



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**MODEL SIMULASI PENGERING BEKU VAKUM DENGAN  
KOMBINASI PEMBEKUAN INTERNAL DAN  
PEMANFAATAN PANAS BUANG KONDENSER**

**TESIS**

**ACHMAD MASWAN  
1006788422**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JUNI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**MODEL SIMULASI PENGERING BEKU VAKUM DENGAN  
KOMBINASI PEMBEKUAN INTERNAL DAN  
PEMANFAATAN PANAS BUANG KONDENSER**

**TESIS**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar  
Magister Teknik**

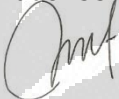
**ACHMAD MASWAN  
1006788422**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
KONVERSI ENERGI  
DEPOK  
JUNI 2012**

ii

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.**

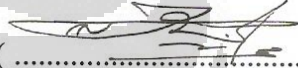
**Nama : Achmad Maswan**  
**NPM : 1006788422**  
**Tanda Tangan : **  
**Tanggal : 29 Juni 2012**

## HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :  
Nama : Achmad Maswan  
NPM : 1006788422  
Program Studi : Teknik Mesin Konversi Energi  
Judul Tesis : Model Simulasi Pengering Beku Vakum dengan  
Kombinasi Pembekuan Internal dan Pemanfaatan  
Panas Buang Kondenser

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Engkos A. Kosasih, MT. (.....)

Penguji : Dr. Ir. Budihardjo, Dipl. Ing. (.....)

Penguji : Dr. Ir. M. Idrus Alhamid (.....)

Penguji : Dr. Ing. Ir. Nasruddin, M.Eng (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 29 Juni 2012

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada ALLAH SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan tesis ini. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik Jurusan Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Penghargaan yang setinggi tinginya dan rasa hormat penulis sampaikan atas bimbingan, pengorbanan dan doa orang tua. Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Dr. Ir. Engkos A. Kosasih MT, selaku dosen pembimbing, yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan Tesis ini;
- (2) Dr. Ing. Ir. Nasruddin, M.Eng, Dr. Ir. M. Idrus Alhamid dan Dr. Ir. Budihardjo, Dipl. Ing. yang telah memberikan masukan dalam penyusunan tesis ini.
- (3) Dr. Ir. Bambang T,P. DEA selaku co-promotor, dan Deputi Bidang Sumberdaya Iptek atas bantuan pendanaan pendidikan melalui program beasiswa pascasarjana Kementerian Riset dan Teknologi (KRT).
- (4) Pak Yulianto yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh gambaran proses pengering beku vakum.
- (5) Pak Himawan, pak Sarwono, mas Budi dan rekan-rekan BTMP-BPPT, atas bantuan dan dukungannya. Rekan-rekan S2 : mas Arnas, Pak Sabar, Pak Hadi.
- (6) Semua pihak yang tidak bisa disebutkan namanya satu persatu yang membantu dalam proses pembuatan tesis ini.

Apresiasi yang mendalam juga disampaikan kepada istri dan buah hati kami yang telah bersabar selama penulis mengikuti pendidikan ini. Akhir kata, saya berharap ALLAH SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 29 Juni 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS  
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Achmad Maswan  
NPM : 1006788422  
Program Studi : Teknik Mesin Konversi Energi  
Departemen : Teknik Mesin  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Tesis

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**MODEL SIMULASI PENDINGER BEKU VAKUM DENGAN  
KOMBINASI PEMBEKUAN INTERNAL DAN PEMANFAATAN PANAS  
BUANG KONDENSER**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 29 Juni 2012

Yang menyatakan



(Achmad Maswan)

## ABSTRAK

Nama : Achmad Maswan  
Program studi : Teknik Mesin  
Judul Tes : Model Simulasi Pengering Beku Vakum dengan Kombinasi Pembekuan Internal dan Pemanfaatan Panas Buang Kondenser

Pengering beku vakum merupakan suatu metode pengeringan produk dalam kondisi beku dengan cara sublimasi di bawah tekanan vakum. Metode ini lebih dikenal untuk menghasilkan bahan makanan berkualitas tinggi, tetapi mempunyai kendala pada waktu prosesnya yang lama sehingga membutuhkan energi dan modal yang besar.

Inovasi untuk mengurangi waktu pembekuan adalah dengan menggabungkan antara pendinginan dan pembekuan vakum, tetapi produk yang dihasilkan akan mengalami penurunan kualitas. Alternatif metode di dalam pembekuan vakum adalah melakukan pemvakuman setelah produk terbentuk lapisan es. Sedangkan inovasi untuk mengurangi waktu proses pengeringan adalah menaikkan temperatur permukaan produk dengan memanfaatkan panas buang dari kondenser.

Model simulasi numerik beda hingga satu dimensi yang menggabungkan persamaan perpindahan panas dan perpindahan massa dikembangkan untuk memprediksikan pengaruh temperatur dan tekanan ruang serta ketebalan es saat pemvakuman terhadap waktu proses pengering beku vakum. Pada simulasi ini kondisi batas yang digunakan adalah tetap untuk tahap pendinginan dan kondisi batas bergerak untuk proses pembekuan dan pengeringan.

Hasil simulasi menunjukkan dengan memperkecil tekanan dan menaikkan temperatur ruang pengering serta memulai pemvakuman setelah produk terbentuk lapisan es maka akan mempercepat proses pengering beku vakum sehingga konsumsi energi yang dibutuhkan akan berkurang.

Kata Kunci : Simulasi, *freeze*, *drying*, *vacuum*, *sublimation*, *waste heat*, efisiensi, energi

## **ABSTRACT**

*Name : Achmad Maswan  
Major : Mechanical Engineering  
Title : Simulation Model of Vacuum Freeze Drying by Combined the Internal Freezing and Utilization Condensers Waste Heat*

*Vacuum freeze drying is a method of dehydrating frozen materials by sublimation under vacuum. It is well known that produces high-quality dry food. However, its main problem is required a long drying time as well as high energy consumption and capital costs.*

*Innovation to reduce the freezing time is doing by combine the vacuum cooling and freezing process, which is decrease the product quality. An alternative method of vacuum freezing is doing by vacuum the product when the ice layer is form. Meanwhile the innovation in reducing the drying time is doing by increase the surface temperature of the product by utilizing the condensers waste heat.*

*One-dimensional finite difference numerical simulation, develop the combining heat and mass transfer equations to predict the effect of temperature, pressure chamber and the ice thickness against the vacuum freeze drying process. In this simulation the boundary conditions is fixed for the cooling stage and moving for the freezing and drying stage.*

*The simulation obtained by reduce the pressure and increase the temperature of the drying chamber as well as start the vacuum after ice layer of the product is formed will accelerate the process of vacuum freeze dryer so that the required energy consumption will be reduced.*

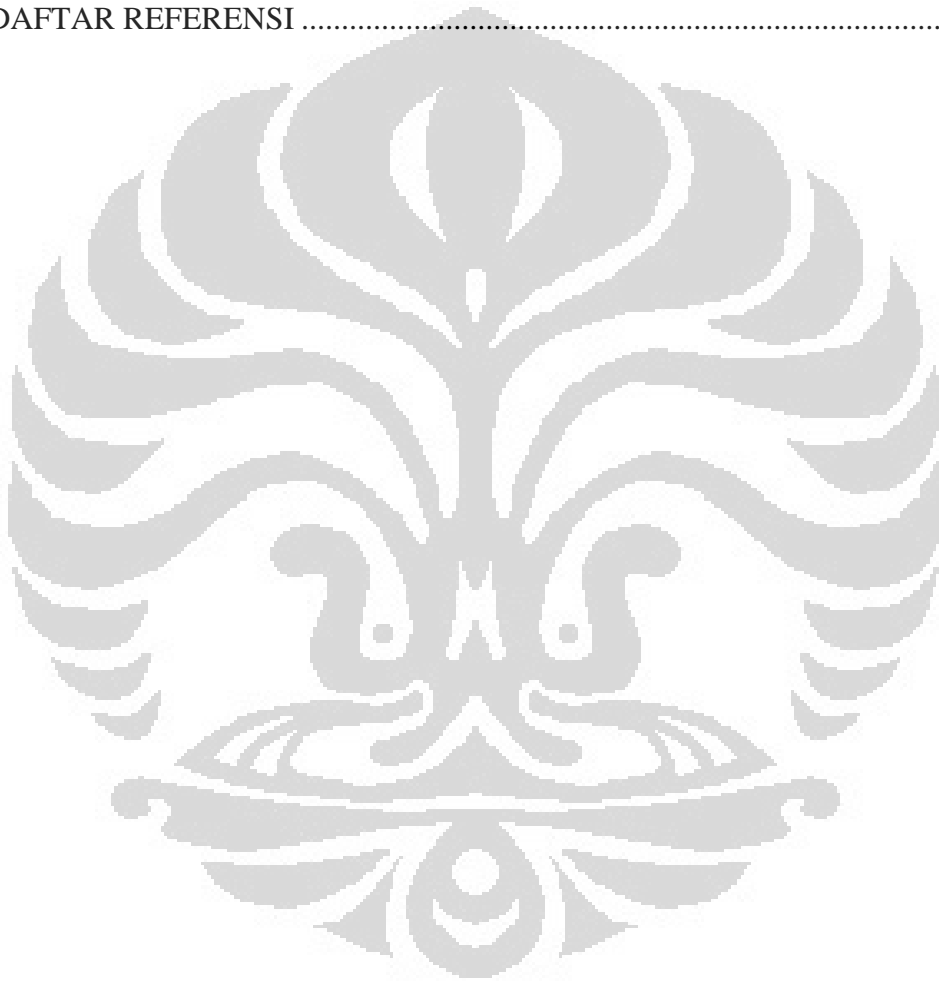
*Keyword :Simulation, freeze, drying, vacuum, sublimation, waste heat, efficiency, energy*



## DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
UCAPAN TERIMA KASIH.....	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR NOTASI.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
1 BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Metodologi Penelitian.....	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	6
2 BAB 2 DASAR TEORI.....	8
2.1 Pengeringan Beku Vakum.....	8
2.1.1 Proses Pendinginan dan Pembekuan.....	8
2.1.2 Proses Sublimasi.....	10
2.2 Metode Numerik.....	10
2.2.1 Perpindahan panas.....	11
2.2.2 Perpindahan massa.....	12
2.2.3 Persamaan Keseimbangan Energi.....	13
2.2.4 Psikrometri.....	14
2.2.5 Sifat Termodinamika Air dan Es.....	15
3 BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	17
3.1 Pengembangan Model Matematika.....	17
3.1.1 Model Matematika untuk tahap pendinginan.....	19
3.1.2 Model Matematika untuk tahap pembekuan.....	22
3.1.3 Model Matematika untuk tahap sublimas.....	26
3.2 Pembuatan Model Simulasi.....	30
3.3 Simulasi Proses Pengeringan Beku Vakum.....	32
4 BAB 4 PEMBAHASAN.....	34
4.1 Profil temperatur produk terhadap waktu proses pengering beku.....	34
4.2 Perbandingan antara hasil pengujian dengan simulasi.....	37

4.3	Pengaruh variasi parameter kondisi operasi terhadap waktu pembekuan .....	41
4.4	Pengaruh variasi parameter kondisi operasi terhadap waktu proses pengeringan .....	45
4.5	Pengaruh variasi parameter kondisi operasi terhadap waktu total proses pengering beku vakum .....	49
4.6	Pengaruh variasi parameter kondisi operasi terhadap waktu pemvakuman proses pengering beku vakum .....	52
5	BAB 5 KESIMPULAN .....	55
5.1	Kesimpulan .....	55
5.2	Saran .....	55
	DAFTAR REFERENSI .....	56



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema tahanan thermal setiap node .....	12
Gambar 3.1 Diagram alir Penelitian.....	17
Gambar 3.2 Kondisi batas model simulasi.....	18
Gambar 3.3 Skema proses pengering beku vakum .....	19
Gambar 3.4 Pembagian node saat awal tahap pendinginan .....	19
Gambar 3.5 Pembagian node saat tahap pembekuan .....	23
Gambar 3.6 Pembagian node saat tahap sublimasi .....	27
Gambar 3.7 Diagram alir program simulasi tahap pendinginan .....	30
Gambar 3.8 Diagram alir program simulasi tahap pendinginan .....	31
Gambar 3.9 Diagram alir program simulasi tahap sublimasi.....	32
Gambar 3.10 Profil temperatur ruang pengering saat awal proses .....	33
Gambar 3.11 Profil temperatur ruang pengering saat pemanasan .....	33
Gambar 4.1 Profil temperatur produk fungsi waktu pada tekanan ruang ( $P_r$ 0.05 kPa), temperatur ruang saat pemanasan ( $T_r$ 40 C) dengan ketebalan es ( $L_{es}$ 1 mm) saat di lakukan pemvakuman dan temperatur ruang saat pemanasan ( $T_{rp}$ = 40 C).....	34
Gambar 4.2 Profil temperatur produk fungsi waktu pada variasi tekanan ruang dengan ketebalan es 1 mm saat di lakukan pemvakuman dan temperatur ruang saat pemanasan ( $T_{rp}$ = 40 C) .....	35
Gambar 4.3 Profil temperatur produk fungsi waktu pada variasi temperatur ruang saat pemanasan dengan tekanan ruang 0.5 kPa dan ketebalan es 1 mm saat di lakukan pemvakuman.....	35
Gambar 4.4 Profil temperatur produk fungsi waktu pada variasi ketebalan es saat di lakukan pemvakuman dengan tekanan ruang 0.5 kPa dan temperatur ruang saat pemanasan ( $T_{rp}$ = 40 C).....	36
Gambar 4.5 Profile temperatur terhadap waktu berdasarkan hasil pengujian .....	37
Gambar 4.6 Perbedaan kondisi batas pengujian dengan simulasi .....	38
Gambar 4.7 Perbandingan hasil pengujian dengan simulasi.....	39
Gambar 4.8 Perbandingan hasil pengujian aloevera (Belyamin, 2006) dengan simulasi .....	40
Gambar 4.9 Laju rata-rata massa tersublimasi selama proses pembekuan fungsi tekanan ruang pada ketebalan es 1 mm saat di lakukan pemvakuman dan temperatur ruang saat pemanasan yang berbeda ( $T_{rp}$ = 30, 35 dan 40 °C) .....	41
Gambar 4.10 Laju massa tersublimasi selama proses pembekuan fungsi tekanan ruang pada temperatur ruang saat pemanasan ( $T_{rp}$ = 30 C) dan ketebalan es saat di lakukan pemvakuman yang berbeda (1 mm, 3 mm) .....	42
Gambar 4.11 Waktu yang di butuhkan selama proses pembekuan fungsi tekanan ruang pada ketebalan es 1 mm saat di lakukan pemvakuman dan temperatur ruang saat pemanasan yang berbeda ( $T_r$ = 30, 35 dan 40 °C).....	43
Gambar 4.12 Waktu yang di butuhkan selama proses pembekuan fungsi tekanan ruang pada temperatur ruang saat pemanasan ( $T_{rp}$ = 30C) dan ketebalan es saat di lakukan pemvakuman yang berbeda (1 mm, 3 mm dan non vakum) .....	44

Gambar 4.13 Laju rata-rata massa tersublimasi selama proses pengeringan fungsi tekanan ruang pada ketebalan es 1 mm saat di lakukan pemvakuman dan temperatur ruang saat pemanasan yang berbeda ( $T_r = 30, 35$ dan $40\text{ }^\circ\text{C}$ ) .....	45
Gambar 4.14 Laju rata-rata massa tersublimasi selama proses pengeringan fungsi tekanan ruang pada temperatur ruang saat pemanasan ( $T_r = 40\text{ C}$ ) dan ketebalan es saat di lakukan pemvakuman yang berbeda (1 mm, 3 mm, dan non vakum)...	46
Gambar 4.15 Waktu yang di butuhkan selama proses pengeringan fungsi tekanan ruang pada ketebalan es 1 mm saat di lakukan pemvakuman dan temperatur ruang saat pemanasan yang berbeda ( $T_{rp} = 30, 35$ dan $40\text{ }^\circ\text{C}$ ).....	47
Gambar 4.16 Waktu yang di butuhkan selama proses pengeringan fungsi tekanan ruang pada temperatur ruang saat pemanasan ( $T_{rp} = 30\text{C}$ ) dan ketebalan es saat di lakukan pemvakuman yang berbeda (1 mm, 3 mm dan non vakum) .....	48
Gambar 4.17 Waktu total yang di butuhkan selama proses pengeringan fungsi tekanan ruang pada ketebalan es 1 mm saat di lakukan pemvakuman dan temperatur ruang saat pemanasan yang berbeda ( $T_{rp} = 30, 35$ dan $40\text{ }^\circ\text{C}$ ) .....	50
Gambar 4.18 Waktu total yang di butuhkan selama proses pengering beku vakum fungsi tekanan ruang pada temperatur ruang pemanas $T_{rp} 30\text{ }^\circ\text{C}$ dan ketebalan es produk saat dilakukan pemvakuman yang berbeda ( tebal es = 0.001, 0.003 dan non vakum) .....	51
Gambar 4.19 Waktu Pemvakuman selama proses pengering beku vakum fungsi tekanan ruang pada ketebalan es 1 mm saat di lakukan pemvakuman dan temperatur ruang saat pemanasan yang berbeda ( $T_{rp} = 30, 35$ dan $40\text{ }^\circ\text{C}$ ) .....	53
Gambar 4.20 Waktu pemvakuman selama proses pengering beku vakum fungsi tekanan ruang pada temperatur ruang pemanas $T_{rp} 30\text{ }^\circ\text{C}$ dan ketebalan es produk saat dilakukan pemvakuman yang berbeda ( tebal es = 0.001, 0.003 dan non vakum).....	54

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Parameter non dimensi pada perpindahan massa dan panas.....	13
Tabel 2.2 Persamaan sifat thermodynamika air dan es.....	16



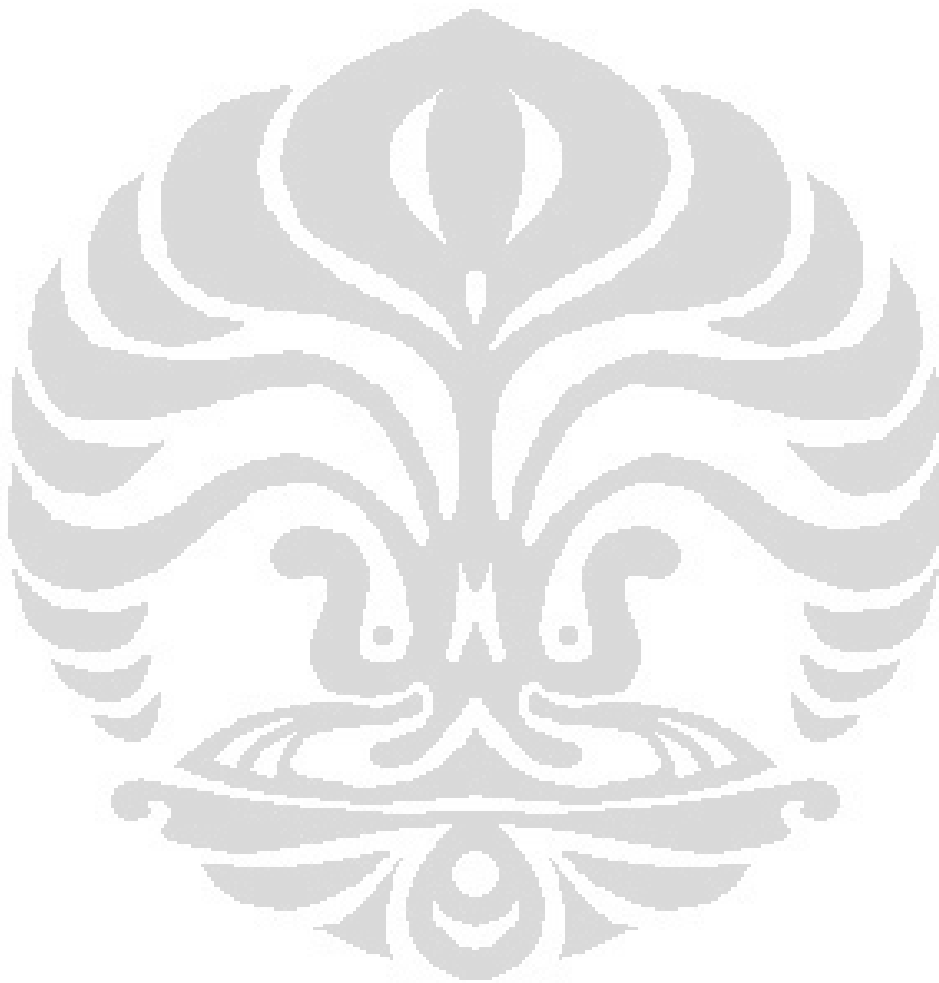
## DAFTAR NOTASI

### Nomenclatur

$A$	Area ( $m^2$ )
$C_p$	Specific heat capacity ( $kJ/kg.K$ )
$D$	Diameter produk (m)
$h$	Koefisien perpindahan panas ( $W/m^2.K$ )
$k$	Thermal conductivity ( $W/m^2.K$ )
$\dot{m}$	Mass flow (kg/s)
$\dot{Q}$	Heat transfer rate (W)
$R$	Tahanan termal (W/K)
$dx$	Jarak antar node (m)
$dt$	Waktu (sekon)
$L$	Tebal material (m)
$n$	Jumlah node
$r$	Jari-jari (m)
$p$	Faktor pembagi jarak
$h_{fg}$	Kalor laten penguapan (j/s)
$h_{es}$	Kalor laten pembekuan (j/s)
$h_{sg}$	Kalor laten sublimasi (j/s)
$T$	Temperatur ( $^{\circ}C$ )
$T_K$	Temperatur (K)
Greek letters	
$\sigma$	Konstanta Stefan $5.7 \cdot 10^{-8} W/mK^4$
$\epsilon$	Emisivitas
$\rho$	Density ( $kg/m^3$ )
$\mu$	Viscosity ( $kg/m.s$ )
$\Delta$	Delta
Subscripts	
$a$	Udara
$es$	Es
$w$	Air
$av$	Uap air
$ms$	Sublimasi
$mv$	Evaporasi
$r$	Radiasi
$k$	Konveksi
$_r$	Ruang pengering
$_sf$	Permukaan produk

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil simulasi	58
Lampiran 2. Program simulasi pengering beku vakum	60



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pengeringan beku vakum adalah sebuah metode pengeringan yang mempunyai kelebihan dibandingkan dengan metode pengeringan yang lain, terutama pada metode ini pengeringan dilakukan pada suhu rendah sehingga mengurangi adanya kerusakan produk akibat suhu tinggi, dan produk kering memiliki bentuk fisik yang menarik. Pada metode ini kandungan uap air dari produk dapat di kontrol selama proses, bahkan produk dapat dikembalikan seperti keadaan sebelum dikeringkan (Oetjen, 2004). Namun demikian, mesin pengeringan beku mempunyai kendala dalam waktu proses yang lama dan konsumsi energinya, hal ini dikarenakan 3 proses yang terjadi pada pengeringan beku vakum yaitu proses pembekuan, proses pengeringan atau sublimasi, proses pemvakuman dan penangkapan uap sebelum masuk pompa vakum yang membutuhkan energi yang besar

Penelitian-penelitian saat ini memfokuskan inovasi pada pengurangan penggunaan energi, dan laju proses pengeringan beku baik itu di tahap pembekuan maupun tahap sublimasi karena semakin lama proses semakin tinggi biaya energi yang di perlukan (E.A. Boss et al.,2004). Pada proses pembekuan inovasi di lakukan dengan berbagai metode diantaranya dengan pembekuan vakum yaitu menurunkan suhu dan tekanan secara bersamaan. Metode pendinginan vakum merupakan teknik untuk mempercepat penguapan kandungan air yang bebas pada produk berpori (Wang & Sun, 2001). Proses pendinginan vakum biasa di lakukan untuk produk berpori yang mempunyai kandungan air yang bebas, biasanya diaplikasikan untuk pendinginan sayuran, buah segar, bunga potong, produk daging dan ikan (McDonald & Sun, 2000; Wang & Sun, 2001; McDonald & Sun, 2001). Pada pendinginan vakum, saat proses penurunan tekanan akan diikuti dengan adanya evaporasi uap air dari permukaan produk, panas laten evaporasi akan membutuhkan energi yang besar sehingga akan menyebabkan turunnya temperatur pada produk. Pada proses pendinginan vakum sangat dimungkinkan terjadi pembekuan, tetapi hal ini tidak di harapkan karena dapat menyebabkan



kerusakan sel dan struktur produk akibat pembentukan kristal es (McDonald & Sun, 2000). Pada proses pendinginan vakum, proses pendinginan dapat di hentikan pada tekanan dan temperatur yang telah di tentukan, kondisi tekanan di jaga diatas tekanan triple point dari air (0.612 kPa).

Metode pendinginan vakum sangat di mungkinkan terjadi pembentukan lapisan es apabila tekanannya di bawah triple point atau tekanan saturasi pada 0°C (Cengel & Boles, 2002). Beberapa penelitian telah mencoba melakukan kajian tentang pembekuan vakum, Lin dan Chou (2001) menggunakan metode ini untuk memproduksi es sedangkan Cheng dan Lin (2007) mengkaji perubahan bentuk air menjadi es pada pendinginan dan pembekuan vakum yang menghasilkan 2 lapisan es dimana pada lapisan es bagian atas berpori tidak teratur sedangkan lapisan bawah berbentuk padat. Fey an Boles (1987) menganalisa pengaruh parameter sublimasi dan pembekuan untuk media berpori. Beberapa penelitan mencoba menggabungkan metode pembekuan vakum untuk proses pengeringan beku vakum (Belyamin, 2006). Pada pembekuan vakum efek pembekuan di peroleh dengan adanya penguapan sebagian air produk karena adanya perbedaan konsentrasi antara produk dengan ruang pengering, dalam hal ini efek pembekuan bukan karena perpindahan panas dari bahan ke media pembeku tetapi karena pelepasan panas laten penguapan. Pada proses pengeringan beku harus diminimalkan adanya penguapan air dari permukaan produk karena akan menyebabkan terjadinya perpindahan cairan kedaerah permukaan produk sehingga akan merusak kualitas dari produk (halstrom, 1990), McDonald & Sun, 2000). Salah satu alternatif untuk menghindari adanya penguapan pada saat pembekuan adalah dengan melakukan penurunan tekanan ruang saat sudah terbentuk lapisan es, sehingga pembentukkan lapisan berikutnya berasal dari pelepasan panas laten akibat dari sublimasi.

Pada proses sublimasi, inovasi diantaranya mempercepat laju sublimasi dengan memberikan pemanas pada ruang pengering. Salah satu metodenya adalah dengan menggunakan energi gelombang elektromagnetik (*microwave*) sebagai pemanas (J.F. Nastaj et al, 2008) dan (Xu Duan et al, 2010). Pada inovasi ini masih menggunakan energi sebagai pembangkit dari gelombang elektromagnetik. Salah satu alternatif untuk mereduksi penggunaan energi sebagai pemanas pada

**Universitas Indonesia**

tahap pengeringan sublimasi adalah dengan memanfaatkan panas buang kondenser. Dengan memanfaatkan panas buang kondenser, energi yang diperlukan untuk meningkatkan suhu permukaan produk waktu pengeringan sublimasi bisa dikatakan nol dan juga meningkatkan laju pengeringan (Yulianto,2010), (Alhamid, 2011) dan (Nasruddin, 2011).

Berdasarkan persoalan diatas maka dilakukan penelitian mesin pengeringan beku vakum dengan mengkombinasikan pompa vakum dan sistem refrigerasi (pembekuan internal) untuk menurunkan tekanan dan temperatur material di dalam ruangan pengering dan menghindari adanya mass loss secara evaporasi pada saat proses pembekuan vakum dengan penurunan tekanan di saat sudah mulai terbentuk lapisan es. Selain itu, inovasi juga dilakukan pada proses sublimasi / pengeringan yaitu dengan memanfaatkan panas buang kondensor yang seharusnya dibuang kelingkungan dari sistem refrigerasi dimanfaatkan sebagai media pemanas untuk mempercepat waktu pengeringan. Dengan mempercepat waktu proses pengering beku vakum akan mengurangi penggunaannya (E.A. Boss et al, 2004).

Untuk menganalisa proses pengeringan beku vakum ini perlu dikembangkan model perhitungan numerik yang dapat digunakan untuk mensimulasi berbagai kondisi operasi dari proses pengeringan ini. Pembuatan model simulasi ini nantinya dapat di gunakan sebagai gambaran di dalam menentukan kondisi operasi mesin pengering beku vakum sehingga akan di dapatkan kondisi operasi yang paling efisien laju pengeringan dan kebutuhan energinya.

## **1.2 Perumusan Masalah**

Pengeringan beku merupakan metode pengeringan yang dikenal dengan keunggulan mutu hasil pengeringannya,tetapimetode pengeringan ini mempunyai kendala waktu proses yang lama dan konsumsi energi yang besar. Inovasi dengan melakukan pembekuan vakum dapat mempercepat laju pembekuan tetapi masih terjadi penguapan yang dapat merusak kualitas produk. Untuk menghindari adanya penguapan maka pada saat penurunan tekanan ruang, permukaan produk sudah terbentuk lapisan es. Selain itu inovasi untuk mempercepat laju pengeringan sublimasi dapat di lakukan dengan menaikkan temperatur permukaan

produk dengan menggunakan microwave. Tetapi inovasi ini masih membutuhkan energi untuk membangkitkan gelombang elektromagnetik. Untuk menekan penggunaan energi pemanas pada saat pengeringan sublimasi dapat memanfaatkan panas buang kondenser.

Untuk menganalisa sistem pengeringan beku vakum ini perlu dikembangkan model perhitungan numerik yang dapat digunakan untuk mensimulasi berbagai kondisi operasi dari pengeringan beku vakum ini, sehingga didapatkan gambaran di dalam melakukan pengujian dan pengembangan pengering beku vakum selanjutnya.

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari model simulasi ini adalah untuk memprediksi perubahan temperatur dari produk, waktu yang diperlukan selama proses pembekuan dan pengeringan, laju terbentuknya ketebalan es, laju massa produk yang terdifusi, dan waktu yang dibutuhkan untuk menjalankan pompa vakum selama proses pengering beku vakum dengan berbagai kondisi operasi. Kondisi operasi yang nantinya dilakukan simulasi adalah variasi tekanan dan temperatur ruang pengering serta variasi ketebalan es saat dilakukan pemvakuman. Dari model simulasi ini diharapkan nantinya dapat diketahui pengaruh tekanan dan temperatur ruang pengering serta ketebalan es saat dilakukan pemvakuman terhadap waktu proses pengering beku vakum dan waktu yang dibutuhkan untuk menjalankan pompa vakum. Dari hasil simulasi ini diharapkan dapat digunakan sebagai gambaran di dalam pengkondisian eksperimen dan optimasi kebutuhan energi selama proses pengering beku vakum. Simulasi ini nantinya menggunakan perhitungan numerik satu dimensi dengan menggunakan persamaan dasar perpindahan panas dan massa.

### **1.4 Batasan Masalah**

Model simulasi ini menggunakan perhitungan numerik satu dimensi dengan menggunakan persamaan dasar perpindahan panas dan massa. Program simulasi ini dibuat dengan menggunakan software Matlab. Hal yang akan dibahas dalam tesis ini adalah pengaruh kondisi operasi pengeringan beku vakum yang meliputi variasi tekanan, ketebalan lapisan es saat dilakukan pemvakuman, dan temperatur

**Universitas Indonesia**

saat sublimasi pada ruang pengering terhadap waktu proses pengeringan, laju pembekuan, dan laju massa yang terdiffusi pada pengeringan beku vakum dengan mengkombinasikan pembekuan internal dan pemanfaatan panas buang kondenser dengan kondisi batas di produk dan ruang pengering.

Pada model simulasi ini, asumsi yang digunakan sebagai berikut:

- Produk berupa air murni.
- Pada sisi dan bawah dinding tempat produk yang akan di keringkan diasumsikan terisolasi sempurna.
- Produk mempunyai ketebalan yang tipis sehingga diasumsikan diam dan tidak terjadi perpindahan panas konveksi pada produk.
- Perpindahan panas pada node terluar diasumsikan linier sehingga temperatur pada node terluar mendekati dinding sama dengan temperatur node sebelumnya.
- Temperatur dan tekanan ruang pengering dikondisikan (divariasikan).
- Penambahan dan terbentuknya lapisan es merata keseluruhan permukaan produk.
- Penurunan permukaan akibat sublimasi seragam pada permukaan produk.
- Pada saat pevakuman, tekanan partial uap air sama dengan tekanan ruang pengering.

### 1.5 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- Studi literatur

Studi literatur merupakan proses pengumpulan informasi yang berkaitan dengan materi bahasan yang berasal dari buku-buku, jurnal yang berasal dari dosen maupun perpustakaan.

- Pengembangan Model Matematika

Model matematika ini merupakan pengembangan dari persamaan dasar perpindahan panas dan massa dengan menggunakan analogi listrik untuk menghitung perubahan temperatur pada produk yang akan dikeringkan. Permodelan ini terdiri dari 3 proses perhitungan yaitu pada tahapan pendinginan (*cooling*), pembentukan es (*freezing*) dan pengeringan (sublimasi). Model

**Universitas Indonesia**

simulasi yang digunakan merupakan metode perhitungan numerik beda hingga satu dimensi dengan menggunakan persamaan dasar perpindahan panas dan massa.

- **Pembuatan Program Simulasi**

Program simulasi ini di buat dengan menggunakan software Matlab.

- **Melakukan Simulasi Proses Pengeringan Beku Vakum**

Pada tahapan ini di simulasikan berbagai variasi kondisi operasi dari proses pengeringan beku vakum meliputi variasi tekanan dan temperatur ruang pengering dan variasi ketebalan es tertentu saat mulai dilakukan pemvakuman.

- **Analisa dan kesimpulan**

Data dari simulasi ini kemudian dianalisa pengaruhnya terhadap perubahan temperatur bahan, laju ketebalan lapisan es, laju massa yang terdiffusi, waktu yang dibutuhkan selama proses pengering beku vakum., dan waktu yang dibutuhkan untuk menjalankan pompa vakum selama proses pengering beku vakum.

## **1.6 Sistematika Penulisan**

Agar tesis ini memiliki struktur yang baik dan tujuan penulisan dapat tercapai dengan baik, maka penulisan tesis ini akan mengikuti sistematika penulisan sebagai berikut :

### **BAB I PENDAHULUAN**

Bagian ini berisi tentang latar belakang yang melandasi penulisan tesis, perumusan masalah, tujuan penulisan, pembatasan masalah, metodologi penelitian dan sistematika penulisan.

### **BAB II DASAR TEORI**

Bab ini menjelaskan teori-teori yang mendasari penelitian ini. Dasar teori meliputi: dasar teori tentang sistem Refrijerasi, persamaan-persamaan yang digunakan pada sistem Refrijerasi dan dasar pemilihan Refrijeran. Dasar teori yang ada di kutip dari beberapa buku dan referensi lain yang mendukung dalam penulisan ini.

**BAB III      METODE PENELITIAN**

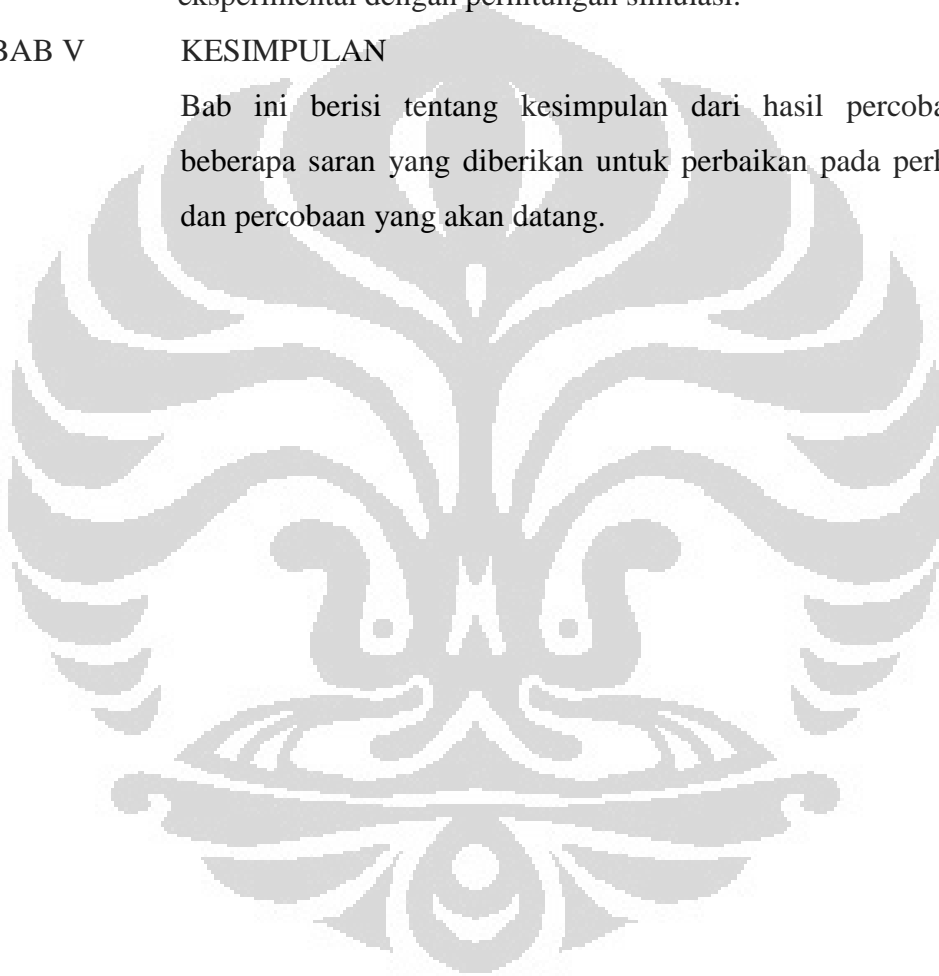
Bab ini berisikan tentang metode perhitungan secara *balck-box*, spesifikasi alat pengujian yang digunakan, metode persiapan dan metode pengambilan data yang dilakukan.

**BAB IV      HASIL DAN ANALISA**

Bab ini berisi tentang hasil yang diperoleh dari proses pengujian, serta analisa perbandingan kapasitas pendinginan berdasarkan eksperimental dengan perhitungan simulasi.

**BAB V      KESIMPULAN**

Bab ini berisi tentang kesimpulan dari hasil percobaan dan beberapa saran yang diberikan untuk perbaikan pada perhitungan dan percobaan yang akan datang.



## **BAB 2**

### **DASAR TEORI**

#### **2.1 Pengerinan Beku Vakum**

Pengerinan beku vakum adalah sebuah metode pengerinan yang mempunyai kelebihan dibandingkan dengan metode pengerinan yang lain, terutama pada metode ini pengerinan dilakukan pada suhu rendah sehingga mengurangi adanya kerusakan produk akibat suhu tinggi, dan produk kering memiliki bentuk fisik yang menarik. Pada metode ini kandungan uap air dari produk dapat di kontrol selama proses, bahkan produk dapat dikembalikan seperti keadaan sebelum dikeringkan (GW Oetjen, 2004). Selain mempunyai kelebihan, mesin pengerinan beku mempunyai kendala dalam waktu proses yang lama dan konsumsi energinya, hal ini dikarenakan 2 proses yang terjadi pada pengerinan beku vakum yaitu proses pembekuan, dan proses pengerinan atau sublimasi dan juga proses pemvakuman dan penangkapan uap sebelum masuk pompa vakum yang membutuhkan energi yang besar.

##### **2.1.1 Proses Pendinginan dan Pembekuan**

Metode penelitian saat ini memfokuskan inovasi pada pengurangan penggunaan energi, dan laju proses pengerinan beku baik itu di tahap pembekuan maupun tahap sublimasi. Pada proses pembekuan inovasi dilakukan dengan berbagai metode misalnya pembekuan dengan semburan udara dingin (*air blast freezer*), pembekuan dengan temperatur rendah (kriogenik) biasanya menggunakan nitrogen cair atau CO<sub>2</sub>, metode lempeng sentuh serta pendinginan dan pembekuan vakum. Metode pendinginan vakum merupakan teknik untuk mempercepat penguapan kandungan air yang bebas pada produk berpori (Wang & Sun, 2001). Proses pendinginan vakum biasa dilakukan untuk produk berpori yang mempunyai kandungan air yang bebas, biasanya diaplikasikan untuk pendinginan sayuran, buah segar, bunga potong, produk daging dan ikan (McDonald & Sun, 2000; Wang & Sun, 2001; McDonald & Sun, 2001). Pada pendinginan vakum, saat proses penurunan tekanan akan diikuti dengan adanya evaporasi uap air dari permukaan produk, panas laten evaporasi akan

membutuhkan energi yang besar sehingga akan menyebabkan turunnya temperatur pada produk. Pada proses pendinginan vakum sangat dimungkinkan terjadi pembekuan, tetapi hal ini tidak di harapkan karena dapat menyebabkan merusakkan cel dan struktur produk akibat pembentukan kristal es (McDonald & Sun, 2000). Pada proses pendinginan vakum, proses pendinginan dapat di hentikan pada tekanan dan temperatur yang telah di tentukan, kondisi tekanan di jaga diatas tekanan triple point dari air (0.612 kPa).

Methodode pendinginan vakum sangat di mungkinkan terjadi pembentukan lapisan es apabila tekanannya di bawah triple point atau tekanan saturasi pada 0°C (Cengel & Boles, 2002). Beberapa penelitian telah mencoba melakukan kajian tentang pembekuan vakum, Lin dan Chou (2001) menggunakan methodode ini untuk memproduksi es sedangkan Cheng dan Lin (2007) mengkaji perubahan bentuk air menjadi es pada pendinginan dan pembekuan vakum yang menghasilkan 2 lapisan es dimana pada lapisan es bagian atas berpori tidak teratur sedangkan lapisan bawah berbentuk padat. Fey an Boles (1987) menganalisa pengaruh parameter sublimasi dan pembekuan untuk media berpori. Beberapa penelitan mencoba menggabungkan metode pembekuan vakum untuk proses pengeringan beku vakum (Belyamin, 2006). Pada pembekuan vakum efek pembekuan di peroleh dengan adanya penguapan sebagian air produk karena adanya perbedaan konsentrasi antara produk dengan ruang pengering, dalam hal ini efek pembekuan bukan karena perpindahan panas dari bahan ke media pembeku tetapi karena pelepasan panas laten penguapan. Pada proses pengeringan beku harus diminimalkan adanya penguapan air dari permukaan produk karena akan menyebabkan terjadinya perpindahan cairan kedaerah permukaan produk sehingga akan merusak kualitas dari produk (halstrom, 1990), McDonald & Sun, 2000). Salah satu alternatif untuk menghindari adanya penguapan pada saat pembekuan adalah dengan melakukan penurunan tekanan ruang saat sudah terbentuk lapisan es, sehingga pembentukkan lapisan berikutnya berasal dari pelepasan panas laten akibat dari sublimasi.



### 2.1.2 Proses Sublimasi

Pada proses sublimasi, inovasi diantaranya mempercepat laju sublimasi dengan menggunakan energi gelombang elektromagnetik (*microwave*) sebagai pemanas (J.F. Nastaj, K.Witkiewicz, 2008) dan (Xu Duan et al, 2010). Pada inovasi ini masih menggunakan energi sebagai pembangkit dari gelombang elektromagnetik. Salah satu alternatif untuk mereduksi penggunaan energi sebagai pemanas pada tahap pengeringan sublimasi adalah dengan memanfaatkan panas buang kondenser. Dengan memanfaatkan panas buang kondenser, energi yang diperlukan untuk meningkatkan suhu permukaan produk waktu pengeringan sublimasi bisa dikatakan nol dan juga meningkatkan laju pengeringan (M. Yulianto et al, 2010), (M.I Alhamid et al, 2011) dan (Nasruddin, M et al, 2011).

## 2.2 Metode Numerik

Secara umum, metode untuk memprediksikan suatu proses dapat dilakukan dengan 2 cara yaitu dengan eksperimen dan dengan perhitungan teoritis. Prediksi secara teoritis pada umumnya diperoleh dari suatu model matematis yang biasanya berupa seperangkat persamaan diferensial. Pada umumnya persamaan-persamaan tersebut tidak dapat diselesaikan secara langsung dengan matematika klasik. Sehingga untuk mendapatkan penyelesaian dari model matematis tersebut, dilakukan perhitungan secara numeris dengan membuat grid imajiner di dalam domain, dan kemudian menyusun dan menyelesaikan persamaan aljabar. Untuk memprediksi suatu proses dengan metode numerik memerlukan informasi lebih lanjut tentang proses dan produk, dan pengetahuan tentang metode komputasi.

Pemodelan matematik menjadi alat bantu untuk desain dan optimalisasi proses, baik itu proses pendinginan, proses pembekuan maupun proses pengeringan. Penelitian di bidang ini telah memungkinkan untuk memprediksi profil suhu dan memperkirakan waktu proses dan kerugiannya, dan untuk meningkatkan parameter proses operasi. Wang & Sun (2002a) mengembangkan model matematika dari proses pendingin vakum berdasarkan konservasi massa udara dan uap dalam ruang vakum. Perbandingan hasil simulasi dan percobaan air menunjukkan kelayakan model untuk digunakan memprediksi proses pendinginan vakum makanan. Selanjutnya, Wang & Sun (2002b) juga

menggunakan metode finite elemen, menggabungkan perpindahan massa dan panas, untuk memprediksi proses pendinginan vakum dari daging. Simulasi menunjukkan bahwa pendinginan cepat dapat dicapai dengan menggunakan pendinginan vakum. Houska et al (1996) dan Dostal et al (2004) mengembangkan model matematis untuk memprediksi suhu makanan selama pendinginan vakum. Fey & Boles, (1987) memodelkan sublimasi dan pembekuan semi-infinite, dimana pembekuan terjadi karena adanya evaporasi dan sublimasi. Sedangkan Chakraborty (2006) dan J.F. Nastaj & K.Witkiewicz (2008) mengembangkan model simulasi untuk memprediksi pada proses pengeringan/ sublimasi. Penelitian -penelitian untuk memprediksi proses pengering beku vakum biasanya dengan memodelkan gabungan persamaan perpindahan panas dan massa.

### 2.2.1 Perpindahan panas

Perpindahan panas dapat dianalogikan dengan listrik dimana laju perpindahan panas dapat dipandang sebagai aliran, sedang gabungan dari konduktifitas termal, tebal bahan dan luas merupakan tahanan terhadap aliran ini. Temperatur merupakan fungsi potensial atau pendorong terjadinya aliran sehingga dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\text{Aliran kalor} = \frac{\text{beda potensial thermal}}{\text{tahanan thermal}} \quad (2.1)$$

Persamaan untuk aliran kalor satu dimensi dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T_{\text{menyeluru}} h}{\sum R_{th}} \quad (2.2)$$

Sedangkan tahanan thermal untuk perpindahan panas konveksi dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut:

$$R_h = \frac{1}{h_t A} \quad (2.3)$$

Dimana nilai koefisien konveksi bebas ( $h_k$ ) untuk horizontal plane di dapat dengan persamaan:

$$Nu = \frac{h La}{k} \quad (2.4)$$

Besarnya nilai Nuselt merupakan korelasi antara nilai Rayleigh

$$Nu = 0.54 Ra^{1/4} \quad 10^4 \leq Ra \leq 10^7$$

$$Nu = 0.15 Ra^{1/3} \quad 10^7 \leq Ra \leq 10^{11}$$

$$Nu = 0.27 Ra^{1/4} \quad 10^4 \leq Ra \leq 10^{11}$$

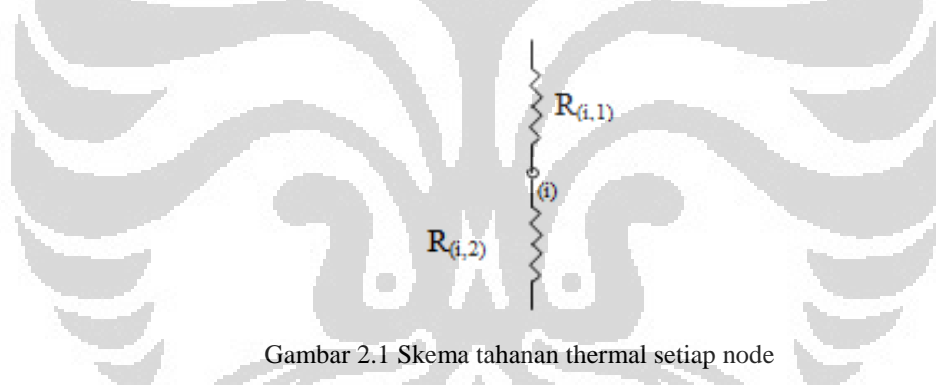
Besarnya nilai Rayleigh merupakan korelasi antara nilai Grashof dan Prandtl

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad Gr = \frac{La^3 \rho^2 g \Delta T \beta}{\mu^2} \quad Ra = Gr Pr$$

Pada proses pendinginan dan pembekuan tanpa pemvakuman perpindahan panas radiasi diabaikan (Delgado and Sun, 2003) dan (Moraga et al, 2012), sedangkan pada proses pembekuan vakum dan sublimasi perpindahan panas radiasi di perhitungkan. Sedangkan nilai koefisien radiasi ( $h_r$ ) di dapat dengan persamaan (Wang, L., & Sun, D. W. ; 2002b):

$$h_r = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{K_r}^2 + T_{K_{sf}}^2) \cdot (T_{K_r} + T_{K_{sf}}) \quad (2.5)$$

Berdasarkan analogi tahanan listrik, tahanan thermal untuk setiap node secara umum dapat digambarkan pada gambar 2. Pada setiap node dipengaruhi oleh kalor pada sisi atas dan bawah node, sehingga tahanan thermal pada persamaan ini di notasikan untuk sebelah atas node sebagai (1) dan sebelah bawah di notasikan (2).



Gambar 2.1 Skema tahanan thermal setiap node

Sedangkan tahanan thermal konduksi arah axial dituliskan sebagai berikut:

$$R_{(i)} = \frac{dx_{(i)}}{\pi \cdot k \cdot r^2} \quad (2.6)$$

$i = \text{arah axial}$

Sedangkan tahanan thermal konveksi arah axial dituliskan sebagai berikut:

$$R_{(i)} = \frac{1}{\pi \cdot h \cdot r^2} \quad (2.7)$$

$i = \text{arah axial}$

### 2.2.2 Perpindahan massa

Parameter non dimensi pada perpindahan massa setara dengan perpindahan panas, hubungan parameter non dimensi perpindahan massa dengan perpindahan

panas dapat di lihat pada tabel 2.1 (Ashim K. Dutta, 2002). Sedangkan massa uap air di udara yang terdiffusi di dekati dengan persamaan empiris (sherwod dan Pigford, dalam ASHRAE handbook, 1997).

$$D_{AB} = \frac{0.926}{P} \left( \frac{T_{abs}^{2.5}}{T_{abs} + 245} \right) \quad (2.8)$$

Tabel 2.1 Parameter non dimensi pada perpindahan massa dan panas

Mass transfer	Heat transfer equivalent
<i>Schmidt number</i>	<i>Prandtl number</i>
$Sc = \frac{\mu/\rho}{D_{AB}}$ = $\frac{\text{momentum diffusivity}}{\text{mass diffusivity}}$	$Pr = \frac{\mu/\rho}{\alpha_{fluid}}$ = $\frac{\text{momentum diffusivity}}{\text{thermal diffusivity}}$
<i>Sherwood number</i>	<i>Nusselt number</i>
$Sh = \frac{h_m L}{D_{AB}} = \frac{L}{\frac{1}{h_m}}$ = $\frac{\text{diffusive resistance}}{\text{convective resistance}}$	$Nu = \frac{h L}{k_{fluid}} = \frac{L}{\frac{1}{h}}$ = $\frac{\text{conductive resistance}}{\text{convective resistance}}$
<i>Grashof number<sup>1</sup></i>	<i>Grashof number</i>
$Gr_{AB} = \frac{g \rho \Delta \rho L^3}{\mu^2}$	$Gr = \frac{\beta g \rho^2 L^3 \Delta T}{\mu^2}$
<i>Rayleigh number</i>	<i>Rayleigh number</i>
$Ra_m = Gr_{AB} \times Sc$	$Ra = Gr \times Pr$

(Ashim K. Dutta, 2002)

### 2.2.3 Persamaan Keseimbangan Energi

Persamaan keseimbangan energi untuk 1 dimensi pada setiap node merupakan penjumlahan dari tingkat panas konduksi atau radiasi pada kiri dan atas node di tambah dengan tingkat panas yang dihasilkan (*generated*) harus sama dengan perubahan panas yang terkandung elemen pada setiap waktu. Persamaan ini dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\dot{Q}_{bawah} + \dot{Q}_{atas} + \dot{Q}_{gen} = \Delta Q_{elemen} / \Delta t \quad (2.16)$$

Persamaan keseimbangan energi diatas digunakan untuk perhitungan pada proses beku vakum menjadi:

$$\left( \left( \frac{T_{(i-1)} - T_{(i)}}{R_{(i,1)}} \right) + \left( \frac{T_{(i+1)} - T_{(i)}}{R_{(i,2)}} \right) \right) = \rho \cdot Cp \cdot Vol_{(i)} \cdot \frac{T_{(i)}^+ - T_{(i)}}{dt} \quad (2.17)$$

$i = \text{arah axial}$

#### 2.2.4 Psikrometri

Psikrometri merupakan kajian tentang sifat-sifat campuran udara dan uap air. Kandungan uap air di ruang pengering pada saat awal proses penurunan temperatur mempunyai pengaruh yang besar terhadap perhitungan keseimbangan energi panas dan massa. Pengaruh nilai energi ini akibat dari panas laten penguapan air yang mempunyai nilai sebesar  $2.4 \cdot 10^6$  joule. Persamaan- persamaan psikrometri yang di gunakan di dalam perhitungan keseimbangan energi panas dan massa di jabarkan di bawah ini (ASHRAE Handbook, 1997):

Tekanan saturasi (kPa) es dari temperatur -100 s/d  $0^\circ\text{C}$

$$\ln(P_{ws}) = C_1/T + C_2 + C_3T + C_4T^2 + C_5T^3 + C_6T^4 + C_7\ln T \quad (2.18)$$

Tekanan saturasi (kPa) air dari temperatur 0 s/d  $200^\circ\text{C}$

$$\ln(P_{ws}) = C_8/T + C_9 + C_{10}T + C_{11}T^2 + C_{12}T^3 + C_{13}\ln T \quad (2.19)$$

Dimana:

$$\begin{aligned} C_1 &= -5.674\,535\,9\,e^3 & C_8 &= -5.800\,220\,6\,e^3 \\ C_2 &= 6.392\,524\,7 & C_9 &= 1.391\,499\,3 \\ C_3 &= -9.677\,843\,e^{-3} & C_{10} &= -4.864\,023\,9\,e^{-2} \\ C_4 &= 6.221\,570\,1\,e^{-7} & C_{11} &= 4.176\,476\,8\,e^{-5} \\ C_5 &= 2.074\,782\,5\,e^{-9} & C_{12} &= -1.445\,209\,3\,e^{-8} \\ C_6 &= -9.484\,024\,e^{-13} & C_{13} &= 6.545\,967\,3 \\ C_7 &= 4.163\,501\,9 & &= - \end{aligned}$$

Sedangkan untuk menghitung tekanan parsial uap air di dapat dengan persamaan:

$$P_{va} = \emptyset \cdot P_{ws} \quad (2.20)$$

Dimana  $\emptyset$  adalah kelembaban relatif udara.

Sedangkan untuk menghitung rasio kelembaban W (kg uap air/kg udara kering) dapat di gunakan persamaan gas ideal:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (2.21)$$

$$(P_a + P_{va}) \cdot V = (n_a + n_{va}) \cdot R \cdot T \quad (2.22)$$

$$\text{udara kering } P_a V = n_a \cdot R \cdot T \quad (2.23)$$

Universitas Indonesia

$$\text{uap air} \quad P_{va}V = n_{va} \cdot R \cdot T \quad (2.24)$$

Dimana  $V$  volume total udara  $n_a$  jumlah mol dari udara kering  $n_{va}$  jumlah mole dari uap air  $R$  konstanta gas 8314.41J/(kg mol K) sedangkan  $T$  adalah temperatur absolut (K). Sehingga ratio kelembaban adalah

$$W = 0.62198 \frac{P_{va}}{P - P_{va}} \quad (2.25)$$

Sedangkan volume spesifik  $v$  ( $m^3/kg$ ) di dapat dengan persamaan:

$$v = V/M_a = V / (28.9645 \cdot n_a) \quad (2.26)$$

Dimana  $M_a$  adalah total massa udara kering. Dengan mensubstitusi persamaan (2.23) ke dalam persamaan (2.26) di dapat:

$$v = \frac{R \cdot T}{28.9645(P - P_{va})} \quad (2.27)$$

### 2.2.5 Sifat Thermodinamika Air dan Es

Persamaan sederhana untuk menghitung sifat thermodinamika air dan es pada suhu -20 s/d 50 °C di tabulasikan kedalam tabel 2.2 (Liley P.E., 2005).

Tabel 2.2 Persamaan sifat termodinamika air dan es

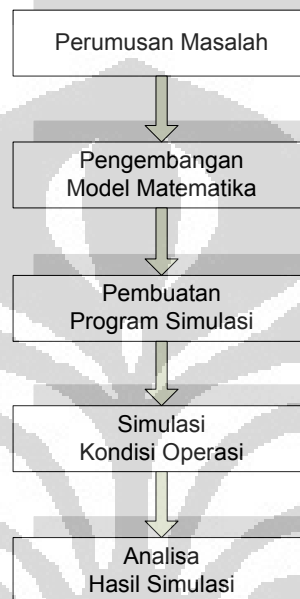
Property	Units	Range	Eq.	a	b	c	$\Delta'$
s.v.p.	kPa	A	L	22.01251	-6166.44	274.005	0.002
s.v.p.		B	L	16.99268	-4206.29	240.566	0.002
s.v.p.		C	L	16.66775	-4306.02	235.152	0.001
$h_s$	kJ/kg	A	P	-333.40	2.11	$4 \times 10^{-3}$	0.017
$h_f$		B	P		4.20763	$5.72917 \times 10^{-4}$	0.039
$h_g$		C	P	0.380	4.17716	$4.1667 \times 10^{-5}$	0.002
$h_{sf}$		A	P	2834.3	-0.265	$4.5 \times 10^{-3}$	0.006
$h_{sg}$		B	P	2500.93	-2.3609	$4.08 \times 10^{-4}$	0.003
$h_{fg}$		C	P	2500.93	-2.3609	$4.08 \times 10^{-4}$	0.004
$h_{sf}$		A	P	2500.9	1.845	$5 \times 10^{-4}$	0.00
$h_{sg}$		B	P	2500.8	1.8478	$-7.625 \times 10^{-4}$	0.001
$h_{fg}$		C	P	2500.8	1.8478	$-7.625 \times 10^{-4}$	0.001
$c_{ps}$	kJ/kg-K	A	P	2.067	$6.89 \times 10^{-3}$		0.00
$c_{pf}$		B	P	4.2200	$-3.02083 \times 10^{-3}$	$6.0069 \times 10^{-5}$	0.015
$c_{pg}$		C	P	4.1967	$-9.11067 \times 10^{-4}$	$1.21528 \times 10^{-5}$	0.026
$c_{ps}$		A	P	1.8844	$-1.035 \times 10^{-3}$	$1.15 \times 10^{-5}$	0.007
$c_{pf}$		B	P	1.8844	$9.91667 \times 10^{-4}$	$4.1667 \times 10^{-6}$	0.004
$c_{pg}$		C	P	1.8881	$7.2167 \times 10^{-4}$	$9.02778 \times 10^{-6}$	0.005
$c_{vf}$		B	P	4.2177	$-2.55417 \times 10^{-3}$	$-2.53472 \times 10^{-5}$	0.016
$c_{vg}$		C	P	4.2263	$-3.0825 \times 10^{-3}$	$-1.8403 \times 10^{-5}$	0.003
$c_{vf}$		A	P	1.4183	$8.350 \times 10^{-4}$	$7.50 \times 10^{-6}$	0.010
$c_{vg}$		B	P	1.4183	$8.29167 \times 10^{-4}$	$2.4306 \times 10^{-6}$	0.003
$c_{vg}$		C	P	1.42029	$6.94447 \times 10^{-4}$	$4.51389 \times 10^{-6}$	0.004
$\gamma_f$		B	P	1.0006	$-1.70833 \times 10^{-4}$	$2.25694 \times 10^{-5}$	0.019
$\gamma_g$		C	P	0.99423	$4.16667 \times 10^{-4}$	$9.375 \times 10^{-6}$	0.007
$\gamma_s$		A	P	1.3285	$-7.25 \times 10^{-5}$		0.008
$\gamma_f$		B	P	1.3285	$-8 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-6}$	0.006
$\gamma_g$		C	P	1.3271	$1.20633 \times 10^{-5}$	$3.17461 \times 10^{-7}$	
$\mu_f$	Pa-s	B	L	3.84288	384.838	105.503	0.022
$\mu_g$		C	L	3.37247	514.060	125.351	0.012
$\mu_s$		A	P	9.22	0.0235		0.032
$\mu_f$		B	P	9.22	0.02583		0.044
$\mu_g$		C	P	9.2102	0.024722	$6.9444 \times 10^{-5}$	0.019
$k_s$	W/m-K	A	P	2.216	-0.0102		0.00
$k_f$		B	P	0.5610	$1.92917 \times 10^{-3}$	$3.125 \times 10^{-6}$	0.007
$k_g$		C	P	0.6089	$2.26387 \times 10^{-3}$	$-1.07639 \times 10^{-5}$	0.005
$k_s$		A	P	0.01707	$5.4 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-7}$	0.108
$k_f$		B	P	0.01707	$5.25 \times 10^{-5}$	$2.7778 \times 10^{-7}$	0.013
$k_g$		C	P	0.01710	$5.13889 \times 10^{-5}$	$2.7778 \times 10^{-6}$	0.011
$Pr_f$	-	B	L	-1.65537	469.685	110.401	0.013
$Pr_f$		C	L	-1.78023	501.834	114.643	0.010
$Pr_g$		B	P	1.01873	$-7.91667 \times 10^{-3}$		0.40
$Pr_g$		C	P	1.01670	$-8.75 \times 10^{-3}$		0.40
$\nu_f$	m/s	B	P	1402.3	4.9375	$-4.6875 \times 10^{-2}$	0.007
$\nu_f$		C	P	1411.11	4.2056	$-3.1597 \times 10^{-2}$	0.004
$\nu_g$		A	P	409.0	0.7265	$-4.5 \times 10^{-4}$	0.013
$\nu_g$		B	P	409.0	0.72417	$-7.639 \times 10^{-4}$	0.001
$\nu_g$		C	P	408.91	0.73107	$-9.028 \times 10^{-4}$	0.002
$\beta_s$	k/K	A	P	161.5	0.70		0.00
$\beta_f$		B	P	-0.681	0.18096	$-2.7813 \times 10^{-3}$ *	0.150
$\beta_g$		C	P	-0.39630	0.14561	$-1.2310 \times 10^{-3}$ **	0.013
$\beta_s$		B	P	3.692	$-1.2542 \times 10^{-2}$	$5.9028 \times 10^{-5}$	0.020
$\beta_g$		C	P	3.67603	$-1.16111 \times 10^{-2}$	$4.8611 \times 10^{-5}$	0.022
$\tau$	mN/m	B	P	75.66	-0.14042	$-3.125 \times 10^{-4}$	
$\tau$		C	P	75.66	-0.141	$-2.7778 \times 10^{-4}$	

\*Also add term  $d^2$ ,  $d = 2.9945 \times 10^{-5}$ . Range is 5–25 °C.  
 \*\*Also add term  $d^2$ ,  $d = 6.16667 \times 10^{-6}$ .  
 Range is Temperature range: A, -20–0 °C; B, 0–25 °C; C, 25–50 °C.  
 Eq.: Equation used for property ( $\psi$  = any property,  $t$  = °C)  
 L (logarithmic)  $\ln \psi = a + b/(t + c)$   
 P (polynomial)  $\psi = a + bt + ct^2$   
 $\Delta'$ : Average deviation ( $(\psi_{calc} - \psi_{table})/\psi_{table}$ , over range listed (%).

(Liley P.E., 2005)

## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Bagan alir penelitian yang menggambarkan kegiatan riset yang akan dikerjakan dapat dilihat dalam gambar 3.1 berikut ini :

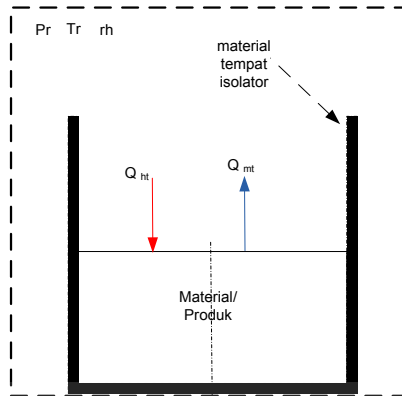


Gambar 3.1 Diagram alir Penelitian

### 3.1 Pengembangan Model Matematika

Model matematika ini merupakan pengembangan dari persamaan dasar perpindahan panas dan massa dengan menggunakan analogi listrik untuk menghitung perubahan temperatur pada produk yang akan dikeringkan (gambar 3.2).

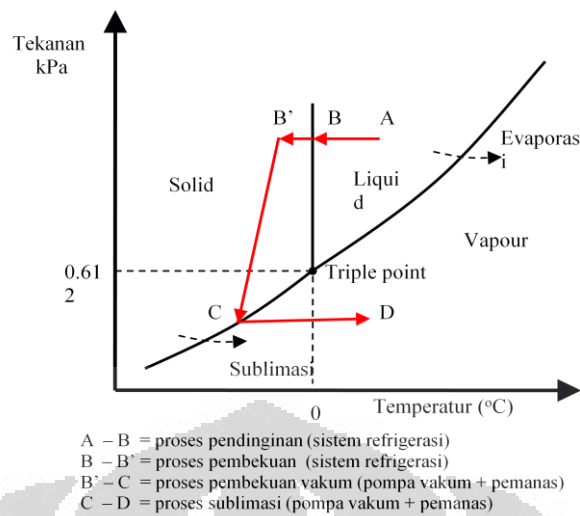




Gambar 3.2 Kondisi batas model simulasi

Permodelan ini terdiri dari 3 proses perhitungan (gambar 3.3) yaitu:

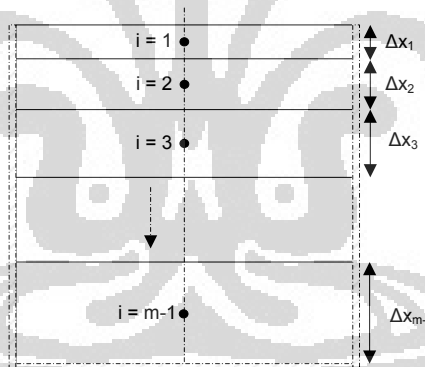
- Tahap pendinginan (*cooling*)  
Pada tahap ini terjadi penurunan temperatur permukaan produk sampai 0°C dan terjadi pembentukan es saat pertama kali.
- Tahap pembentukan es (*freezing*)  
Pada tahap ini terjadi pembentukan es akibat adanya perpindahan kalor dari produk dan atau perpindahan massa karena sublimasi akibat dari penurunan tekanan ruang pengering.
- Tahap pengeringan/ sublimasi  
Pada tahap ini terjadi perpindahan massa (sublimasi) karena perbedaan konsentrasi antara produk dan ruang pengering dan juga peningkatan temperatur permukaan produk akibat perpindahan panas dari produk ke ruang pengering.



Gambar 3.3 Skema proses pengering beku vakum

### 3.1.1 Model Matematika untuk tahap pendinginan

Pada proses pendinginan kondisi batas adalah tetap sedangkan pembagian node dapat dilihat pada gambar 3.4, dimana jarak antara node pada arah axial semakin melebar ke arah dinding.



Gambar 3.4 Pembagian node saat awal tahap pendinginan

Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan  $dx_{(i)}$  setiap node

$$dx_{(i)} = ax \cdot i + bx \quad (3.1)$$

Dimana :

$$ax = \frac{L}{(m-1) \cdot p} - bx$$

$$bx = \frac{(2 \cdot p - n) \cdot L / 2 \cdot p}{(1.5 \cdot n - 0.5n^2)}$$

$$p = \text{faktor pembagi}$$

$$i = n - 1$$

$L = \text{ketebalanspesimenuji}$

Tahanan thermal

Tahanan thermal pada node  $i=1$

$$R_{(1,1)} = \left( \frac{1}{h_a \cdot \pi \cdot r^2} \right) + \left( \frac{dx_1/2}{k_w \cdot \pi \cdot r^2} \right) \quad (3.2)$$

$$R_{(1,2)} = \left( \frac{(dx_1 + dx_2)/2}{k_w \cdot \pi \cdot r^2} \right) \quad (3.3)$$

Tahanan thermal pada node  $i=2:m-1$

$$R_{(i,1)} = \left( \frac{(dx_{(i-1)} + dx_i)/2}{k_w \cdot \pi \cdot r^2} \right) \quad (3.4)$$

$$R_{(i,2)} = \left( \frac{(dx_{(i)} + dx_{(i+1)})/2}{k_w \cdot \pi \cdot r^2} \right) \quad (3.5)$$

Sehingga  $\sum 1/R_i$  pada node ke  $i$  menjadi:

$$\sum 1/R_i = \frac{1}{R_{(i,1)}} + \frac{1}{R_{(i,2)}} \quad (3.6)$$

Volume pada setiap node ( $Vol_{(i)}$ )

$$Vol_{(i)} = \pi \cdot r^2 \cdot \Delta x_i \quad (3.7)$$

Massa terevaporasi

$$\dot{m}_{mv} = h_{ma} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot (\rho_{vw} - \rho_{va}) \quad (3.8)$$

Energi perpindahan massa akibat evaporasi

$$\dot{Q}_{mv} = \dot{m}_{mv} \cdot h_{fg} \quad (3.9)$$

Persamaan energi untuk keseimbangan panas dan massa

Untuk node 1

$$\left( \frac{T_r^+ - T_{(1)}^+}{R_{(1,1)}} \right) + \left( \frac{(T_{(2)}^+ - T_{(1)}^+)}{R_{(1,2)}} \right) + \dot{Q}_{gen} + \dot{Q}_{mv} = C p_w \cdot \rho_w \cdot Vol_{(1)} \left( \frac{T_{(1)}^+ - T_{(1)}}{dt} \right) \quad (3.10)$$

Untuk node  $i=2:m-1$

$$\left( \frac{T_{(i-1)}^+ - T_{(i)}^+}{R_{(i,1)}} \right) + \left( \frac{(T_{(m+1)}^+ - T_{(i)}^+)}{R_{(i,2)}} \right) = C p_w \cdot \rho_w \cdot Vol_{(i)} \left( \frac{T_{(i)}^+ - T_{(i)}}{dt} \right) \quad (3.11)$$

Temperatur baru tiap node

Berdasarkan persamaan (3.10) dan (3.11) temperatur baru untuk setiap node menjadi:

Untuk node ke 1

$$\begin{aligned} & \left( 1 + \left( \frac{dt \cdot \Sigma 1/R_{(1)}}{C_{p_w} \cdot \rho_w \cdot Vol_{(1)}} \right) \right) \cdot T_{(1)}^+ - \left( \frac{dt}{C_{p_w} \cdot \rho_w \cdot Vol_{(1)} \cdot R_{(1,1)}} \right) \cdot T_{(2)}^+ = \\ & \left( \frac{dt}{C_{p_w} \cdot \rho_w \cdot Vol_{(1)} \cdot R_{(1,1)}} \right) \cdot Tr^+ + T_{(1)} - \dot{Q}_{mv} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Untuk node ke 2:m-1

$$\begin{aligned} & - \left( \frac{dt}{C_{p_w} \cdot \rho_w \cdot Vol_{(i)} \cdot R_{(i,1)}} \right) \cdot T_{(i-1)}^+ + \left( 1 + \left( \frac{dt \cdot \Sigma 1/R_{(i)}}{C_{p_w} \cdot \rho_w \cdot Vol_{(i)}} \right) \right) \cdot T_{(i)}^+ - \\ & \left( \frac{dt}{C_{p_w} \cdot \rho_w \cdot Vol_{(i)} \cdot R_{(i,2)}} \right) \cdot T_{(i+1)}^+ = T_{(i)} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Untuk node ke m

$$-T_{(i-1)}^+ + T_{(i)}^+ = 0 \quad (3.14)$$

$T_{(i)}^+$  di cari dari persamaan (3.12), (3.13) dan (3.14) dengan membuat matrik diagonal (3.15), kemudian dari matrik tersebut diselesaikan dengan eliminasi gauss. Matrik diagonal [m , m].

$$\begin{bmatrix} B_{(1)} - C_{(1)} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ -A_{(2)} & B_{(2)} - C_{(2)} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & B_{(m-1)} - C_{(m-1)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{(1)}^+ \\ T_{(2)}^+ \\ \vdots \\ T_{(m-1)}^+ \\ T_{(m)}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{(1)} Tr^+ + T_{(1)} - \dot{Q}_{mv} \\ T_{(2)} \\ \vdots \\ T_{(m-1)} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Dimana:

$$A(i) = \frac{dt}{C_{p_w} \cdot \rho_w \cdot Vol_{(i)} \cdot R_{(i,1)}}$$

$$B(i) = 1 + \frac{dt \cdot \Sigma 1/R_{(i)}}{C_{p_w} \cdot \rho_w \cdot Vol_{(i)}}$$

$$C(i) = \frac{dt}{C_{p_w} \cdot \rho_w \cdot Vol_{(i)} \cdot R_{(i,2)}}$$

Untuk  $T_{(1)}^+ \leq 0$  (saat pertama kali terbentuk es), dilakukan perhitungan terbentuknya lapisan es di mana  $T_{(1)}^+$  di jadikan 0. Kemudian di hitung nilai  $\dot{Q}_{gen}$ . Dimana  $\dot{Q}_{gen}$  merupakan energi yang digunakan untuk membentuk lapisan es. Berdasarkan persamaan (3.10) maka persamaan untuk mendapatkan  $\dot{Q}_{gen}$  menjadi:

Untuk node ke 1

$$\dot{Q}_{gen} + \left( \frac{1}{R_{(1,2)}} \right) T_{(2)}^+ = \left( \frac{1}{R_{(1,1)}} \right) Tr^+ - \dot{Q}_{mv} \quad (3.16)$$

Untuk node ke 2

$$0 + \left( 1 + \left( \frac{dt \cdot \sum 1/R_{(2)}}{C_{p_w} \cdot \rho_w \cdot Vol_{(2)}} \right) \right) \cdot T_{(2)}^+ - \left( \frac{dt}{C_{p_w} \cdot \rho_w \cdot Vol_{(2)} \cdot R_{(2,2)}} \right) \cdot T_{(3)}^+ = T_{(2)} \quad (3.17)$$

Untuk node ke  $i = 3:m-1$ , persamaan sama dengan persamaan (3.13), sedangkan untuk node ke  $m$  juga sama dengan (3.14). Sehingga untuk mendapatkan nilai  $\dot{Q}_{gen}$ . di cari dari persamaan (3.16), (3.17), (3.13) dan (3.14) dengan membuat matrik diagonal (3.18), kemudian dari matrik tersebut diselesaikan dengan eliminasi gaus.

$$\begin{bmatrix} 11/R_{(1,2)} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_{(2)} & -C_{(2)} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & B_{(m-1)} - C_{(m-1)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Q}_{gen} \\ T_{(2)}^+ \\ \vdots \\ T_{(m-1)}^+ \\ T_{(m)}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left( \frac{1}{R_{(1,1)}} \right) T r^+ - \dot{Q}_{mv} \\ T_{(2)} \\ \vdots \\ T_{(m-1)} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Menghitung ketebalan es

Berdasarkan nilai  $\dot{Q}_{gen}$  maka dapat di hitung ketebalan es yang terbentuk:

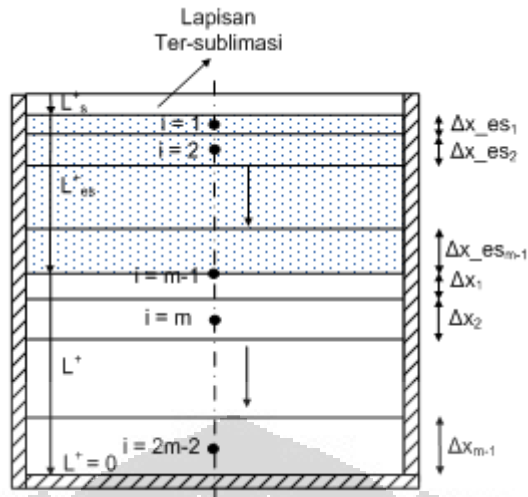
$$L_{es} = \frac{(\dot{Q}_{gen}/h_{es})}{\rho_{es} \cdot \pi \cdot r^2} \cdot dt \quad (3.19)$$

Sedangkan ketebalan air menjadi:

$$L = \frac{(Q_{gen}/h_{es})}{\rho_w \cdot \pi \cdot r^2} \cdot dt \quad (3.20)$$

### 3.1.2 Model Matematika untuk tahap pembekuan

Setelah terbentuk lapisan es maka kondisi batas menjadi dua lapis dan bergerak dimana kondisi batas dari lapisan es akan bertambah sedangkan kondisi batas dari cairan (air) akan berkurang. Sedangkan pembagian node menjadi 9 node untuk lapisan es dan 10 node untuk lapisan air. Dimana pada node di lapisan batas antara es dan air di jadikan satu node dengan temperatur yang tetap pada  $0^\circ\text{C}$ . Pada saat pembentukan es ketebalan lapisan es akan semakin bertambah ( $L_{es}^+ = L_{es} + \Delta L_{es}$ ) sedangkan lapisan air akan berkurang ( $L^+ = L - \Delta L$ ), sedangkan pada saat mulai terjadi sublimasi ketebalan lapisan es akan berkurang ( $L_{es}^+ = L_{es} + \Delta L_{es} - \Delta L_s$ ). Pembagian node untuk tahap pembekuan dapat dilihat pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 Pembagian node saat tahap pembekuan

Persamaan yang di gunakan di dalam menghitung nilai ketebalan setiap node sama dengan persamaan (3.1) dengan nilai  $L$  di ganti dengan nilai  $L_{es}$  untuk ketebalan pada node  $es$  ( $dx_{es}$ ), sedangkan untuk ketebalan air ( $dx$ ) nilai  $L$  di ganti dengan nilai  $L^+$ .

Tahanan thermal lapisan batas

Perhitungan yang di gunakan untuk menghitung tahanan thermal untuk tahap pembekuan hampir sama dengan tahanan thermal pada saat pendinginan. Perbedaan hanya terletak pada perhitungan tahanan thermal untuk lapisan batas antara es dan air, properties thermodinamika dan jumlah node ( $i = 1 : 2m-2$ ).

Untuk lapisan es yang berbatasan dengan lapisan es dan air

$$R_{(m-2,1)} = \left( \frac{dx_{es(m-3)} + dx_{es(m-2)}}{2.k_{es}.\pi.r^2} \right) \quad (3.21)$$

$$R_{(m-2,2)} = \left( \frac{dx_{es(m-2)}}{2.k_{es}.\pi.r^2} \right) + \left( \frac{dx_{es(m-1)}}{k_{es}.\pi.r^2} \right) \quad (3.22)$$

Untuk batas lapisan es dan air

$$R_{(m-1,1)} = \left( \frac{dx_{es(m-2)}}{2.k_{es}.\pi.r^2} \right) + \left( \frac{dx_{es(m-1)}}{k_{es}.\pi.r^2} \right) \quad (3.23)$$

$$R_{(m-1,2)} = \left( \frac{dx(1)}{k_w.\pi.r^2} \right) + \left( \frac{dx(2)}{2.k_w.\pi.r^2} \right) \quad (3.24)$$

Untuk lapisan air yang berbatasan dengan lapisan es dan air

$$R_{(m,1)} = \left( \frac{dx(1)}{k_w.\pi.r^2} \right) + \left( \frac{dx(2)}{2.k_w.\pi.r^2} \right) \quad (3.25)$$

$$R_{(m,2)} = \left( \frac{dx_{(2)} + dx_{(3)}}{2 \cdot k_w \cdot \pi \cdot r^2} \right) \quad (3.26)$$

Massa yang tersublimasi

$$\dot{m}_{ms} = h_{ma} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot (\rho_{vw} - \rho_{va}) \quad P_{sat_w} \leq P_{va} \quad (3.27)$$

$$\dot{m}_{ms} = 0 \quad P_{sat_w} > P_{va}$$

Energi perpindahan massa akibat sublimasi

$$\dot{Q}_{ms} = \dot{m}_{ms} \cdot h_{sg} \quad (3.28)$$

Pengurangan ketebalan es akibat sublimasi

$$\Delta L_s = \frac{\dot{m}_{ms} \cdot dt}{\rho_{es} \cdot \pi \cdot r^2} \quad (3.29)$$

Perubahan kandungan uap air di ruang pengering

$$\Delta m_v = \frac{m_v}{T_{r^+}} \cdot (T_{r^+} - T_r) \quad (3.30)$$

Kandungan uap air di ruang pengering

$$m_v = m_v + \Delta m_v \quad (3.31)$$

$$m_v = 0 \quad m_v \leq 0$$

Massa yang teranti-sublimasi di *cold trap*

$$\dot{m}_{ct} = \dot{m}_{ms} - \left( \frac{\Delta m_v}{dt} \right) \quad (3.32)$$

Energi di *cold trap* akibat anti-sublimasi

$$\dot{Q}_{ct} = \dot{m}_{ct} \cdot h_{sg} \quad (3.33)$$

Persamaan energi untuk keseimbangan panas dan massa pada tahap pembekuan

Untuk node 1

$$\left( \frac{T_{r^+} - T_{(1)}^+}{R_{(1,1)}} \right) + \left( \frac{(T_{(2)}^+ - T_{(1)}^+)}{R_{(1,2)}} \right) + \dot{Q}_{ms} = C p_{es} \cdot \rho_{es} \cdot Vol_{(1)} \left( \frac{T_{(1)}^+ - T_{(1)}}{dt} \right) \quad (3.34)$$

$$\dot{Q}_{ms} = 0 \quad P_{sat_w} < P_{va}$$

Untuk node  $i=2:m-8$  dan  $i=m:2m-2$

$$\left( \frac{T_{(i-1)}^+ - T_{(i)}^+}{R_{(i,1)}} \right) + \left( \frac{(T_{(i+1)}^+ - T_{(i)}^+)}{R_{(i,2)}} \right) = C p \cdot \rho \cdot Vol_{(i)} \left( \frac{T_{(i)}^+ - T_{(i)}}{dt} \right) \quad (3.35)$$

Untuk node pada lapisan batas  $i=m-1$

$$\left( \frac{T_{(i-1)}^+ - T_{(i)}^+}{R_{(i,1)}} \right) + \left( \frac{(T_{(i+1)}^+ - T_{(i)}^+)}{R_{(i,2)}} \right) + \dot{Q}_{gen} = C p_{es} \cdot \rho_{es} \cdot Vol_{(i)} \left( \frac{T_{(i)}^+ - T_{(i)}}{dt} \right) \quad (3.36)$$

Temperatur baru tiap node dan energi pembentukan es

Berdasarkan persamaan (3.10) dan (3.11) temperatur baru untuk setiap node menjadi:

Untuk node ke 1

$$\left(1 + \left(\frac{dt \cdot \sum 1/R_{(1)}}{Cp_{es} \cdot \rho_{es} \cdot Vol_{(1)}}\right)\right) \cdot T_{(1)}^+ - \left(\frac{dt}{Cp_{es} \cdot \rho_{es} \cdot Vol_{(1), R_{(1,1)}}}\right) \cdot T_{(2)}^+ = \left(\frac{dt}{Cp_{es} \cdot \rho_{es} \cdot Vol_{(1), R_{(1,1)}}}\right) \cdot Tr^+ + T_{(1)} - \dot{Q}_{ms} \quad (3.37)$$

$$\dot{Q}_{ms} = 0 \quad Psat_w < P_{va}$$

Untuk node ke i=2:m-3

$$-\left(\frac{dt}{Cp_{es} \cdot \rho_{es} \cdot Vol_{(i), R_{(i,1)}}}\right) \cdot T_{(i-1)}^+ + \left(1 + \left(\frac{dt \cdot \sum 1/R_{(i)}}{Cp_{es} \cdot \rho_{es} \cdot Vol_{(i)}}\right)\right) \cdot T_{(i)}^+ - \left(\frac{dt}{Cp_{es} \cdot \rho_{es} \cdot Vol_{(i), R_{(i,2)}}}\right) \cdot T_{(i+1)}^+ = T_{(i)} \quad (3.38)$$

Untuk node ke i=m-2

$$-\left(\frac{dt}{Cp_{es} \cdot \rho_{es} \cdot Vol_{(i), R_{(i,1)}}}\right) \cdot T_{(i-1)}^+ + \left(1 + \left(\frac{dt \cdot \sum 1/R_{(i)}}{Cp_{es} \cdot \rho_{es} \cdot Vol_{(i)}}\right)\right) \cdot T_{(i)}^+ - 0 = T_{(i)} \quad (3.39)$$

Untuk node ke i=m-1

$$\left(\frac{1}{R_{(i,1)}}\right) T_{(i-1)}^+ + Q_{gen} + \left(\frac{1}{R_{(i,2)}}\right) T_{(i+1)}^+ = 0 \quad (3.40)$$

Untuk node ke i=m

$$0 + \left(1 + \left(\frac{dt \cdot \sum 1/R_{(i)}}{Cp_w \cdot \rho_w \cdot Vol_{(i)}}\right)\right) \cdot T_{(i)}^+ - \left(\frac{dt}{Cp_w \cdot \rho_w \cdot Vol_{(i), R_{(i,1)}}}\right) \cdot T_{(i+1)}^+ = T_{(i)} \quad (3.41)$$

Untuk node ke i=m+1:2m-3

$$-\left(\frac{dt}{Cp_w \cdot \rho_w \cdot Vol_{(i), R_{(i,1)}}}\right) \cdot T_{(i-1)}^+ + \left(1 + \left(\frac{dt \cdot \sum 1/R_{(i)}}{Cp_w \cdot \rho_w \cdot Vol_{(i)}}\right)\right) \cdot T_{(i)}^+ - \left(\frac{dt}{Cp_w \cdot \rho_w \cdot Vol_{(i), R_{(i,2)}}}\right) \cdot T_{(i+1)}^+ = T_{(i)} \quad (3.42)$$

Untuk node ke i=2m-2

$$-T_{(i-1)}^+ + T_{(i)}^+ = 0 \quad (3.43)$$



$T_{(i)}^+$  di cari dari persamaan (3.37) s/d (3.43) dengan membuat matrik diagonal pada (3.44), kemudian dari matrik tersebut diselesaikan dengan eliminasi gaus.

Matrik diagonal [2m-2 , 2m-2].

$$\begin{bmatrix} B_{(1)} & -C_{(1)} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ -A_{(2)} & B_{(2)} & -C_{(2)} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & B_{(2m-3)} & -C_{(2m-3)} & T_{(2m-3)}^+ \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & 1 & T_{(m)}^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{(1)}^+ \\ T_{(2)}^+ \\ \vdots \\ \dot{Q}_{gen} \\ \vdots \\ T_{(2m-3)}^+ \\ T_{(m)}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{(1)}Tr^+ + T_{(1)} - \dot{Q}_{ms} \\ T_{(2)} \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ T_{(2m-3)} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

Menghitung ketebalan es

Berdasarkan nilai  $\dot{Q}_{gen}$  maka dapat di hitung ketebalan es yang terbentuk:

$$\Delta L_{es} = \frac{(\dot{Q}_{gen} / h_{es})}{\rho_{es} \cdot \pi \cdot r^2} \cdot dt \quad (3.45)$$

Ketebalan es baru

$$L_{es}^+ = L_{es} + \Delta L_{es} - \Delta L_s \quad (3.46)$$

Sedangkan ketebalan air menjadi:

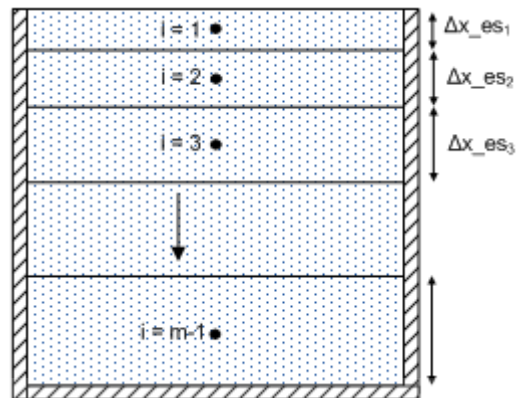
$$\Delta L = \frac{(\dot{Q}_{gen} / h_{es})}{\rho_w \cdot \pi \cdot r^2} \cdot dt \quad (3.47)$$

Ketebalan air baru

$$L^+ = L + \Delta L \quad (3.48)$$

### 3.1.3 Model Matematika untuk tahap sublimasi

Setelah semua bahan berubah menjadi es maka kondisi batas menjadi satu lapis yaitu lapisan es dengan kondisi batas yang bergerak. Sedangkan pembagian node menjadi 10 node. Dimana pada node 1 s/d 8 nilai temperatur adalah sama dengan nilai temperatur pada node es sedangkan untuk node 9 dan 10 bernilai 0°C. Pembagian node untuk tahap sublimasi dapat dilihat pada gambar 3.6.



Gambar 3.6 Pembagian node saat tahap sublimasi

Persamaan yang di gunakan di dalam menghitung nilai ketebalan setiap node sama dengan persamaan (3.1) dengan nilai  $L$  di ganti dengan nilai  $L_{es}$  untuk ketebalan pada node es ( $dx_{es}$ ).

Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan ( $dx_{es}$ ). setiap node

$$dx_{es} = ax.i + bx \quad [3.49]$$

Dimana :

$$ax = \frac{L_{es}}{(m-1).p} - bx$$

$$bx = \frac{(2.p - n).L_{es}/2.p}{(1.5.n - 0.5n^2)}$$

$p = \text{faktor pembagi}$

$$i = n - 1$$

$$L_{es} = \text{ketebalan spesimen uji}$$

Tahanan thermal

Perhitungan yang di gunakan untuk menghitung tahanan thermal untuk tahap sublimasi sama dengan tahanan thermal pada saat pendinginan. Perbedaan hanya terletak pada sifat termodinamikanya.

Tahanan thermal pada node  $i=1$

$$R_{(1,1)} = \left( \frac{1}{h_a \cdot \pi \cdot r^2} \right) + \left( \frac{dx_{es1}/2}{k_{es} \cdot \pi \cdot r^2} \right) \quad (3.50)$$

$$R_{(1,2)} = \left( \frac{(dx_{es1} + dx_{es2})/2}{k_{es} \cdot \pi \cdot r^2} \right) \quad (3.51)$$

Tahanan thermal pada node  $i=2:m-1$

$$R_{(i,1)} = \left( \frac{(dx_{es(i-1)} + dx_{es(i)})/2}{k_{es} \cdot \pi \cdot r^2} \right) \quad (3.52)$$

$$R_{(i,2)} = \left( \frac{(dx_{es(i)} + dx_{es(i+1)})/2}{k_{es} \cdot \pi \cdot r^2} \right) \quad (3.53)$$

Massa yang tersublimasi

$$\dot{m}_{ms} = h_{ma} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot (\rho_{vw} - \rho_{va}) \quad Psat_w \leq P_{va} \quad (3.54)$$

$$\dot{m}_{ms} = 0 \quad Psat_w > P_{va}$$

Energi perpindahan massa akibat sublimasi

$$\dot{Q}_{ms} = \dot{m}_{ms} \cdot h_{sg} \quad (3.55)$$

Perubahan kandungan uap air di ruang pengering

$$\Delta m_v = \frac{m_v}{Tr^+} \cdot (Tr^+ - Tr) \quad (3.56)$$

Kandungan uap air di ruang pengering

$$m_v = m_v + \Delta m_v \quad (3.57)$$

$$m_v = 0 \quad m_v \leq 0$$

Massa yang teranti-sublimasi di *cold trap*

$$\dot{m}_{ct} = \dot{m}_{ms} - \left( \frac{\Delta m_v}{dt} \right) \quad (3.58)$$

Energi di *cold trap* akibat anti-sublimasi

$$\dot{Q}_{ct} = \dot{m}_{ct} \cdot h_{sg} \quad (3.59)$$

Persamaan energi untuk keseimbangan panas dan massa pada tahap sublimasi

Untuk node 1

$$\left( \frac{Tr^+ - T_{(1)}^+}{R_{(1,1)}} \right) + \left( \frac{(T_{(2)}^+ - T_{(1)}^+)}{R_{(1,2)}} \right) + \dot{Q}_{ms} = Cp_{es} \cdot \rho_{es} \cdot Vol_{(1)} \left( \frac{T_{(1)}^+ - T_{(1)}}{dt} \right) \quad (3.60)$$

$$\dot{Q}_{ms} = 0 \quad Psat_w \leq P_{va}$$

Untuk node  $i=2:m-1$

$$\left( \frac{T_{(i-1)}^+ - T_{(i)}^+}{R_{(i,1)}} \right) + \left( \frac{(T_{(i+1)}^+ - T_{(i)}^+)}{R_{(i,2)}} \right) = Cp_{es} \cdot \rho_{es} \cdot Vol_{(i)} \left( \frac{T_{(i)}^+ - T_{(i)}}{dt} \right) \quad (3.61)$$

Temperatur baru tiap node dan energi sublimasi

Berdasarkan persamaan (3.10) dan (3.11) temperatur baru untuk setiap node menjadi:

Untuk node ke 1

$$\left(1 + \left(\frac{dt \cdot \sum 1/R_{(1)}}{Cp_{es} \cdot \rho_{es} \cdot Vol_{(1)}}\right)\right) \cdot T_{(1)}^+ - \left(\frac{dt}{Cp_{es} \cdot \rho_{es} \cdot Vol_{(1), R_{(1,1)}}}\right) \cdot T_{(2)}^+ = \left(\frac{dt}{Cp_{es} \cdot \rho_{es} \cdot Vol_{(1), R_{(1,1)}}}\right) \cdot Tr^+ + T_{(1)} - \dot{Q}_{ms} \quad (3.62)$$

$$\dot{Q}_{ms} = 0 \quad Psat_w > P_{va}$$

Untuk node ke  $i=2:m-1$

$$-\left(\frac{dt}{Cp_{es} \cdot \rho_{es} \cdot Vol_{(i), R_{(i,1)}}}\right) \cdot T_{(i-1)}^+ + \left(1 + \left(\frac{dt \cdot \sum 1/R_{(i)}}{Cp_{es} \cdot \rho_{es} \cdot Vol_{(i)}}\right)\right) \cdot T_{(i)}^+ - \left(\frac{dt}{Cp_{es} \cdot \rho_{es} \cdot Vol_{(i), R_{(i,2)}}}\right) \cdot T_{(i+1)}^+ = T_{(i)} \quad (3.63)$$

Untuk node ke  $i=m$

$$-T_{(i-1)}^+ + T_{(i)}^+ = 0 \quad (3.64)$$

$T_{(i)}^+$  di cari dari persamaan (3.62), (3.63) dan (3.64) dengan membuat matrik (3.65), kemudian dari matrik tersebut diselesaikan dengan eliminasi gaus.

Matrik  $[m, m]$ .

$$\begin{bmatrix} B_{(1)} - C_{(1)} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ -A_{(2)} & B_{(2)} - C_{(2)} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & B_{(m-1)} - C_{(m-1)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{(1)}^+ \\ T_{(2)}^+ \\ \vdots \\ T_{(m-1)}^+ \\ T_{(m)}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{(1)}Tr^+ + T_{(1)} - \dot{Q}_{ms} \\ T_{(2)} \\ \vdots \\ T_{(m-1)} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

Dimana:

$$A(i) = \frac{dt}{Cp_w \cdot \rho_w \cdot Vol_{(i), R_{(i,1)}}}$$

$$B(i) = 1 + \frac{dt \cdot \sum 1/R_{(i)}}{Cp_w \cdot \rho_w \cdot Vol_{(i)}}$$

$$C(i) = \frac{dt}{Cp_w \cdot \rho_w \cdot Vol_{(i), R_{(i,2)}}}$$

Menghitung ketebalan es

Pengurangan ketebalan es akibat sublimasi

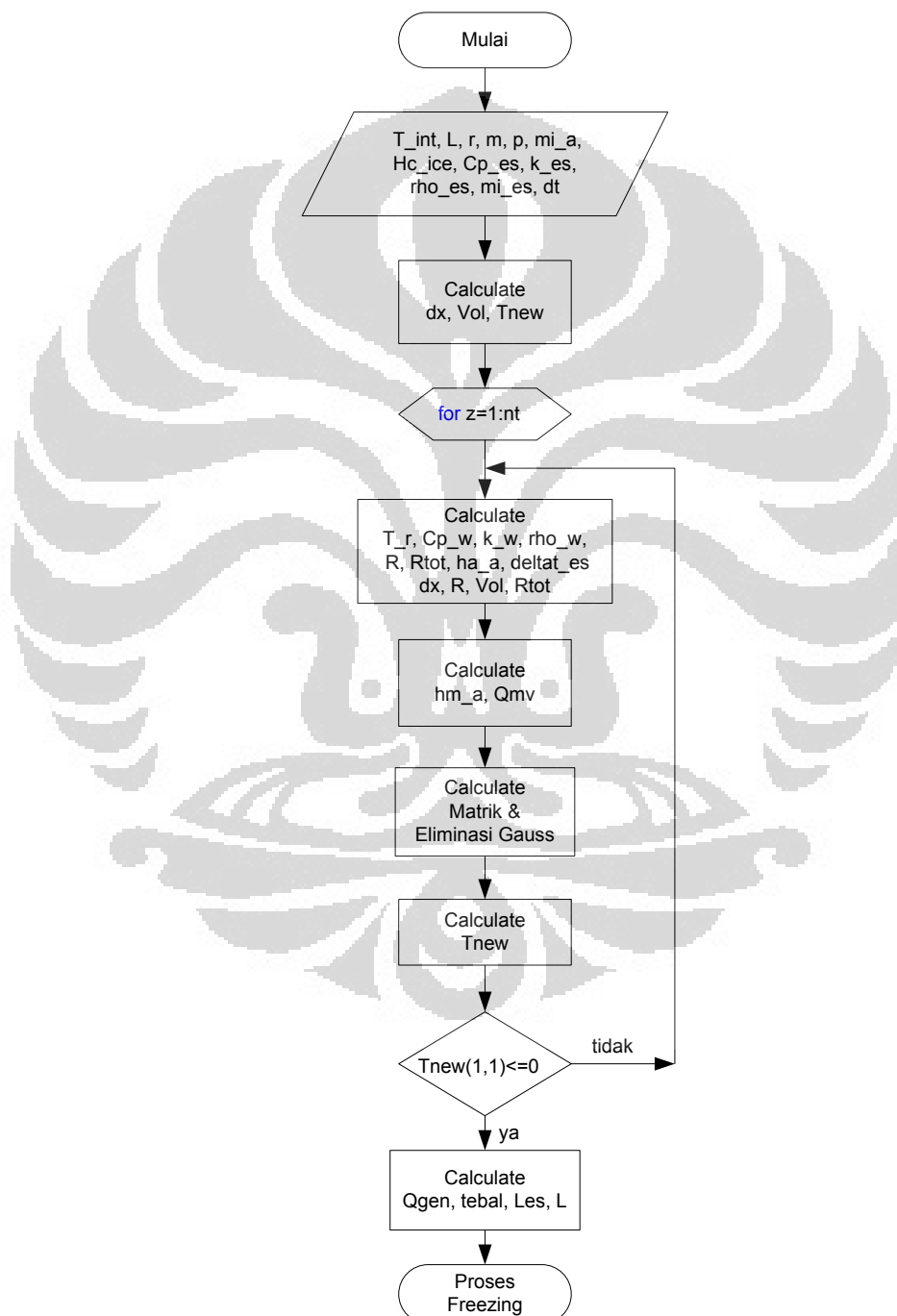
$$\Delta L_s = \frac{\dot{m}_{ms} \cdot dt}{\rho_{es} \cdot \pi \cdot r^2} \quad (3.66)$$

Ketebalan es baru

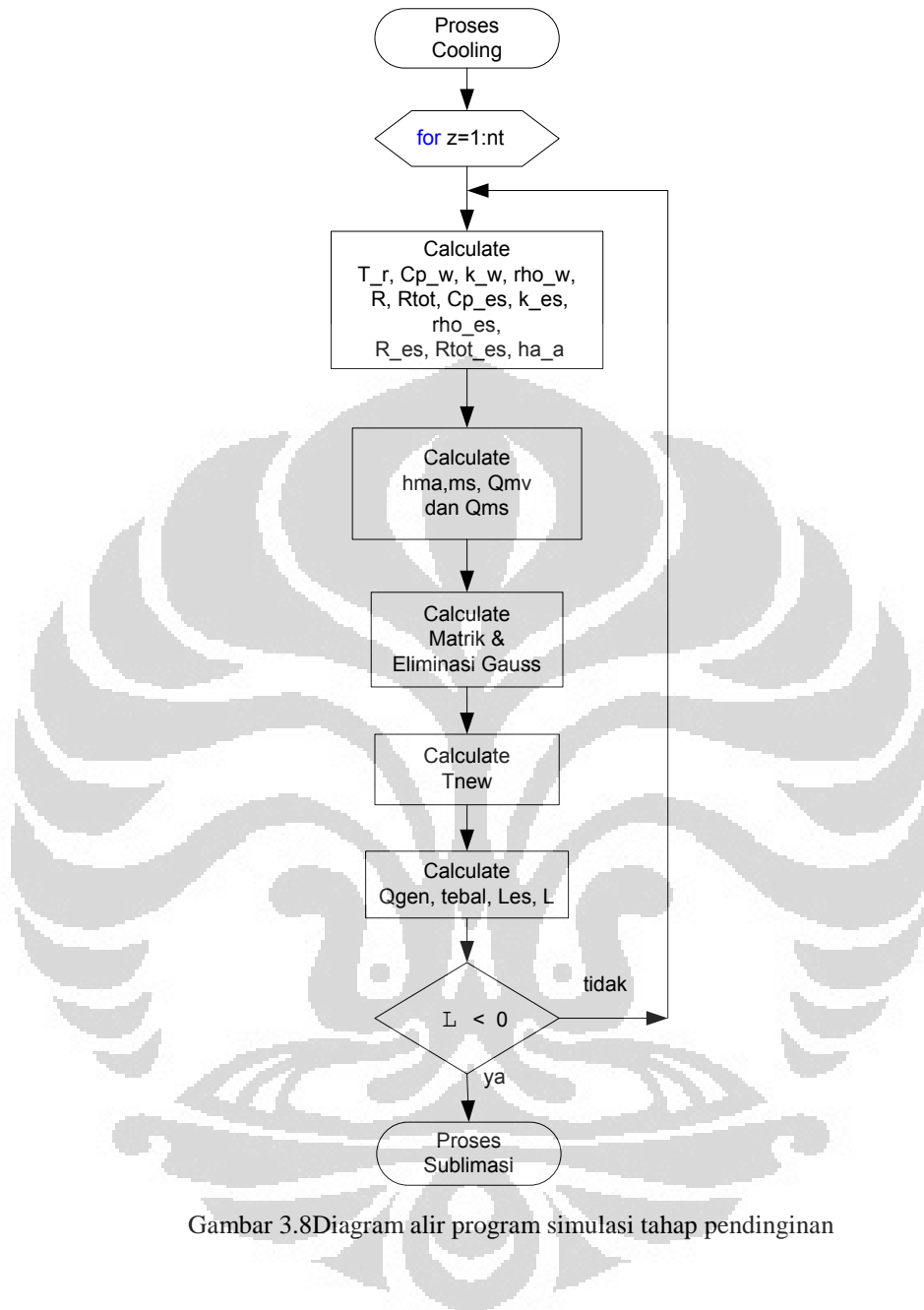
$$L_{es}^+ = L_{es} - \Delta L_s \quad (3.67)$$

### 3.2 Pembuatan Model Simulasi

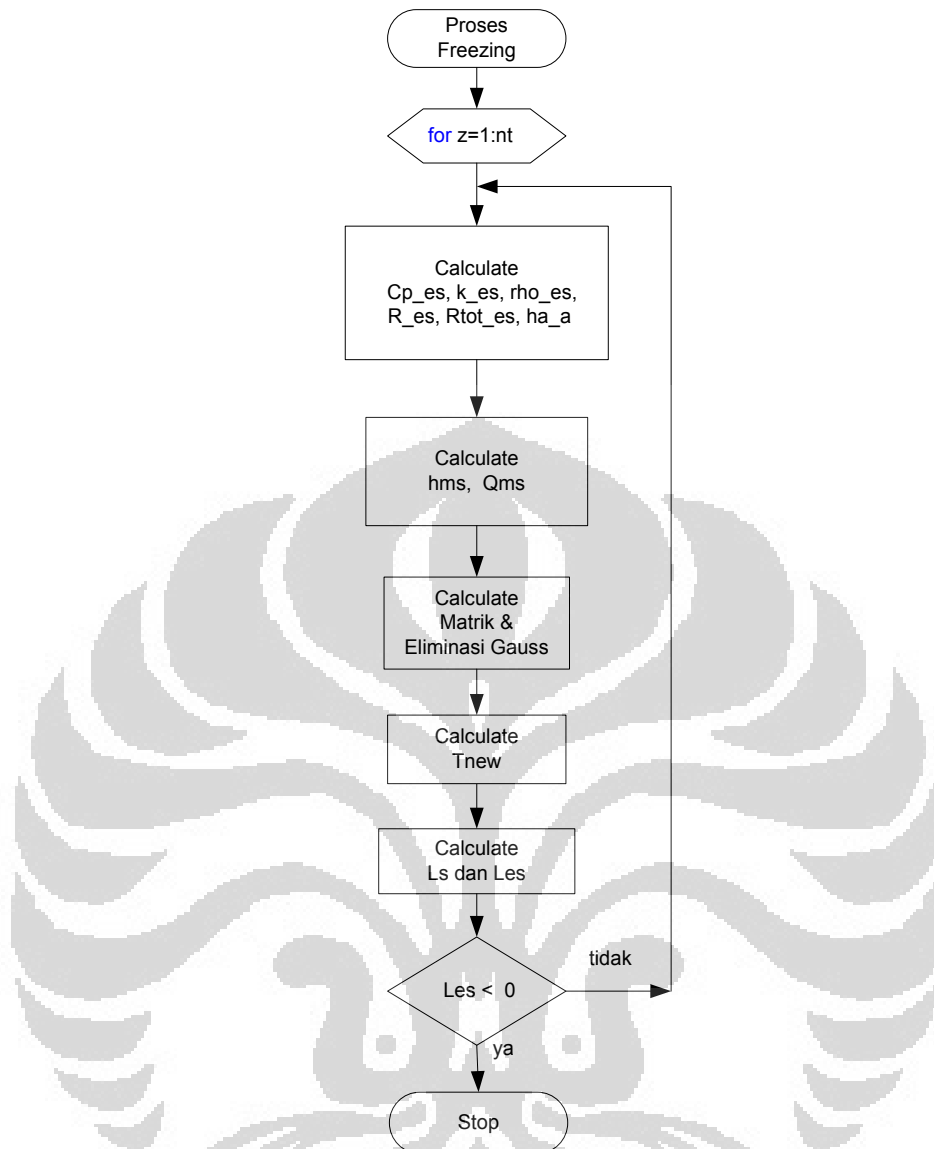
Berdasarkan dari model matematika yang telah di kembangkan diatas, kemudian di aplikasikan kedalam bentuk pemrograman dalam matlab. Program simulasi dapat di lihat pada halaman lampiran, sedangkan diagram alir dari program simulasi dapat di lihat pada gambar 3.7 s/d 3.9.



Gambar 3.7 Diagram alir program simulasi tahap pendinginan



Gambar 3.8 Diagram alir program simulasi tahap pendinginan



Gambar 3.9 Diagram alir program simulasi tahap sublimasi

### 3.3 Simulasi Proses Pengeringan Beku Vakum

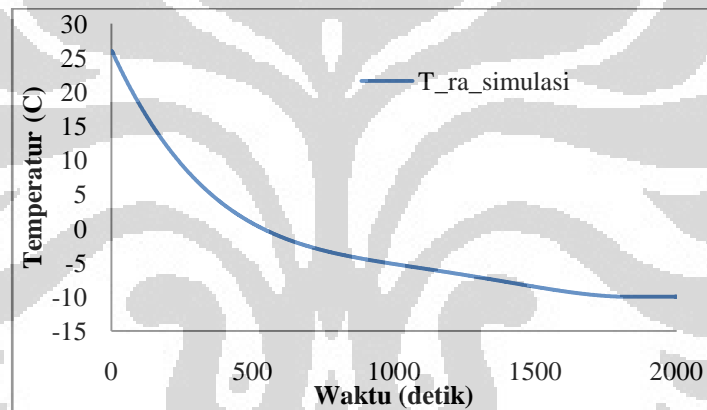
Dengan berdasarkan data awal dari pengujian yang pernah dilakukan di gunakan sebagai data referensi untuk mensimulasikan proses pengeringan beku vakum. Dimana data tersebut di gunakan sebagai acuan didalam menentukan variasi kondisi parameter simulasi. Data dan parameter simulasi meliputi:

- Tekanan awal ruang pengering 101.132 kPa
- Temperatur awal ruang pengering : 26.3 °C, sedangkan selama proses pendinginan dan pembekuan temperatur mengikuti profil pada gambar 3.10.

- Kelembaban relatif awal ruang pengering 75%.
- Temperatur awal produk 25 °C.
- Dimensi produk  $t = 0.005$  m, diameter 0.1 m.

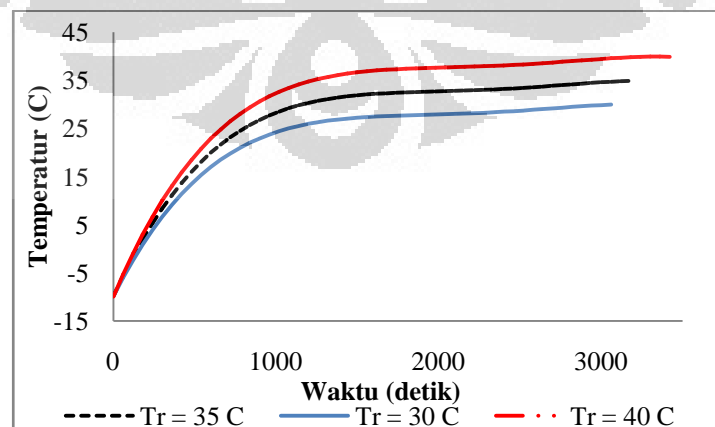
Kondisi operasi pengering beku vakum, pemanas di hidupkan bersamaan dengan pemvakuman. Sedangkan data yang akan di variasikan meliputi:

- Temperatur ruang pengering saat pemanas di hidupkan di variasikan 30°C, 35°C dan 40°C dengan mengikuti profil pada gambar 3.11.
- Ketebalan es saat mulai dilakukan pemvakuman yaitu 1 mm, 3 mm dan setelah semua air terbentuk es.
- Tekanan ruang saat pemvakuman di variasikan pada tekanan: 0.05 kPa, 0.1 kPa, 0.15 kPa, 0.2 kPa, 0.25 kPa dan 0.3 kPa.



(Kosasih et al, 2011) “telah diolah kembali”

Gambar 3.10 Profil temperatur ruang pengering saat awal proses



(Kosasih et al, 2011) “telah diolah kembali”

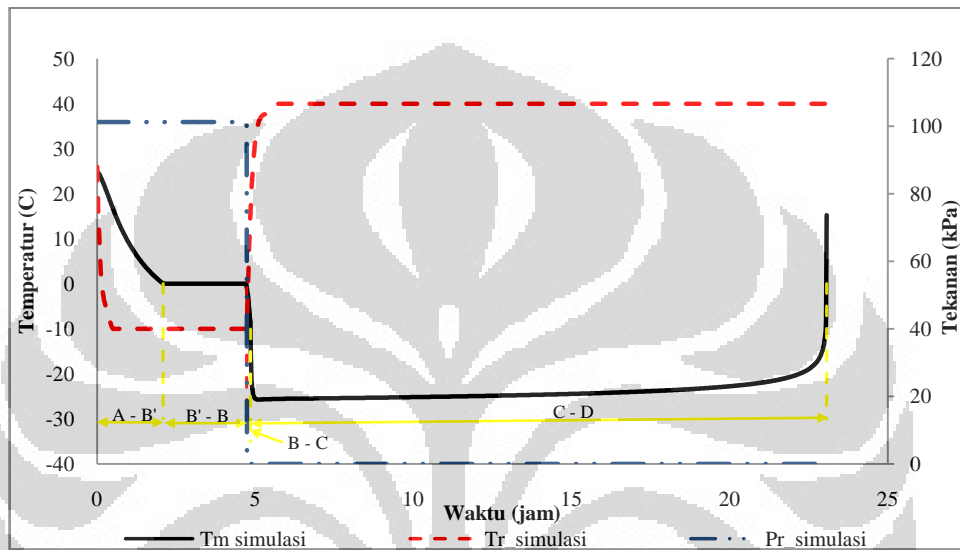
Gambar 3.11 Profil temperatur ruang pengering saat pemanasan



## BAB 4

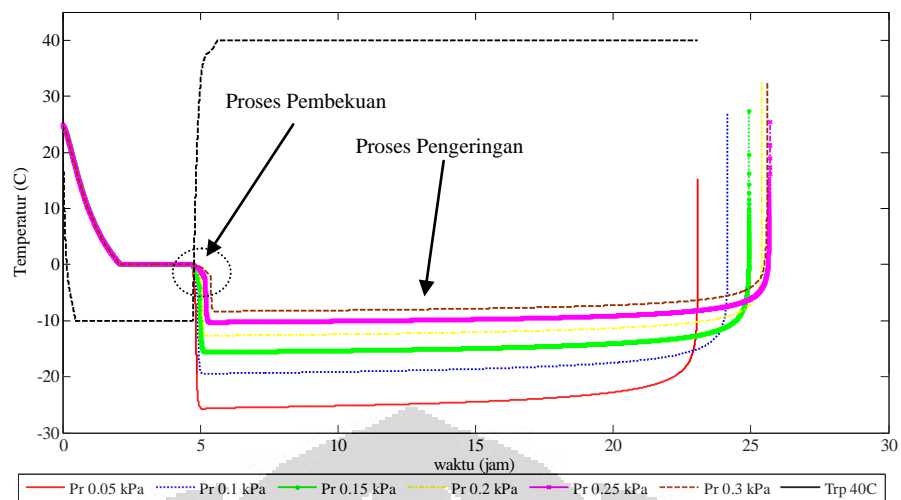
### PEMBAHASAN

#### 4.1 Profil temperatur produk terhadap waktu proses pengering beku



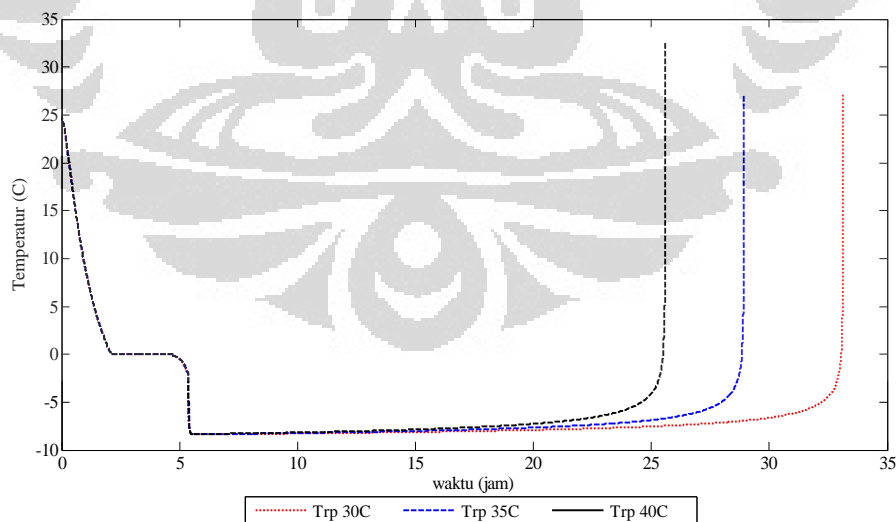
Gambar 4.1 Profil temperatur produk fungsi waktu pada tekanan ruang ( $Pr$  0.05 kPa), temperatur ruang saat pemanasan ( $Tr$  40 C) dengan ketebalan es ( $L_{es}$  1 mm) saat di lakukan pemvakuman dan temperatur ruang saat pemanasan ( $Trp$  = 40 C)

Pada gambar 4.1 diperlihatkan profile temperatur produk ( $T_m$ ) hasil simulasi proses pengering beku vakum. Proses dari A ke B' merupakan proses penurunan temperatur pada material (*cooling*) dengan menggunakan sistem refrigerasi. Proses dari B' ke B yaitu proses pembekuan dengan menggunakan sistem refrigerasi sampai ketebalan es 1mm, kemudian dilanjutkan dengan pembekuan vakum (B – C) menggunakan pompa vakum sedangkan sistem refrigerasi di gunakan untuk mengkondensasi uap air di coldtrap. Pada tahap ini temperatur ruang pengering ( $Tr$ ) dinaikkan menjadi 40°C dengan memanfaatkan panas buang kondenser. Proses dari C ke D merupakan proses sublimasi dengan tekanan ruang ( $Pr$ ) 0.05 kPa dan temperatur ruang 40°C.



Gambar 4.2 Profil temperatur produk fungsi waktu pada variasi tekanan ruang dengan ketebalan es 1 mm saat di lakukan pemvakuman dan temperatur ruang saat pemanasan ( Trp = 40 C)

Pada gambar 4.2 di perhatikan profil penurunan suhu permukaan produk dengan variasi tekanan ruang pengering terhadap waktu. Pada awal proses terjadi penurunan temperatur produk dari 25°C menjadi 0°C kemudian produk mulai membeku sampai ketebalan es 1 mm, tekanan ruang di turunkan dengan variasi tekanan yang berbeda (0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 dan 0.3 kPa) terlihat bahwa semakin kecil tekanan ruang semakin besar perbedaan gradien penurunan temperatur produk.

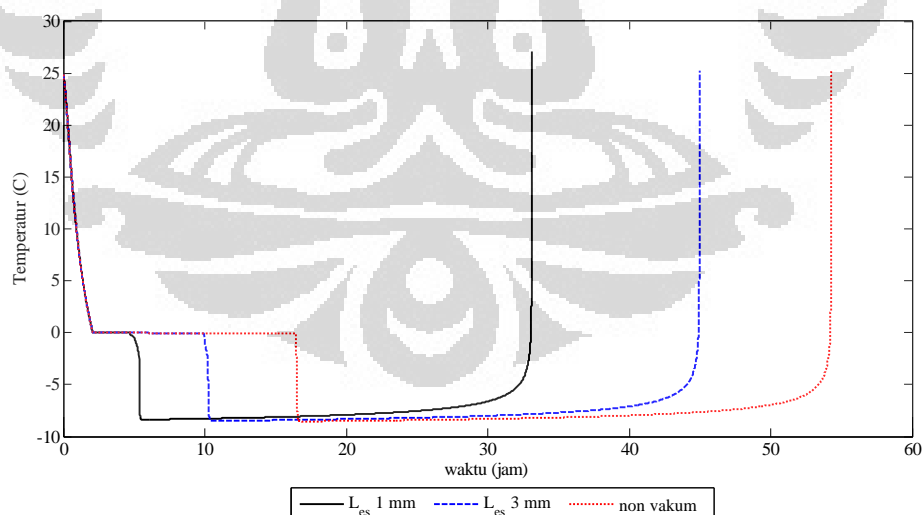


Gambar 4.3 Profil temperatur produk fungsi waktu pada variasi temperatur ruang saat pemanasan dengan tekanan ruang 0.5 kPa dan ketebalan es 1 mm saat di lakukan pemvakuman

Pada gambar 4.3 di perhatikan profil penurunan suhu permukaan produk dengan variasi temperatur ruang pengering saat pemanasan terhadap waktu. Pada

awal proses terjadi penurunan temperatur produk dari  $25^{\circ}\text{C}$  menjadi  $0^{\circ}\text{C}$  kemudian produk mulai membeku sampai ketebalan es 1 mm dan tekanan ruang di turunkan menjadi 0.005 kPa. Temperatur permukaan produk untuk variasi temperatur ruang pengering pada proses pembekuan bernilai hampir sama, hal ini disebabkan besarnya panas sensibel jauh lebih kecil di dibandingkan panas laten pembekuan sehingga panas sensibel dari ruang pengering tidak terlalu berpengaruh terhadap kenaikan temperatur permukaan produk. Sedangkan pada proses pengeringan/ sublimasi terlihat bahwa semakin tinggi temperatur ruang saat pemanasan semakin tinggi temperatur permukaan produk. Hal ini di sebabkan pada proses pengeringan tidak terdapat proses pembekuan, sehingga panas sensibel dari ruang pengering di gunakan untuk menaikkan temperatur permukaan produk.

Profile temperatur pada gambar 4.2 dan 4.3 telah sesuai dengan teori dan studi literatur. Dimana temperatur permukaan produk di pengaruhi oleh temperatur media pemanas (temperatur ruang) dan tekanan ruang pengering (S. Zhai et al, 2005; Hottot et al, 2007). Semakin tinggi temperatur ruang semakin tinggi temperatur permukaan produk, semakin rendah tekanan ruang pengering semakin rendah temperatur permukaan produk.

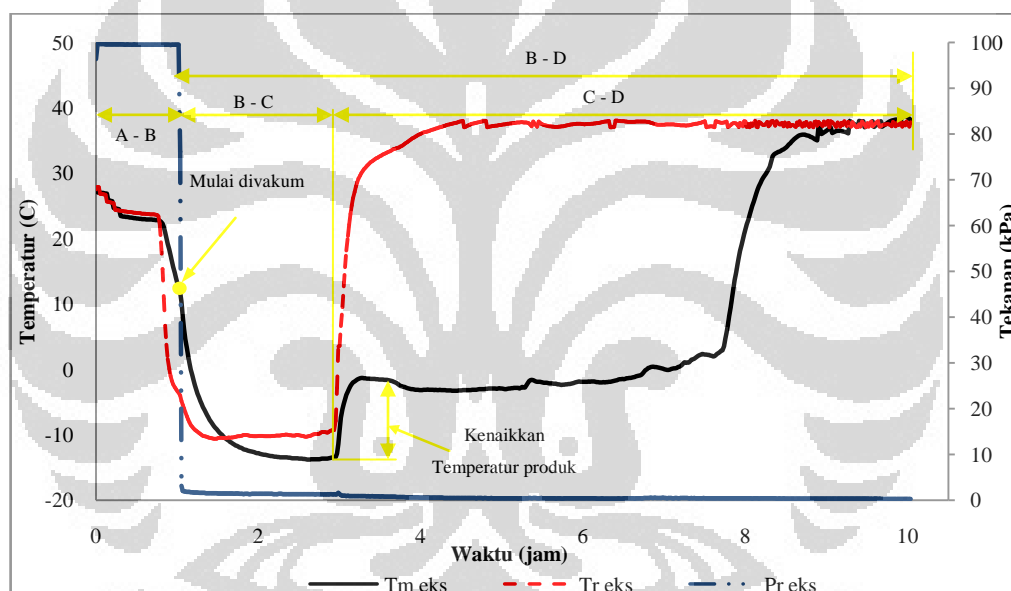


Gambar 4.4 Profil temperatur produk fungsi waktu pada variasi ketebalan es saat di lakukan pemvakuman dengan tekanan ruang 0.5 kPa dan temperatur ruang saat pemanasan ( $T_{rp} = 40^{\circ}\text{C}$ )

Pada gambar 4.4 di perhatikan profil penurunan suhu permukaan produk dengan variasi saat di lakukan pemvakuman. Pada awal proses terjadi penurunan

temperatur produk dari  $25^{\circ}\text{C}$  menjadi  $0^{\circ}\text{C}$  kemudian produk mulai membeku sampai ketebalan es 1 mm, 3 mm dan semua produk sudah membeku, tekanan ruang di turunkan menjadi 0.005 kPa. Temperatur permukaan saat semua produk telah membeku untuk perbedaan saat pemvakuman yaitu pada tebal 1 mm adalah  $-8.4^{\circ}\text{C}$ , tebal es 3 mm adalah  $-9.1^{\circ}\text{C}$  dan tanpa vakum adalah  $-0.2^{\circ}\text{C}$ , sedangkan pada saat awal pengeringan/ sublimasi temperatur permukaan produk menjadi  $-25.7^{\circ}\text{C}$  untuk tebal 1 mm,  $-26^{\circ}\text{C}$  untuk 3 mm dan  $-26.2^{\circ}\text{C}$  untuk tanpa pembekuan vakum.

#### 4.2 Perbandingan antara hasil pengujian dengan simulasi

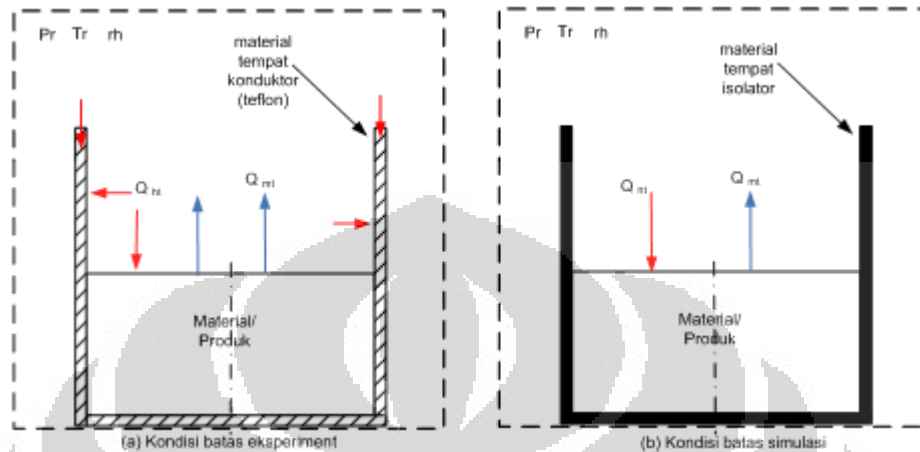


Gambar 4.5 Profile temperatur terhadap waktu berdasarkan hasil pengujian

Pada gambar 4.5 diperlihatkan profile temperatur produk ( $T_m$ ) yang berupa ubur-ubur hasil dari pengujian pada proses pengering beku vakum. Proses dari A ke B merupakan proses penurunan temperatur pada material (*cooling*) dengan menggunakan sistem refrigerasi. Kemudian di lanjutkan dengan proses dari B ke D yaitu melakukan pemvakuman pada saat temperatur material sebesar  $11.8^{\circ}\text{C}$  (produk belum membeku). Dalam tahap ini terjadi evaporasi sampai produk menjadi beku, setelah produk beku baru terjadi proses sublimasi tanpa pemanasan (B – C). Pada proses ini sistem yang di gunakan adalah pompa vakum, sedangkan sistem refrigerasi di gunakan untuk mengkondensasi uap air di coldtrap. Pada

Universitas Indonesia

proses dari C ke D terjadi proses sublimasi dengan tekanan ruang ( $P_r \pm 0.35$  kPa) dan temperatur ruang ( $T_r \pm 37^\circ\text{C}$  dengan memanfaatkan panas buang kondenser sebagai media pemanas).



Gambar 4.6 Perbedaan kondisi batas pengujian dengan simulasi

Perbedaan antara hasil simulasi dengan hasil pengujian:

- Kondisi batas

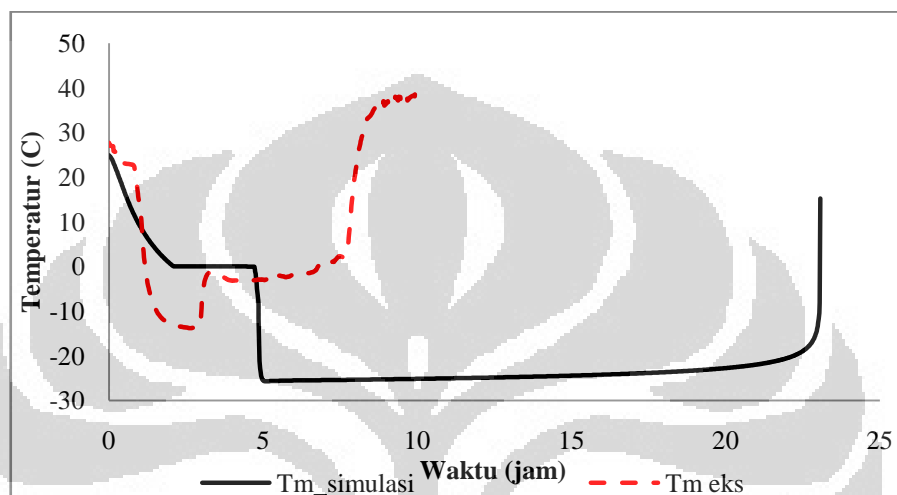
Pada pengujian tempat produk yang akan dikeringkan merupakan konduktor sehingga menyebabkan terjadinya perpindahan panas dari tempat produk ke produk. Hal ini di perlihatkan pada gambar 4.5 dimana pada saat sublimasi tanpa pemanasan temperatur material  $\pm -10$  s/d  $-13^\circ\text{C}$  selama  $\pm 1.5$  jam sedangkan dengan menaikkan temperatur ruang menjadi  $37^\circ\text{C}$  temperatur material naik menjadi  $\pm -3^\circ\text{C}$  dengan sangat cepat. Sedangkan pada simulasi tempat produk di asumsikan terisolasi sempurna (gambar 4.6).

- Saat dilakukan pemvakuman

Pada pengujian pemvakuman dilakukan saat proses penurunan temperatur produk/bahan (belum terbentuk lapisan es di permukaan), sehingga akan terjadi evaporasi dari air pada produk. Evaporasi akan menyebabkan berkurangnya kandungan air pada produk. Sedangkan pada simulasi pemvakuman dilakukan pada saat produk sudah terbentuk lapisan es. Sehingga berkurangnya massa produk di akibatkan oleh proses sublimasi.

- Saat memberikan pemanas

Pada pengujian pemanas diberikan pada saat proses sublimasi sedang berjalan diperlihatkan pada gambar 4.5. Sedangkan pada simulasi pemanas diberikan bersamaan dengan pemvakuman.

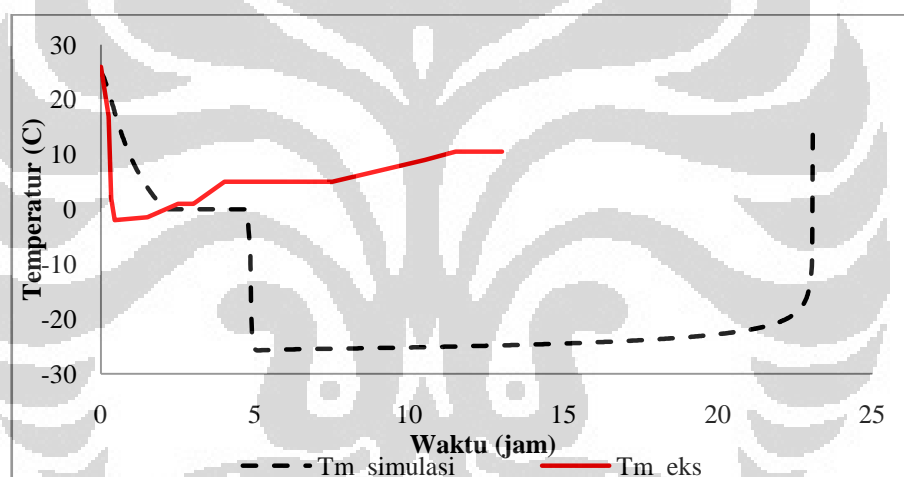


Gambar 4.7 Perbandingan hasil pengujian dengan simulasi

Pada gambar 4.7 di perlihatkan perbandingan hasil pengujian dengan simulasi. Waktu proses pendinginan sampai  $0^{\circ}\text{C}$  pada pengujian selama  $\pm 45$  menit, sedangkan pada simulasi selama  $\pm 2$  jam. Waktu proses pendinginan pada pengujian lebih cepat dibandingkan dengan simulasi dikarenakan pada pengujian perpindahan panas terjadi pada permukaan produk/ bahan (udara ke produk), dari sisi-sisi produk (dinding material tempat produk ke produk), dari bagian bawah produk (material tempat produk ke produk), dan perpindahan massa akibat adanya pemvakuman (evaporasi). Sedangkan pada simulasi perpindahan panas hanya terjadi pada permukaan produk.

Waktu proses pembekuan sampai semua produk terbentuk es, pada pengujian dari data tidak dapat diamati waktu pembekuan vakumnya, sedangkan pada simulasi waktu pembekuan selama 2.75 jam dengan rincian 2.6 jam untuk pembekuan lapisan produk setebal 1mm dengan sistem refrigerasi (tanpa pemvakuman) dan  $\pm 7$  menit untuk pembekuan vakum dengan ketebalan es 3.5 mm.

Waktu proses sublimasi pada pengujian selama 8.9 jam. Sedangkan pada simulasi waktu sublimasi selama  $\pm 18,2$  jam. Waktu proses sublimasi yang berbeda di pengaruhi oleh massa air pada produk, temperatur permukaan produk dan tekanan produk yang berbeda. Pada pengujian massa produk sudah berkurang akibat evaporasi (saat awal proses karena adanya kelembaban udara yang masih kering dan perbedaan konsentrasi akibat pemvakuman), sedangkan pada simulasi pengurangan massa produk pada awal proses hanya disebabkan kelembaban (rh) yang nilainya sangat kecil  $4.847E-06$  kg (massa keseluruhan 0.0393 kg). Temperatur permukaan produk pada pengujian lebih tinggi di dibandingkan dengan simulasi hal ini dipengaruhi oleh tekanan ruang yang lebih tinggi dan adanya konduksi dari dinding tempat produk (gambar 4.5).

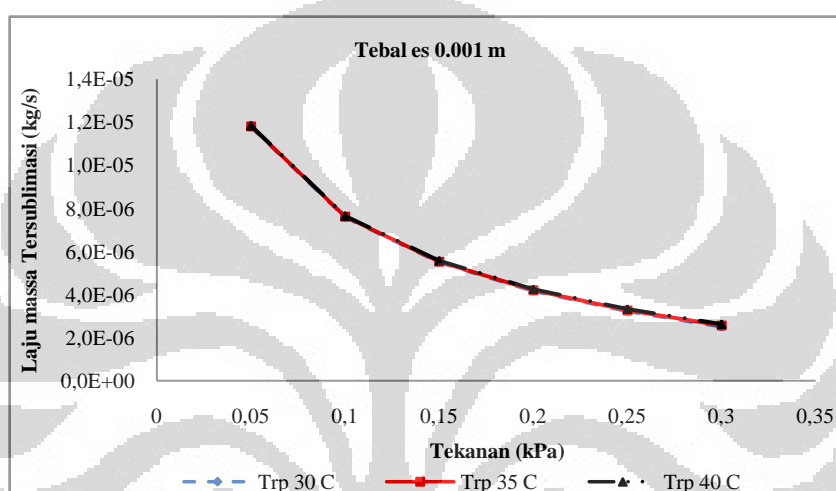


Gambar 4.8 Perbandingan hasil pengujian aloe vera (Belyamin, 2006) dengan simulasi

Pada gambar 4.8 di perhatikan hasil pengujian aloe vera (Belyamin et.al, 2006) dimana pada proses pengeringan ini pemvakuman dilakukan pada awal proses, sehingga proses penurunan temperatur dan pembekuan produk merupakan hasil dari evaporasi. Sedangkan pada saat pengeringan/ sublimasi tanpa adanya penambahan pemanas. Waktu proses pengering beku vakum pada pengujian selama 13 jam, sedangkan simulasi selama 23 jam.

### 4.3 Pengaruh variasi parameter kondisi operasi terhadap waktu pembekuan

Pada proses pembekuan temperatur ruang di kondisikan dengan memberikan pemanasan, sehingga pada proses ini keseimbangan energi yang mempengaruhi proses berupa energi perpindahan massa sublimasi, energi pembentukan lapisan es, energi perpindahan panas dari ruang ke produk dan energi penurunan temperatur produk.



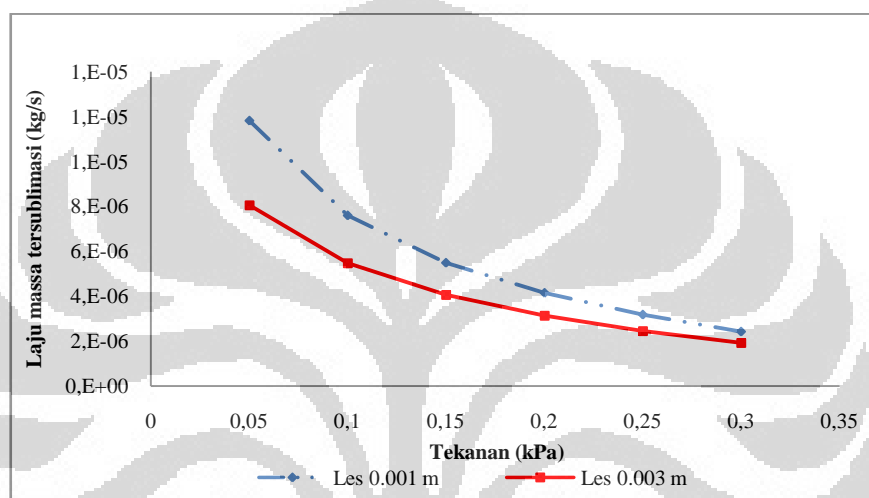
Gambar 4.9 Laju rata-rata massa tersublimasi selama proses pembekuan fungsi tekanan ruang pada ketebalan es 1 mm saat di lakukan pemvakuman dan temperatur ruang saat pemanasan yang berbeda ( Trp = 30, 35 dan 40 °C)

Pada gambar 4.9 diperlihatkan besarnya massa yang tersublimasi dengan variasi tekanan ruang, dimana besarnya laju massa tersublimasi semakin kecil dengan naiknya tekanan ruang. Perubahan tekanan ruang akan mempengaruhi nilai konsentrasi uap air di ruang pengering, semakin besar tekanan ruang akan semakin besar konsentrasi uap airnya dan akan memperkecil besarnya gradien konsentrasi antara ruang pengering dengan permukaan produk. Perubahan temperatur ruang tidak terlalu berpengaruh terhadap laju sublimasi. Besarnya konsentrasi di permukaan produk tergantung dari temperatur permukaan, semakin besar temperatur permukaan produk semakin besar pula konsentrasi uap air dari produk. Sedangkan temperatur permukaan produk untuk variasi temperatur ruang pengering pada proses pembekuan bernilai hampir sama di perhatikan pada gambar 4.3. Hal ini disebabkan karena pada proses pembekuan vakum perubahan



kalor sensibel mempunyai nilai yang sangat kecil dibandingkan dengan kalor laten pembekuan.

Nilai Laju massa tersublimasi pada tekanan 0.05 kPa dengan Trp 30°C adalah 1.179E-05 kg/s, untuk Trp 35°C adalah 1.183E-05 kg/s, sedangkan untuk Trp 40°C adalah 1.184E-05 kg/s. Laju massa tersublimasi pada tekanan 0.3 kPa dengan Trp 30°C adalah 2.516E-06 kg/s, untuk Trp 35°C adalah 2.577E-06 kg/s, sedangkan untuk Trp 40°C adalah 2.641E-06 kg/s.

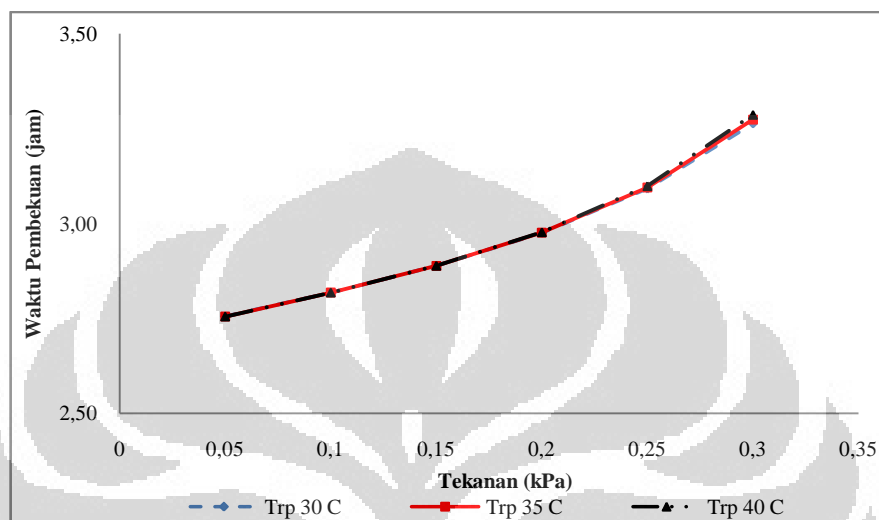


Gambar 4.10 Laju massa tersublimasi selama proses pembekuan fungsi tekanan ruang pada temperatur ruang saat pemanasan (Trp = 30 C) dan ketebalan es saat di lakukan pemvakuman yang berbeda (1 mm, 3 mm)

Pada gambar 4.10 diperlihatkan laju massa tersublimasi dengan variasi tekanan ruang dan ketebalan lapisan es saat di lakukan pemvakuman, dimana laju massa tersublimasi semakin besar dengan semakin rendahnya tekanan ruang dan dengan ketebalan es semakin tipis saat dilakukan pemvakuman . Besarnya laju massa tersublimasi pada temperatur ruang 30°C dengan tekanan ruang 0.05 kPa untuk tebal es 1 mm adalah 1.182E-05 kg/s sedangkan untuk tebal es 3 mm adalah 8.061E-06 kg/s. Besarnya laju massa tersublimasi pada temperatur ruang 30°C dengan tekanan ruang 0.3 kPa untuk tebal es 1 mm adalah 2.426E-06 kg/s sedangkan untuk tebal es 3 mm adalah 1.919E-06 kg/s

Pada gambar 4.11 diperlihatkan waktu yang dibutuhkan selama pembekuan dengan variasi tekanan ruang dan temperatur ruang, dimana waktu yang di butuhkan untuk pembekuan semakin cepat dengan semakin rendah tekanan ruang.

Sedangkan perubahan temperatur ruang tidak terlalu mempengaruhi waktu pembekuan, hal ini disebabkan karena pada proses pembekuan vakum perubahan kalor sensibel mempunyai nilai yang sangat kecil dibandingkan dengan kalor laten pembekuan.

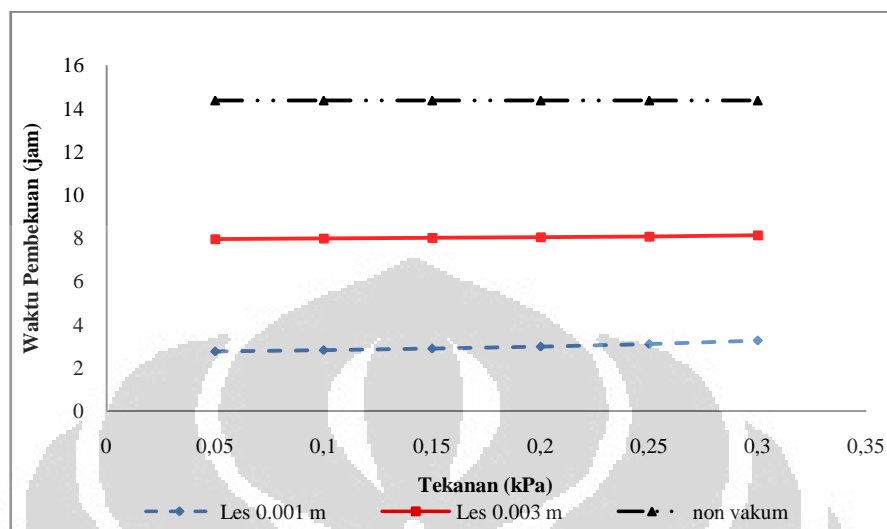


Gambar 4.11 Waktu yang di butuhkan selama proses pembekuan fungsi tekanan ruang pada ketebalan es 1 mm saat di lakukan pemvakuman dan temperatur ruang saat pemanasan yang berbeda (  $T_r = 30, 35$  dan  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Nilai waktu pembekuan pada ketebalan es 1 mm saat pemvakuman dengan tekanan ruang 0.05 kPa dengan  $T_r 30^{\circ}\text{C}$  adalah 2.76 jam, untuk  $T_r 35^{\circ}\text{C}$  adalah 2.75 jam, sedangkan untuk  $T_r 40^{\circ}\text{C}$  adalah 2.75 jam. Waktu pembekuan pada ketebalan es 1 mm saat pemvakuman dengan tekanan ruang 0.3 kPa dengan  $T_r 30^{\circ}\text{C}$  adalah 3.26 jam, untuk  $T_r 35^{\circ}\text{C}$  adalah 3.27 jam, sedangkan untuk  $T_r 40^{\circ}\text{C}$  adalah 3.29 jam.

Pada gambar 4.12 diperlihatkan waktu yang dibutuhkan selama pembekuan dengan variasi tekanan ruang dan ketebalan lapisan es saat di lakukan pemvakuman, dimana waktu pembekuan semakin cepat dengan mempercepat saat pemvakuman dan perubahan tekanan ruang pengaruhnya tidak terlalu besar di bandingkan perubahan ketebalan es saat dilakukan pemvakuman. Dengan semakin cepat saat pemvakuman semakin cepat pula waktu yang di butuhkan untuk pembekuan, hal ini disebabkan pada pembekuan vakum, pembekuan terjadi karena adanya sublimasi. Dimana besarnya panas laten sublimasi sekitar 8 kali

panas laten pembekuan. sehingga kecepatan pembentukan es lebih cepat dari pada kecepatan pengurangan ketebalan es akibat sublimasi.



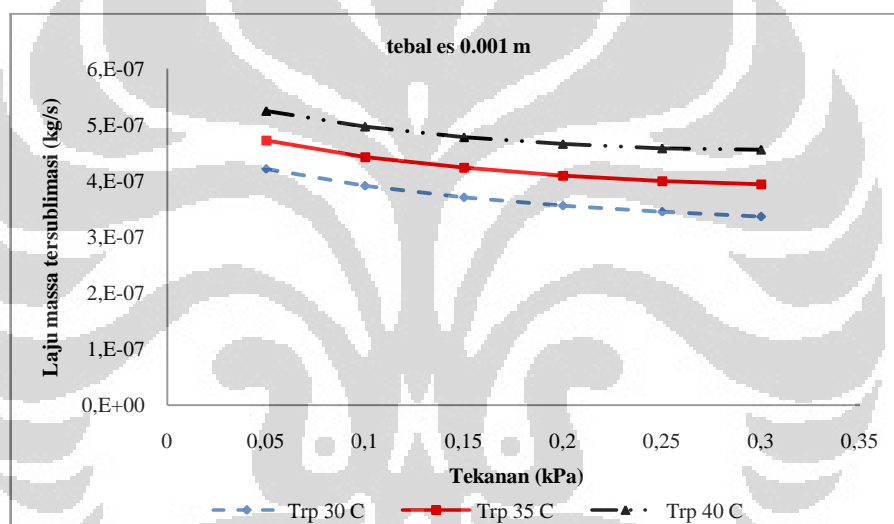
Gambar 4.12 Waktu yang di butuhkan selama proses pembekuan fungsi tekanan ruang pada temperatur ruang saat pemanasan ( $T_{rp} = 30^{\circ}\text{C}$ ) dan ketebalan es saat di lakukan pemvakuman yang berbeda (1 mm, 3 mm dan non vakum)

Waktu pembekuan pada temperatur ruang  $30^{\circ}\text{C}$  dengan tekanan ruang 0.05 kPa untuk tebal es 1 mm adalah 2.76 jam, untuk tebal es 3 mm adalah 7.96 jam, sedangkan untuk pembekuan tanpa pemvakuman adalah 14.38 jam. Waktu pembekuan pada temperatur ruang  $30^{\circ}\text{C}$  dengan tekanan ruang 0.3 kPa untuk tebal es 1 mm adalah 3.26 jam, untuk tebal es 3 mm adalah 8.14 jam dan untuk pembekuan tanpa vakum adalah 14.38 jam. Dengan mempercepat saat dilakukan pemvakuman yaitu dari pemvakuman dilakukan pada saat semua produk telah menjadi es menjadi pemvakuman dilakukan saat ketebalan es 1 mm pada temperatur ruang  $30^{\circ}\text{C}$  dan tekanan ruang 0.3 kPa akan mengurangi waktu pembekuan sebesar 11.12 jam. Sedangkan menurunkan tekanan ruang pengering dari 0.3 kPa menjadi 0.05 kPa pada temperatur ruang  $30^{\circ}\text{C}$  dan ketebalan es 1 mm akan mengurangi waktu pembekuan sebesar 0.51 jam.

Berdasarkan gambar 4.9 s/d 4.12 dapat di simpulkan bahwa besarnya laju massa tersublimasi pada saat pembekuan vakum akan semakin besar dengan mempercepat saat pembekuan dan semakin rendah tekanan ruang pengering. Semakin besar laju massa yang tersublimasi semakin cepat terbentuknya lapisan es, sehingga akan mempercepat pembekuan. (Y. C. Fey and M. A. Boles, 1987).

#### 4.4 Pengaruh variasi parameter kondisi operasi terhadap waktu proses pengeringan

Pada gambar 4.13 diperlihatkan besarnya massa yang tersublimasi dengan variasi tekanan ruang, dimana besarnya laju massa tersublimasi semakin kecil dengan naiknya tekanan ruang dan akan semakin besar dengan kenaikan temperatur ruang pengering. Kenaikkan temperatur ruang pengering akan menaikkan temperatur permukaan produk sehingga laju massa tersublimasi juga akan semakin besar.

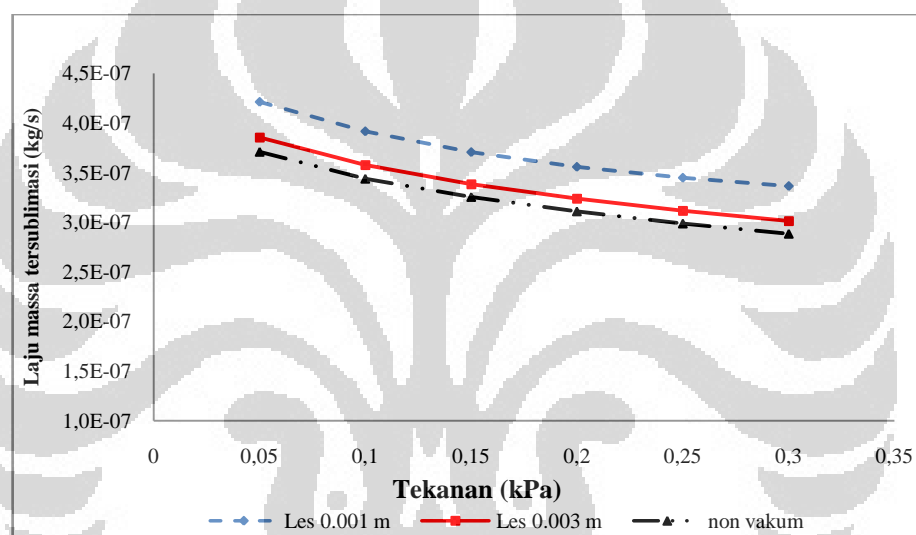


Gambar 4.13 Laju rata-rata massa tersublimasi selama proses pengeringan fungsi tekanan ruang pada ketebalan es 1 mm saat di lakukan pemvakuman dan temperatur ruang saat pemanasan yang berbeda ( Tr = 30, 35 dan 40 °C)

Nilai Laju massa tersublimasi pada ketebalan es 1 mm saat dilakukan pemvakuman dengan tekanan ruang 0.05 kPa dengan Trp 30°C adalah 4.214E-07 kg/s, untuk Trp 35°C adalah 4.720E-07 kg/s, sedangkan untuk Trp 40°C adalah 5.249E-07 kg/s. Laju massa tersublimasi pada ketebalan es 1 mm saat dilakukan pemvakuman dengan tekanan ruang 0.3 kPa dengan Trp 30°C adalah 3.363E-07 kg/s, untuk Trp 35°C adalah 3.941E-07 kg/s, sedangkan untuk Trp 40°C adalah 4.454E-07 kg/s.

Pada gambar 4.14 diperlihatkan laju massa tersublimasi dengan variasi tekanan ruang dan ketebalan lapisan es saat di lakukan pemvakuman. Dimana laju

massa tersublimasi semakin kecil dengan naiknya tekanan ruang sedangkan dengan mempercepat saat pemvakuman akan memperbesar laju massa tersublimasi. Pengaruh ketebalan es saat dilakukan pemvakuman terhadap laju massa tersublimasi pada proses pengeringan di karenakan pada saat pembekuan vakum sudah terjadi sublimasi, sehingga lapisan es pada proses pengeringan ketebalannya sudah berkurang. Di mana ketebalan es akan mempengaruhi perubahan temperatur permukaan produk, semakin tipis ketebalan es akan semakin tinggi temperatur permukaan produk (gambar 4.3) dan akan memperbesar laju massa tersublimasi.

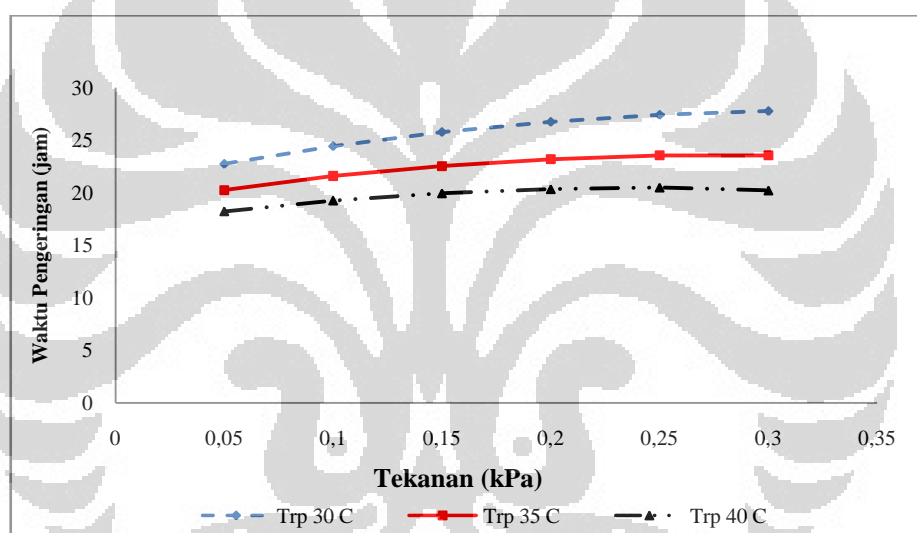


Gambar 4.14 Laju rata-rata massa tersublimasi selama proses pengeringan fungsi tekanan ruang pada temperatur ruang saat pemanasan ( $T_r = 40\text{ C}$ ) dan ketebalan es saat di lakukan pemvakuman yang berbeda (1 mm, 3 mm, dan non vakum)

Besarnya laju massa tersublimasi pada temperatur ruang  $30^\circ\text{C}$  dengan tekanan ruang 0.05 kPa untuk tebal es 1 mm adalah  $4.214\text{E}-07\text{ kg/s}$ , untuk tebal es 3 mm adalah  $3.856\text{E}-07\text{ kg/s}$ , dan untuk pembekuan tanpa pemvakuman adalah  $3.711\text{E}-07\text{ kg/s}$ . Besarnya laju massa tersublimasi pada temperatur ruang  $30^\circ\text{C}$  dengan tekanan ruang 0.3 kPa untuk tebal es 1 mm adalah  $3.3634\text{E}-07\text{ kg/s}$ , untuk tebal es 3 mm adalah  $3.012\text{E}-07\text{ kg/s}$  dan untuk pembekuan tanpa pemvakuman adalah  $2.884\text{E}-07\text{ kg/s}$ .

Pada gambar 4.15 diperlihatkan waktu yang dibutuhkan selama pembekuan dengan variasi tekanan ruang dan temperatur ruang, dimana waktu yang di butuhkan untuk pembekuan semakin cepat dengan semakin rendah tekanan ruang

dan semakin tinggi temperatur ruang pengering. Pada gambar 4.15 diperlihatkan bahwa kenaikan tekanan ruang pada ketebalan es 1 mm dan temperatur ruang 40°C tidak selalu menyebabkan kenaikan waktu pengeringan. Pada tekanan ruang 0.3 kPa waktu yang di butuhkan untuk proses pengeringan lebih cepat dibandingkan dengan tekanan ruang 0.25 kPa. Hal ini di akibatkan pada saat pembekuan telah terjadi sublimasi, sehingga pada proses pengeringan massanya akan berbeda. Massa es yang tersisa dari proses pembekuan untuk tekanan ruang 0.25 kPa adalah 0.0338 kg sedangkan untuk tekanan ruang 0.3 kPa adalah 0.0331 kg, sehingga dimungkinkan waktu yang dibutuhkan untuk pengeringan pada tekanan 0.3 kPa akan lebih cepat dibandingkan dengan 0.25 kPa.

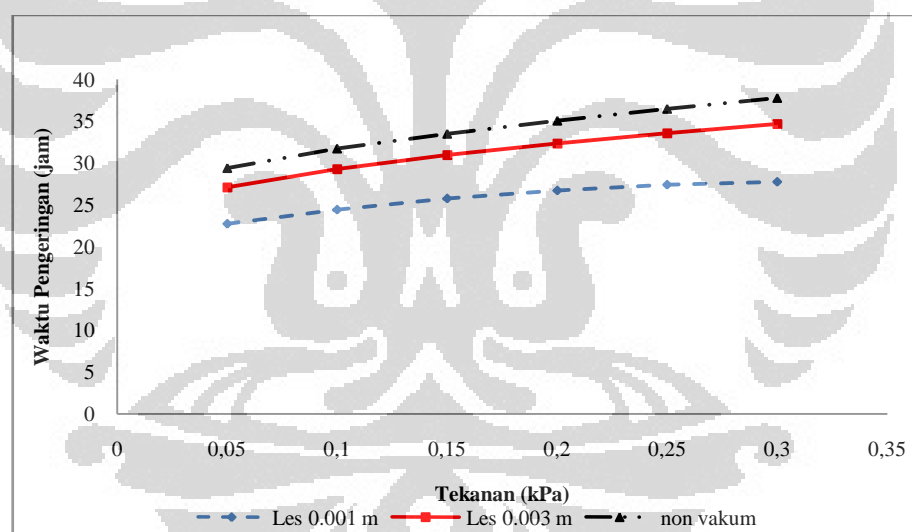


Gambar 4.15 Waktu yang di butuhkan selama proses pengeringan fungsi tekanan ruang pada ketebalan es 1 mm saat di lakukan pemvakuman dan temperatur ruang saat pemanasan yang berbeda ( Trp = 30, 35 dan 40 °C)

Nilai waktu pengeringan/ sublimasi pada ketebalan es 1 mm saat pemvakuman dengan tekanan ruang 0.05 kPa dengan Trp 30°C adalah 22.75 jam, untuk Trp 35°C adalah 20.25 jam, sedangkan untuk Trp 40°C adalah 18.22 jam. Waktu pengeringan/ sublimasi pada ketebalan es 0.001 saat pemvakuman dengan tekanan ruang 0.3 kPa dengan Trp 30°C adalah 27.77 jam, untuk Trp 35°C adalah 23.56 jam, sedangkan untuk Trp 40°C adalah 20.22 jam. Dengan menaikkan temperatur ruang pengering dari 30°C menjadi 40°C pada tekanan ruang 0.3 kPa dan ketebalan es 1 mm akan mengurangi waktu pengeringan/ sublimasi sebesar 7.56 jam. Sedangkan menurunkan tekanan ruang pengering dari 0.3 kPa menjadi

0.05 kPa pada temperatur ruang 40°C dan ketebalan es 1 mm saat dilakukan pemvakuman akan mengurangi waktu pengeringan/ sublimasi sebesar 1.99 jam.

Pada gambar 4.16 diperlihatkan waktu yang dibutuhkan selama pengeringan dengan variasi tekanan ruang dan ketebalan lapisan es saat di lakukan pemvakuman. Waktu pengeringan/ sublimasi semakin cepat dengan semakin rendah tekanan ruang. Sedangkan fenomena pada ketebalan es 1 mm sudah dijelaskan pada penjelasan gambar 4.10. Dengan semakin cepat saat pemvakuman semakin cepat pula waktu yang di butuhkan untuk pengeringan, hal ini disebabkan pada pembekuan vakum telah terjadi sublimasi, dengan mempercepat saat pembekuan vakum akan memperbesar jumlah massa yang tersublimasi. Pada temperatur ruang 30°C dan tekanan ruang 0.05 kPa dan ketebalan es saat dilakukan pemvakuman 1 mm massa yang tersisa adalah 0.0345 kg, untuk tebal 3 mm adalah 0.0377 kg sedangkan untuk non vakum massanya 0.0393 kg.



Gambar 4.16 Waktu yang di butuhkan selama proses pengeringan fungsi tekanan ruang pada temperatur ruang saat pemanasan ( $T_{rp} = 30^{\circ}\text{C}$ ) dan ketebalan es saat di lakukan pemvakuman yang berbeda (1 mm, 3 mm dan non vakum)

Waktu pengeringan/ sublimasi pada temperatur ruang 30°C dengan tekanan ruang 0.05 kPa untuk tebal es 1 mm adalah 22.75 jam, untuk tebal es 3 mm adalah 27.13 jam, sedangkan untuk pembekuan tanpa pemvakuman adalah 29.41 jam. Waktu pengeringan/ sublimasi pada temperatur ruang 30°C dengan tekanan ruang 0.3 kPa untuk tebal es 1 mm adalah 27.77 jam, untuk tebal es 3 mm adalah 34.71 jam dan untuk pembekuan tanpa vakum adalah 37.81 jam. Dengan mempercepat

saat dilakukan pemvakuman yaitu dari pemvakuman dilakukan pada saat semua produk telah menjadi es menjadi pemvakuman dilakukan saat ketebalan es 1 mm pada temperatur ruang 30°C dan tekanan ruang 0.3 kPa akan mengurangi waktu pengeringan/ sublimasi sebesar 10.04 jam. Sedangkan menurunkan tekanan ruang pengering dari 0.3 kPa menjadi 0.05 kPa pada temperatur ruang 30°C dan ketebalan es 1 mm akan mengurangi waktu pengeringan/ sublimasi sebesar 5.02 jam.

Berdasarkan gambar 4.13 s/d 4.16 dapat di simpulkan bahwa besarnya laju massa tersublimasi pada saat pengeringan akan semakin besar dengan semakin rendah tekanan ruang dan semakin tinggi temperatur ruang pengering. Semakin kecil tekanan ruang dan semakin tinggi temperatur ruang akan mempercepat waktu pengeringan. Dengan mempercepat saat pembekuan akan mengurangi besarnya massa air yang harus di keringkan, sehingga akan mempercepat waktu pengeringan/ sublimasi. Waktu pengeringan di pengaruhi oleh tekanan ruang, temperatur ruang dan besarnya massa air dari produk yang akan dikeringkan (E.A. Boss et al, 2004).

#### **4.5 Pengaruh variasi parameter kondisi operasi terhadap waktu total proses pengering beku vakum**

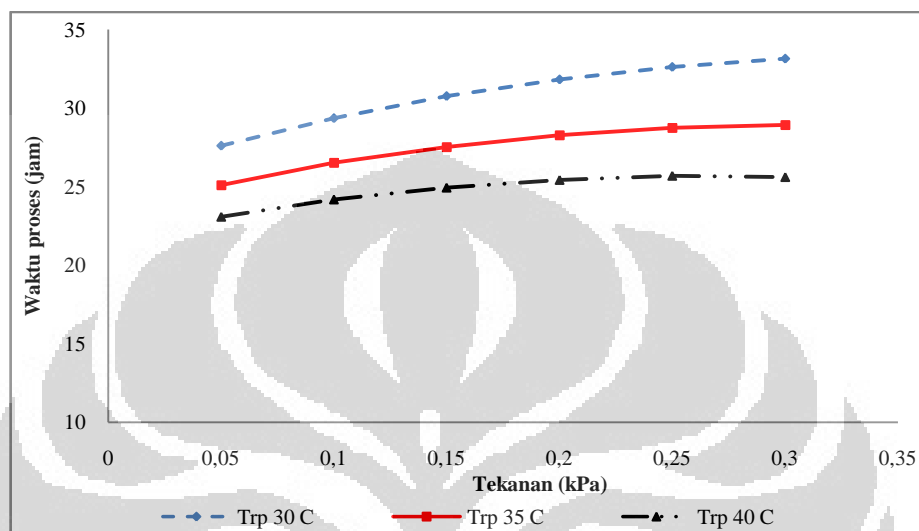
Pada proses pengering beku vakum, diawali dengan tahap pendinginan yaitu penurunan temperatur produk dari 25°C menjadi 0°C kemudian tahap pembekuan dan dilanjutkan dengan tahap sublimasi. Jadi waktu yang dibutuhkan selama proses pengering beku vakum merupakan penjumlahan dari waktu untuk tahap pendinginan, pembekuan dan pengeringan. Pada penelitian ini untuk tahap pendinginan untuk variasi kondisi operasi tidak mengalami perubahan atau proses pendinginan untuk semua variasi kondisi operasi adalah sama, sehingga waktu yang di butuhkan untuk tahap pendinginan adalah sama yaitu 2.09 jam.

Pada gambar 4.17 diperlihatkan waktu yang dibutuhkan selama proses pengering beku vakum dengan variasi tekanan ruang dan temperatur ruang, dimana waktu yang di butuhkan untuk proses pengering beku vakum semakin cepat dengan semakin rendah tekanan ruang dan semakin tinggi temperatur ruang pengering. Waktu yang dibutuhkan untuk proses pengering beku vakum pada

**Universitas Indonesia**



ketebalan es 1 mm saat dilakukan pemvakuman lebih di dominasi oleh waktu pengeringan, dimana waktu untuk tahap pengeringan sebesar 18.22 s/d 27.77 jam (gambar 4.15), waktu pembekuan sebesar 2.76 s/d 3.29 jam (gambar 4.11) sedangkan untuk tahap pendinginan 2.09 jam.

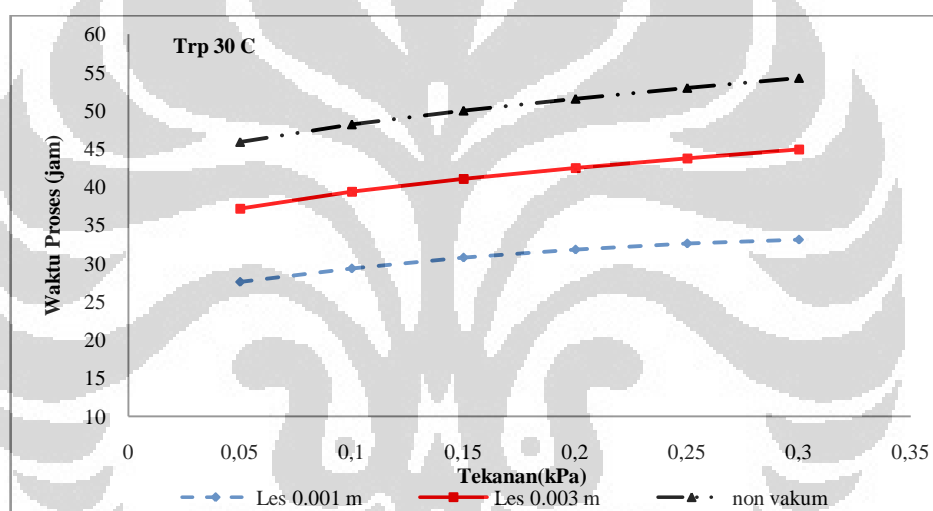


Gambar 4.17 Waktu total yang di butuhkan selama proses pengeringan fungsi tekanan ruang pada ketebalan es 1 mm saat di lakukan pemvakuman dan temperatur ruang saat pemanasan yang berbeda ( Trp = 30, 35 dan 40 °C)

Nilai waktu pengering beku vakum pada ketebalan es 1 mm saat pemvakuman dengan tekanan ruang 0.05 kPa dengan Trp 30°C adalah 27.60 jam, untuk Trp 35°C adalah 25.09 jam, sedangkan untuk Trp 40°C adalah 23.07 jam. Waktu pengeringan/ sublimasi pada ketebalan es 0.001 saat pemvakuman dengan tekanan ruang 0.3 kPa dengan Trp 30°C adalah 33.13 jam, untuk Trp 35°C adalah 28.93 jam, sedangkan untuk Trp 40°C adalah 25.59 jam. Dengan menaikkan temperatur ruang pengering dari 30°C menjadi 40°C pada tekanan ruang 0.3 kPa dan ketebalan es 1 mm akan mengurangi waktu proses pengering beku vakum sebesar 7.53 jam. Sedangkan menurunkan tekanan ruang pengering dari 0.3 kPa menjadi 0.05 kPa pada temperatur ruang 40°C dan ketebalan es 1 mm saat dilakukan pemvakuman akan mengurangi waktu proses pengering beku vakum sebesar 2.52 jam.

Pada gambar 4.18 diperlihatkan waktu yang dibutuhkan selama proses pengering beku vakum dengan variasi tekanan ruang dan ketebalan es saat dilakukan pemvakuman, dimana waktu yang di butuhkan untuk proses pengering

beku vakum semakin cepat dengan semakin rendah tekanan ruang dan semakin cepat saat pemvakuman. Waktu yang dibutuhkan untuk proses pengering beku vakum pada ketebalan es 1 mm saat dilakukan pemvakuman lebih di dominasi oleh waktu pengeringan dan atau pembekuan, dimana waktu untuk tahap pengeringan sebesar 18.22 s/d 20.22 jam, waktu pembekuan sebesar 2.75 s/d 3.29 jam (gambar 4.12) sedangkan untuk tahap pendinginan 2.09 jam. Pada proses pemvakuman dilakukan setelah semua produk menjadi es, waktu proses pengering beku di dominasi waktu pembekuan dan pengeringan. Waktu untuk tahap pengeringan sebesar 23.66 s/d 28.43 jam (gambar 4.16), waktu pembekuan sebesar 14.38 jam (gambar 4.12) sedangkan untuk tahap pendinginan 2.09 jam.



Gambar 4.18 Waktu total yang di butuhkan selama proses pengering beku vakum fungsi tekanan ruang pada temperatur ruang pemanas Trp 30 °C dan ketebalan es produk saat dilakukan pemvakuman yang berbeda ( tebal es = 0.001, 0.003 dan non vakum)

Nilai waktu pengering beku vakum pada temperatur ruang 30°C dengan tekanan ruang 0.05 kPa dengan ketebalan es 1 mm saat dilakukan pemvakuman adalah 27.60 jam, untuk tebal 3 mm adalah 37.18 jam, sedangkan untuk non vakum adalah 45.88 jam. Waktu pengering beku vakum pada temperatur ruang 30°C dengan tekanan ruang 0.3 kPa dengan ketebalan es 1 mm saat dilakukan pemvakuman adalah 33.13 jam, untuk tebal es 3 mm adalah 44.94 jam, sedangkan untuk pembekuan non vakum adalah 54.29 jam. Dengan mempercepat saat pemvakuman dari semua produk sudah terbentuk es menjadi saat ketebalan es 1 mm pada tekanan ruang 0.3 kPa dan temperatur ruang 30°C akan mengurangi

waktu proses pengering beku vakum sebesar 21.16 jam. Sedangkan menurunkan tekanan ruang pengering dari 0.3 kPa menjadi 0.05 kPa pada temperatur ruang 30°C dan ketebalan es 1 mm saat dilakukan pemvakuman akan mengurangi waktu proses pengering beku vakum sebesar 5.53 jam.

Berdasarkan gambar 4.17 dan 4.18 dapat di simpulkan bahwa pada proses tanpa adanya pembekuan vakum, nilai waktu proses pengering beku vakum dipengaruhi oleh tekanan dan temperatur ruang (Daoussi et al, 2009). Semakin besar temperatur ruang dan semakin kecil tekanan ruang akan mempercepat waktu proses pengering beku vakum. Pada proses dengan adanya pembekuan vakum, nilai waktu proses pengering beku vakum dipengaruhi oleh tekanan, temperatur ruang dan ketebalan es saat dilakukan pemvakuman. Semakin kecil tekanan ruang dan semakin cepat saat pemvakuman akan mempercepat waktu proses pembekuan. Dengan semakin besar temperatur ruang, semakin kecil tekanan ruang dan semakin cepat saat pemvakuman akan memperbesar massa air yang tersublimasi pada saat pembekuan. Dengan massa air yang tersisa semakin kecil, semakin kecil tekanan ruang dan semakin besar temperatur ruang akan mempercepat proses pengeringan (E.A. Boss et al, 2004). Sehingga dengan mempercepat saat pemvakuman, semakin rendah tekanan ruang dan semakin tinggi temperatur ruang akan mempercepat proses pengering beku vakum.

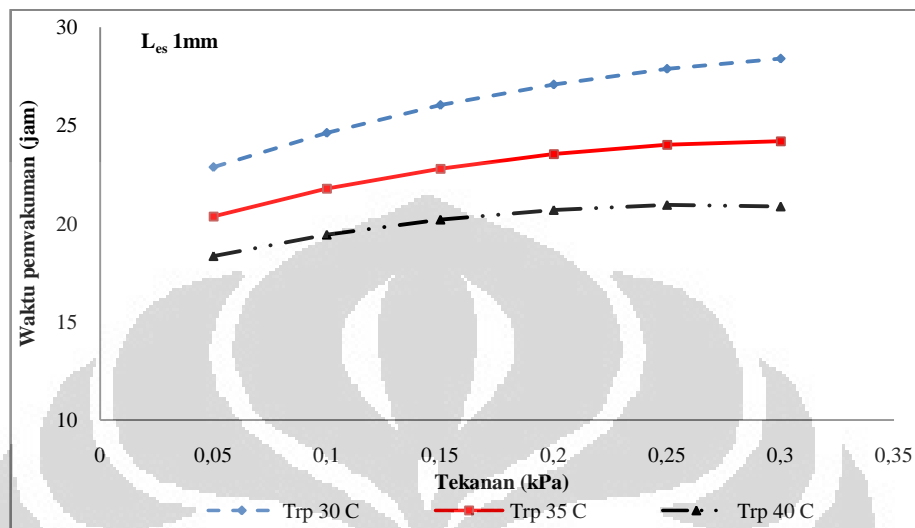
#### **4.6 Pengaruh variasi parameter kondisi operasi terhadap waktu pemvakuman proses pengering beku vakum**

Tugas utama dari pompa vakum pada proses pengering beku vakum mempunyai fungsi menurunkan tekanan ruang pengering saat awal proses, mengevakuasi gas tidak terkondensasi, dan mengevakuasi gas inert dari produk yang dikeringkan. energi yang dibutuhkan untuk menjalankan pompa vakum dapat didekati dengan persamaan (A.I. Liapis & R. Bruttini, 2008):

$$E_{vp} = P_{in, vp} \cdot S_{vp} \cdot \left( \frac{\lambda}{\lambda - 1} \right) \cdot \left[ \left( \frac{P_{out, vp}}{P_{in, vp}} \right)^{\frac{\lambda - 1}{\lambda}} - 1 \right]$$

Dimana  $E_{vp}$  adalah energi pompa vakum (Watt),  $P_{in, vp}$  adalah tekanan masuk pompa vakum (Pa),  $P_{out, vp}$  tekanan keluar pompa vakum ( tekanan

ambien (Pa)),  $S_{vp}$  adalah debit pompa vakum (m<sup>3</sup>/s) bernilai konstan selama proses pengeringan, sedangkan  $\lambda$  index politropik gas kompresibel ( $\lambda$  bernilai 1.2 s/d 1.7).

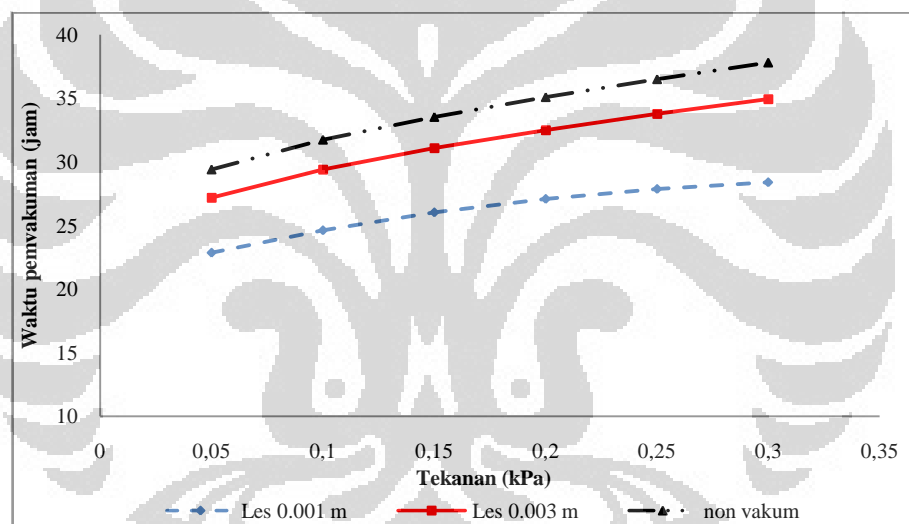


Gambar 4.19 Waktu Pemvakuman selama proses pengering beku vakum fungsi tekanan ruang pada ketebalan es 1 mm saat di lakukan pemvakuman dan temperatur ruang saat pemanasan yang berbeda ( Trp = 30, 35 dan 40 °C)

Berdasarkan persamaan diatas daya dari pompa vakum akan konstan pada tekanan ruang yang sama. Sehingga dengan mempercepat waktu di jalankan pompa vakum akan menghemat penggunaan energi pompa vakum. Waktu yang dibutuhkan untuk menjalankan pompa vakum pada tekanan ruang 0.05 kPa dan ketebalan es 1 mm untuk temperatur ruang 30°C adalah 22.87 jam, untuk temperatur ruang 35°C adalah 20.36 jam, dan untuk temperatur ruang 40°C adalah 18.34 jam. Sedangkan waktu yang dibutuhkan untuk menjalankan pompa vakum pada tekanan ruang 0.3 kPa dan ketebalan es 1 mm untuk temperatur ruang 30°C adalah 28.40 jam, untuk temperatur ruang 35°C adalah 24.19 jam, dan untuk temperatur ruang 40°C adalah 20.86 jam. Sehingga dengan menaikkan temperatur ruang dari 30°C menjadi 40°C pada tekanan 0.05 kPa akan mengurangi waktu pemakaian pompa vakum sebesar 4.53 jam, sedangkan untuk tekanan ruang 0.3 kPa adalah sebesar 7.53 jam (gambar 4.19)

Pada gambar 4.20 diperlihatkan waktu yang dibutuhkan untuk menjalankan pompa vakum selama proses pengering beku vakum untuk variasi tekanan dan

ketebalan es saat pemvakuman yang berbeda. Waktu yang dibutuhkan untuk menjalankan pompa vakum pada tekanan ruang 0.05 kPa dan temperatur ruang 30°C untuk ketebalan es 1 mm adalah 22.87 jam, untuk ketebalan es 3 mm adalah 27.19 jam, dan tanpa pembekuan vakum adalah 29.41 jam. Sedangkan waktu yang dibutuhkan untuk menjalankan pompa vakum pada tekanan ruang 0.3 kPa dan temperatur ruang 30°C untuk ketebalan es 1 mm adalah 28.40 jam, untuk ketebalan es 3 mm adalah 34.94 jam, dan tanpa pembekuan vakum adalah 37.81 jam. Sehingga dengan mempercepat saat pemvakuman dari pembekuan tanpa vakum menjadi ketebalan es 1 mm pada tekanan 0.05 kPa akan mengurangi waktu pemakaian pompa vakum sebesar 6.54 jam, sedangkan untuk tekanan ruang 0.3 kPa adalah sebesar 9.42 jam.



Gambar 4.20 Waktu pemvakuman selama proses pengering beku vakum fungsi tekanan ruang pada temperatur ruang pemanas  $T_{rp}$  30 °C dan ketebalan es produk saat dilakukan pemvakuman yang berbeda ( tebal es = 0.001, 0.003 dan non vakum)

Berdasarkan gambar 4.19 dan 4.20 dapat di simpulkan bahwa dengan mempercepat saat pemvakuman dan menaikkan temperatur ruang akan mempercepat waktu yang dibutuhkan untuk menjalankan pompa vakum selama proses pengering beku vakum. Pada tekanan yang sama dimungkinkan dengan semakin cepat waktu yang di butuhkan untuk menjalankan pompa vakum akan menghemat penggunaan energi.

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Hasil simulasi menunjukkan bahwa:

- Mempercepat saat pemvakuman dari semua produk sudah terbentuk es menjadi saat ketebalan es 1 mm pada tekanan ruang 0.3 kPa dan temperatur ruang 30°C akan mengurangi:
  - Waktu proses sebesar 21.2 jam (39%).
  - Waktu menjalankan pompa vakum 9.4 jam (25%).
- Kenaikkan temperatur ruang pengering dari 30°C menjadi 40°C pada tekanan ruang 0.3 kPa dan ketebalan es 1 mm akan mengurangi:
  - Waktu proses sebesar 7.5 jam (23%).
  - Waktu menjalankan pompa vakum 7.5 jam (27%).
- Penurunan tekanan ruang pengering dari 0.3 kPa menjadi 0.05 kPa pada temperatur ruang 40°C dan ketebalan es 1 mm saat dilakukan pemvakuman akan mengurangi waktu proses sebesar 2.5 jam (10%).
- Model matematik yang dikembangkan dapat digunakan untuk memprediksi profile temperatur material untuk setiap node, laju massa pembekuan dan pengeringan, profil terbentuknya dan pengurangan lapisan es, dan kebutuhan energi proses pengering beku vakum.

#### **5.2 Saran**

Metode untuk mempercepat pembekuan dengan melakukan pemvakuman pada saat sudah terbentuk es dapat dievaluasi lebih lanjut dengan melakukan pengujian.

## DAFTAR REFERENSI

- A. Hottot, S. Vessot, J. Andrieu, (2007). Freeze drying of pharmaceuticals in vials: influence of freezing protocol and sample configuration on ice morphology and freeze-dried cake texture, *Chem. Eng. Process.* 46 666–674.
- Ashim K. Dutta, 2002. *Biological and bioenvironmental Heat and Mass Transfer*, Marcel Dekker, Inc, New York.
- ASHRAE Handbook, 1997, *Fundamentals (SI)*, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineer, Atlanta, Georgia.
- Belyamin, Tambunan, A.H., Purwadaria, H.K., Alhamid, M.I, 2006, Kajian energi pengeringan beku dengan pembekuan vakum dan pemanasan dari bawah, *Prosiding, Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) V*, Jakarta, Indonesia, 21-23 November.
- Boss, E.A., Filho, R.M., de Toledo, E.C.V., 2004. Freeze-drying process: real time model and optimization. *Chemical Engineering and Processing* 43, 1475–1485.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2005). *Thermodynamics—an engineering approach* (5th ed.). New York: McGraw-Hill Companies, Inc., pp. 117–118.
- Chakraborty, R., A.K.Saha., P, Bhattacharya. 2006. Modeling and simulation of parametric sensitivity in primary freeze-drying of foodstuffs. *Elsevier Separation and Purification Technology* (49), 258-263
- Cheng, H. -P., & Lin, C.-T. (2007). The morphological visualization of the water in vacuum cooling and freezing process. *Journal of Food Engineering*, 78(2), 569–576.
- Dostal, M., & Petera, K. (2004). Vacuum cooling of liquids: Mathematical model. *Journal of Food Engineering*, 61(4), 533–539.
- Engkos A. Kosasih, M. Idrus Alhamid, Nasruddin,. 2011, *Pengembangan Mesin Pengeringan Beku Vakum Compact dengan Kombinasi Pembekuan Internal*, Laporan Akhir Hibah Riset Strategis Nasional.

**Universitas Indonesia**

- Fey, Y. C. and Boles, M. A. (1988). The parametric analysis of self-freezing in an initially wet porous medium. *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 9, 147-155
- George-Wilhelm Oetjen, Peter Haseley, 2004. *Freeze Drying Second, Completely Revised and Extended Edition*. WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA, Weinheim ISBN: 978-3-527-30620-6.
- Hallstrom, B. (1990). Mass transport of water in foods - a consideration of the engineering aspects. *Journal of Food Engineering*, 12, 45±52.
- Housřka, M., Podlouckyř, Sř ., Zř itnyř, R., Greře, R., Sř estařk, J., Dostař l, M., et al. (1996). Mathematical model of the vacuum cooling of liquids. *Journal of Food Engineering*, 29, 339–348.
- J. Nastaj, K. Witkiewicz, (2008). Experimental and simulation studies of primary vacuum freeze-drying process of random solids at microwave heating, *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 35 430–438.
- J. Nastaj, K. Witkiewicz, (2009). Mathematical modeling of the primary and secondary vacuum freeze drying of random solids at microwave heating, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52 (2009) 4796–4806.
- Liley, P.E., 2005. Thermophysical properties of ice/water/steam from -20°C to 50°C. *International Journal of Mechanical Engineering Education* 33 (1) 45-50.
- Lin, H. I., & Chou S. F. (2001). Teoretical model of a thin-film accumulation type vacuum freezing ice production (VFIP) method. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 24(4), 463-471.
- M. Idrus Alhamid, Nasruddin, M. Yulianto . 2010. Effect Of Upper Heating from Heat Loss Condenser on Drying Time and Final Moisture Content at Freeze Vacuum Drying Process. *Int Confrence IMAT*.
- M. Yulianto, M. Idrus Alhamid, Nasruddin,. 2010. Mass diffusivity pada pengeringan beku vakum aloevera Akibat variasi temperatur pemanas (posisi atas dan posisi Bawah) dari panas buang kondenser, *Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) ke-9*.
- McDonald, K., & Sun, D.-W. (2000). Vacuum cooling technology for the food processing industry: A review. *Journal of Food Engineering*, 45, 55–65.



- McDonald, K., & Sun, D.-W. (2001). Effect of evacuation rate on the vacuum cooling process of a cooked beef product. *Journal of Food Engineering*, 48, 195–202.
- Nasruddin, M. Idrus Alhamid, Engkos A. Kosasih, M. Yulianto. 2011. Effect Of Freeze Vacuum Drying and Heating from Condenser's Heat Loss on Drying Rate and Microstructure of Aloe Vera. *Journal of Applied Sciences* 6 (5): 335-343.
- R. Daoussi, S. Vessot, J. Andrieu, O. Monnier, (2009). Sublimation kinetics and sublimation end-point times during freeze-drying of pharmaceutical active principle with organic co-solvent formulations, *Chem. Eng. Res. Des.* 87 899–907.
- Wang, L. J., & Sun, D.-W. (2001). Rapid cooling of porous and moisture foods by using vacuum cooling technology. *Trends in Food Science & Technology*, 12(5–6), 174–184.
- Wang, L., & Sun, D. W. (2002a). Modelling vacuum cooling process of cooked meat—part 1: analysis of vacuum cooling system. *International Journal of Refrigeration*, 25, 854–861.
- Wang, L., & Sun, D. W. (2002b). Modelling vacuum cooling process of cooked meat—part 2: mass and heat transfer of cooked meat under vacuum pressure. *International Journal of Refrigeration*, 25, 862– 871.
- Xu Duan, Min zhang, Arun S. Mujumdar, Shaojin Wang, 2010. Microwave freeze drying of sea cucumber (*Stichopus Japonicus*). *Elsavier : Journal of Food Engineering* 96 (2010) 491-497
- Zhai, S., Su, H., Taylor, R. and Slater, K.H., 2005, Pure ice sublimation within vials in a laboratory lyophiliser; comparison of theory with experiments, *Chem Eng Sci*, 60: 1167–1176.

## LAMPIRAN

## Lampiran 1. Hasil Simulasi

Tekanan kPa	Massa terevaporasi / sublimasi (kg)			Waktu proses (jam)				
	<i>Cooling</i>	<i>Vacuum Freeze</i>	<i>Sublimasi</i>	<i>Cooling</i>	<i>Freeze</i>	<i>Vacuum Freeze</i>	<i>Sublimasi</i>	<i>Vacuum Pump</i>
Tebal es 0.001 m Trp 30C								
0.05	4.847E-06	0.0049	0.0345	2.09	2.64	0.12	22.75	22.87
0.1	4.847E-06	0.0049	0.0344	2.09	2.64	0.18	24.44	24.62
0.15	4.847E-06	0.0049	0.0344	2.09	2.64	0.25	25.78	26.03
0.2	4.847E-06	0.0050	0.0342	2.09	2.64	0.34	26.74	27.08
0.25	4.847E-06	0.0053	0.0340	2.09	2.64	0.45	27.42	27.87
0.3	4.847E-06	0.0057	0.0336	2.09	2.64	0.62	27.77	28.40
Tebal es 0.001 m Trp 35C								
0.05	4.847E-06	0.0049	0.0344	2.09	2.64	0.12	20.25	20.36
0.1	4.847E-06	0.0049	0.0344	2.09	2.64	0.18	21.60	21.78
0.15	4.847E-06	0.0050	0.0343	2.09	2.64	0.25	22.53	22.78
0.2	4.847E-06	0.0051	0.0342	2.09	2.64	0.34	23.20	23.54
0.25	4.847E-06	0.0054	0.0339	2.09	2.64	0.46	23.55	24.01
0.3	4.847E-06	0.0059	0.0334	2.09	2.64	0.63	23.56	24.19
Tebal es 0.001 m Trp 40C								
0.05	4.847E-06	0.0049	0.0344	2.09	2.64	0.12	18.22	18.34
0.1	4.847E-06	0.0049	0.0344	2.09	2.64	0.18	19.25	19.43
0.15	4.847E-06	0.0050	0.0343	2.09	2.64	0.25	19.94	20.19
0.2	4.847E-06	0.0052	0.0341	2.09	2.64	0.34	20.34	20.68
0.25	4.847E-06	0.0055	0.0338	2.09	2.64	0.46	20.49	20.95
0.3	4.847E-06	0.0061	0.0331	2.09	2.64	0.65	20.22	20.86
Tebal es 0.003 m Trp 30C								
0.05	4.85E-06	0.0016	0.0377	2.09	7.90	0.06	27.13	27.19
0.1	4.85E-06	0.0016	0.0377	2.09	7.90	0.08	29.32	29.40
0.15	4.85E-06	0.0016	0.0377	2.09	7.90	0.11	30.97	31.08
0.2	4.85E-06	0.0016	0.0377	2.09	7.90	0.14	32.35	32.49
0.25	4.85E-06	0.0016	0.0377	2.09	7.90	0.18	33.60	33.78
0.3	4.85E-06	0.0016	0.0376	2.09	7.90	0.24	34.71	34.94
Tebal es 0.003 m Trp 35C								
0.05	4.85E-06	0.0016	0.0377	2.09	7.90	0.06	24.25	24.31
0.1	4.85E-06	0.0016	0.0377	2.09	7.90	0.08	25.94	26.02
0.15	4.85E-06	0.0016	0.0377	2.09	7.90	0.11	27.13	27.24
0.2	4.85E-06	0.0016	0.0377	2.09	7.90	0.14	28.16	28.30
0.25	4.85E-06	0.0016	0.0377	2.09	7.90	0.18	29.07	29.25
0.3	4.85E-06	0.0016	0.0376	2.09	7.90	0.24	29.85	30.09
Tebal es 0.003 m Trp 40C								
0.05	4.847E-06	0.0016	0.0377	2.09	7.90	0.06	21.83	21.89
0.1	4.847E-06	0.0016	0.0378	2.09	7.90	0.08	23.15	23.23
0.15	4.847E-06	0.0016	0.0377	2.09	7.90	0.11	24.06	24.16
0.2	4.847E-06	0.0016	0.0377	2.09	7.90	0.14	24.83	24.97
0.25	4.847E-06	0.0016	0.0377	2.09	7.90	0.18	25.47	25.65
0.3	4.847E-06	0.0017	0.0376	2.09	7.90	0.23	26.02	26.26

## Lampiran 1. Hasil Simulasi (lanjutan)

Tekanan kPa	Massa terevaporasi / sublimasi (kg)			Waktu proses (jam)				
	<i>Cooling</i>	<i>Vacuum Freeze</i>	<i>Sublimasi</i>	<i>Cooling</i>	<i>Freeze</i>	<i>Vacuum Freeze</i>	<i>Sublimasi</i>	<i>Vacuum Pump</i>
non vakum Trp 30C								
0.05	4.85E-06	0	0.0393	2.09	14.38	0.00	29.41	29.41
0.1	4.85E-06	0	0.0393	2.09	14.38	0.00	31.73	31.73
0.15	4.85E-06	0	0.0393	2.09	14.38	0.00	33.53	33.53
0.2	4.85E-06	0	0.0393	2.09	14.38	0.00	35.08	35.08
0.25	4.85E-06	0	0.0393	2.09	14.38	0.00	36.49	36.49
0.3	4.85E-06	0	0.0393	2.09	14.38	0.00	37.81	37.81
non vakum Trp 35C								
0.05	4.85E-06	0.0000	0.0393	2.09	14.38	0.00	26.29	26.29
0.1	4.85E-06	0.0000	0.0393	2.09	14.38	0.00	28.08	28.08
0.15	4.85E-06	0.0000	0.0393	2.09	14.38	0.00	29.43	29.43
0.2	4.85E-06	0.0000	0.0393	2.09	14.38	0.00	30.58	30.58
0.25	4.85E-06	0.0000	0.0393	2.09	14.38	0.00	31.61	31.61
0.3	4.85E-06	0.0000	0.0393	2.09	14.38	0.00	32.56	32.56
non vakum Trp 40C								
0.05	4.847E-06	0.0000	0.0393	2.09	14.38	0.00	23.66	23.66
0.1	4.847E-06	0.0000	0.0393	2.09	14.38	0.00	25.06	25.06
0.15	4.847E-06	0.0000	0.0393	2.09	14.38	0.00	26.09	26.09
0.2	4.847E-06	0.0000	0.0392	2.09	14.38	0.00	26.96	26.96
0.25	4.847E-06	0.0000	0.0392	2.09	14.38	0.00	27.73	27.73
0.3	4.847E-06	0.0000	0.0393	2.09	14.38	0.00	28.43	28.43

## Lampiran 2. Program Simulasi Pengering Beku Vakum

### Program Utama

```

clc
clear
nfig = 0;
%Finite different 1D Perubahan Kondisi Produk Pada Sistem Vacuum
%Freeze Drying dengan metode implisit
%Input
Pa_a = input ('Tekanan di dalam ruang pengering (kPa) = ');
T_ruang = input ('Temperatur didalam ruang pengering (C) = ');
RH_r = input ('Kelembaban Relatif ruang pengering (%) = ');
T_int = input ('Temperatur awal produk (C) = ');
Pa_av = input ('Tekanan vakum di ruang pengering (kPa) = ');
L = input ('Tinggi produk yang dikeringkan (m) = ');
r = input ('Jari-jari tempat produk (m) = ');
m = input ('Jumlah gridpoints arah sumbu x = ');
Les_b = input ('Batas ketebalan es mulai di vakum (m) = ');
mx = input ('Temperatur pada node ke = ');
dt = input ('Perubahan waktu (sekon) = ');
nt = input ('jumlah looping = ');

% konstanta
R_g = 8314.41; % Konstanta gas (J/kg molK)
Hc_ice = 3.334e5; % Enthalpi es saat 0 C (J/kg)
Cp_es1 = 2102.7; % Panas spesifik es saat 0 C (J/kgK)
k_es1 = 2.250; % Konduktifitas panas es saat 0 C (W/mK)
rho_es1 = 916.88; % Densitas es saat 0 C (kg/m3)
rho_w1 = 999.85; % Densitas air saat 0 C (kg/m3)
Ta_int = T_int + 273.15; % Temperatur absolut awal produk (C)
p = 5; % faktor pembagi node arah sumbu y

% Dimensi tempat produk
Dia_r = 0.2;
t_r = 0.2;
Dia_temp = 0.1;
t_temp = 0.1;
tb_temp = 0.001;

% Menghitung Volume Ruang Pengering
V_r=(0.25*3.14*Dia_r^2*t_r)-
((3.14*Dia_temp*t_temp*tb_temp)+(0.25*3.14*Dia_temp*tb_temp))-
(3.14*r^2*L);

% Menghitung properties udara % material
Psat_a = nilai_Psat (T_r);
Pv_a = RH_r*Psat_a;
Pd_a = Pa_a - Pv_a;
m_v = (Pv_a*V_r*18.01528)/(R_g*(T_r+273));

% Menghitung dx
dx=nilai_dx(m,L,p);

% Menghitung volume tiap node
Vol = nilai_Voll(r,dx,m);

% Membuat temperatur awal dari water pada setiap node
for i=1:m
    T(i,1)= T_int;
end

% initial kondisi
t = 0; % waktu awal proses
t_es = 0; % Waktu awal proses freezing
t_s = 0; % Waktu awal proses sublimasi

```

```

t_c = 0; % Waktu awal proses cooling
t_TK = 0; % Waktu awal pevakuman
b_es = 0; % Batasan ketebalan es proses pengeringan
L_as = 0.005; % konstanta Batasan ketebalan es
L_w = 0; % Ketebalan air
Les = 0; % Ketebalan es
Ls = 0; % Ketebalan sublimasi
Les_c = 0; % Batasan Proses cooling
Les_s = 0; % Ketebalan es total (Les - Ls)
tebal = 0; % Penambahan ketebalan lapisan es
mkdot = 0; % Laju massa yang teranti_sublimasi (kg/s)
ms = 0; % Massa yang tersublimasi (kg)
Q_tot = 0; % Energi total selama proses pengeringan
Q_ct = 0; % Energi total selama proses cooling
Qmk = 0; % Energi cold trap
TK = 1; % Penggunaan Pemanas
for z=1:nt % Timestep loop Menghitung Temperatur Baru
    t = t + dt;
    T_r = nilai_T_ra(t);
    T_awal = T_r;
    % Data plot
    t_all(z,:) = t;
    upt(z,1) = T_r(1,:);
    if Les_c <= 0 % Proses Cooling
        t_c = t_c + dt;
    % Menghitung Properties water
        Psat_w = nilai_Psat (T(1,1));
        for i = 1: m-1
            Cp_w(i) = (-0.00124551*T(i)^3)+ (0.103347056*T(i)^2)+(-
            3.328318426*T(i))+4219.305914;
            rho_w(i) = (5.11817E-05*T(i)^3)+ (-
            0.008289063*T(i)^2)+(0.063164729*T(i))+999.8489944;
            k_w (i) = (-3.92369E-
            06*T(i)^2)+(0.001950976*T(i))+0.560964795;
        end
    % Perhitungan massa yang terevaporasi
        v_va = (R_g*(T_r+273.15))/(18.01528*(Pv_a*1000));
        rho_va = 1/v_va;
        v_vw = (R_g*(T(1,1)+273.15))/(18.01528*(Psat_w*1000));
        rho_vw = 1/v_vw;
        Yv_a = (Pv_a/Pa_a);
        W = 0.62198*(Pv_a/(Pa_a-Pv_a));
    % Menghitung Mass transfer
        hm_aw = nilai_hm_aw (T_r,r,Pa_a,rho_va,rho_vw);
        hfg = nilai_hfg(T(1,1));
        hc = nilai_hc(T(1,1));
    if RH_r <= 1
        mvdot = hm_aw*3.14*r^2*(rho_vw - rho_va);
        Qmv = (mvdot*hfg);
    else
        mvdot = 0
        Qmv = (mvdot*hfg);
    end
    % Menghitung koefisien konveksi
        ha_a = ha_udaral (T_r,Pa_a,T(1,1),r);
    % Menghitung Nilai Tahanan R
        R = nilai_R_im(m,ha_a,r,k_w,dx);
    % Menghitung nilai Rtot

```

```

for i = 1:m-1
    Rtot(i,1) = (1/R(i,1)) + (1/R(i,2));
end
% Menghitung koefisien
for i = 1:m-1
    alf(i) = (dt/(rho_w(i)*Cp_w(i)*Vol(i)));
    A(i) = (alf(i)/R(i,1));
    B(i) = (1 + (alf(i)* Rtot(i)));
    C(i) = (alf(i)/R(i,2));
end
% Membuat Matrik Persamaan
MA = zeros (m,m);
MX = zeros (m,1);
MB = zeros (m,1);
% batas atas
MA (1,1) = B(1);
MA (1,2) = -C(1);
MB (1,1) = (A(1)*T_r) + T(1,1) - (Qmv);
% node dalam
for i = 2 : m-1
    MA(i,i-1) = -A(i);
    MA(i,i) = B(i);
    MA(i,i+1) = -C(i);
    MB(i,1) = T(i,1);
end
% batas bawah
MA(m,m-1) = -1;
MA(m,m) = 1;
MB(m,1) = 0;
% Eliminasi Gauss
n=m;
X=eliminasiG(MA,MB,n);
for i = 1:m
    T(i,1) = X(1,i);
end
% alaternatif satu
Psat_a = nilai_Psat (T_r);
DPv_a = ((mvdot * R_g *
(T(1,1)+273.15))/(18.01528*V_r))/1000;
Pv_a = Pv_a + DPv_a;
Pv_a1 = Pv_a;
Qkonv = abs((T(1,1)-T_r)/R(1,1));
m_v = m_v + (mvdot*dt);
Pa_a = (((T_r+273.15)/(T_awal+273.15))*Pa_a + DPv_a);
RH_r = Pv_a/Psat_a;
W1 = W;
Q_t = Qmv + Qkonv;
Q_tot = Q_tot + Q_t;
Q_tot_c = Q_tot;
% Data Plot
tc(z,1) = t_c; % Waktu proses cooling
t_ct = t_c; % Besarnya waktu proses cooling
if T(1,1)<=0
% Menghitung koefisien
for i = 1:m-1
    alf(i) = (dt/(rho_w(i)*Cp_w(i)*Vol(i)));
    A(i) = (alf(i)/R(i,1));
    B(i) = (1 + (alf(i)*Rtot(i)));

```

```

        C(i) = (alf(i)/R(i,2));
    end
    % Membuat Matrik Persamaan
    MA = zeros (m,m);
    MX = zeros (m,1);
    MB = zeros (m,1);
    % batas atas
    MA (1,1) = 1;
    MA (1,2) = (1/R(1,2));
    MB (1,1) = - (T_r/R(1,1));
    MA (2,1) = 0;
    MA (2,2) = B(2);
    MA (2,3) = -C(2);
    MB (2,1) = T(2,1);
    % node dalam
    for i = 3 : m-1
        MA(i,i-1) = -A(i);
        MA(i,i) = B(i);
        MA(i,i+1) = -C(i);
        MB(i,1) = T(i,1);
    end
    % batas bawah
    MA(m,m-1) = -1;
    MA(m,m) = 1;
    MB(m,1) = 0;
    n=m;
    X=eliminasiG(MA,MB,n);
    for i = 1:m
        T(i,1) = X(1,i);
    end
    Qgen = T(1,1);
    T(1,1) = 0;
    mdot = Qgen / (Hc_ice); % Menghitung laju massa es
    Vnew = (mdot*dt) /rho_es1;
    V_w = (mdot*dt) / rho_w1;
    tebal = Vnew / (3.14*r^2); % Penambahan ketebalan es
    tebal_w = V_w / (3.14*r^2); % Pengurangan ketebalan water
    Les = Les + tebal; % Menghitung tebal lapisan es
    L = L - tebal_w; % Tebal lapisan water
    Les_c = Les; % Batasa proses cooling
    L_w = L; % Batasan proses freezing
    Les_s = Les; % Ketebalan lapisan es
    Pv_al = Pv_a;
end
    T_r_1 = T_r;
end
    if L_w < 0.005 && L_w > 0
        Les_in = Les;
        tebal_s = 0;
        t_c = 0;
    % Membuat temperatur awal dari pada setiap node ((2*m)-3)
        T_awal = zeros ((2*m)-2,1);
    for i= m: (2*m)-2
        T_awal(i,1) = T(i-8,1);
    end
    if t_es >= 1
        T = T;
    else

```

```

        T = T_awal;
    end
    % Properties air dan es
    for i = 1:(2*m)-3
        if T(i) <=0
            Cp(i) = (0.005818238*T(i)^3)+
            (0.192393223*T(i)^2)+(11.93391183*T(i))+2162.040426;
            rho(i) = (2.55718E-07*T(i)^3)+ (-0.000358107*T(i)^2)+(-
            0.150390953*T(i))+916.6707074;
            k(i) = (-2.77699E-06*T(i)^2)+(-
            0.003579323*T(i))+2.08991838;
        else
            Cp(i) = (-0.00124551*T(i)^3)+ (0.103347056*T(i)^2)+(-
            3.328318426*T(i))+4219.305914;
            rho(i) = (5.11817E-05*T(i)^3)+ (-
            0.008289063*T(i)^2)+(0.063164729*T(i))+999.8489944;
            k(i) = (-3.92369E-
            06*T(i)^2)+(0.001950976*T(i))+0.560964795;
        end
    end
    for i=1:(2*m)-3
        kk(i,1)=k(i);
    end
    % Menghitung dx_es & dx
        dx_es = nilai_dx(m,Les_s,p);
        dx = nilai_dx(m,L,p);
    % Menghitung volume tiap node
        Vol_es = nilai_Vol_es(r,dx_es,dx,m);
    % Menghitung nilai koefisien konfeksi pada lapisan es
        ha_es = ha_udaral (T_r,Pa_a,T(1,1),r);
    % Menghitung Nilai Tahanan R es dan air
        R = nilai_R_freezing(m,ha_es,r,k,dx_es,dx);
    % Mencari nilai Rtot es dan air tiap node
    for i = 1:(2*m)-3
        Rtot(i,1) = (1/R(i,1)) + (1/R(i,2));
    end
    % Menghitung heat dan mass transfer
    if Les_in <= Les_b
    % Perhitungan massa yang terevaporasi
        v_va = (R_g*(T_r+273.15))/(18.01528*(Pv_a*1000));
        rho_va = 1/v_va;
        v_vw = (R_g*(T(1,1)+273.15))/(18.01528*(Psat_w*1000));
        rho_vw = 1/v_vw;
        Yv_a = (Pv_a/Pa_a);
        W = 0.62198*(Pv_a/(Pa_a-Pv_a));
    % Menghitung Mass transfer
        hm_aw = nilai_hm_aw (T_r,r,Pa_a,rho_va,rho_vw);
        hfg = nilai_hfg(T(1,1));
        hc = nilai_hc(T(1,1));
    if RH_r <= 1
        mvdot = hm_aw*3.14*r^2*(rho_vw - rho_va);
        Qmv = (mvdot*hfg);
    else
        mvdot = 0;
        Qmv = (mvdot*hfg);
    end
    else
    % Perhitungan massa yang tersublimasi

```



```

        t_TK = t_TK + dt;
    if TK >= 2
        T_r = T_r;
        Pa_a = Pa_av;
    else
        T_r = nilai_T_rp40(t_TK);
        Pa_a = Pa_av;
    end
    % Menghitung nilai koefisien konfeksi pada lapisan es
    ha_es = ha_udaral (T_r, Pa_a, T(1,1), r);
    % Menghitung Nilai Tahanan R es dan air
    R = nilai_R_freezing(m, ha_es, r, k, dx_es, dx);
    % Mencari nilai Rtot es dan air tiap node
    for i = 1:(2*m)-3
        Rtot(i,1) = (1/R(i,1)) + (1/R(i,2));
    end
    if Pa_a <= Pv_a1
        Pv_a = Pa_a;
    else
        Pv_a = Pv_a1;
    end
    Psat_w = nilai_Psat (T(1,1));
    v_va = (R_g*(T_r+273.15))/(18.01528*(Pv_a*1000));
    rho_va = 1/v_va;
    v_vw = (R_g*(T(1,1)+273.15))/(18.01528*(Psat_w*1000));
    rho_vw = 1/v_vw;
    hm_aw = nilai_hm_aw (T_r, r, Pa_a, rho_va, rho_vw);
    if Psat_w <= Pv_a
        mvdot = 0;
    else
        mvdot = hm_aw*3.14*r^2*(rho_vw - rho_va);
    end
    h_sg = nilai_h_sg (T(1,1));
    Qmv = (mvdot*h_sg);
    tebal_s = (mvdot*dt)/(rho(1)*3.14*r^2);
    Ls = Ls + tebal_s;
    Dmv = ((m_v/T_r)*((T_r-T_r_1)/dt));
    mkdot = mvdot - (Dmv/dt);
    m_v = m_v + Dmv;
    if m_v <= 0
        m_v = 0;
    end
    Qmk = (mkdot*h_sg);
end
% Menghitung koefisien
for i = 1:(2*m)-3
    alf(i) = (dt/(rho(i)*Cp(i)*Vol_es(i)));
    A(i) = (alf(i)/R(i,1));
    B(i) = (1 + (alf(i)*Rtot(i)));
    C(i) = (alf(i)/R(i,2));
end
A(m-1) = (1/R(m-1,1));
B(m-1) = 1;
C(m-1) = (1/R(m-1,2));
% Membuat Matrik Persamaan
MA = zeros ((2*m)-2, (2*m)-2);
MB = zeros ((2*m)-2, 1);
% batas atas es

```

```

    MA (1,1) = B(1);
    MA (1,2) = -C(1);
    MB (1,1) = T(1,1) + (A(1)*T_r)-(Qmv);
% node dalam es
for i = 2 : m-3
    MA(i,i-1) = -A(i);
    MA(i,i)   = B(i);
    MA(i,i+1) = -C(i);
    MB(i,1)   = T(i,1);
end
% Sebelum batas antara es dan air
MA(m-2,m-3) = -A(m-2);
MA(m-2,m-2) = B(m-2);
MA(m-2,m-1) = 0;
MB(m-2,1)   = T(m-2,1);
% batas antara es dan air
MA(m-1,m-2) = A(m-1);
MA(m-1,m-1) = B(m-1);
MA(m-1,m)   = C(m-1);
MB(m-1,1)   = 0;%T(m-1,1);
% Setelah batas antara es dan air
MA(m,m-1) = 0;
MA(m,m)   = B(m);
MA(m,m+1) = -C(m);
MB(m,1)   = T(m,1);
% node dalam air
for i = m+1 : (2*m)-3
    MA(i,i-1) = -A(i);
    MA(i,i)   = B(i);
    MA(i,i+1) = -C(i);
    MB(i,1)   = T(i,1);
end
% batas bawah air
MA((2*m)-2,(2*m)-3) = -1;
MA((2*m)-2,(2*m)-2) = 1;
MB((2*m)-2,1)       = 0;
% Eliminasi Gauss
n=(2*m)-2;
X=eliminasiG(MA,MB,n);
X;
for i = 1:(2*m)-2
    T(i,1) = X(1,i);
end
    T_r_1   = T_r;
    Qgen    = T(m-1);
    T(m-1)  = 0;
    mdot    = Qgen / (Hc_ice);
    Vnew    = mdot / rho_es1;
    tebal   = Vnew / (3.14*r^2);
    V_w     = mdot / rho_w1;
    tebal_w = V_w / (3.14*r^2);
    Les     = Les + tebal;
    Les_s   = Les_s + tebal - tebal_s;
    L       = L - tebal_w;
    L_w     = L;
    Qkonv   = abs((T(1,1)-T_r))/R(1,1);
    Q_t     = Qmv + Qkonv;
    Q_tot   = Q_tot + Q_t;

```

```

        Q_tot_es = Q_tot;
        ms       = ms + (mvdot*dt);
        Q_ct     = Q_ct + Qmv;
        t_es     = t_es + dt;
        t_est    = t_es;
        t_sc     = 0;
    end
    if L_w < 0
        ds       = dt;
        t_c      = 0; % Waktu proses cooling
        t_es     = 0; % Waktu proses freezing
        t_s      = t_s + ds;
        t_TK    = t_TK + dt;
    if TK >= 2
        T_r     = nilai_T_rp40(t_s);
        Pa_a    = Pa_av; %nilai_Pa_a_s(t_s);
    else
        T_r     = nilai_T_rp40(t_TK);
        Pa_a    = Pa_av; %nilai_Pa_a_s(t_TK);
    end
    if Pa_a <= Pv_a1
        Pv_a    = Pa_a;
    else
        Pv_a    = Pv_a1;
    end
    % Membuat temperatur awal es pada setiap node ((2*m)-3)
        T_asc = zeros (m,1);
    for i= 1:m-1
        T_asc(i,1) = T(i,1);
    end
        T_asc(m,1) = T(m-1,1);
    if t_sc > 0
        T = T;
    else
        T = T_asc;
    end
    % Menghitung volume tiap node
        dx_es = nilai_dx(m,Les_s,p);
    % Menghitung volume tiap node
        Vol = nilai_Voll(r,dx_es,m);
    % Perhitungan massa yang tersublimasi
        Psat_w = nilai_Psat (T(1,1));
        v_va   = (R_g*(T_r+273.15))/(18.01528*(Pv_a*1000));
        rho_va = 1/v_va;
        v_vw   = (R_g*(T(1,1)+273.15))/(18.01528*(Psat_w*1000));
        rho_vw = 1/v_vw;
        hm_aw  = nilai_hm_aw (T_r,r,Pa_a,rho_va,rho_vw);
        mvdot  = hm_aw*3.14*r^2*(rho_vw - rho_va);
        Dmv    = ((m_v/T_r)*((T_r-T_r_1)/dt));
        mkdot  = mvdot - (Dmv/dt);
        m_v    = m_v + Dmv;
    if m_v <= 0
        m_v = 0;
    end
    if T(i) <=0
    Cp(i)=(0.005818238*T(i)^3)+
    (0.192393223*T(i)^2)+(11.93391183*T(i))+2162.040426;

```

```

rho(i)      = (2.55718E-07*T(i)^3)+ (-0.000358107*T(i)^2)+(-
0.150390953*T(i))+916.6707074;
k(i)        = (-2.77699E-06*T(i)^2)+(-
0.003579323*T(i))+2.08991838;
else
Cp(i)       = (-0.00124551*T(i)^3)+ (0.103347056*T(i)^2)+(-
3.328318426*T(i))+4219.305914;
rho(i)      = (5.11817E-05*T(i)^3)+(-
0.008289063*T(i)^2)+(0.063164729*T(i))+999.8489944;
k(i)        = (-3.92369E-06*T(i)^2)+(0.001950976*T(i))+0.560964795;
end

tebal_s    = (mvdot*dt)/(rho(1)*3.14*r^2);
Les_s      = Les_s - tebal_s;
Ls         = Ls + tebal_s;
h_sg       = nilai_h_sg (T(1,1));
Qmv        = (mvdot*h_sg);
Qmk        = (mkdot*h_sg);
c_hm       = hm_aw;
hm(z,1)    = c_hm;
cts        = t_s;
t_suall(z,:) = cts;
% Menghitung koefisien konveksi
ha_a       = ha_udara1 (T_r,Pa_a,T(1,1),r);
% Menghitung Nilai Tahanan R
R           = nilai_R_im(m,ha_a,r,k,dx_es);
% Menghitung nilai Rtot
for i = 1:m-1
    Rtot(i,1) = (1/R(i,1)) + (1/R(i,2));
end
t_sc       = t_sc + dt;
% Menghitung koefisien
for i = 1:m-1
    alf(i) = (dt/(rho_w(i)*Cp_w(i)*Vol(i)));
    A(i)   = (alf(i)/R(i,1));
    B(i)   = (1 + (alf(i)*Rtot(i)));
    C(i)   = (alf(i)/R(i,2));
end
% Membuat Matrik Persamaan
MA = zeros (m,m);
MX = zeros (m,1);
MB = zeros (m,1);
% batas atas
MA (1,1) = B(1);
MA (1,2) = -C(1);
MB (1,1) = (A(1)*T_r) + T(1,1)-(Qmv);
% node dalam
for i = 2 : m-1
    MA(i,i-1) = -A(i);
    MA(i,i)   = B(i);
    MA(i,i+1) = -C(i);
    MB(i,1)   = T(i,1);
end
% batas bawah
MA(m,m-1) = -1;
MA(m,m)   = 1;
MB(m,1)   = 0;
% Eliminasi Gauss
n=m;

```

```

        X=eliminasiG(MA,MB,n);
    for i = 1:m
        T(i,1) = X(1,i);
    end
    % Menentukan nilai pada saat T sublimasi > 0
    if T(1,1) <= 0
        Ls_r          = Les_s;
        t_r           = t;
    end
        T_r_1         = T_r;
        L_as          = Les_s;
        Qkonv         = abs((T(1,1)-T_r))/R(1,1);
        Q_t           = Qmv + Qkonv;
        Q_tot         = Q_tot + Q_t;
        Q_tot_s       = Q_tot;
        ms            = ms + (mvdot*dt);
        Q_ct          = Q_ct + Qmv;
    end
        t_all(z,1)    = t;
        tt_c(z,1)     = t_c;
        tt_es(z,1)    = t_es;
        tt_TK(z,1)    = t_TK;
        tt_s(z,1)     = t_s;
        T_r_t(z,1)    = T_r(1);
        T_m_t(z,1)    = T(mx);
        T_m1_t(z,1)   = T(1);
        T_m2_t(z,1)   = T(2);
        T_m3_t(z,1)   = T(3);
        T_m4_t(z,1)   = T(4);
        T_m5_t(z,1)   = T(5);
        T_m6_t(z,1)   = T(6);
        T_m7_t(z,1)   = T(7);
        T_m8_t(z,1)   = T(8);
        T_m9_t(z,1)   = T(9);
    ms_t(z,1)        = ms;           % Massa uap air tersublimasi
    mvdot_t(z,1)     = mvdot;       % Laju massa uap air tersublimasi
    mkdot_t(z,1)     = mkdot;       % Laju massa uap air ter_desublimasi
    m_v_t(z,1)       = m_v;         % Massa uap air pada ruang pengering
    ha(z,1)          = ha_a;        % Koeffisien konveksi
    hm(z,1)          = hm_aw;       % Koeffisien mass transfer
    Ps_a(z,1)        = Psat_a;      % Tekanan saturasi udara ruang pengering
    Ps_w(z,1)        = Psat_w;      % Tekanan saturasi permukaan material
    Pv(z,1)          = Pv_a;        % Tekanan partial uap air pada udara
    Pa_a_t(z,1)      = Pa_a;        % Tekanan ruang pengering
    Qk_t(z,1)        = Qkonv;       % Energi heat transfer
    Qm_t(z,1)        = Qmv;         % Energi akibat mass transfer
    Qmk_t(z,1)       = Qmk;         % Energi desublimasi
    Qt_t(z,1)        = Q_t;         % Energi total setiap waktu
    Qtot_t           = Q_tot;       % Energi total selama proses
    L_t(z,1)         = L;           % Ketebalan air
    Les_t(z,1)       = Les;         % Ketebalan es
    Ls_t(z,1)        = Ls;         % Penambahan ketebalan sublimasi
    Les_s_t(z,1)     = Les_s;       % Ketebalan es total
    % Data Yang di tampilkan
    t
    if L_as <= (b_es)
    break
    end
end

```

```

end
T
T_r
% Save Data
    c_t=
[t_all,tt_c,tt_es,tt_s,tt_TK,T_r_t,T_m_t,mvdot_t,mkdot_t,m_v_t,ha,
hm,Ps_a,Ps_w,Pv,Qk_t,Qm_t,Qmk_t,Qt_t,L_t,Les_t,Ls_t,Les_s_t];
Temp_m_t=[T_m1_t,T_m2_t,T_m3_t,T_m4_t,T_m5_t,T_m6_t,T_m7_t,T_m8_t,
T_m9_t];
    savefile_t = 'A2_B7_C40_D3_SB.txt';
    savefile_Te = 'Temp_A2_B7_C40_D3_SB.txt';
    save(savefile_t,'c_t','-ASCII');
    save(savefile_Te,'Temp_m_t','-ASCII');
% Hasil yang di tampilkan
    jt_c = t_ct/3600;
    jt_es = t_est/3600;
    jt_s = t_s/3600;
    jt = t/3600;
fprintf('Waktu proses cooling (Jam)=%8.3f\n',jt_c);
fprintf('Waktu proses freezing (Jam)=%8.3f\n',jt_es);
fprintf('Waktu proses sublimasi (Jam)=%8.3f\n',jt_s);
fprintf('Waktu proses pengeringan(Jam)=%8.3f\n',jt);
% Plot grafik
    tp = t_all;
    itp = tp/3600;
    upe = T_r_t;
    ute = T_m_t;
    ums_t = ms_t;
    umvdot = mvdot_t;
    um_v_t = m_v_t;
    uPs_a = Ps_a;
    uPs_w = Ps_w;
    uPv = Pv;
    uQk_t = Qk_t;
    uQm_t = Qm_t;
    uQt_t = Qt_t;
    uL_t = L_t;
    uLes_t = Les_t;
    uLs_t = Ls_t;
    uLes_s_t = Les_s_t;
% grafik temperatur material fungsi waktu(total)
    nfig = nfig+1; figure(nfig)
    figure(1)
    lg1 = sprintf('T bahan node ke %3.0f',mx);
    lg2 = sprintf('T ruang');
    plot(itp,ute,'r-','LineWidth',2); hold on
    plot(itp,upe,'m-','LineWidth',2); hold on
    title('VFD_1D: Grafik Perubahan Temperatur terhadap waktu')
    grid,xlabel('waktu (jam)'),ylabel('Temperatur (C)')
    legend(char(lg1),char(lg2),'Location','Best')
% grafik massa terevaporasi/ tersublimasi fungsi waktu (total)
    nfig = nfig+1; figure(nfig)
    figure(2)
    lg1 = sprintf('mvdot');
    plot(itp,umvdot,'r-','LineWidth',2); hold on
    title('VFD_1D: Grafik massa terevaporasi fungsi waktu')
    grid,xlabel('Waktu (jam)'),ylabel('massa terevaporasi (kg/s)')
    legend(char(lg1),'Location','Best')

```

```

% grafik massa terevaporasi/ tersublimasi fungsi waktu (total)
nfig = nfig+1; figure(nfig)
figure(3)
lg1 = sprintf('ms');
plot(itp,ums_t,'r-','LineWidth',2); hold on
title('VFD_1D: Grafik massa tersublimasi terhadap waktu')
grid,xlabel('Waktu (jam)'),ylabel('massa sublimasi(kg)')
legend(char(lg1),'Location','Best')
% grafik perubahan ketebalan air, es dan sublimasi fungsi waktu
nfig = nfig+1; figure(nfig)
figure(4)
lg1 = sprintf('L_t');
plot(itp,uL_t,'r-','LineWidth',2); hold on
title('VFD_1D: Grafik Ketebalan air')
grid,xlabel('Time (jam)'),ylabel('Tebal (m)')
legend(char(lg1),'Location','Best')
% grafik perubahan ketebalan es dan sublimasi fungsi waktu
nfig = nfig+1; figure(nfig)
figure(5)
lg1 = sprintf('Les_t');
plot(itp,uLes_t,'r-','LineWidth',2); hold on
title('VFD_1D: Grafik Ketebalan es')
grid,xlabel('Time (jam)'),ylabel('Tebal (m)')
legend(char(lg1),'Location','Best')
% grafik perubahan ketebalan air, es dan sublimasi fungsi waktu
nfig = nfig+1; figure(nfig)
figure(6)
lg1 = sprintf('Les_s_t');
plot(itp,uLes_s_t,'b-','LineWidth',2); hold on
title('VFD_1D: Grafik Ketebalan es dan sublimasi')
grid,xlabel('Time (jam)'),ylabel('Tebal (m)')
legend(char(lg1),'Location','Best')

```

#### Sub program menghitung nilai dx

```

function [dx] = nilai_dx(m,L,p)
b_y = (((2*p-m)*L)/(2*p)) / ((1.5*m) - (0.5*m*m));
a_y = (L/((m-1)*p))- b_y;
dx = zeros (m-1,1);
for i = 1 : m-1 %baris
dx(i,1) = ( a_y * i) + b_y;
end
end

```

#### Sub program menghitung nilai volume tiap node

```

function [Vol] = nilai_Voll(r,dx,m)
% Menghitung volume tiap node
for i=1:m-1
Vol (i,1) = 3.14*( r^2) * dx(i);
end
end

```

#### Sub program menghitung nilai tekanan saturasi

```

function Psat = nilai_Psat (T)% Source: ASHRAE FUNDAMENTAL,
Tabs = T + 273.15;
C1 = -5.6745359E+03;
C2 = 6.3925247E+00;
C3 = -9.6778430E-03;
C4 = 6.2215701E-07;

```

```

C5 = 2.0747825E-09;
C6 = -9.4840240E-13;
C7 = 4.1635019E+00;
C8 = -5.8002206E+03;
C9 = 1.3914993E+00;
C10= -4.8640239E-02;
C11= 4.1764768E-05;
C12= -1.4452093E-08;
C13= 6.5459673E+00;
if Tabs <= 273.15
Psat=(exp((C1/Tabs)+C2+(C3*Tabs)+(C4*Tabs^2)+(C5*Tabs^3)+(C6*Tabs^4)+(C7*log(Tabs))))/1000;
else
Psat=(exp((C8/Tabs)+C9+(C10*Tabs)+(C11*Tabs^2)+(C12*Tabs^3)+(C13*log(Tabs))))/1000;
end
end

```

#### Sub program menghitung nilai koefisien konveksi mass transfer

```

function hm_aw = nilai_hm_aw (T_r,r,Pa_a,rho_va,rho_vw)
T_rabs = T_r + 273.15;
D_AB = ((0.926/(Pa_a))*((T_rabs^2.5)/(T_rabs+245)))*1e-6;
rho_a=(1.51741E-05*T_r^2)+(-0.004716749*T_r)+1.290225342;
mi_a=(4.91551E-08*T_r)+1.72221E-05;
Area = 3.14*r*r;
Kell = 2*3.14*r;
LL= Area/Kell;
Sc = (mi_a*rho_a)/D_AB;
Gr_AB = ((LL^3)*(rho_a)*9.81*(abs(rho_va-rho_vw)))/(mi_a^2);
Ra = Sc *Gr_AB;
Sh = (0.27*Ra^(1/3));
hm_aw = Sh*D_AB/LL;
end

```

#### Sub program menghitung nilai entalpi evaporasi

```

function hfg = nilai_hfg (T)
a1 = 2500.93;
a2 = -2.3609;
a3 = 4.08E-04;
hfg = (a1+(a2*T)+(a3*T^2))*1000;
end

```

#### Sub program menghitung nilai entalpi sublimasi

```

function h_sg = nilai_h_sg (T)
if T <= 0
a1 = 2834.3;
a2 = -0.265;
a3 = 4.5E-03;
else
a1 = 2500.93;
a2 = -2.3609;
a3 = 4.08E-04;
end
h_sg = (a1+(a2*T)+(a3*T^2))*1000;
end

```

#### Sub program menghitung nilai entalpi sublimasi

```

function hc = nilai_hc (T)
if T <= 0

```



```

        a1 = -333.4;
        a2 = 2.11;
        a3 = 4E-03;
elseif T > 0 && T<= 25
        a1 = 0;
        a2 = 4.20763;
        a3 = 5.72917E-04;
else
        a1 = 0.380;
        a2 = 4.17716;
        a3 = 4.1667E-05;
end
        hc = (a1+(a2*T)+(a3*T^2))*1000;
end

```

**Sub program menghitung nilai koefisien konveksi heat transfer**

```

function ha_a = ha_udara1 (T_r,Pa,T,r)
T_r;
T;
XX = T_r + 273.15;
YY = T + 273.15;
Pair= Pa;
Tf = (T_r+T)/2;
rho_a=(1.51741E-05*T_r^2)+(-0.004716749*T_r)+1.290225342;
mi_a=(4.91551E-08*T_r)+1.72221E-05;
Cp_a=(0.000365458*T_r^2)+(0.015406509*T_r)+1005.919485;
k_a=(7.54139E-05*T_r)+0.024365063;
Area = 3.14*r*r;
Kell = 2*3.14*r;
afT= (Tf + 273.15);
LL= Area/Kell;
delT= abs(T_r - T);
t_eks = 1/afT;
Pr_a = (mi_a*Cp_a)/k_a;
Gr_a = ((LL^3)*(rho_a^2)*9.81*delT*t_eks)/(mi_a^2);
Ra_a = Pr_a *Gr_a;
if T_r > T
        Nu_a = 0.54*(Ra_a^(1/4));
else
        Nu_a = 0.27*(Ra_a^(1/4));
end
ha_a = Nu_a*k_a/LL;
end

```

**Sub program menghitung nilai tahanan thermal saat cooling dan sublimasi**

```

function [R] = nilai_R_im(m,ha_a,r,k_w,dx)
%Menghitung Nilai Tahanan R
R = zeros(m,2);
% Mencari nilai R (i,1)
R(1,1) = (1/(ha_a*3.14 * (r^2)))+((dx(1)/2)/(k_w(1)*3.14*(r^2))) ;
for i = 2:m-1
R(i,1) = (( dx(i-1)+dx(i))/2) / ( k_w(i) * 3.14 * (r^2));
end
% Mencari nilai R (i,2)
R(1,2) = ((dx(1)+dx(2))/2) / ( k_w(i) * 3.14 * (r^2) );
for i = 2:m-2
R(i,2) = ((dx(i)+ dx(i+1))/2) / ( k_w(i) * 3.14 * (r^2) );
end

```

```
R(m-1,2) = (dx(m-1)/2) / ( k_w(m-1) * 3.14 * (r^2) );
end
```

### Sub program menghitung nilai tahanan thermal saat freezing

```
function [R] = nilai_R_freezing(m,ha_es,r,k,dx_es,dx)
%Menghitung Nilai Tahanan R di es
R = zeros((2*m)-3,2);
%Mencari nilai R (1,1) & R (1,2)
R(1,1) = (1/(ha_es*3.14*(r^2)))+(dx_es(1)/2)/(k(1)*3.14*(r^2));
R(1,2) = ((dx_es(1)+dx_es(2))/2) / ( k(1) * 3.14 * (r^2) );
for i = 2:m-3
R(i,1) = (( dx_es(i-1)+dx_es(i))/2) / ( k(i) * 3.14 * (r^2));
R(i,2) = ((dx_es(i)+ dx_es(i+1))/2) / ( k(i) * 3.14 * (r^2) );
end
R(m-2,1) = (( dx_es(m-3)+dx_es(m-2))/2)/( k(m-2) * 3.14 * (r^2));
R(m-2,2) = (( dx_es(m-2)/2)+dx_es(m-1))/( k(m-2) * 3.14 * (r^2));
R(m-1,1) = ((dx_es(m-2)/2)+dx_es(m-1))/( k(m-1) * 3.14 * (r^2));
%Menghitung Nilai Tahanan R di air
R(m-1,2) = (dx(1)/(k(m-1)*3.14*(r^2)))+(dx(2)/(2*k(m)*3.14*(r^2)));
R(m,1) = (dx(1)/(k(m-1)*3.14*(r^2)))+( dx(2)/(2*k(m)*3.14*(r^2)));
R(m,2) = ((dx(2)+ dx(3))/2) / ( k(m) * 3.14 * (r^2) );
for i = m+1:(2*m)-4
R(i,1) = ((dx(i-(m-1))+dx(i-(m-2)))/2) / ( k(i) * 3.14 * (r^2));
R(i,2) = ((dx(i-(m-2))+dx(i-(m-3)))/2)/(k(i)*3.14*(r^2) );
end
R((2*m)-3,1) = ((dx(m-2)+dx(m-1))/2)/(k((2*m)-3) * 3.14 * (r^2));
R((2*m)-3,2) = (dx(m-1)/2) / ( k((2*m)-3) * 3.14 * (r^2) );
end
```

### Sub program menyelesaikan persamaan dengan eliminasi gauss

```
function[X]=eliminasiG(MA,MB,n)
% OperasiBaris
for k=1:n-1
for i=k+1:n
if MA(i,k)~=0
lambda=MA(i,k)/MA(k,k);
for j=1:n
MA(i,j)=MA(i,j)-lambda*MA(k,j);
end
MB(i)=MB(i)-lambda*MB(k);
end
end
end
% SubstitusiMundur
for i=n:-1:1
sum = 0;
X(i) = 0;
for j=1:n
sum = sum+MA(i,j)*X(j);
end
X(i) = (MB(i)-sum)/MA(i,i);
end
end
```