Pemodelan Solidifikasi untuk Proses Pembekuan Air dengan Geometri Cetakan Es Bujur Sangkar dan Persegi Panjang

Andreas Pujianto¹, Prabowo²), Sigit Deddy P. Sidhi¹,

¹⁾ Politeknik Kelautan dan Perikanan Sorong, Kota Sorong ²⁾ Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

Email: ^{1,a)} andreas_pujianto.kkp@gmail.com

Diterima : 19 Oktober 2016 Disetujui : 30 November 2016

ABSTRACT

Numerical study is presented concerning transient solidification for water freezing process. The ice can produces 25 kg of ice block product is used as model in this study. 2D-simpllified geometry of ice can is modeled with square and rectangular shape which have different aspect ratio (H/L) 1 and 0.62 respectively. Both of shapes is compared one to another based on heat transfer and duration of solidification. Boundary conditions use isothermal temperature walls. Three walls (top, bottom, and right) have the same temperature values are -8 °C and the left wall temperature value is 0 °C Second order implicit URANS equations were solved with laminar model in numerical calculation. Most of internal heat energy (latent and sensible) from the water released to the walls which have lower temperature than other wall for 15 hours cooling process. This condition makes temperature of the liquid water decrease and phase change occured. The rectangular shape perform better than the square shape in heat transfer of internal heat energy from the water to the walls shape. The top and bottom wall from rectangular shape have greater value of heat transfer because their area are larger than other walls. Solidification process of the water in the rectangular shape faster 7,03% than square which showed by growth of water solid fraction in time of 15 hours cooling process.

Keywords : ice can, heat transfer, solidification.

Pendahuluan

Es balok adalah salah satu jenis es yang sering digunakan dan diproduksi dalam jumlah yang besar khususnya untuk industri perikanan tradisional. Bentuk standar es balok pada umumnya bujur sangkar dan persegi panjang. Setiap bentuk mempunyai ukuran produksi es yang berbeda-beda yaitu 25 kg, 50 kg, 100 kg, dan 136 kg [4]. Bentuk yang berbeda dari cetakan es mempunyai pengaruh terhadap nilai perpindahan panas dan lama proses pembekuan air. Panas adalah energi yang dapat dipindahkan dari satu sistem ke sistem yang lain sebagai akibat dari perbedaan temperature [2]. Energi dalam (panas sensibel dan laten) dari air di dalam cetakan es diserap oleh air garam yang mempunyai temperatur yang lebih rendah selama proses pembuatan es. Air garam disirkulasikan untuk didinginkan kembali oleh evaporator dari sistem refrigerasi dengan bantuan agitator. Beberapa penelitian tentang solidifikasi dilakukan diantaranya studi tentang perpindahan panas pada solidifikasi timah cair di dalam *cavity* mempunyai aspek rasio

(H/L) 0,75 [5], proses transien dari solidifikasi cairan murni phase-change material disertai dengan konveksi alami di dalam *cavity* bentuk persegi panjang yang ditentukan secara analitik dan numeric [6], studi numerik tiga dimensi proses konveksi alami dengan pembekuan di dalam kubus dengan Rayleigh numbers (Ra) berkisar antara $10^5 - 10^6$ [7], studi numerik tentang konveksi alami air kondisi steadv dipadukan dengan proses pembekuan air secara transien. Kedua hal tersebut dianalisa dengan menggunakan *software* CFD komersial FLUENT [3], dan hal yang sama mengenai simulasi numerik untuk konveksi alami kondisi steady dan proses pembekuan secara transien untuk air tetapi menggunakan software CFD Open source OpenFOAM [1].

Tujuan penelitian ini adalah mengetahui: fenomena perpindahan panas dari air ke dinding cetakan es selama proses pembekuan, pertumbuhan fraksi padat dari air di dalam cetakan es, serta pertumbuhan ketebalan dari es di dalam cetakannya. Kedua bentuk cetakan es dibandingkan perpindahan performa panasnya dan kecepatan proses pembekuan air menjadi es melalui pemodelan dengan menggunakan software CFD berbasis volume.

Numerical Setup

Pada penelitian ini, cetakan es dengan kapasitas produksi 25 kg dimodelkan dengan bentuk bujur sangkar dan persegi panjang. Gambar 1 menunjukkan skema dari model dan gridnya. Ukuran untuk *cavity* bentuk bujur sangkar dengan tinggi (H) dan panjang (L) adalah 186,5 mm yang mempunyai aspek rasio (H/L) = 1. Cavity bentuk persegi panjang mempunyai ketinggian (H) = 146.6 mm dan panjang (L) = 237,3 mm yang mempunyai aspek rasio (H/L) = 0.62 Kedua bentuk model mempunyai ukuran luas area (A) yang hampir sama yaitu $3,48 \times 10^4 \,\mathrm{mm^2}$.



Gambar 1. Skema model dan grid bentuk cetakan es dua dimensi (a) bujur sangkar (b) persegi panjang

Kondisi batas pada gambar 2 menunjukkan dinding *cavity* dengan kondisi isothermal yang asimetris untuk mendapatkan hasil yang menarik pada kasus solidifikasi ini. Dinding *cavity* sebelah kiri mempunyai nilai temperatur yang berbeda dimana nilainya lebih tinggi dari pada dinding *cavity* lainnya. Temperatur untuk dinding sebelah kiri adalah 0°C dan dinding yang lain mempunyai nilai -8°C. Temperatur awal dari air (liquid) untuk kedua cavity diatur 4°C dimana kondisi ini telah melewati anomali sehingga kondisi air tidak mempengaruhi hasil pemodelan.



Gambar 2. Kondisi batas (a) bujur sangkar (b) persegi panjang.

Tabel 1. Karakteristik dari air yang digunakan dalam pemodelan

Karakteristik air	Nilai Satuan	dan
Densitas fasa cair T = $272K(2)$	998,8 kg/m ³	
$\Gamma_{ref} = 275 \mathbf{K} (\mathbf{\rho}_0)$ Densitas fasa padat ($\mathbf{\rho}_s$)	916,8 kg//m ³	
Viskositas dinamis (µ)	0,001003	kg/m.s
Konduktivitas termal fasa cair (k_l)	0,6 W/1	m.K
Konduktivitas termal fasa cair (k_s)	2,26 W/	m.K
Panas spesifik (C_P)	4182 J/I	kg.K
Koefisien termal ekspansi $T_{ref} = 273 K (\rho_0)$	6,734 ×10) ^{−5} 1/K
Panas laten (λ)	335 kJ	/kg
Temperatur fasa cair (T_l)	0,3 °	С
Temperatur fasa padat (T_s)	0 °C	2

Pemodelan solidifikasi dilakukan menggunakan persamaan second order URANS dalam dua dimensi (2D) yang diselesaikan dengan model laminar. Algoritma SIMPLE digunakan untuk velocity coupling sedangkan PRESTO untuk diskretisasi untuk tekanan. Fraksi cair (f_l) dan total energi panas dari air (h)ditentukan dengan kondisi temperature yang dirumuskan pada persamaan 1 dan 2.

$$f_{l} = \begin{cases} 0 & T < T_{s} & \text{Fasa cair} \\ \frac{T - T_{s}}{T_{l} - T_{s}} & T_{s} < T < T_{l} & Interface \quad (1) \\ \vdots & \vdots & T_{l} < T & \text{Fasa padat} \end{cases}$$
$$h(T) = \int_{T_{ref}}^{T} C_{p} dT + f_{l} \lambda \quad \mathbf{si} \qquad (2)$$

Perpindahan panas terjadi antara air dengan dinding cetakan es pada pemodelan solidifikasi transien. Perpindahan panas perbedaan teriadi karena temperatur diantara keduanya. Distribusi temperatur dari air di dalam cavity ditunjukkan pada gambar 3. Penurunan temperatur air terjadi setelah melepaskan energi panas internal (panas sensibel) ke dinding. Lapisan termal muncul di dekat dinding yang mempunyai temperatur lebih rendah (dinding atas, bawah. dan kanan). Lapisan termal

bergerak ke dinding sebelah kiri yang mempunyai temperatur lebih tinggi selama proses pendinginan terjadi. Bentuk lapisan termal membentuk huruf (U) yang menghadap dinding sebelah kiri. Bentuk ini semakin mengecil sebagai tanda bahwa air telah mendekati temperatur dari dinding.



Gambar 3. Distribusi temperatur air di dalam *cavity* (a) bujur sangkar (b) persegi panjang.

Dinding *cavity* (atas, bawah, dan kanan) menyerap energi panas internal (panas sensibel dan laten) dari air berdasarkan kondisi batas yang diberikan. Fenomena yang berbeda terjadi pada dinding sebelah kiri yang melepaskan energi panas ke air, meskipun temperaturnya lebih rendah dari pada air. Hal ini terjadi karena pengaruh dari dinding atas dan bawah yang mempunyai temperatur lebih rendah dari pada dinding sebelah kiri.

Fenomena berbeda yang terjadi diantara bentuk *cavity* bujur sangkar dan persegi panjang ditunjukkan pada gambar 3. Penurunan distribusi temperatur air di dalam *cavity* bentuk persegi panjang lebih cepat dibandingkan bujur sangkar. Hal ini dikarenakan energi panas internal dari air di dalam *cavity* persegi panjang lebih besar dilepaskan ke dinding *cavity* selama waktu proses pendinginan pada durasi yang sama. Bentuk persegi pajang menyerap energi internal dari air sebesar 338,69 J/s lebih besar dari pada bujur sangkar yang hanya 311,64 J/s saat 4 jam proses pendinginan. Hal ini juga terlihat dari nilai perpindahan panas pada dinding atas dan bawah persegi panjang lebih besar 61,87% dari pada bentuk bujur sangkar.



Gambar 4. Nilai perpindahan panas selama 15 jam proses pendinginan (a) dinding atas, bawah, dan kanan (b) dinding kiri

Gambar 4 (a) menunjukkan pelepasan energi panas internal (panas sensibel dan laten) dari air ke dinding *cavity*. Penurunan perpindahan panas mengalami nilai perlambatan selama proses pendinginan berlangsung. Perpindahan panas dari cavity persegi panjang lebih besar dari pada bujur sangkar sebelum 11 jam awal proses pendinginan, sedangkan 4 jam terakhir nilai perpindahan panasnya menjadi lebih kecil dari pada bujur sangkar. Fenomena berbeda terjadi di dinding kiri cavity, air di dalam *cavity* menyerap panas dari dinding ini yang terlihat pada gambar 4 (b). Fenomena ini terjadi karena dinding sebelah kiri mempunyai temperatur yang lebih tinggi dari pada dinding *cavity* yang lain. Nilai perpindahan panas di dinding sebelah kiri

untuk kedua bentuk *cavity* menunjukkan nilai yang hampir sama.



Gambar 5. Fraksi cair dan padat dari air di dalam cavity untuk durasi pendinginan 4 jam dan 12 jam.

panas dari energi panas Perpindahan internal (sebagian besar panas laten) dari air ke interface (cair – padat) membuat proses solidifikasi terjadi. Gambar 5 menunjukkan fraksi padat dari air $(f_l) = 1$, fraksi cair $(f_l) =$ 0, dan interface (cair-padat) berkisar nilainya antara $0 < f_l < 1$. Fraksi padat berkembang lebih besar sedangkan untuk fraksi cair lebih kecil. Pergerakan interface (cair – padat) terlihat bergerak dari dinding yang lebih rendah temperaturnya ke dinding sebelah kiri cavity. Interface (cair - padat) meniadi lebih kecil selama proses pembekuan sampai air berubah sepenuhnya menjadi es. Pertumbuhan fraksi padat dari air disertai oleh kecepatan aliran fraksi cair yang semakin melemah. Aliran dari fraksi cair membentuk 2 arah aliran yang saling berlawanan. Arah aliran di dekat dinding sebelah kiri arahnya berlawanan dengan jarum jam sedangkan yang di dekat dinding sebelah kanan adalah searah dengan jarum iam.

Fenomena berbeda diantara *cavity* bujur sangkar dan persegi panjang pada gambar 5 menunjukkan pertumbuhan fraksi padat di dalam *cavity*. Pertumbuhan fraksi padat di dalam persegi panjang lebih cepat dari pada bujur sangkar. Bentuk persegi panjang menunjukkan ketebalan lapisan fraksi padat dibandingkan dengan panjangnya (δ/L) = 0,53 lebih besar dibandingkan bentuk bujur sangkar yang hanya memiliki (δ/L) = 0,41 untuk durasi 12 jam pendinginan.

Gambar 6 (a) menunjukkan pertumbuhan fraksi padat dari air yang bertambah luas selama 15 jam proses pendinginan. Pertumbuhannya semakin lambat karena perpindahan panasnya yang semakin menurun. Fraksi padat dari air di dalam cavity persegi panjang tumbuh lebih besar 7.03% dari pada bentuk bujur sangkar. Gambar 6 (b) menunjukkan perkembangan ketebalan lapisan fraksi padat dari dinding sebelah kanan pada y/h = 0.5. Ketebalan lapisan fraksi padat pada persegi panjang

dibandingkan dengan panjangnya (δ /L) lebih besar 71.7% dari pada bujur sangkar selama 15 jam proses pendinginan.



Gambar 6. (a) Fraksi padat dari air di dalam *cavity*(b) Pertumbuhan ketebalan lapisan fraksi padat dari dinding kanan *cavity*

Simpulan

Simpulan dari fenomena solidifikasi transien dari kedua bentuk *cavity* adalah sebagai berikut :

1. Perpindahan panas bentuk *cavity* persegi panjang lebih baik dibandingkan dengan bujur sangkar. Perpindahan panas dari air ke dinding *cavity* persegi panajang menunjukkan nilai yang lebih besar untuk dinding atas dan bawah yang menyebabkan perpindahan panasnya lebih besar.

2. Pertumbuhan fraksi solid dan lapisan ketebalannya untuk *cavity* persegi panjang lebih cepat dari pada bujur sangkar. Fraksi padat air di dalam *cavity* persegi panjang lebih besar 7,03% selama 15 jam proses pendinginan. Ketebalan lapisan fraksi padat juga lebih besar 71,7% pada y/h = 0,5.

Daftar Pustaka

- [1] Bourdillon A.C., Verdin P.G., Thompson C.P. (2015), Numerical Simulations of Water Freeng Processes in Cavities and Cylindrical Cavitys, Applied Thermal Engineering, Vol.75, Hal. 839-855.
- [2] Çengel, Y. A. (2003), *Heat Transfer: a Practical Approach, 2nd Edition*, McGraw-Hill.
- [3] Michalek T. & Kowalewski T.A. (2003), Simulations of The Water Freezing Process: Numerical Benchmark, Hal. 389-408.
- [4] PT GEA Grasso Indonesia." Standar Grasso untuk Pabrik Es Balok Indonesia". www.grassoindonesia.com. 1 Mei 2016.
- [5] Rady M.A. & Mohanty A.K. (1996), Natural Convection During Melting and Solidification of Pure Metals in a Cavity, Numerical Heat Transfer, Part A, Hal. 49-62
- [6] Vynnycky M. & Kimura S. (2007), An Analytical and Numerical Study of Coupled Transient Natural Convection and Solidification in a Rectangular Cavity. Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 50, Hal. 5204-5214.

[7] Yeoh G. H., Behnia M., Davis V., and Leonardi E. (1990), A Numerical Study of Three-Dimensional Natural Convection During Freezing of Water, Int. J. For Numerical Methods in Eng., Vol. 30, Hal. 899-914.