

Model Simulasi Pengering Beku Vakum dengan Kombinasi Pembekuan Internal dan Pemanfaatan Panas Buang Kondenser

Engkos Achmad Kosasih, Muhammad Idrus Alhamid dan Achmad Maswan

Universitas Indonesia
Departemen Teknik Mesin FT UI, Depok, 16424
kos.sri@gmail.com

Abstrak

Pengeringan dengan menggunakan pengering beku vakum mempunyai banyak kelebihan, tetapi mempunyai kendala di dalam waktu proses yang lama maupun konsumsi energinya yang tinggi. Inovasi untuk mengurangi waktu pembekuan adalah dengan menggabungkan antara pendinginan dan pembekuan vakum, tetapi produk yang dihasilkan akan mengalami penurunan kualitas. Alternatif metode didalam pembekuan vakum adalah dengan melakukan pemvakuman setelah produk terbentuk lapisan es. Sedangkan inovasi didalam mengurangi waktu proses pengeringan adalah dengan menaikkan temperatur permukaan produk dengan memanfaatkan panas terbuang dari kondenser. Model simulasi numerik beda hingga satu dimensi dengan kondisi batas tetap dan bergerak dikembangkan untuk memprediksikan pengaruh temperatur dan tekanan ruang serta ketebalan es saat dilakukan pemvakuman terhadap waktu proses pengering beku vakum. Hasil simulasi menunjukkan dengan memperkecil tekanan ruang pengering, menaikkan temperatur ruang pengering serta mempercepat saat dilakukan pemvakuman akan mengurangi waktu penggunaan pompa vakum dan waktu proses pengering beku vakum.

Keywords: numerik, perpindahan panas dan massa, pengeringan beku vakum, panas buang kondenser, *double* evaporator,

Pendahuluan

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). Tetapi pengering beku vakum mempunyai kekurangan dalam waktu proses yang lama dan konsumsi energi yang tinggi. Penelitian-penelitian saat ini memfokuskan inovasi pada pengurangan penggunaan energi, dan laju proses pengeringan beku baik itu di tahap pembekuan maupun tahap sublimasi. Pada proses pembekuan inovasi di lakukan dengan berbagai metode diantaranya dengan menggabungkan 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 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 vakum untuk media berpori. Beberapa penelitian 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 ke daerah 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 pembentukan 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 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 kombinasi pompa vakum dan sistem refrigerasi (pembekuan internal) untuk menurunkan tekanan dan temperatur material di dalam ruang 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 sebagai media pemanas untuk mempercepat waktu pengeringan.

Untuk menganalisa proses pengeringan beku vakum ini perlu dikembangkan model perhitungan numerik yang dapat digunakan untuk mensimulasi berbagai kondisi operasi dari proses pengering

beku vakum ini. Model simulasi ini digunakan untuk mengetahui pengaruh dari temperatur dan tekanan ruang serta ketebalan es saat dilakukan pemvakuman terhadap waktu proses pengering beku vakum dan waktu pemakaian pompa vakum. Pembuatan model simulasi ini nantinya juga di harapkan dapat di gunakan sebagai gambaran di dalam menentukan kondisi operasi mesin pengering beku vakum sehingga akan di dapatkan kondisi operasi yang paling efisien waktu proses dan kebutuhan energi pengering beku vakum.

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.

2.1 Perpindahan panas

Perpindahan panas dapat dianalogikan dengan listrik dimana laju perpindahan panas dapat dipandang sebagai aliran, sedang gabungan dari konduktivitas 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:

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

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

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

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

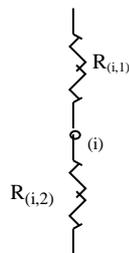
$$Nu = \frac{h_k La}{k} \quad (2.4)$$

Sedangkan besarnya nilai Nuselt merupakan korelasi nilai Rayleigh.

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. Nilai koefisien radiasi (h_r) didapat 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 1.



Gambar 1. Skema tahanan thermal setiap node

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).

Sedangkan tahanan thermal konduksi arah axial dituliskan sebagai berikut:

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

Sedangkan tahanan thermal konveksi arah axial dituliskan sebagai berikut:

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

2.2. Perpindahan massa

Parameter non dimensi pada perpindahan massa setara dengan perpindahan panas (Ashim K. Datta, 2002), hubungan parameter non dimensi perpindahan massa dengan perpindahan panas dapat di lihat pada tabel-1. Sedangkan massa uap air di udara yang terdiffusi di dekati dengan

persamaan empiris (sherwod dan Pigford, dalam ASHRAE handbook, 1997).

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

Dimana P adalah tekanan dalam kPa dan T_K adalah temperatur dalam Kelvin.

Tabel 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>
$Sh = \frac{h_m L}{D_{AB}} = \frac{\frac{L}{D_{AB}}}{\frac{1}{h_m}} = \frac{\text{diffusive resistance}}{\text{convective resistance}}$	$Nu = \frac{hL}{k_{fluid}} = \frac{\frac{L}{h}}{\frac{1}{h}} = \frac{\text{conductive resistance}}{\text{convective resistance}}$
<i>Grashof number¹</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:

$$\dot{Q}_{bawah} + \dot{Q}_{atas} + \dot{Q}_{gen} = \Delta Q_{elemen}/\Delta t \quad (2.9)$$

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

$$\left(\left(\frac{T_{(i-1)} - T_{(i)}}{R_{(i,1)}} \right) + \left(\frac{T_{(i+1)} - T_{(i)}}{R_{(i,2)}} \right) + \dot{Q}_{gen} \right) = \rho \cdot Cp \cdot Vol_{(i)} \cdot \frac{T_{(i)}^+ - T_{(i)}}{dt} \quad (2.10)$$

Dimana ρ adalah densitas dalam kg/m^3 , C_p adalah panas spesifik J/kg K dan dt adalah perubahan waktu dalam detik.

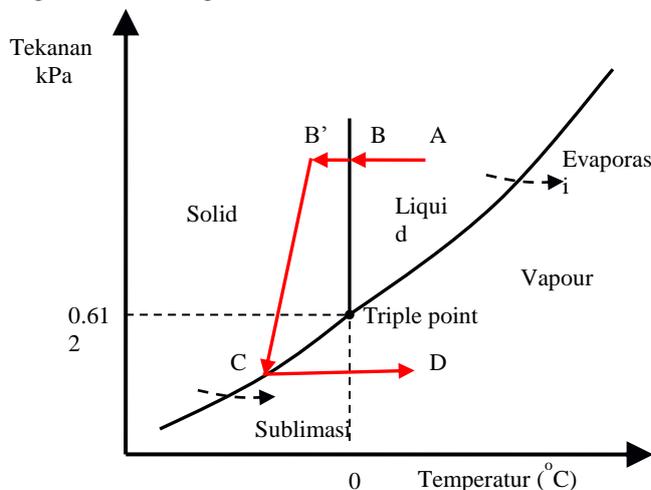
3. Metodologi

Model simulasi ini menggunakan perhitungan numerik satu dimensi dengan menggunakan persamaan dasar perpindahan panas dan massa. Program simulasi ini di buat 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 saat sublimasi pada ruang pengering terhadap waktu proses pengeringan, laju pembekuan, dan laju massa yang terdiffusi pada pengering beku vakum dengan mengkombinasikan pembekuan internal dan pemanfaatan panas buang kondenser dengan kondisi batas di produk yang akan dikeringkan. Pada model simulasi ini, asumsi yang digunakan sebagai berikut:

- Produk yang akan di keringkan merupakan air.
- Pada sisi dan bawah dinding tempat produk yang akan di keringkan diasumsikan terisolasi sempurna.
- Pada saat pevakuhan, tekanan partial uap air sama dengan tekanan ruang pengering.

3.1 Model Simulasi

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.



- A - B = proses pendinginan (sistem refrigerasi)
- B - B' = proses pembekuan (sistem refrigerasi)
- B' - C = proses pembekuan vakum (pompa vakum + pemanas)
- C - D = proses sublimasi (pompa vakum + pemanas)

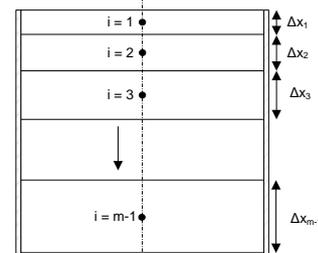
Gambar 2. Skema proses pengering beku vakum

Permodelan ini terdiri dari 3 proses perhitungan (gambar 2).

- Tahap pendinginan (*cooling*)
Pada tahap ini terjadi penurunan temperatur permukaan produk sampai 0°C (A - B') dan terjadi pembentukan es saat pertama kali. Pada tahap ini menggunakan sistem refrigerasi yang di gunakan adalah
- Tahap pembentukan es (*freezing*)
Pada tahap ini terdapat 2 tahap proses. Tahap 1 proses pembentukan es sampai ketebalan es tertentu (Les 1, 3 dan 5.4 mm) dengan menggunakan sistem refrigerasi (B' - B). Tahap 2 proses pembentukan es dengan menggunakan pompa vakum dan memanfaatkan panas buang kondenser (B - C). Pada tahap ini proses pembentukan lapisan es 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 ruang pengering ke produk (C - D).

3.2 Kondisi Batas

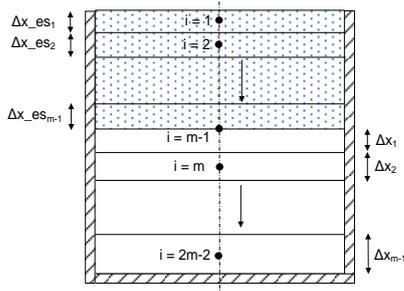
Pada proses pendinginan pembagian node dapat dilihat pada gambar 3, dimana jarak antara node pada arah axial semakin melebar kearah dinding. Selama proses pendinginan jarak antara node adalah tetap sampai terbentuk lapisan es.



Gambar 3. Pembagian node saat tahap pendinginan

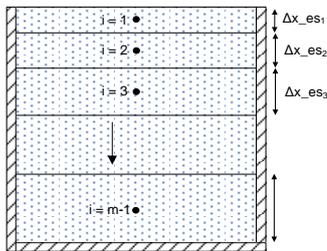
Setelah terbentuk lapisan es maka kondisi batas menjadi dua lapis dan bergerak dimana kondisi batas dari lapisan es akan bertambah sedangkan kondisi batas dari cairan (air) akan berkurang. Sedangkan pembagian node menjadi 9 node untuk lapisan es dan 10 node untuk lapisan air. Dimana pada node di lapisan batas antara es dan air di jadikan satu node dengan temperatur yang tetap pada 0°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 4.



Gambar 4. Pembagian node saat tahap pembekuan

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 5.



Gambar 5. Pembagian node saat tahap sublimasi

3.3 Pengembangan Model Matematis

Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan jarak antar node $dx_{(i)}$ setiap node dalam (m) adalah:

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

Dimana untuk proses pendinginan $ax = \frac{L}{(m-1)p} - bx$ sedangkan nilai $bx = \frac{(2.p-n).L/2.p}{(1.5.n - 0.5n^2)}$ dengan p faktor pembagi dan i jumlah node di kurangi satu dan L ketebalan produk yang di keringkan dalam (m). Sedangkan untuk proses pembekuan kondisi batas di bagi menjadi dua bagian yaitu daerah es dan daerah air. Dimana persamaan yang di gunakan untuk pembagian jarak node untuk es $dx_{es(i)}$ sama dengan persamaan 3.1 dengan $ax = \frac{L_{es}^+}{(m-1)p} - bx$ sedangkan nilai $bx = \frac{(2.p-n).L_{es}^+/2.p}{(1.5.n - 0.5n^2)}$ dengan p faktor pembagi dan i jumlah node di kurangi satu dan ketebalan es baru adalah $L_{es}^+ = L_{es} + \Delta L_{es}$ untuk proses pembekuan dalam (m).

Sedangkan untuk pembekuan vakum $L_{es}^+ = L_{es} +$

$\Delta L_{es} - \Delta L_s$ dengan ΔL_s merupakan perubahan ketebalan lapisan es tersublimasi (m), dan ΔL_{es} merupakan penambahan ketebalan lapisan es (m). Sedangkan untuk daerah air $ax = \frac{L^+}{(m-1)p} - bx$ sedangkan nilai $bx = \frac{(2.p-n).L^+/2.p}{(1.5.n - 0.5n^2)}$ dengan p faktor pembagi dan i jumlah node di kurangi satu dan ketebalan lapisan es baru $L^+ = L - \Delta L$, dengan ΔL merupakan pengurangan ketebalan lapisan air (m). Sedangkan untuk proses pengeringan/ sublimasi kondisi batas menjadi satu lapis. Dimana persamaan yang di gunakan untuk pembagian jarak node untuk es $dx_{es(i)}$ sama dengan persamaan 3.1 dengan $ax = \frac{L_{es}^+}{(m-1)p} - bx$ sedangkan nilai $bx = \frac{(2.p-n).L_{es}^+/2.p}{(1.5.n - 0.5n^2)}$ dengan p faktor pembagi dan i jumlah node di kurangi satu dan $L_{es}^+ = L_{es} - \Delta L_s$.

Menghitung tahanan thermal

Pada setiap node akan di pengaruhi oleh temperatur sebelum dan sesudah node tersebut sehingga tahanan thermal pada setiap node terdiri dari 2 tahanan termal yaitu atas dinotasikan 1 dan bawah di notasikan 2.

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 $i=2:m-1$

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

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

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 termodinamika dan jumlah node ($i = 1 : 2m-2$). Dimana untuk daerah es properties yang di gunakan adalah properties es sedangkan untuk daerah air properties yang di gunakan adalah air.

Node es yang berbatasan dengan lapisan es dan air

$$R_{(m-2,1)} = \left(\frac{dx_{es(m-3)} + dx_{es(m-2)}}{2 \cdot k_{es} \cdot \pi \cdot r^2} \right) \quad (3.6)$$

$$R_{(m-2,2)} = \left(\frac{dx_{es(m-2)}}{2 \cdot k_{es} \cdot \pi \cdot r^2} \right) + \left(\frac{dx_{es(m-1)}}{k_{es} \cdot \pi \cdot r^2} \right) \quad (3.7)$$

Node batas lapisan es dan air

$$R_{(m-1,1)} = \left(\frac{dx_{es(m-2)}}{2.k_{es}.\pi.r^2} \right) + \left(\frac{dx_{es(m-1)}}{k_{es}.\pi.r^2} \right) \quad (3.8)$$

$$R_{(m-1,2)} = \left(\frac{dx_{(1)}}{k_w.\pi.r^2} \right) + \left(\frac{dx_{(2)}}{2.k_w.\pi.r^2} \right) \quad (3.9)$$

Node air yang berbatasan dengan lapisan es dan air

$$R_{(m,1)} = \left(\frac{dx_{(1)}}{k_w.\pi.r^2} \right) + \left(\frac{dx_{(2)}}{2.k_w.\pi.r^2} \right) \quad (3.10)$$

$$R_{(m,2)} = \left(\frac{dx_{(2)}+dx_{(3)}}{2.k_w.\pi.r^2} \right) \quad (3.11)$$

Persamaan yang di gunakan untuk menghitung tahanan thermal untuk tahap pengeringan/ sublimasi sama dengan tahanan thermal pada saat pendinginan dengan nilai properties termodinamika es dan jarak node pada saat sublimasi. Dimana pada persamaan 3.2 s/d 3.11 nilai h_a adalah koefisien perpindahan panas, k_w koefisien konduksi dari air, k_{es} koefisien konduksi dari es $dx_{(i)}$ jarak node pada daerah air, $dx_{es(i)}$ jarak node pada daerah es.

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

$$\sum 1/R_i = \frac{1}{R_{(i,1)}} + \frac{1}{R_{(i,2)}} \quad (3.12)$$

Dan persamaan untuk menghitung volume pada setiap node ($Vol_{(i)}$)

$$Vol_{(i)} = \pi.r^2 . dx_{(i)} \quad (3.13)$$

Sedangkan untuk volume lapisan batas es dan air

$$Vol = \pi.r^2 . (dx + dx_{es}) \quad (3.14)$$

$$Vol_{(i)} = \pi.r^2 . dx_{es(i)} \quad (3.15)$$

Menghitung massa terevaporasi, dan ter sublimasi. Massa terevaporasi (kg/s):

$$\begin{aligned} \dot{m}_{mv} &= h_{ma} . \pi . r^2 . (\rho_{vw} - \rho_{va}) \quad RH < 100\% \\ \dot{m}_{mv} &= 0 \quad RH \geq 100\% \end{aligned} \quad (3.16)$$

Massa yang tersublimasi (kg/s)

$$\begin{aligned} \dot{m}_{ms} &= h_{ma} . \pi . r^2 . (\rho_{vw} - \rho_{va}) \quad P_{sat_w} > P_{va} \\ \dot{m}_{ms} &= 0 \quad P_{sat_w} \leq P_{va} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Dimana nilai h_{ma} adalah koefisien konveksi perpindahan massa (m/s), ρ_{vw} densitas uap air permukaan produk pada tekanan saturasi (kg/m^3), ρ_{va} densitas partial uap air udara (kg/m^3), RH kelembaban relatif ruang pengering, P_{sat_w} tekanan saturasi air pada permukaan produk (kPa), dan P_{va} tekanan partial uap air (kPa).

Menghitung Energi massa terevaporasi, dan ter sublimasi.

Energi perpindahan massa akibat evaporasi (joule/dt)

$$\dot{Q}_{mv} = \dot{m}_{mv} . h_{fg} \quad (3.18)$$

Energi perpindahan massa akibat sublimasi (joule/dt)

$$\dot{Q}_{ms} = \dot{m}_{ms} . h_{sg} \quad (3.19)$$

Dimana h_{fg} adalah kalor laten penguapan (joule/kg) dan h_{sg} kalor laten sublimasi.

Persamaan energi untuk keseimbangan panas dan massa Untuk proses pendinginan pada node 1

$$\begin{aligned} \left(\frac{Tr^+ - T_{(1)}^+}{R_{(1,1)}} \right) + \left(\frac{(T_{(2)}^+ - T_{(1)}^+)}{R_{(1,2)}} \right) + \dot{Q}_{mv} = \\ Cp_w . \rho_w . Vol_{(1)} \left(\frac{T_{(1)}^+ - T_{(1)}}{dt} \right) \end{aligned} \quad (3.20)$$

Pada node i=2:m-1

$$\begin{aligned} \left(\frac{T_{(i-1)}^+ - T_{(i)}^+}{R_{(i,1)}} \right) + \left(\frac{(T_{(m+1)}^+ - T_{(i)}^+)}{R_{(i,2)}} \right) = \\ Cp_w . \rho_w . Vol_{(i)} \left(\frac{T_{(i)}^+ - T_{(i)}}{dt} \right) \end{aligned} \quad (3.21)$$

Untuk proses pembekuan pada node 1

$$\begin{aligned} \left(\frac{Tr^+ - T_{(1)}^+}{R_{(1,1)}} \right) + \left(\frac{(T_{(2)}^+ - T_{(1)}^+)}{R_{(1,2)}} \right) + \dot{Q}_{ms} = \\ Cp_{es} . \rho_{es} . Vol_{(1)} \left(\frac{T_{(1)}^+ - T_{(1)}}{dt} \right) \end{aligned} \quad (3.22)$$

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

Pada node i=2:m-8 dan i=m:2m-2

$$\left(\frac{T_{(i-1)}^+ - T_{(i)}^+}{R_{(i,1)}} \right) + \left(\frac{(T_{(i+1)}^+ - T_{(i)}^+)}{R_{(i,2)}} \right) = Cp . \rho . Vol_{(i)} \left(\frac{T_{(i)}^+ - T_{(i)}}{dt} \right) \quad (3.23)$$

Pada node lapisan batas i=m-1

$$\begin{aligned} \left(\frac{T_{(i-1)}^+ - T_{(i)}^+}{R_{(i,1)}} \right) + \left(\frac{(T_{(i+1)}^+ - T_{(i)}^+)}{R_{(i,2)}} \right) + \dot{Q}_{gen} = \\ Cp_{es} . \rho_{es} . Vol_{(i)} \left(\frac{T_{(i)}^+ - T_{(i)}}{dt} \right) \end{aligned} \quad (3.24)$$

Untuk proses sublimasi pada node 1

$$\begin{aligned} \left(\frac{Tr^+ - T_{(1)}^+}{R_{(1,1)}} \right) + \left(\frac{(T_{(2)}^+ - T_{(1)}^+)}{R_{(1,2)}} \right) + \dot{Q}_{ms} = \\ Cp_{es} . \rho_{es} . Vol_{(1)} \left(\frac{T_{(1)}^+ - T_{(1)}}{dt} \right) \end{aligned} \quad (3.25)$$

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

Pada node i=2:m-1

$$\left(\frac{T_{(i-1)}^+ - T_{(i)}^+}{R_{(i,1)}} \right) + \left(\frac{(T_{(i+1)}^+ - T_{(i)}^+)}{R_{(i,2)}} \right) = Cp_{es} . \rho_{es} . Vol_{(i)} \left(\frac{T_{(i)}^+ - T_{(i)}}{dt} \right) \quad (3.26)$$

Menghitung temperatur baru T^+ ($^{\circ}C$) tiap node

Berdasarkan persamaan keseimbangan energi

perpindahan panas dan massa 3.20 s/d 3.26
temperatur baru untuk setiap node menjadi:
Untuk proses pendinginan pada node ke 1

$$\left(1 + \left(\frac{dt \cdot \sum 1/R_{(1)}}{Cp_w \cdot \rho_w \cdot Vol_{(1)}}\right)\right) \cdot T_{(1)}^+ - \left(\frac{dt}{Cp_w \cdot \rho_w \cdot Vol_{(1)} \cdot R_{(1,1)}}\right) \cdot T_{(2)}^+ = \left(\frac{dt}{Cp_w \cdot \rho_w \cdot Vol_{(1)} \cdot R_{(1,1)}}\right) \cdot Tr^+ + T_{(1)} - \dot{Q}_{mv} \quad (3.27)$$

Pada node ke 2:m-1

$$-\left(\frac{dt}{Cp_w \cdot \rho_w \cdot Vol_{(i)} \cdot R_{(i,1)}}\right) \cdot T_{(i-1)}^+ + \left(1 + \left(\frac{dt \cdot \sum 1/R_{(i)}}{Cp_w \cdot \rho_w \cdot Vol_{(i)}}\right)\right) \cdot T_{(i)}^+ - \left(\frac{dt}{Cp_w \cdot \rho_w \cdot Vol_{(i)} \cdot R_{(i,2)}}\right) \cdot T_{(i+1)}^+ = T_{(i)} \quad (3.28)$$

Pada node ke m

$$-T_{(i-1)}^+ + T_{(i)}^+ = 0 \quad (3.29)$$

Untuk proses pembekuan pada node ke 1

$$\left(1 + \left(\frac{dt \cdot \sum 1/R_{(1)}}{Cp_{es} \cdot \rho_{es} \cdot Vol_{(1)}}\right)\right) \cdot T_{(1)}^+ - \left(\frac{dt}{Cp_{es} \cdot \rho_{es} \cdot Vol_{(1)} \cdot R_{(1,1)}}\right) \cdot T_{(2)}^+ = \left(\frac{dt}{Cp_{es} \cdot \rho_{es} \cdot Vol_{(1)} \cdot R_{(1,1)}}\right) \cdot Tr^+ + T_{(1)} - \dot{Q}_{ms} \quad (3.30)$$

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

Pada node ke i=2:m-3

$$-\left(\frac{dt}{Cp_{es} \cdot \rho_{es} \cdot Vol_{(i)} \cdot R_{(i,1)}}\right) \cdot T_{(i-1)}^+ + \left(1 + \left(\frac{dt \cdot \sum 1/R_{(i)}}{Cp_{es} \cdot \rho_{es} \cdot Vol_{(i)}}\right)\right) \cdot T_{(i)}^+ - \left(\frac{dt}{Cp_{es} \cdot \rho_{es} \cdot Vol_{(i)} \cdot R_{(i,2)}}\right) \cdot T_{(i+1)}^+ = T_{(i)} \quad (3.31)$$

Pada node ke i=m-2

$$-\left(\frac{dt}{Cp_{es} \cdot \rho_{es} \cdot Vol_{(i)} \cdot R_{(i,1)}}\right) \cdot T_{(i-1)}^+ + \left(1 + \left(\frac{dt \cdot \sum 1/R_{(i)}}{Cp_{es} \cdot \rho_{es} \cdot Vol_{(i)}}\right)\right) \cdot T_{(i)}^+ - 0 = T_{(i)} \quad (3.32)$$

Pada node ke i=m-1

$$\left(\frac{1}{R_{(i,1)}}\right) T_{(i-1)}^+ + Q_{gen} + \left(\frac{1}{R_{(i,2)}}\right) T_{(i+1)}^+ = 0 \quad (3.33)$$

Pada node ke i=m

$$0 + \left(1 + \left(\frac{dt \cdot \sum 1/R_{(i)}}{Cp_w \cdot \rho_w \cdot Vol_{(i)}}\right)\right) \cdot T_{(i)}^+ - \left(\frac{dt}{Cp_w \cdot \rho_w \cdot Vol_{(i)} \cdot R_{(i,1)}}\right) \cdot T_{(i+1)}^+ = T_{(i)} \quad (3.34)$$

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

$$-\left(\frac{dt}{Cp_w \cdot \rho_w \cdot Vol_{(i)} \cdot R_{(i,1)}}\right) \cdot T_{(i-1)}^+ + \left(1 + \left(\frac{dt \cdot \sum 1/R_{(i)}}{Cp_w \cdot \rho_w \cdot Vol_{(i)}}\right)\right) \cdot T_{(i)}^+ - \left(\frac{dt}{Cp_w \cdot \rho_w \cdot Vol_{(i)} \cdot R_{(i,2)}}\right) \cdot T_{(i+1)}^+ = T_{(i)} \quad (3.35)$$

Pada node ke i=2m-2

$$-T_{(i-1)}^+ + T_{(i)}^+ = 0 \quad (3.36)$$

Untuk proses pengeringan pada node 1

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

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

Pada node i=2:m-1

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

Penyelesaian persamaan temperatur baru

Penyelesaian persamaan 3.27 s/d 3.38 dengan membuat matrik diagonal, kemudian dari matrik tersebut diselesaikan dengan eliminasi gaus.

Dimana nilai $A(i) = \frac{dt}{Cp_w \cdot \rho_w \cdot Vol_{(i)} \cdot R_{(i,1)}}$, $B(i) = 1 + \frac{dt \cdot \sum 1/R_{(i)}}{Cp_w \cdot \rho_w \cdot Vol_{(i)}}$ dan $C(i) = \frac{dt}{Cp_w \cdot \rho_w \cdot Vol_{(i)} \cdot R_{(i,2)}}$

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 (3.20) maka persamaan untuk mendapatkan \dot{Q}_{gen} menjadi:

Untuk node ke 1

$$\dot{Q}_{gen} + \left(\frac{1}{R_{(1,2)}}\right) T_{(2)}^+ = \left(\frac{1}{R_{(1,1)}}\right) Tr^+ - \dot{Q}_{mv} \quad (3.39)$$

Untuk node ke 2

$$0 + \left(1 + \left(\frac{dt \cdot \sum 1/R_{(2)}}{Cp_w \cdot \rho_w \cdot Vol_{(2)}}\right)\right) \cdot T_{(2)}^+ - \left(\frac{dt}{Cp_w \cdot \rho_w \cdot Vol_{(2)} \cdot R_{(2,2)}}\right) \cdot T_{(3)}^+ = T_{(2)} \quad (3.40)$$

Untuk node ke $i = 3:m-1$, persamaan sama dengan persamaan (3.28), sedangkan untuk node ke m juga sama dengan (3.29). Sehingga untuk mendapatkan nilai \dot{Q}_{gen} di cari dari persamaan 3.41, 3.42, 3.28 dan 3.29.dengan membuat matrik diagonal, kemudian dari matrik tersebut diselesaikan dengan eliminasi gauss.

Perubahan kandungan uap air di ruang pengering

$$\Delta m_v = \frac{m_v}{Tr^+} \cdot (Tr^+ - Tr) \quad (3.41)$$

Kandungan uap air di ruang pengering

$$m_v = m_v + \Delta m_v \quad (3.42)$$

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

Menghitung ketebalan lapisan air dan es

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

$$\Delta L_{es} = \frac{(\dot{Q}_{gen}/h_{es})}{\rho_{es} \cdot \pi \cdot r^2} \cdot dt \quad (3.43)$$

Sedangkan ketebalan air menjadi:

$$\Delta L = \frac{(Q_{gen}/h_{es})}{\rho_w \cdot \pi \cdot r^2} \cdot dt \quad (3.44)$$

Pengurangan ketebalan es akibat sublimasi

$$\Delta L_s = \frac{\dot{m}_{ms} \cdot dt}{\rho_{es} \cdot \pi \cdot r^2} \quad (3.45)$$

Ketebalan es baru tanpa adanya sublimasi

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

Dengan sublimasi

$$L_{es}^+ = L_{es} + \Delta L_{es} - \Delta L_s \quad (3.47)$$

Ketebalan air baru

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

Massa yang teranti-sublimasi di *cold trap*

$$\dot{m}_{ct} = \dot{m}_{ms} - \left(\frac{\Delta m_v}{dt} \right) \quad (3.49)$$

Energi di cold trap akibat anti-sublimasi

$$\dot{Q}_{ct} = \dot{m}_{ct} \cdot h_{sg} \quad (3.50)$$

4 Hasil dan pembahasan

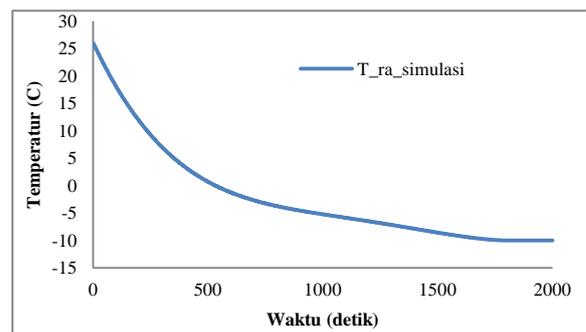
Dengan berdasarkan data awal dari pengujian yang pernah dilakukan di gunakan sebagai data referensi untuk mensimulasikan proses

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 awal proses temperatur ruang (T_{ra}) mengikuti profil pada gambar 6.
- Kelembaban relatif awal ruang pengering 75%.
- Temperatur awal produk 25 °C.
- Dimensi produk $t = 0.005$ m, diameter 0.1 m.

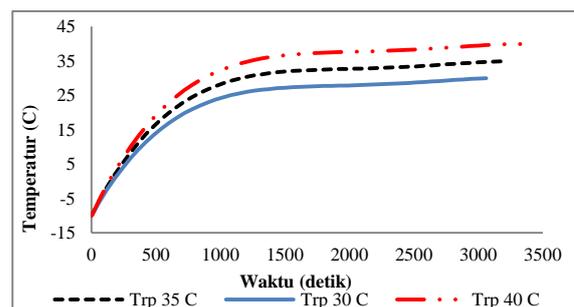
Kondisi operasi pengering beku vakum, pemanas di hidupkan bersamaan dengan pemvakuman. Sedangkan data yang akan di variasikan meliputi:

- Temperatur ruang pengering saat pemanas di hidupkan (T_{rp}) di variasikan 30°C, 35°C dan 40°C dengan mengikuti profil pada gambar 7.
- Ketebalan es saat mulai dilakukan pemvakuman yaitu 1 mm, 3 mm dan setelah semua air terbentuk es (non vakum).
- 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.



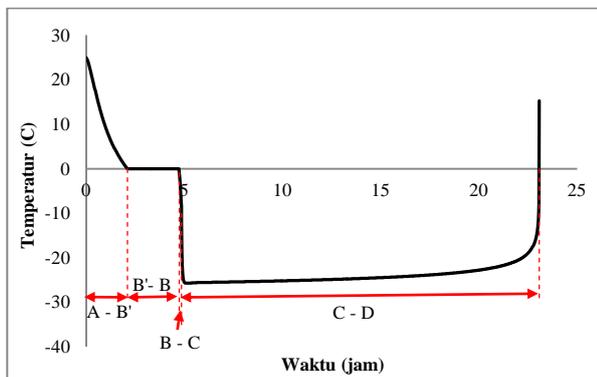
(Kosasih dkk, 2011) “telah diolah kembali”

Gambar 6. Temperatur ruang pengering saat awal proses



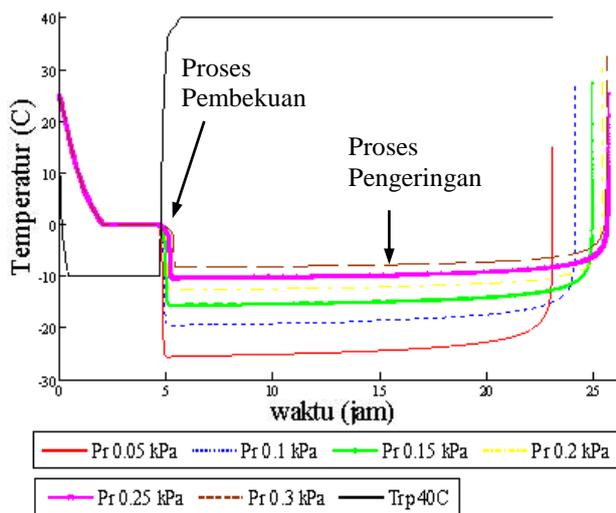
(Kosasih dkk, 2011) “telah diolah kembali”

Gambar 7. Temperatur ruang pengering saat pemanasan



Gambar 8. Temperatur produk fungsi waktu

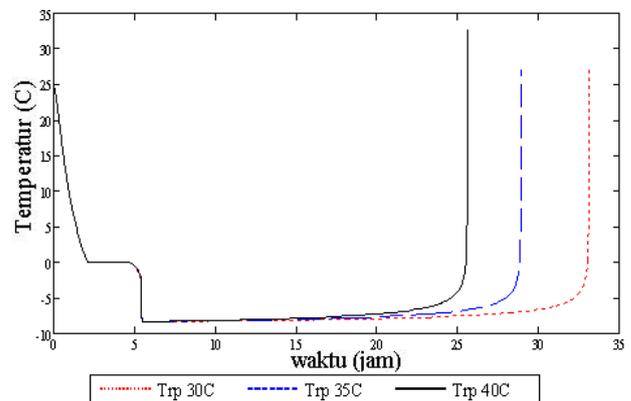
Pada gambar 8. di perlihatkan profil penurunan suhu permukaan produk terhadap waktu. Pada awal proses terjadi penurunan temperatur produk dari 25°C menjadi 0°C (A – B’) kemudian produk mulai membeku sampai ketebalan es 1 mm (B’ – B), tekanan ruang di turunkan menjadi 0.05 kPa dan temperatur ruang dikondisikan pada temperatur 40°C (B – C). Kemudian proses di lanjutkan dengan sublimasi (C – D).



Gambar 9. Temperatur produk fungsi waktu pada variasi Tekanan ruang (Pr) dan (Trp) 40°C

Pada gambar 9 di perlihatkan 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. Pada gambar 4.3 di perlihatkan profil penurunan suhu permukaan produk dengan variasi temperatur ruang pengering saat pemanasan terhadap waktu. Pada awal proses terjadi penurunan temperatur produk dari 25°C menjadi 0°C kemudian produk

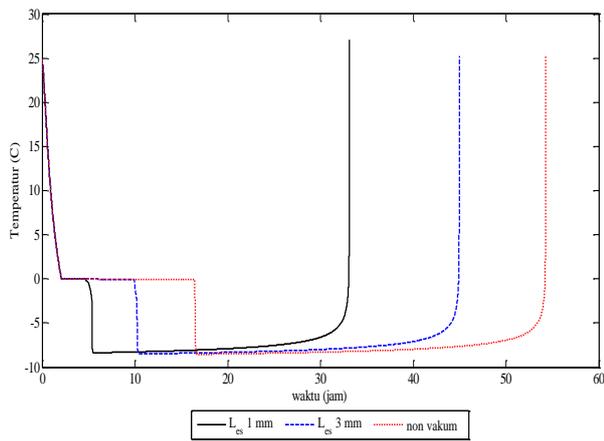
mulai membeku sampai ketebalan es 1 mm dan tekanan ruang di turunkan menjadi 0.05 kPa. Temperatur permukaan produk untuk variasi temperatur ruang pengering pada proses pembekuan bernilai hampir sama, hal ini disebabkan besarnya panas sensibel jauh lebih kecil di dibandingkan panas laten pembekuan sehingga 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.



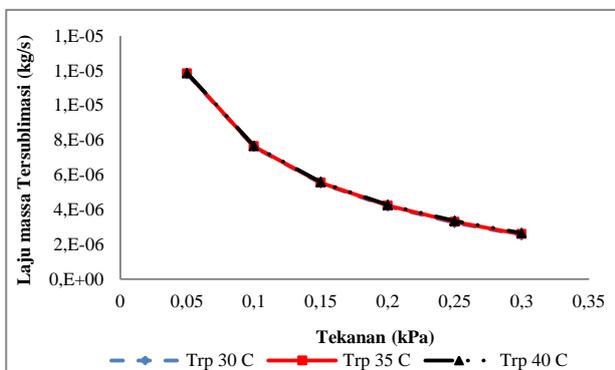
Gambar 10 Temperatur produk fungsi waktu dan temperatur ruang pada tekanan 0.5 kPa

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.

Pada gambar 4.4 di perlihatkan profil penurunan suhu permukaan produk dengan variasi saat di lakukan pemvakuman. Pada awal proses terjadi penurunan temperatur produk dari 25°C menjadi 0°C kemudian produk mulai membeku sampai ketebalan es 1 mm, 3 mm dan semua produk sudah membeku, tekanan ruang di turunkan menjadi 0.3 kPa. Temperatur permukaan saat awal pembekuan vakum yaitu pada tebal 1 mm adalah -2.1°C, tebal es 3 mm adalah -2.4°C dan tanpa vakum adalah -0.1°C, sedangkan pada saat awal pengeringan/ sublimasi temperatur permukaan produk menjadi -8.4°C untuk tebal 1 mm, -8.5°C untuk 3 mm dan -8.5°C untuk tanpa pembekuan vakum.



Gambar 11. Temperatur produk fungsi waktu dan ketebalan es saat pada tekanan 0.3 kPa

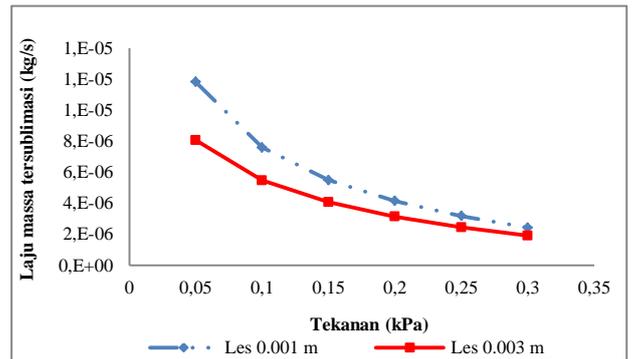


Gambar 12. Laju rata-rata massa tersublimasi selama proses pembekuan fungsi tekanan ruang pada L_{es} 1 mm saat di lakukan pemvakuman dan Trp = 30, 35 dan 40°C

Pada gambar 4.5 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 dengan 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 perlihatkan pada gambar 4.3.

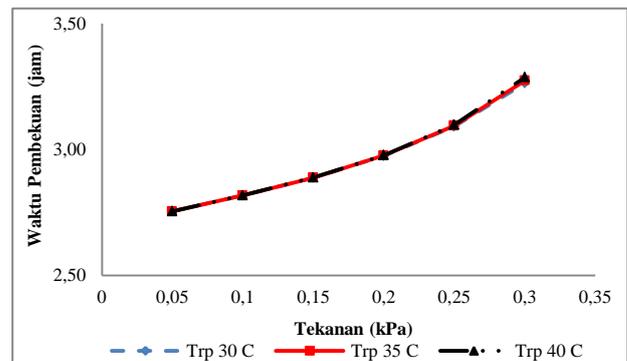
Nilai Laju massa tersublimasi pada tekanan 0.05 kPa dengan Trp 30°C adalah 1.179E-05 kg/s, untuk Trp 35°C adalah 1.183E-05 kg/s, sedangkan untuk Trp 40°C adalah 1.184E-05 kg/s. Laju massa

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 13. Laju massa tersublimasi selama proses pembekuan fungsi tekanan ruang pada Trp 30°C dan L_{es} saat di lakukan pemvakuman yang berbeda (1 mm, 3 mm)

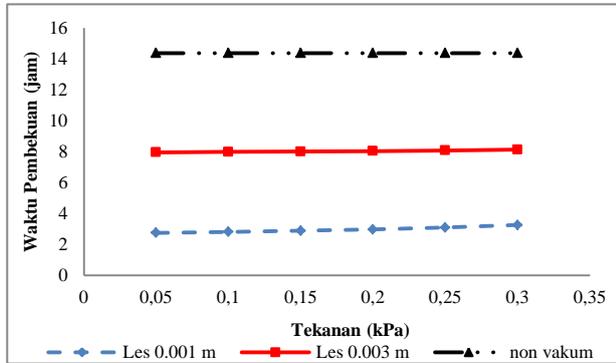
Pada gambar 4.6 diperlihatkan laju massa tersublimasi dengan variasi tekanan ruang dan ketebalan lapisan es saat di lakukan pemvakuman, dimana laju massa tersublimasi semakin besar dengan semakin rendahnya tekanan ruang dan dengan ketebalan es semakin tipis saat dilakukan pemvakuman. Besarnya laju massa 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.



Gambar 14. Waktu yang di butuhkan selama proses pembekuan fungsi tekanan ruang pada L_{es} 1 mm saat di lakukan pemvakuman dan Trp = 30, 35 dan 40°C

Pada gambar 4.7 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. Nilai waktu pembekuan pada ketebalan es 1 mm saat

pemvakuman dengan tekanan ruang 0.05 kPa dengan Trp 30°C adalah 2.76 jam, untuk Trp 35°C adalah 2.75 jam, sedangkan untuk Trp 40°C adalah 2.75 jam. Waktu pembekuan pada ketebalan es 1 mm saat pemvakuman dengan tekanan ruang 0.3 kPa dengan Trp 30°C adalah 3.26 jam, untuk Trp 35°C adalah 3.27 jam, sedangkan untuk Trp 40°C adalah 3.29 jam.



Gambar 15. Waktu yang di butuhkan selama proses pembekuan fungsi tekanan ruang pada Trp = 30°C dan L_{es} saat di lakukan pemvakuman yang berbeda (1 mm, 3 mm dan non vakum)

Pada gambar 4.8 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.

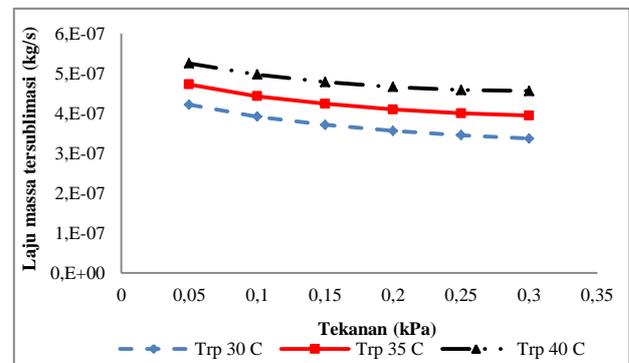
Waktu pembekuan pada temperatur ruang 30°C dengan tekanan ruang 0.05 kPa untuk tebal es 1 mm adalah 2.76 jam, untuk tebal es 3 mm adalah 7.96 jam, sedangkan untuk pembekuan tanpa pemvakuman adalah 14.38 jam. Waktu pembekuan pada temperatur ruang 30°C dengan tekanan ruang 0.3 kPa untuk tebal es 1 mm adalah 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°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°C dan ketebalan es 1 mm akan mengurangi waktu pembekuan sebesar 0.51 jam.

Gambar 4.5 s/d 4.8 sudah sesuai dengan dasar teori dan literatur dimana semakin besar laju massa yang tersublimasi semakin cepat terbentuknya lapisan es, sehingga akan mempercepat pembekuan. (Y. C. Fey and M. A. Boles,1987).

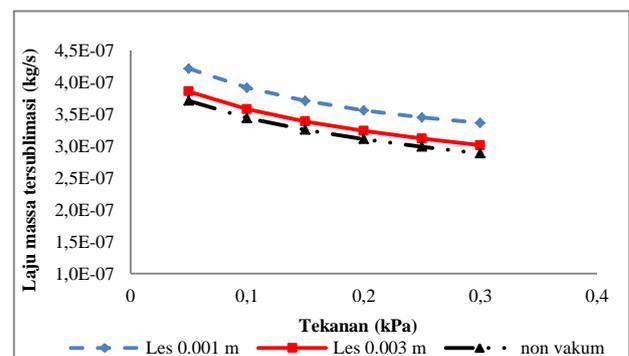
4.3 Pengaruh variasi parameter kondisi operasi terhadap waktu pengeringan

Pada gambar 4.9 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 16. Laju rata-rata massa tersublimasi selama proses pengeringan fungsi tekanan ruang pada L_{es} 1 mm saat di lakukan pemvakuman dan Trp = 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.



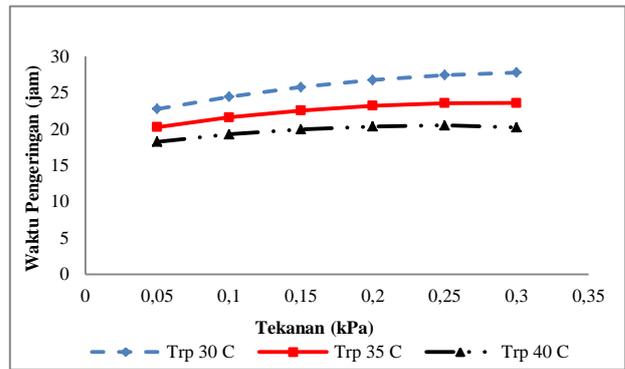
Gambar 17. Laju rata-rata massa tersublimasi selama

proses pengeringan fungsi tekanan ruang pada $Tr_p = 30^\circ\text{C}$ dan L_{es} saat di lakukan pemvakuman yang berbeda (1 mm, 3 mm, dan non vakum)

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 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 4.4) dan akan memperbesar laju massa tersublimasi.

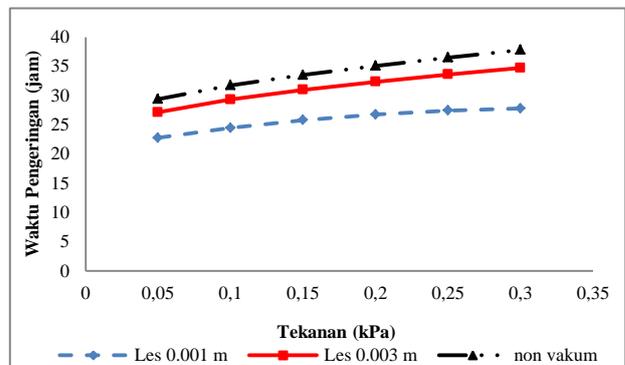
Besarnya laju massa tersublimasi pada temperatur ruang 30°C dengan tekanan ruang 0.05 kPa untuk tebal es 1 mm adalah $4.214\text{E}-07$ kg/s, untuk tebal es 3 mm adalah $3.856\text{E}-07$ kg/s, dan untuk pembekuan tanpa pemvakuman adalah $3.711\text{E}-07$ kg/s. Besarnya laju massa tersublimasi pada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

Pada gambar 4.11 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 18. Waktu yang di butuhkan selama proses pengeringan fungsi tekanan ruang pada L_{es} 1 mm saat di lakukan pemvakuman dan $Tr_p = 30, 35$ dan 40°C

Nilai waktu pengeringan/ sublimasi pada ketebalan es 1 mm saat pemvakuman dengan tekanan ruang 0.05 kPa dengan $Tr_p 30^\circ\text{C}$ adalah 22.75 jam, untuk $Tr_p 35^\circ\text{C}$ adalah 20.25 jam, sedangkan untuk $Tr_p 40^\circ\text{C}$ adalah 18.22 jam. Waktu pengeringan/ sublimasi pada ketebalan es 0.001 saat pemvakuman dengan tekanan ruang 0.3 kPa dengan $Tr_p 30^\circ\text{C}$ adalah 27.77 jam, untuk $Tr_p 35^\circ\text{C}$ adalah 23.56 jam, sedangkan untuk $Tr_p 40^\circ\text{C}$ 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.



Gambar 19. Waktu yang di butuhkan selama proses pengeringan fungsi tekanan ruang $Tr_p 30^\circ\text{C}$ dan L_{es} saat di lakukan pemvakuman yang berbeda (1 mm, 3 mm dan non vakum)

Pada gambar 4.12 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 4.11. 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

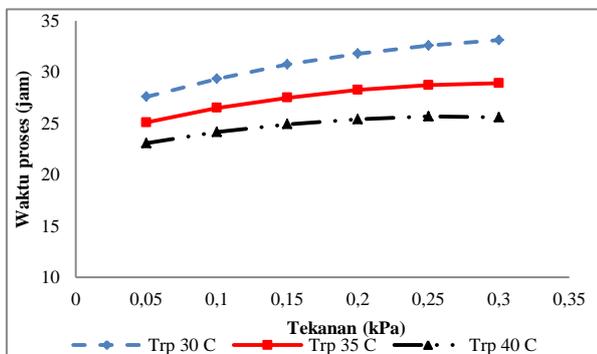
pembekuan vakum akan memperbesar jumlah massa yang tersublimasi. Pada temperatur ruang 30°C dan tekanan ruang 0.05 kPa dan ketebalan es saat dilakukan pemvakuman 1 mm massa yang tersisa adalah 0.0345 kg, untuk tebal 3 mm adalah 0.0377 kg sedangkan untuk non vakum massanya 0.0393 kg.

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.

Gambar 4.9 s/d 4.12 sudah sesuai dengan dasar teori dan literatur dimana waktu pengeringan di pengaruhi oleh tekanan ruang, temperatur ruang dan besarnya massa air dari produk yang akan dikeringkan (E.A. Boss et al, 2004).

4.4 Pengaruh variasi parameter kondisi operasi terhadap waktu proses pengering beku vakum

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.

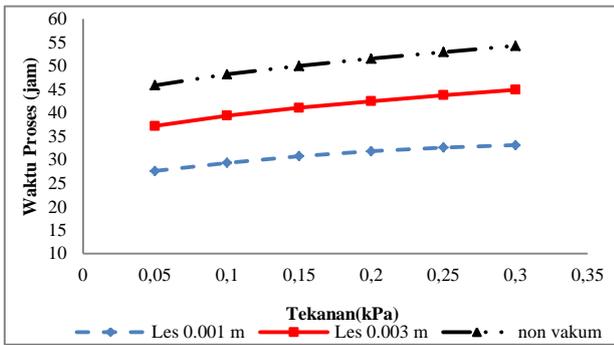


Gambar 20. Waktu yang di butuhkan selama proses pengering beku vakum fungsi tekanan ruang pada L_{es} 1 mm saat di lakukan pemvakuman dan Trp = 30, 35 dan 40°C

Pada gambar 4.13 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 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 4.11), waktu pembekuan sebesar 2.76 s/d 3.29 jam (gambar 4.7) sedangkan untuk tahap pendinginan 2.09 jam.

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 4.14 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 4.11) sedangkan untuk tahap pendinginan 2.09 jam, sehingga pengaruh kondisi operasi terhadap waktu proses pengering beku vakum seperti penjelasan gambar 4.12. sedangkan 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 4.11), waktu pembekuan sebesar 14.38 jam (gambar 4.8) sedangkan untuk tahap pendinginan 2.09 jam.



Gambar 21. Waktu yang di butuhkan selama proses pengering beku vakum fungsi tekanan ruang pada Trp 30°C dan L_{es} saat di lakukan pemvakuman yang berbeda (1 mm, 3 mm 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.

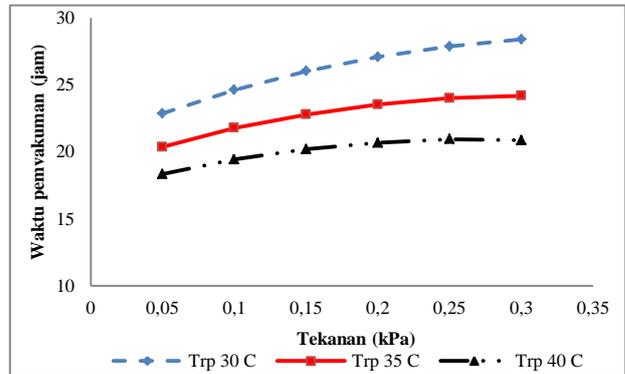
Gambar 4.13 dan 4.14 sudah sesuai dengan dasar teori dan literatur dimana pada proses tanpa adanya pembekuan vakum, nilai waktu proses pengering beku vakum dipengaruhi oleh tekanan dan temperatur ruang (Daoussi et al, 2009). Pada proses dengan adanya pembekuan vakum, nilai waktu proses pengering beku vakum dipengaruhi oleh tekanan, temperatur ruang dan ketebalan es saat dilakukan pemvakuman. (E.A. Boss et al, 2004).

4.5 Pengaruh variasi parameter kondisi operasi terhadap waktu dijalankan pompa 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 (m³/s) bernilai konstan selama proses pengeringan, sedangkan λ index politropik gas kompresibel (λ bernilai 1.2 s/d 1.7).

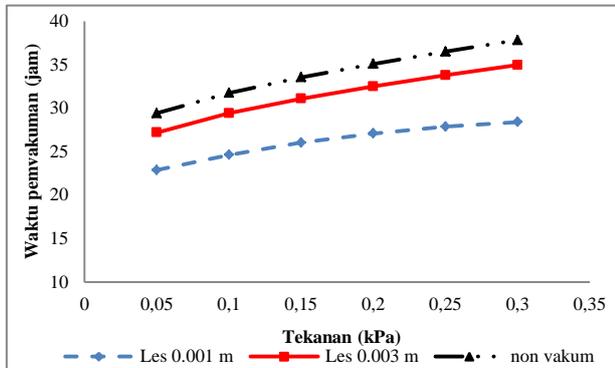


Gambar 22. Waktu dijalankan pompa vakum selama proses pengering beku vakum fungsi tekanan ruang pada L_{es} 1 mm saat di lakukan pemvakuman dan Trp30, 35 dan 40°C

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 4.15).

Pada gambar 4.16 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 23. Waktu dijalankan pompa vakum selama proses pengering beku vakum fungsi tekanan ruang pada T_{rp} 30°C dan L_{es} saat dilakukan pemvakuman yang berbeda (1 mm, 3 mm dan non vakum)

Berdasarkan gambar 4.15 dan 4.16 dapat disimpulkan 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 dibutuhkan untuk menjalankan pompa vakum akan menghemat penggunaan energi.

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.

Saran

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

Nomenklatur

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

σ	Konstanta Stefan $5.7 \cdot 10^{-8} W/mK^4$
ϵ	Emisivitas
ρ	Density (kg/m^3)
μ	Viscosity ($kg/m.s$)
Δ	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 Referensi

- A. Hottot, S. Vessot, J. Andrieu. Freeze drying of

- pharmaceuticals in vials: influence of freezing protocol and sample configuration on ice morphology and freeze-dried cake texture, *Chem. Eng. Process.* Vol.46, 666–674 (2007)
- A.I. Liapis, R. Bruttini, Exergy analysis of freeze drying of pharmaceuticals in vials on trays, *Int. J. Heat Mass Transf.* Vol. 51, 3854–3868 (2008)
- Ashim K. Dutta. Biological and bioenvironmental Heat and Mass Transfer, Marcel Dekker, Inc, New York (2002)
- ASHRAE Handbook, Fundamentals (SI), American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineer, Atlanta, Georgia (1997)
- Belyamin, Tambunan, A.H., Purwadaria, H.K., Alhamid, M.I. Kajian energi pengeringan beku dengan pembekuan vakum dan pemanasan dari bawah, Prosiding, Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) V, Jakarta, Indonesia, 21-23 November (2006)
- Boss, E.A., Filho, R.M., de Toledo, E.C.V.. Freeze-drying process: real time model and optimization. *Chemical Engineering and Processing.* Vol. 43, 1475–1485 (2004)
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A.. Thermodynamics—an engineering approach (5th ed.). New York: McGraw-Hill Companies, Inc., pp. 117–118 (2005)
- Chakraborty,R.,A,K,Saha.,P, Bhattacharya. Modeling and simulation of parametric sensitivity in primary freeze-drying of foodstuffs. Elsevier Separation and Purification Technology. Vol.49, 258-263 (2006)
- Cheng, H. -P., & Lin, C.-T.. The morphological visualization of the water in vacuum cooling and freezing process. *Journal of Food Engineering.* Vol. 78(2), 569–576 (2007)
- Delgado, A., Sun, D.W. One-dimensional finite difference modeling of heat and mass transfer during thawing of cooked cured meat. *J. Food Eng.* Vol. 57, 383-389 (2003)
- Dostal, M., & Petera, K. Vacuum cooling of liquids: Mathematical model. *Journal of Food Engineering.* Vol. 61(4), 533–539 (2004)
- Engkos A. Kosasih, M. Idrus Alhamid, Nasruddin. Pengembangan Mesin Pengeringan Beku Vakum Compact dengan Kombinasi Pembekuan Internal, Laporan Akhir Hibah Riset Strategis Nasional (2011)
- Fey, Y. C. and Boles, M. A. The parametric analysis of self-freezing in an initially wet porous medium. *Int. J. Heat and Fluid Flow.*Vol. 9, 147-155 (1988)
- George-Wilhelm Oetjen, Peter Haseley. Freeze Drying Second, Completely Revised and Extended Edition. WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA, Weinheim ISBN: 978-3-527-30620-6 (2004)
- Hallstrom, B. Mass transport of water in foods - a consideration of the engineering aspects. *Journal of Food Engineering.* Vol. 12, 4-52 (1990)
- Houska, M., Podloucky', S', Z'itny', R., Gre'e, R., S'esta'k, J., Dosta'l, M., et al. Mathematical model of the vacuum cooling of liquids. *Journal of Food Engineering.* Vol.29, 339–348 (1996)
- J. Nastaj, K. Witkiewicz. Experimental and simulation studies of primary vacuum freeze-drying process of random solids at microwave heating, *Int. Commun. Heat Mass Transfer.* Vol. 35, 430–438, (2008)
- J. Nastaj, K. Witkiewicz. Mathematical modeling of the primary and secondary vacuum freeze drying of random solids at microwave heating, *International Journal of Heat and Mass Transfer.* Vol. 52, 4796–4806, (2009)
- Liley,P.E. Thermophysical properties of ice/water/steam from -20°C to 50°C. *International Journal of Mechanical Engineering Education.* Vol. 33 ,(1) 45-50 (2005)
- Lin, H. I., & Chou S. F. Teoritical model of a thin-film accumulation type vacuum freezing ice production (VFIP) method. *Journal of the Chinese Institute of Engineers.* Vol. 24(4), 463-471 (2001).
- M. Idrus Alhamid, Nasruddin, M. Yulianto. Effect Of Upper Heating from Heat Loss Condenser on Drying Time and Final Moisture Content at Freeze Vacuum Drying Process. *Int Confrence IMAT (2010)*
- M. Yulianto, M. Idrus Alhamid, Nasruddin. 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 (2010)
- McDonald, K., & Sun, D.-W. Vacuum cooling technology for the food processing industry: A review. *Journal of Food Engineering.* Vol. 45, 55–65 (2000)
- McDonald, K., & Sun, D.-W. Effect of evacuation rate on the vacuum cooling process of a cooked beef product. *Journal of Food Engineering.* Vol. 48, 195–202 (2001)

Moraga, N.O., Jauriat, L.A., Lemus-Mondaca, R.A., 2012. Heat and mass transfer in conjugate food freezing/air natural convection. *International Journal of Refrigeration*. Vol. 35, 880-889 (2012)

Nasruddin, M. Idrus Alhamid, Engkos A. Kosasih, M. Yulianto. Effect Of Freeze Vacuum Drying and Heating from Condenser's Heat Loss on Drying Rate and Microstructure of Aloe Vera. *Journal of Applied Sciences*. . 2011ol. 6 (5), 335-343 (2011)

R. Daoussi, S. Vessot, J. Andrieu, O. Monnier. Sublimation kinetics and sublimation end-point times during freeze-drying of pharmaceutical active principle with organic co-solvent formulations, *Chem. Eng. Res. Des.* Vol. 87, 899–907 (2009)

Wang, L. J., & Sun, D.-W. Rapid cooling of porous and moisture foods by using vacuum cooling technology. *Trends in Food Science & Technology*. Vol. 12(5–6), 174–184 (2001)

Wang, L., & Sun, D. W. Modelling vacuum cooling process of cooked meat—part 1: analysis of vacuum cooling system. *International Journal of Refrigeration*. Vol. 25, 854–861 (2002a)

Wang, L., & Sun, D. W. Modelling vacuum cooling process of cooked meat—part 2: mass and heat transfer of cooked meat under vacuum pressure. *International Journal of Refrigeration*. Vol. 25, 862– 871 (2002b)

Xu Duan, Min zhang, Arun S. Mujumdar, Shaojin Wang. Microwave freeze drying of sea cucumber (*Stichopus Japonicus*). *Elsavier : Journal of Food Engineering*. Vol. 96, 491-497 (2010)

Zhai, S., Su, H., Taylor, R. and Slater, K.H, Pure ice sublimation within vials in a laboratory lyophiliser; comparison of theory with experiments, *Chem Eng Sci*. Vol. 60, 1167–1176 (2005)