

PENGARUH SUHU MEDIA PEMBEKU TERHADAP EFISIENSI EKSERGI DAN LAJU PEMBEKUAN

The Effect of Freezer Medium Temperature Toward Exergy Efficiency and Freezing Rate

D. Mustofa K.¹, A. H. Tambunan², S. T. Soekarto³, Radite Praeko A. S.⁴

ABSTRACT

The concept of exergy is defined as the maximum theoretical work that would be delivered by a system as it comes into equilibrium with the environment. This method is used to analyze the freezing process. Objective of the research is study of effect medium temperature toward exergy efficiency and freezing rate.

The research indicated that lower medium temperature of freezer resulted in a higher freezing rate but with lower exergy efficiency. In case of sliced beef meat, freezing rate of 3 cm/h can be obtained with temperature stage of $T_{ma} = -3^{\circ}\text{C}$, $T_{mf} = -15$ and $T_{mb} = -21^{\circ}\text{C}$, with exergy efficiency 58 %.

Keyword: Exergy analysis, freezing rate, medium temperature of freezer

Diterima: 12 Januari 2007; Disetujui: 20 Mei 2007

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Kaidah termodinamika I merupakan konsep kekekalan energi dimana suatu bentuk energi dapat dikonversi menjadi bentuk energi lain, dan tidak dapat dimusnahkan atau diciptakan. Secara umum, keseimbangan energi tidak memberikan informasi mengenai mutu atau kualitas dari energi yang masuk atau keluar dari batas sistem tersebut. Dalam hukum termodinamika II dikenal konsep eksergi yang berguna dalam menganalisis sistem termal, karena eksergi adalah suatu ukuran mutu atau

nilai dari energi dan dalam sistem termal ia dapat dimusnahkan. Sebagian dari eksergi yang memasuki suatu sistem termal akan hilang oleh adanya *irreversibilitas* (ketakmampubalikan) dari sistem tersebut. Hal ini dapat dijelaskan menggunakan analisis keseimbangan eksergi pada sistem termal.

Boelman et al., 2004, melakukan analisis terhadap definisi efisiensi eksergi pada alat penukar kalor sederhana guna diterapkan pada peralatan yang beroperasi pada suhu lingkungan (T_0). Ia memperkenalkan parameter T' sebagai suhu tak berdimensi (skalar).

¹ Mahasiswa Program Doktor, Sekolah Pascasarjana, Ilmu Keteknikan Pertanian, FATETA – IPB. Email: dianta_mk@yahoo.com

² Guru Besar Departemen Teknik Pertanian, FATETA – IPB. Email : ahtambun@ipb.ac.id

³ Guru Besar Teknologi Pangan dan Gizi, FATETA – IPB.

⁴ Staf Pengajar Departemen Teknik Pertanian, FATETA – IPB. Email : radite@telkom.net

Leidenfrost (1980) melakukan analisis eksergi pada mesin refrigerasi dengan refrigeran R-12. Metode yang digunakan adalah perhitungan dan perbandingan efisiensi eksergi alat refrigerasi sistem kompresi uap dengan beberapa jenis kondensor berbeda. Dari hasil penelitiannya dapat disimpulkan bahwa efisiensi eksergi paling besar untuk sistem refrigerasi kompresi uap terjadi pada kondensor dengan pendinginan evaporatif, dimana daya total yang digunakan sebesar 470.73 kW.

Tahun 2002, Yumrutas et al. mengembangkan suatu model komputasi analisis eksergi untuk menyelidiki sistem refrigerasi kompresi uap dengan refrigeran amonia. Software EES (*Engineering Equation Solver*) digunakan sebagai alat perhitungan dan simulasi. Asumsi yang digunakan adalah aliran steady, kerugian tekanan pada kompresor dan katup ekspansi diabaikan. Hasil yang diperoleh adalah efisiensi eksergi meningkat dengan naiknya suhu evaporator dan menurunnya suhu kondensor.

Analisis eksergi yang dilakukan pada proses pembekuan masih sedikit, sementara proses pembekuan mengkonsumsi energi cukup besar. Salah satu metode untuk mengurangi besarnya konsumsi energi tersebut adalah dengan penghematan energi yang dilakukan melalui pengaturan energi input pada tahap awal pembekuan dan tahap perubahan fasa.

Bruttini et al. (2001) merekomendasikan pengendalian kehilangan eksergi terbesar yang terjadi pada tahap penurunan suhu awal ke titik beku dan tahap pembekuan air bebas dalam bahan melalui pengendalian suhu media pembeku. Selanjutnya, Tambunan, et al., (2003) melakukan analisis eksergi pembekuan ikan patin dan ayam broiler dengan metode pembekuan lempeng sentuh, dimana diperoleh bahwa kehilangan eksergi rata-rata tahap

penurunan suhu awal ke titik beku sebesar 22.9 kJ/kg dan tahap pembekuan air bebas dalam bahan sebesar 24.8 kJ/kg, sedangkan kehilangan eksergi rata-rata pada tahap penurunan suhu bahan relatif kecil yakni hanya 5.43 kJ/kg. Faktor penting yang berkaitan dengan proses pembekuan bahan pangan beku adalah suhu media dan laju pembekuan. Laju pembekuan akan menentukan mutu produk beku dan waktu pembekuan. Tressler (1981) menyatakan bahwa laju pembekuan cepat akan sedikit menyebabkan kerusakan sel karena ukuran kristal es yang terbentuk kecil.

Kehilangan eksergi menurun ketika perbedaan suhu media pembeku dengan suhu produk yang dibekukan semakin kecil. Dengan memperkecil perbedaan antara suhu media pembeku dengan suhu produk akan memperlambat laju pembekuan, yang berakibat menurunkan kualitas produk yang dibekukan. Meskipun demikian, analisis eksergi yang dikaitkan dengan laju pembekuan masih belum dilakukan. Untuk itu perlu dikaji suhu media pembeku yang optimal agar kehilangan ekserginya sekecil mungkin sementara laju pembekuannya pun masih tergolong pembekuan cepat agar kualitas produk tetap terjaga.

B. Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan suhu media pembeku pada sistem suhu bertahap dengan mempertahankan laju pembekuan sebesar 3 cm/jam dan efisiensi eksergi lebih besar daripada sistem suhu tetap.

PENDEKATAN TEORI

A. Kajian Energi dan Eksergi:

Kajian energi didasarkan pada panas laten dan panas sensible yang dilepaskan bahan pangan. Keseimbangan energi pada proses pembekuan dapat

dinyatakan seperti pada persamaan (1). (Bruttini et al. (2001))

$$\Delta H_{fr} = -Q = m_{ik}(1+y)Cp_1(T_b - T_1) - \gamma m_{ik} y h_{f,air} + m_{ik}(1+y)Cp_2(T_2 - T_b) \quad (1)$$

Q adalah panas yang dilepaskan produk yang harus ditanggulangi oleh mesin pembeku, dimana terdiri dari panas sensibel produk pada saat penurunan suhu awal ke titik beku ditambah panas laten dari pembekuan air bebas dalam bahan ditambah panas pada saat penurunan suhu bahan.

Keseimbangan eksergi untuk sistem tertutup dapat dikembangkan dari persamaan keseimbangan energi dan entropi (Moran dan Saphiro, 1988). Entropi dapat dinyatakan seperti pada persamaan (2).

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{dQ}{T} \right)_{cs} \quad (2)$$

Dengan demikian, keseimbangan entropi dapat dibentuk berdasarkan keseimbangan energi pada masing-masing selang suhu dimana proses tersebut berlangsung.

$$S_2 - S_1 = \Delta S_{fr} = \int_1^b m_{ik}(1+y)Cp_1 \frac{dT}{T} + \int \frac{d(\gamma m_{ik} y h_{f,air})}{T} + \int_b^2 m_{ik}(1+y)Cp_2 \frac{dT}{T} \quad (3)$$

$$\Delta S_{fr} = m_{ik}(1+y) \left[Cp_1 \ln \frac{T_b}{T_1} \right] - \gamma m_{ik} y \left[\frac{h_{f,air}}{T_b} \right] + m_{ik}(1+y) \left[Cp_2 \ln \frac{T_2}{T_b} \right] \quad (4)$$

Persamaan keseimbangan eksergi dapat disusun dari selisih antara persamaan energi dengan perkalian antara persamaan entropi dan suhu lingkungan, sehingga

$$\Delta Ex = (\Delta H_{fr}) - T_0 (\Delta S_{fr}) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta Ex = & (m_{ik}(1+y)Cp_1(T_b - T_1) \\ & - \gamma m_{ik} y h_{f,air} + m_{ik}(1+y)Cp_2(T_2 - T_b)) \\ & - T_0 \left(m_{ik}(1+y) \left[Cp_1 \ln \frac{T_b}{T_1} \right] \right. \\ & \left. - \gamma m_{ik} y \left[\frac{h_{f,air}}{T_b} \right] + m_{ik}(1+y) \left[Cp_2 \ln \frac{T_2}{T_b} \right] \right) \end{aligned} \quad (6)$$

Persamaan tersebut dapat diselesaikan menjadi:

$$\begin{aligned} \Delta Ex = & m_{ik}(1+y)Cp_1 \left((T_b - T_1) - T_0 \ln \frac{T_b}{T_1} \right) \\ & - \gamma m_{ik} y h_{f,air} \left(1 - \frac{T_0}{T_b} \right) \\ & + m_{ik}(1+y)Cp_2 \left((T_2 - T_b) - T_0 \ln \frac{T_2}{T_b} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

Suhu awal sama dengan suhu lingkungan ($T_0 = T_1$), sehingga

$$\begin{aligned} \Delta Ex = & T_0 m_{ik}(1+y)Cp_1 \left(\frac{(T_b - T_0)}{T_0} - \ln \frac{T_b}{T_0} \right) \\ & + T_0 \gamma m_{ik} y h_{f,air} \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_0} \right) \\ & + T_0 m_{ik}(1+y)Cp_2 \left(\frac{(T_2 - T_b)}{T_0} - \ln \frac{T_2}{T_b} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

ΔEx merupakan total perubahan eksergi dalam proses pembekuan yang menunjukkan jumlah perubahan eksergi pada tiap tahap pembekuan, mulai dari pendinginan diatas titik beku, perubahan fase, dan penurunan suhu dibawah titik beku bahan.

Asupan eksergi adalah eksergi yang masuk bersama panas, sehingga bergantung dari suhu media pembeku yang digunakan (T_{cs}).

$$Ex_{in} = Q_{fr} \left(\frac{T_{cs} - T_0}{T_{cs}} \right) \quad (9)$$

Asupan eksergi pada masing-masing tahap pembekuan (I, II dan III) adalah:

$$Ex_{in-1} = Q_1 \left(\frac{T_{ma} - T_0}{T_{ma}} \right) \quad (10)$$

$$Ex_{in-2} = Q_b \left(\frac{T_{mf} - T_0}{T_{mf}} \right) \quad (11)$$

$$Ex_{in-3} = Q_2 \left(\frac{T_{mb} - T_0}{T_{mb}} \right) \quad (12)$$

Efisiensi hukum termodinamika II (efisiensi eksergi) dapat diturunkan dari persamaan (5) yang merupakan persamaan keseimbangan eksergi.

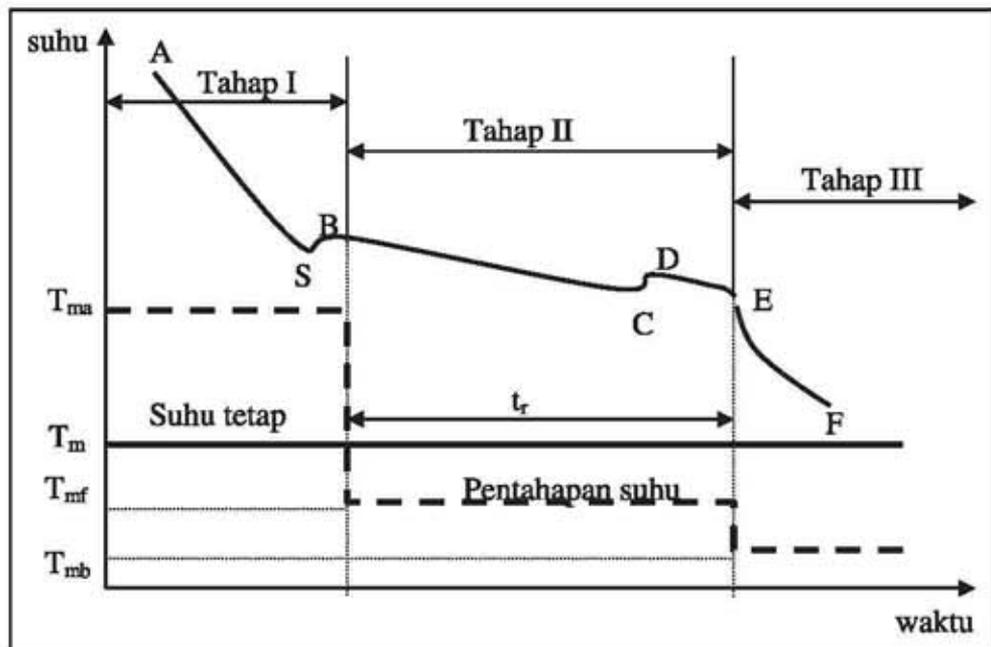
$$\eta_{II} = \frac{\Delta Ex}{Ex_{in}} \times 100\% \quad (13)$$

B. Laju Pembekuan

Pembekuan dapat dibagi menjadi enam tahap, yaitu: (1) Pendinginan Awal (AS), dimana bahan didinginkan hingga mencapai suhu *supercooling*. (2) Periode *supercooling*, dimana air masih berada dalam fase cair meskipun pada suhu di bawah titik beku. Setelah itu terjadi

peningkatan sementara suhu di atas titik beku yang diakibatkan oleh adanya pelepasan panas laten bahan, (SB). (3) Terjadi penurunan titik beku bahan dengan semakin meningkatnya konsentrasi larutan pada bagian air yang tak terbekukan, (BC). (4) Periode pembentukan kristal es, (CD). (5) Kristalisasi air dan larutan pada bahan pangan terus berlangsung, (DE). (6) Penurunan suhu bahan pangan beku hingga mencapai suhu yang diinginkan, (EF). Meskipun demikian, secara umum tahap-tahap tersebut dapat dikelompokkan ke dalam tiga tahap seperti ditunjukkan pada Gambar 1. T_{ma} adalah suhu media pembeku pada tahap pendinginan awal, T_{mf} adalah suhu media pembeku selama proses perubahan fase, dan T_{mb} adalah suhu media pembeku selama tahap penurunan suhu bahan ke tingkat yang diinginkan.

Tambunan, at., al. (2003) menyatakan bahwa pembekuan cepat adalah metoda pengawetan bahan pangan yang mampu mempertahankan mutu dengan hasil



Gambar 1. Skema suhu-waktu pada pembekuan

terbaik. Keunggulan produk beku setelah pembekuan cepat adalah struktur kristal es yang kecil dan seragam, sehingga bila dicairkan (*thawing*) keadaannya masih mendekati sifat-sifat segarnya. Menurut Lembaga Refrigerasi International (1971), laju pembekuan adalah ratio antara jarak minimal dari permukaan bahan ke titik pusat termal terhadap waktu yang diperlukan oleh produk pangan mencapai suhu 0 °C pada permukaan bahan sampai mencapai suhu -5 °C pada pusat termal bahan.

Tiga persamaan dasar yang digunakan untuk menghitung laju pembekuan (*freezing rate*) adalah:

1. Perpindahan Panas Konduksi:

$$q = \frac{kA}{x}(T_a - T_{mf}) \quad (14)$$

2. Perpindahan Panas Konveksi:

$$q = h_c A(T_\infty - T_a) \quad (15)$$

3. Laju perpindahan panas pada saat perubahan fasa:

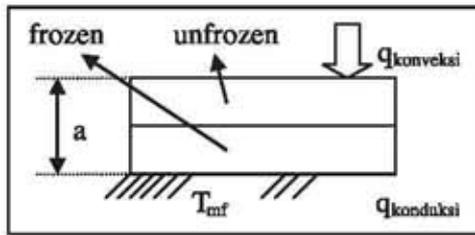
$$q = Aa\rho \frac{dx}{dt} \quad (16)$$

Pengaturan kembali tiga persamaan di atas menghasilkan:

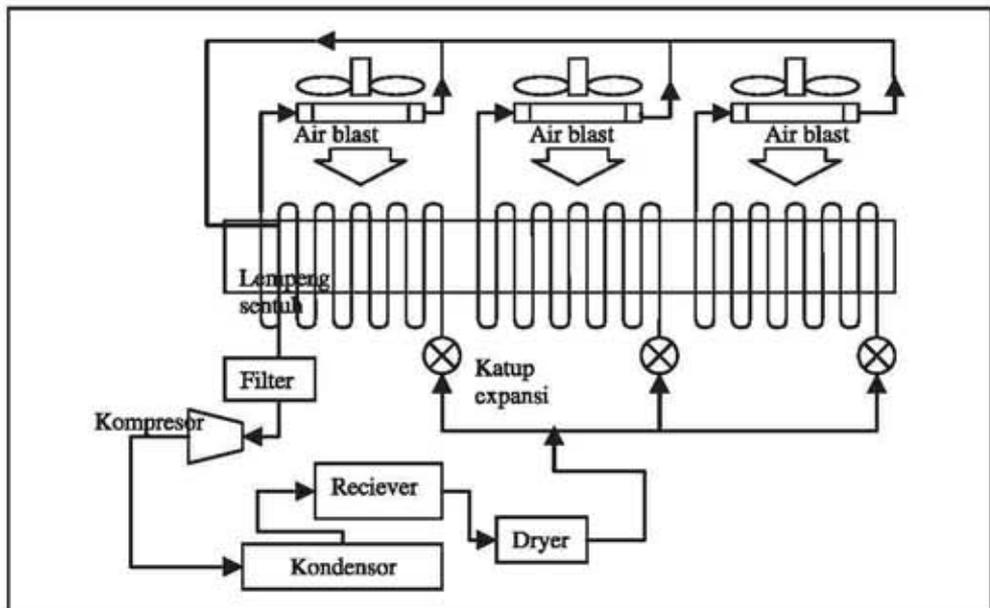
$$\left(\frac{l}{h_c} + \frac{x}{k} \right) dx = \frac{(T_\infty - T_{mf})}{a\rho} dt \quad (17)$$

Integrasi persamaan tersebut dari 0 sampai tinggi *a*, dimana *a* adalah tebal sample menghasilkan persamaan berikut:

$$\frac{x}{h_c} \Big|_0^a + \frac{1}{2} \frac{x^2}{k} \Big|_0^a = \frac{T_\infty - T_{mf}}{a\rho} t \Big|_0^t \quad (18)$$



Gambar 2. Skema pembekuan



Gambar 3. Skema rancangan sistem refrigerasi dengan multi evaporator

Penyelesaian persamaan tersebut menjadi:

$$t_F = \frac{\rho \cdot a}{T_{mf} - T_w} \left(\frac{a}{h_c} + \frac{a^2}{2k} \right) \quad (19)$$

Sehingga laju pembekuan sebagaimana dinyatakan oleh Lembaga Refrigerasi International, 1971 adalah:

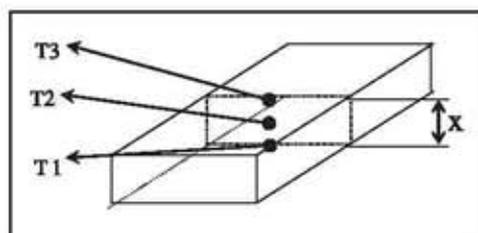
$$L_p = a \cdot 360000 / t_F \text{ (cm/jam)} \quad (20)$$

BAHAN DAN METODE

A. Bahan dan Alat

Bahan pangan yang digunakan sebagai sampel adalah daging sapi model yang diambil dari bagian paha dengan massa masing-masing sampel sebesar 45 gram dan 50 gram. Sedangkan peralatan yang digunakan untuk proses pembekuan bertahap adalah mesin pembeku lempeng sentuh dengan *multi evaporator* modifikasi Ruliyana (2003) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3 di bawah. Multi evaporator tersebut yang nantinya berfungsi sebagai pengendali besarnya suhu pada tahap I (T_{ma}), tahap II (T_{mf}) dan tahap III (T_{mb}).

Pengukuran suhu produk dilakukan dengan titik-titik pengukuran seperti pada Gambar 4 meliputi suhu bagian bawah produk (T_1), suhu tengah produk (T_2), dan suhu bagian atas produk (T_3).



Gambar 4. Titik-titik pengukuran suhu pada bahan.

B. Prosedur Pengujian

Setelah T_{ma} , T_{mf} dan T_{mb} konstan, maka sampel yang telah diletakkan pada wadah sampel dan dibekukan dengan evaporator tahap I. Penurunan suhu yang terjadi hingga mencapai 0°C diperhatikan dan dilakukan pencatatan berikut waktu lamanya proses tersebut berlangsung. Setelah suhu produk mencapai 0°C , wadah sampel digeser ke evaporator tahap II. Selanjutnya, setelah suhu pusat termal bahan mencapai -5°C , wadah digeser ke evaporator tahap III.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Laju Pembekuan

Profil suhu pembekuan daging sapi model dengan suhu tetap dan dengan melakukan pentahapan suhu media pembeku masing-masing ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6.

Pembekuan dengan suhu tetap (Gambar 5) menghasilkan laju pembekuan sebesar 1.37 cm/jam dan pembekuan dengan pentahapan suhu menghasilkan laju pembekuan lebih kecil yakni 1.2 cm/jam . Laju pembekuan yang lebih kecil ini disebabkan oleh suhu media pembeku pada saat terjadinya perubahan fase pada suhu bertahap yang lebih tinggi daripada suhu tetap. Dengan kata lain T_{mf} pada sistem suhu tetap lebih rendah 6 derajat dibanding sistem suhu bertahap. Sehingga berdasarkan kategori laju pembekuan oleh King (1971) pembekuan di atas masih tergolong pembekuan lambat.

B. Analisis Energi dan Eksergi

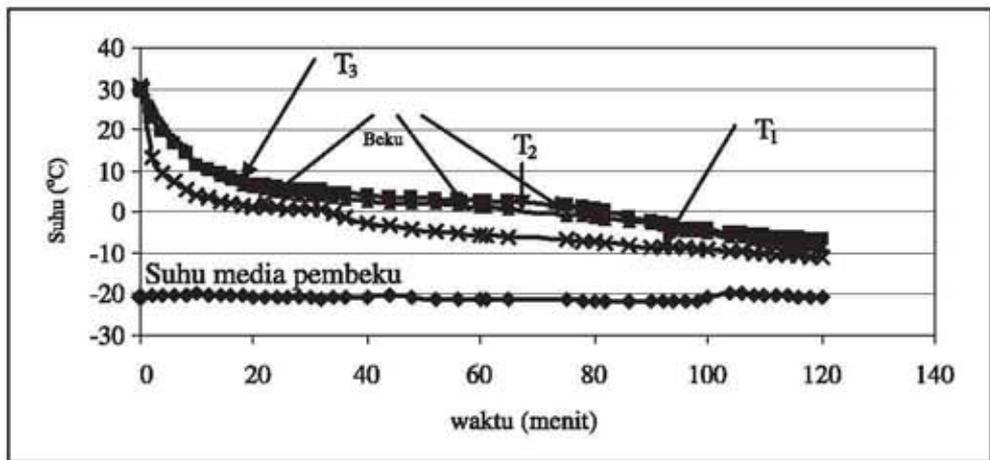
Perhitungan energi dan eksergi, memerlukan nilai parameter y , $C_{p,unfr}$ dan $C_{p,fr}$ yaitu $y = 7.3$, $C_{p,unfr} = 2.914 \text{ kJ/kgK}$ dan $C_{p,fr} = 1.616 \text{ kJ/kgK}$ untuk daging sapi (Heldman dan Lund, 1992). Panas laten pembekuan air diambil 333.79 kJ/kg (Frank dalam Brutini, 2001) dan nilai dari suhu awal sampel (T_0) adalah 30°C , titik

beku (T_p) = -2.2 °C (Heldman dan Lund, 1992), serta suhu penyimpanan (T_r) = -9 °C diambil dari data penelitian. Hasil perhitungan analisis eksergi dengan menerapkan persamaan-persamaan di atas ditabulasikan pada Tabel 1.

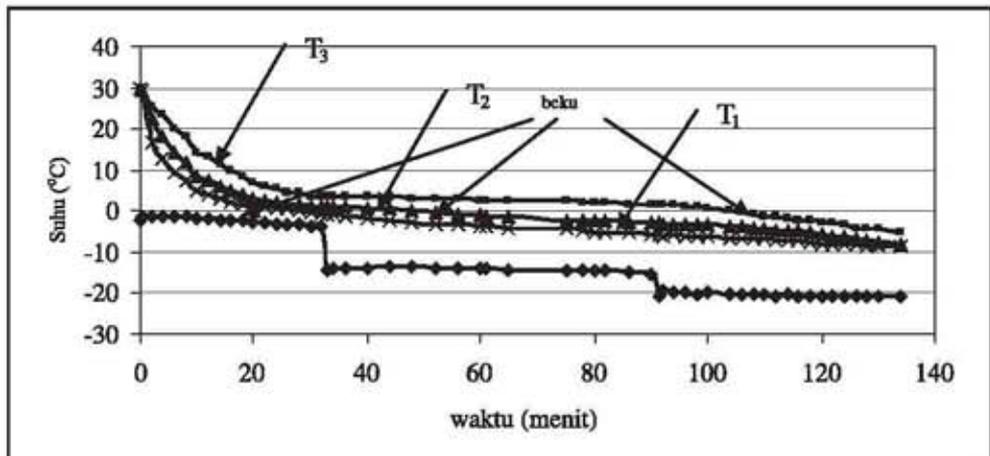
Dari Tabel 1 tersebut nampak bahwa pembekuan dengan pentahapan suhu mampu menaikkan efisiensi eksergi. Efisiensi eksergi pada tahap I meningkat dari 28.3 % menjadi 46.8%, tahap II meningkat dari 58.8 % menjadi 68.1%, sedangkan pada tahap III turun dari 67.9

% menjadi 65.8 %. Peningkatan ini secara keseluruhan menaikkan efisiensi eksergi total proses pembekuan dari 50.9 % menjadi 63.4 %.

Meningkatnya efisiensi Tahap I dan II pada sistem suhu bertahap lebih disebabkan oleh adanya perubahan suhu media pembeku yang digunakan. Jika ditinjau dari persamaan 16 dimana efisiensi eksergi merupakan perubahan eksergi yang terjadi dibandingkan input ekserginya maka input eksergi sebagai penyebut dipengaruhi oleh suhu media



Gambar 5. Profil penurunan suhu daging sapi segar dengan suhu media pembeku tetap pada -21 °C



Gambar 6. Profil penurunan suhu daging sapi segar dengan suhu media pembeku -3 °C pada tahap I, -15 °C pada tahap II, dan -21 pada tahap III

Tabel 4. Hasil perhitungan bahan pembeku, tetapi lebih dipengaruhi oleh tidak dipengaruhi oleh suhu media properties dari produk dan suhu bekunya

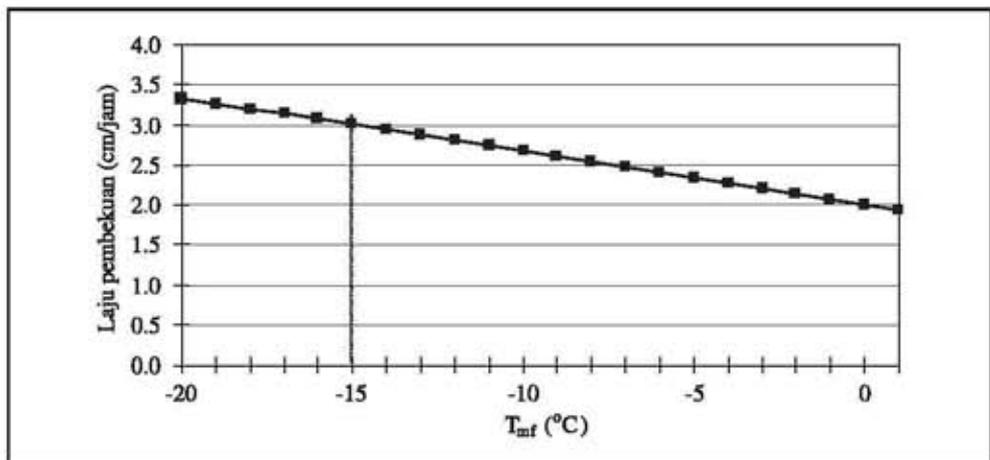
| Pengujian | Simbol | Satuan | Suhu Tetap | Suhu Bertahap |
|-----------------------------------|-------------------------------|---------|------------|---------------|
| Massa produk | m_p | kg | 0.05 | 0.045 |
| Suhu awal | T_i | °C | 30.0 | 30.0 |
| Suhu beku | T_f | °C | -11.0 | -9.0 |
| Suhu media pembeku | T_{ma} | °C | -21.0 | -3.0 |
| | T_{mf} | °C | -21.0 | -15.0 |
| | T_{mb} | °C | -21.0 | -21.0 |
| Suhu lingkungan | T_a | °C | 30.0 | 30.0 |
| Entalpi Pembekuan | ΔH_1 | kJ/kg | -93.83 | -93.83 |
| | ΔH_2 | kJ/kg | -239.42 | -226.12 |
| | ΔH_3 | kJ/kg | -14.22 | -10.99 |
| | ΔH_{fs} atau Q_{fs} | kJ/kg | -347.47 | -330.94 |
| Entropi | ΔS_1 | kJ/kg-K | -0.33 | -0.33 |
| | ΔS_2 | kJ/kg-K | -0.88 | -0.83 |
| | ΔS_3 | kJ/kg-K | -0.05 | -0.04 |
| | ΔS_{fs} (total) | kJ/kg-K | -1.26 | -1.20 |
| Asupan Eksergi | $EX_{in,1}$ | kJ/kg | 18.99 | 11.46 |
| | $EX_{in,2}$ | kJ/kg | 48.42 | 39.44 |
| | $EX_{in,3}$ | kJ/kg | 2.88 | 2.22 |
| | EX_{in} (total) | kJ/kg | 70.29 | 53.13 |
| Perubahan Eksergi | $EX_{ch,1}$ | kJ/kg | 5.37 | 5.37 |
| | $EX_{ch,2}$ | kJ/kg | 28.45 | 26.87 |
| | $EX_{ch,3}$ | kJ/kg | 1.95 | 1.46 |
| | ΔEX_{ch} | kJ/kg | 35.77 | 33.70 |
| Kehilangan Eksergi | $EX_{loss, T_{ma}-T_{mf}}$ | kJ/kg | 13.62 | 6.09 |
| | $EX_{loss, T_{mf}}$ | kJ/kg | 19.97 | 12.57 |
| | $EX_{loss, T_{mf}-T_{mb}}$ | kJ/kg | 0.93 | 0.76 |
| | EX_{loss} (total) | kJ/kg | 34.52 | 19.42 |
| Efisiensi Eksergi (η_{II}) | Tahap I | % | 28.26 | 46.82 |
| | Tahap II | % | 58.76 | 68.14 |
| | Tahap III | % | 67.90 | 65.78 |
| | η_{II} (total) | % | 50.89 | 63.44 |
| Laju pembekuan | f_{rate} | cm/jam | 1.37 | 1.20 |

pembeku sementara perubahan eksergi tidak dipengaruhi oleh suhu media pembeku, tetapi lebih dipengaruhi oleh properties dari produk dan suhu bekunya yang cenderung stabil.

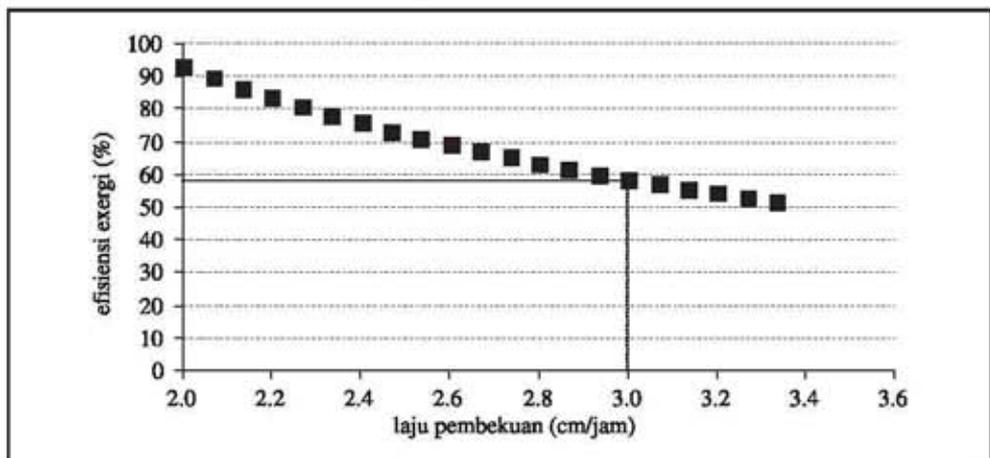
Pada tahap III, efisiensi eksergi pada sistem suhu tetap lebih besar daripada dengan sistem pentahapan suhu karena pada tahap III menghasilkan suhu produk beku yang lebih rendah. Suhu akhir tersebut menyebabkan perubahan eksergi pada sistem suhu tetap menjadi lebih besar, sementara asupan eksergi

untuk kedua sistem tersebut sama.

Nampak bahwa input eksergi pada tahap II selalu mempunyai nilai paling besar dibanding tahap I maupun tahap III, baik pada pengujian sistem pembekuan dengan suhu bertahap maupun pada pengujian sistem suhu tetap. Hal ini disebabkan input eksergi pada tahap II sangat dipengaruhi tidak hanya dari T_{mf} tetapi juga dari panas laten yang terjadi selama perubahan fasa produk.



Gambar 7. Perbandingan suhu media pembeku (T_{mf}) dengan laju pembekuan pada $T_{ma} = -3$ °C; $T_{mb} = -21$ °C



Gambar 8. Grafik hubungan laju pembekuan dengan efisiensi eksergi pada $T_{ma} = -3$ °C; $T_{mb} = -21$ °C.

C. Hubungan Laju Pembekuan dengan Efisiensi Eksergi

Pengaruh suhu media pembeku terhadap laju pembekuan ditunjukkan pada Gambar 7.

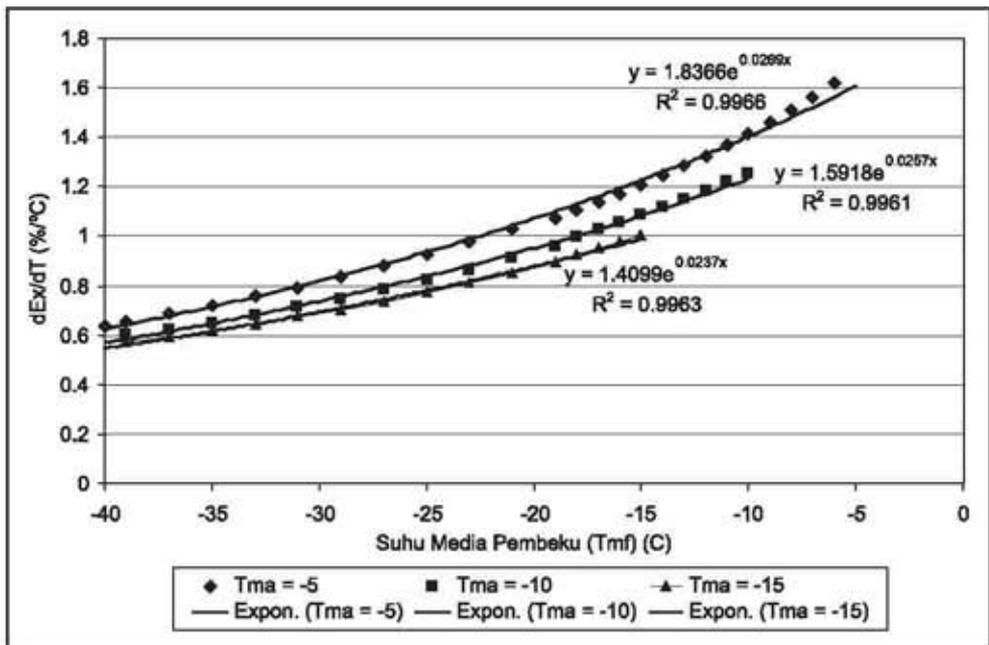
Semakin tinggi suhu media pembeku (T_{mf}) sebagaimana ditunjukkan pada gambar di atas (dari $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $1\text{ }^{\circ}\text{C}$), maka semakin lambat pula laju pembekuannya, karena laju pembekuan merupakan fungsi dari T_{mf} , dimana laju pembekuan berbanding lurus dengan beda suhu bahan dan media pembeku. Semakin besar beda suhu artinya semakin rendah suhu media pembeku akan memperbesar laju pembekuannya.

Dengan laju pembekuan yang cepat akan menurunkan efisiensi eksergi (Gambar 8). Jadi semakin rendah suhu media pembeku akan menghasilkan laju pembekuan yang lebih cepat, tetapi dengan efisiensi eksergi yang semakin rendah, dan sebaliknya, semakin tinggi suhu media pembeku maka semakin kecil

laju pembekuannya dan efisiensi ekserginya semakin besar. Menurut King, laju pembekuan lebih besar atau sama dengan 3 cm/jam termasuk kategori pembekuan cepat. Pada laju pembekuan 3 cm/jam efisiensi eksergi yang dicapai sebesar 58% .

Semakin naik T_{mf} mendekati $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, semakin tinggi pula efisiensi ekserginya, sebab oleh *irreversibilitas* system semakin turun, sementara itu akan mengakibatkan turunnya laju pembekuan bahan. Sebaliknya, jika laju pembekuan diperhitungkan, maka untuk mempercepat laju pembekuan, T_{mf} harus rendah, dan berakibat menurunkan efisiensi ekserginya.

Gambar 9 menunjukkan tiga pasangan tahapan suhu ($T_{ma} = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ & $T_{mb} = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{ma} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ & $T_{mb} = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$, serta $T_{ma} = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ & $T_{mb} = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$) dengan T_{mf} berada diantara T_{ma} dan T_{mb} , (karena T_{mf} tidak mungkin lebih tinggi dari T_{ma} jika lebih tinggi akan menyebabkan



Gambar 9. Grafik Hubungan suhu media pembeku terhadap laju pembekuan dan efisiensi eksergi

($T_{ma} = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{mb} = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{ma} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{mb} = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $T_{ma} = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{mb} = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$)

proses rekristalisasi bahan yang akan menurunkan kualitas produk yang dibekukan menurut Golden, et al. (1997)). Nampak bahwa jika T_{ma} diturunkan suhunya maka akan menggeser kurva dEx/dT ke bawah. Pada awalnya T_{ma} sebesar $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ menghasilkan dEx/dT paling tinggi namun ketika T_{ma} diturunkan hingga $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ataupun $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, maka harga dEx/dT juga turun. Sebaliknya, dengan menaikkan T_{ma} akan menaikkan dEx/dT . dEx/dT merupakan perubahan efisiensi eksergi tiap perubahan suhu bahan.

Dengan mempertahankan laju pembekuan sebesar 3 cm/jam pada pembekuan irisan daging sapi dapat dicapai dengan tahapan suhu $T_{ma} = -3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{mf} = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$, dan $T_{mb} = -21\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan efisiensi ekserginya 58% .

KESIMPULAN

Hasil penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Semakin rendah suhu media pembeku akan menghasilkan laju pembekuan yang lebih cepat, tetapi dengan efisiensi eksergi yang semakin rendah.
2. Pada pembekuan irisan daging sapi, laju pembekuan sebesar 3 cm/jam dapat dicapai dengan tahapan suhu $T_{ma} = -3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{mf} = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$, dan $T_{mb} = -21\text{ }^{\circ}\text{C}$, dengan efisiensi eksergi sebesar 58%

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini terlaksana atas dukungan dana Hibah Penelitian Tim Pasca Sarjana (HPTP) Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Departemen Pendidikan Nasional No. 317/SP3/PP/DP2M/II/2006.

NOMENCLATURE

| | |
|-----------------|--|
| ΔH_{fs} | = perubahan entalpi pada saat pembekuan bahan (kJ/kg) |
| ΔS | = Perubahan entropi (kJ/kgK) |
| H | = Entalpi (kJ/kg) |
| S | = Entropi (kJ/kgK) |
| T_1 | = Suhu bahan awal ($^{\circ}\text{C}$) |
| T_b | = Suhu bahan beku ($^{\circ}\text{C}$) |
| T_2 | = suhu akhir bahan (suhu penyimpanan) ($^{\circ}\text{C}$) |
| T_{ma} | = suhu media pembeku tahap penurunan suhu bahan hingga awal dari tahap pembekuan air bebas. ($^{\circ}\text{C}$) |
| T_{mf} | = suhu media pembeku tahap tahap pembekuan air bebas. ($^{\circ}\text{C}$) |
| T_{mb} | = suhu media pembeku tahap penurunan suhu bahan dibawah suhu bekunya hingga suhu penyimpanan. ($^{\circ}\text{C}$) |
| m_{bk} | = massa bahan kering (kg) |
| m_{air} | = massa air dalam bahan (kg) |
| t_F | = waktu pembekuan (detik) |
| T_a | = suhu awal bahan pangan ($^{\circ}\text{C}$) |
| t_F | = waktu pembekuan (detik) |
| ρ | = berat jenis bahan (kg/m^3) |
| T_{∞} | = suhu lingkungan ($^{\circ}\text{C}$) |
| k | = koefisien konduksi bahan pangan (W/mK) |
| h_c | = koefisien konveksi lingkungan (W/m ² K) |

DAFTAR PUSTAKA

- Bejan, A. 1996. Entropy Generation Minimization. CRC Press, New York.
- Boelman, E. C., Sakulpipatsin, P. 2005., Critical analysis of exergy efficiency definitions—part1 heat exchanger at near-environmental temperatures. Proceeding IEEEES.
- Bruttini, R., Crosser, O.K., Liapis, A.I., 2001, Exergy Analysis For The Freezing Stage of The Freeze Drying Process, Journal of Drying

- Technology, 19(9), 2303-3213.
- Domkundwar, 1980, Refrigeration and Air Conditioning, Dhanpat Rai & Son, Delhi.
- Golden, D.A. and Gallyoun, L. A., 1997, Quality in Food Freezing, Chapman & Hall, New York, USA, pp. 174-190.
- Internasional Institute of Refrigeration, 1971., Recommendations for The Processing and Handling for Frozen Foods. 2nd Ed. Paris.
- King, C.J, 1971, Freeze Drying of Food. CRC, The Chemical Rubber Co., Cleveland-Ohio.
- Leidenfrost, W., Lee, K. H., Korenic, B., 1980. Conservation Of Energy Estimated By Second Law Analysis Of A Power Consuming Process, Energy Journal, Vol 5. pp 47-61.
- Moran, M. J. dan Shapiro, H. N. 2004., Fundamental of Engineering Thermodynamics. John Wiley & Sons. Inc. Canada, USA.
- Tambunan, A. H., 2002. Faktor-faktor yang mempengaruhi laju pembekuan bahan pangan cair. Buletin Keteknikan Pertanian. (14)3:201.
- Tambunan, A. H., Srimudiasuti P., Angrahni, A. D., 2003. Karakteristik dan analisis eksergi pembekuan ikan patin dan ayam broiler, Journal Keteknikan Pertanian Vol. 17 NO.3 (Desember). Hal 32-42.
- Tressler, D.K., W.B. Arsdel and M.J. Copley. 1981. The Freezing Preservation of Food. Vol II. AVI Pub. Co., Westport, Conncticut, USA.
- Yang, J. L., Yi Tai Ma, Min Xia Li, Hai Qing Guan. 2005. Exergy Analysis of Transcritical Carbon Dioxide Refrigeration Cycle with an Expander, Energy Journal, Vol 30 pp 1162-1175.
- Yumrutas, Mehmet Kunduz b, Mehmet Kanoğlu, 2002, Exergy Analysis of Vapour Compression Refrigeration Systems, Exergy, an International Journal 2, 266 - 27