.....	65
Tabel 4.9	Ekstraksi PC dari SP hingga keadaan keseimbangan.....	66
Tabel 4.10	Berbagai studi keseimbangan padat-cair pada <i>Spirulina</i> yang menggunakan persamaan Langmuir.....	68
Tabel 4.11	Sifat fisis bahan yang dipakai untuk simulasi perhitungan.....	69
Tabel 4.12	Ringkasan hasil simulasi proses <i>freezing</i> dengan Model 1.....	72
Tabel 4.13	Sifat-sifat fisis hasil simulasi proses <i>freezing</i> Model 1 (SP kering, $X=0,09-0,11$).....	73
Tabel 4.14	Sifat-sifat fisis hasil simulasi proses <i>freezing</i> Model 1 (SP basah, $X=0,78-0,79$).....	74
Tabel 4.15	Sifat-sifat fisis hasil simulasi proses <i>freezing</i> Model 1 (SP basah, $X=0,80-0,81$).....	74
Tabel 4.16	Sifat-sifat fisis hasil simulasi proses <i>freezing</i> Model 1 (SP basah, $X=0,95$ dan $0,99$).....	74

Tabel 4.17	Ringkasan hasil simulasi proses <i>freezing</i> dengan Model 2	77
Tabel 4.18	Sifat-sifat fisis pada SP (X=0,80) berdasarkan hasil simulasi proses <i>freezing</i> Model 2	78
Tabel 4.19	Sifat-sifat fisis pada SP (X=0,95) berdasarkan hasil simulasi proses <i>freezing</i> Model 2	79
Tabel 4.20	Sifat-sifat fisis pada SP (X=0,99) berdasarkan hasil simulasi proses <i>freezing</i> Model 2	80
Tabel 4.21	Sifat-sifat fisis pada berbagai kadar air berdasarkan hasil simulasi proses <i>freezing</i> Model 2 (p=5).....	81
Tabel 4.22	Ringkasan hasil simulasi proses <i>thawing</i> Model 1	87
Tabel 4.23	Sifat-sifat fisis hasil simulasi proses <i>thawing</i> Model 1 (SP kering, X=0,09-0,10)	88
Tabel 4.24	Sifat-sifat fisis hasil simulasi proses <i>thawing</i> Model 1 (SP basah, X=0,78-0,795)	88
Tabel 4.25	Sifat-sifat fisis hasil simulasi proses <i>thawing</i> Model 1 (SP basah, X=0,80-0,81)	88
Tabel 4.26	Sifat-sifat fisis hasil simulasi proses <i>thawing</i> Model 1 (SP basah, X=0,95)	89
Tabel 4.27	Sifat-sifat fisis hasil simulasi proses <i>thawing</i> Model 1 (SP basah, X=0,99)	89
Tabel 4.28	Ringkasan hasil simulasi proses <i>thawing</i> Model 2	91
Tabel 4.29	Sifat-sifat fisis pada SP (X=0,80) berdasarkan hasil simulasi proses <i>thawing</i> Model 2	92
Tabel 4.30	Sifat-sifat fisis pada SP (X=0,95) berdasarkan hasil simulasi proses <i>thawing</i> Model 2	93
Tabel 4.31	Sifat-sifat fisis pada SP (X=0,99) berdasarkan hasil simulasi proses <i>thawing</i> Model 2	93
Tabel 4.32	Sifat-sifat fisis pada berbagai kadar air berdasarkan hasil simulasi proses <i>thawing</i> Model 2 (dengan p=5)	94
Tabel 4.33	<i>Inventory</i> bahan dan energi pada Sistem Produk I untuk menghasilkan 1.000,0 kg <i>crude</i> PC.....	101
Tabel 4.34	<i>Inventory</i> bahan dan energi pada Sistem Produk II untuk menghasilkan 1.000,0 kg <i>crude</i> PC.....	102
Tabel 4.35	<i>Inventory</i> bahan dan energi pada Sistem Produk III untuk menghasilkan 1.000 kg <i>crude</i> PC.....	103
Tabel L.1	Cuplikan data rekaman suhu air suling.....	117
Tabel L.2	Cuplikan data rekaman suhu SP 5% (<i>power</i> medium).....	120
Tabel L.3	Cuplikan data rekaman suhu SP 5% (<i>power</i> maksimum).....	122
Tabel L.4	Hasil lengkap simulasi proses <i>freezing</i> Model 1	131
Tabel L.5	Hasil lengkap simulasi proses <i>freezing</i> Model 2	136
Tabel L.6	Hasil lengkap simulasi proses <i>thawing</i> Model 1	138
Tabel L.7	Hasil lengkap simulasi proses <i>thawing</i> Model 2	140

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Aplikasi mikroalga pada berbagai bidang.....	9
Gambar 2.2	Komposisi asam amino dari ekstraksi menggunakan alat manotermosonikasi (simbol: strip), cara konvensional (simbol: titik), dan referensi (simbol: garis penuh).....	11
Gambar 2.3	Struktur kimia <i>phycocyanin</i>	11
Gambar 2.4	Mekanisme pemecahan dinding sel SP secara <i>freezing</i> : (a) sebelum <i>freezing</i> (b) selama <i>freezing</i> (c) volume sel yang membengkak.....	21
Gambar 2.5	Elemen volum pada proses pembekuan SP.....	22
Gambar 2.6	Elemen volum perubahan fase dari fase cair ke fase padat.....	23
Gambar 2.7	Model elemen untuk penentuan nilai konduktivitas termal campuran.....	25
Gambar 2.8	Diagram alir prosedur <i>life cycle inventory</i> (LCI).....	31
Gambar 2.9	Diagram alir prosedur LCIA.....	32
Gambar 3.1	Rangkaian alat <i>freezing-thawing</i>	34
Gambar 3.2	Sensor dan alat perekam suhu.....	35
Gambar 3.3	Diagram alir proses ekstraksi dari SP segar dengan pengeringan... ..	36
Gambar 3.4	Diagram alir proses ekstraksi dari SP segar dengan perendaman... ..	36
Gambar 3.5	Diagram alir proses ekstraksi dari SP kering dengan perendaman... ..	37
Gambar 3.6	<i>Flowchart</i> perhitungan model <i>freezing/thawing</i>	40
Gambar 4.1	Kolam kultivasi SP di Nogotirto <i>Algae Park</i> , Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta.....	41
Gambar 4.2	(a) Penyaringan SP hingga airnya tidak menetes lagi, (b) SP basah, kadar airnya sekitar 80%.....	41
Gambar 4.3	<i>Spirulina platensis</i> segar dilihat dari mikroskop: (a)perbesaran 100x, (b) perbesaran 400x.....	42
Gambar 4.4	Serbuk SP kering dilihat dari mikroskop: perbesaran 100x, (b) perbesaran 400x.....	43
Gambar 4.5	Pengaruh suhu dan waktu pengeringan terhadap kadar air dan PC... ..	45
Gambar 4.6	Pengaruh kadar air karena pengeringan oven pada berbagai suhu dan pendinginan di lemari es (8°C) terhadap <i>yield</i> PC.....	46
Gambar 4.7	Ekstrak <i>phycocyanin</i> dari pengeringan SP segar: a. tanpa pengeringan (langsung <i>freezing</i>); b. 30°C; c dan d. 40°C; e. 50°C; f. 60°C; g. 8°C (masuk lemari es 18 jam, tanpa oven).....	47
Gambar 4.8	Sel SP yang telah mengalami proses pengeringan, <i>freezing</i> dan ekstraksi.....	48
Gambar 4.9	Optimasi kadar air terhadap hasil PC.....	48
Gambar 4.10	Pengaruh perendaman SP segar terhadap kadar dan <i>yield</i> PC.....	50
Gambar 4.11	Warna ekstrak PC dari perendaman SP segar.....	51
Gambar 4.12	Sel <i>Spirulina platensis</i> yang telah mengalami proses perendaman, <i>freezing</i> dan ekstraksi.....	51
Gambar 4.13	Hasil ekstraksi dari SP segar (kadar air awal 81,3-81,8% basis basah) yang langsung diolah (tanpa masa tunggu di lemari es): a)dikeringkan dalam oven suhu 50 dan 60°C; b) ditambah air suling... ..	52
Gambar 4.14	Hasil ekstraksi dari SP segar (kadar air awal 75,9% basis basah) yang langsung diolah (dengan penambahan air suling).....	52

Gambar 4.15	Ekstraksi lanjutan ampas SP (dari ekstraksi yang awalnya belum berhasil) setelah dilakukan <i>freezing</i> , yang dilakukan pengeringan oven suhu: a) 40°C, b) 50°C, dan c) 60°C.....	53
Gambar 4.16	Diagram penanganan ulang bahan baku SP segar yang gagal pada ekstraksi pertama.....	54
Gambar 4.17	Foto sel dari serbuk SP kering mula-mula.....	56
Gambar 4.18	Foto sel dari serbuk SP kering yang telah mengalami perendaman (kadar air 54,8%) dan <i>freezing</i>	56
Gambar 4.19	Foto sel dari serbuk SP kering yang telah mengalami perendaman (kadar air 69,9%) dan <i>freezing</i>	57
Gambar 4.20	Foto sel dari serbuk SP kering yang telah mengalami perendaman (kadar air 77,4%) dan <i>freezing</i>	57
Gambar 4.21	Foto sel dari serbuk SP kering yang telah mengalami perendaman (kadar air 81,9%) dan <i>freezing</i>	57
Gambar 4.22	Foto sel dari serbuk SP kering yang telah mengalami perendaman (kadar air 84,9%) dan <i>freezing</i>	58
Gambar 4.23	Pengaruh kadar air dan waktu perendaman serta masa simpan bahan baku SP kering terhadap <i>yield</i> PC.....	59
Gambar 4.24	Pengaruh lamanya pembekuan terhadap <i>yield</i> PC.....	59
Gambar 4.25	Profil suhu pendinginan dan pembekuan <i>slab</i> campuran air dan SP dengan 4 zona (T_0 : suhu dasar <i>slab</i> ; T_1 : suhu posisi tengah; T_2 : suhu permukaan <i>slab</i>): (a) SP 5% <i>power</i> medium; (b) SP 5% <i>power</i> maksimum; (c) air suling; (d) SP kering	61
Gambar 4.26	Profil suhu pendinginan dan pembekuan pada air suling dan campuran SP-air suling (kuning= T_0 ; merah= T_1 ; biru= T_2) (a) SP 5% <i>power</i> medium; (b) SP 5% <i>power</i> maksimum; (c) air suling; (d) SP kering	61
Gambar 4.27	Kemiringan garis penurunan suhu campuran dari suhu lingkungan hingga 0°C: (a) SP 5% <i>power</i> medium; (b) SP 5% <i>power</i> maksimum; (c) air suling; (d) SP kering	63
Gambar 4.28	Profil suhu <i>freezing thawing</i> pada air suling dan campuran SP-air suling: (a) X=0,10; (b) X=0,80; (c) X=0,95; (d) air suling	64
Gambar 4.29	Pengaruh perbandingan pelarut/biomassa terhadap <i>yield</i> PC.....	65
Gambar 4.30	Hasil ekstraksi PC dari SP hingga keadaan keseimbangan (E1, E2, E3, E4: ekstrak dari ekstraksi ke-1, 2, 3, dan 4).....	66
Gambar 4.31	Model keseimbangan Henry.....	67
Gambar 4.32	Model keseimbangan Freundlich.....	67
Gambar 4.33	Model keseimbangan Langmuir.....	68
Gambar 4.34	Profil suhu yang terekam pada menit pertama pendinginan SP kering.....	70
Gambar 4.35	Profil suhu yang terekam pada menit pertama pendinginan SP (kadar air 80%).....	70
Gambar 4.36	Profil suhu yang terekam pada menit pertama pendinginan SP (kadar air 95%).....	70
Gambar 4.37	Profil suhu yang terekam pada menit pertama pendinginan SP (kadar air 99%).....	71
Gambar 4.38	Profil suhu yang terekam pada menit pertama pendinginan air suling.....	71
Gambar 4.39	Tampilan grafik pada simulasi <i>freezing</i> Model 1 yang gagal	72

Gambar 4.40	Contoh tampilan grafik pada simulasi <i>freezing</i> Model 1 yang berhasil.....	72
Gambar 4.41	Nilai fraksi campuran yang membeku (α) sebagai fungsi suhu berdasarkan hasil simulasi <i>freezing</i> Model 1	75
Gambar 4.42	Nilai densitas campuran (SP, air, dan es) berdasarkan hasil simulasi <i>freezing</i> Model 1	75
Gambar 4.43	Nilai <i>specific heat</i> campuran (SP, air, dan es) berdasarkan simulasi <i>freezing</i> Model 1	76
Gambar 4.44	Nilai konduktivitas panas campuran (SP, air, dan es) berdasarkan hasil simulasi <i>freezing</i> Model 1	76
Gambar 4.45	Nilai α campuran (SP, air, dan es) berdasarkan hasil simulasi proses <i>freezing</i> Model 2 ($p=5$).....	82
Gambar 4.46	Nilai densitas campuran (SP, air, dan es) berdasarkan hasil simulasi proses <i>freezing</i> Model 2 ($p=5$).....	82
Gambar 4.47	Nilai <i>specific heat</i> campuran (SP, air, dan es) berdasarkan hasil simulasi proses <i>freezing</i> Model 2 ($p=5$).....	83
Gambar 4.48	Nilai konduktivitas panas campuran (SP, air, dan es) berdasarkan hasil simulasi proses <i>freezing</i> Model 2 ($p=5$).....	83
Gambar 4.49	Nilai α campuran (SP, air, dan es) kadar air 80% berdasarkan hasil simulasi proses <i>freezing</i> Model 2 pada berbagai nilai p	84
Gambar 4.50	Nilai densitas campuran (SP, air, dan es) kadar air 80% berdasarkan hasil simulasi proses <i>freezing</i> Model 2 pada berbagai nilai p	84
Gambar 4.51	Nilai C_p campuran (SP, air, dan es) kadar air 80% berdasarkan hasil simulasi proses <i>freezing</i> Model 2 pada berbagai nilai p	84
Gambar 4.52	Nilai k campuran (SP, air, dan es) kadar air 80% berdasarkan hasil simulasi proses <i>freezing</i> Model 2 pada berbagai nilai p	85
Gambar 4.53	Contoh tampilan grafik hasil simulasi proses <i>thawing</i> Model 1 yang berhasil.....	87
Gambar 4.54	Nilai fraksi campuran (SP, air, dan es) yang membeku (α) sebagai fungsi suhu berdasarkan hasil simulasi proses <i>thawing</i> Model 1	89
Gambar 4.55	Nilai densitas campuran SP dan air suling berdasarkan hasil simulasi proses <i>thawing</i> Model 1	90
Gambar 4.56	Nilai <i>specific heat</i> campuran (SP, air, dan es) berdasarkan hasil simulasi proses <i>thawing</i> Model 1.....	90
Gambar 4.57	Nilai konduktivitas termal campuran (SP, air, dan es) berdasarkan hasil simulasi proses <i>thawing</i> Model 1	91
Gambar 4.58	Nilai α campuran (SP, air, dan es) berdasarkan hasil simulasi proses <i>thawing</i> Model 2 ($p = 5$)	95
Gambar 4.59	Nilai densitas campuran (SP, air, dan es) berdasarkan hasil simulasi proses <i>thawing</i> Model 2 ($p = 5$)	95
Gambar 4.60	Nilai <i>specific heat</i> campuran (SP, air, dan es) berdasarkan hasil simulasi proses <i>thawing</i> Model 2 ($p = 5$)	96
Gambar 4.61	Nilai konduktivitas termal campuran (SP, air, dan es) berdasarkan hasil simulasi proses <i>thawing</i> Model 2 ($p = 5$)	96
Gambar 4.62	Nilai α campuran (SP, air, dan es) kadar air 80% berdasarkan hasil simulasi proses <i>thawing</i> Model 2 pada berbagai nilai p	97
Gambar 4.63	Nilai densitas campuran (SP, air, dan es) kadar air 80% berdasarkan hasil simulasi proses <i>thawing</i> Model 2 pada berbagai nilai p	97
Gambar 4.64	Nilai C_p campuran (SP, air, dan es) kadar air 80% berdasarkan hasil simulasi proses <i>thawing</i> Model 2 pada berbagai nilai p	97

Gambar 4.65	Nilai k campuran (SP, air, dan es) kadar air 80% berdasarkan hasil simulasi proses <i>thawing</i> Model 2 pada berbagai nilai p.....	97
Gambar 4.66	Skema Sistem Produk I	99
Gambar 4.67	Skema Sistem Produk II	100
Gambar 4.68	Skema Sistem Produk III	100
Gambar 4.69	Persentase emisi semua jenis kategori tiap 1.000,0 kg <i>crude</i> PC dari Sistem Produk I	104
Gambar 4.70	Persentase emisi semua jenis kategori tiap 1.000,0 kg <i>crude</i> PC dari Sistem Produk II	104
Gambar 4.71	Persentase emisi semua jenis kategori tiap 1.000,0 kg <i>crude</i> PC dari Sistem Produk III	105
Gambar 4.72	Perbandingan emisi semua jenis kategori tiap 1.000,0 kg <i>crude</i> PC untuk ketiga sistem produk	105