

STUDI NUMERIK DAN EKSPERIMENTA PEFORMANCE PENDINGINAN PRODUK PLASTIK DI DALAM STRAGGED MOLD DENGAN SALURAN PENDINGIN SPIRAL

Fauzun¹, M. Hamdi², A.E. Tontowi¹ dan T. Ariga³

¹Department of Mechanical and Industrial Engineering, Gadjah Mada University, Yogyakarta,
Indonesia

²Department of Engineering Design and Manufacture, University of Malaya, Kuala Lumpur,
Malaysia

³Department of Material Science, Tokai University, Hiratsuka, Japan
Phone: +62-274-521673, Fax: +62-274-521673, E-mail: fauzun71@yahoo.com

ABSTRACT

Hasil-hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa tipe saluran pendingin spiral dan penggunaan material konduktivitas termal tinggi memberikan efek signifikan pada peningkatan performance mold. Salah satu masalah yang harus dipecahkan saat mengkombinasikan kedua temuan di atas adalah bagaimana memanfaatkan material konduktivitas tinggi untuk pembuatan mold sedangkan umumnya kekuatan mekanis material seperti itu tergolong rendah? Staggered mold atau mold yang disisipi material konduktivitas tinggi secara selang-seling merupakan salah satu jawaban yang dihantarkan penulis dalam penelitian ini. Dengan simulasi numerik dan eksperimen, mold ini diselidiki untuk mengetahui performancenya dalam mendinginkan produk plastik di dalamnya. Simulasi proses pendinginan dari temperatur injeksi sampai dengan temperatur ejeksi dilakukan menggunakan paket software Fluent 6.1 untuk mengetahui product cooling time dan pola distribusi temperatur di dalam mold maupun produk selama proses di atas. Sebelum dianalisa, validasi hasil-hasil simulasi di atas dihantarkan dengan melakukan serangkaian pengujian terhadap 2 prototype staggered mold untuk beberapa variasi Reynolds Number. Hasilnya menunjukkan bahwa deviasi untuk tiga parameter yang diamati (temperatur, cooling time dan coolant pressure drop) kurang dari 5%, ini berarti bahwa hasil simulasi cukup mewakili proses riil yang terjadi. Selanjutnya dari hasil analisa performance mold dari sisi CR/PE dan uniformity temperatur produk, diperoleh bahwa peningkatan Re tidak selalu berimplikasi pada peningkatan performance mold. Ada satu nilai Re yang memberikan nilai maksimum pada performance mold yang mana hasil analisa lanjut mengisyaratkan bahwa nilai Re tersebut ada di daerah aliran transisi. Disamping itu juga diketahui bahwa semakin besar perbedaan nilai konduktivitas termal antara material induk dengan material sisipan akan menyebabkan peningkatan cooling time dan ketidakseragaman temperatur produk selama proses pendiginan yang akhirnya berdampak pada penurunan performance mold.

Keywords: Staggered Mold, Spiral Channel, Cooling, CR/PE, Uniformity.

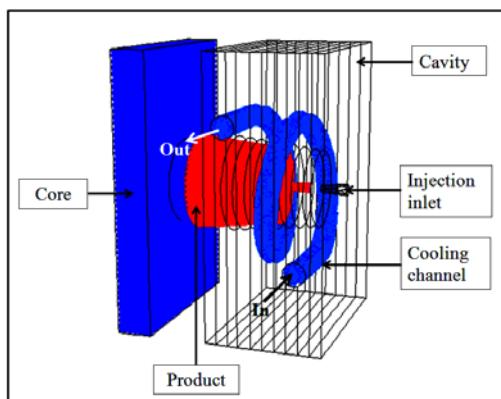
1. Pendahuluan

Sebagian besar produk yang terbuat dari plastik dibentuk menggunakan mesin cetak injeksi [1]. Ada 4 proses penting di setiap siklus kerja mesin ini antara lain: pengisian, packing, pendinginan dan injeksi [2]. Pendinginan merupakan proses yang paling penting diantara ketiganya karena ia menentukan kecepatan dan kualitas hasil cetakan [3]. Umumnya proses pendinginan ini dilakukan dengan membuat saluran di dalam mold dengan berbagai bentuk dan mengalirkan coolant didalamnya untuk menyerap lebihan panas dalam

produk supaya mudah dikeluarkan. Hasil penelitian yang dilakukan Sachs (2000) menunjukkan bahwa saluran pendingin konformal mencapai temperatur ejeksi lebih cepat dibanding saluran pendingin lurus disamping itu temperatur produk selama proses pendinginan juga lebih seragam [3,4]. Hal yang sama juga dijumpai manakala menggunakan material mold dengan konduktivitas termal yang lebih tinggi. Kedua temuan di atas tidak serta merta dapat diaplikasikan sekaligus dalam pembuatan mold karena umumnya material yang memiliki konduktivitas termal tinggi mempunyai



kekuatan mekanik yang rendah sehingga dikhawatirkan tidak mampu menahan beban-beban yang ada selama proses molding. Dalam penelitian ini dihadirkan staggered mold atau mold yang disisipi dengan material konduktivitas termal tinggi yang disusun secara selang seling dengan saluran pendingin berbentuk spiral sebagai salah satu alternatif memecahkan masalah di atas. Bagaimanapun proses pendingin di dalam mold ini perlu diselidiki untuk mengetahui unjuk kerjanya. Dalam penelitian ini penyelidikan dilakukan dengan simulasi numerik menggunakan software Fluent 6.1 dan eksperimen secara langsung. Penyelidikan difokuskan pada bagaimana pengaruh coolant Reynolds number, panjang saluran pendingin dan kombinasi material mold yang digunakan terhadap rasio cooling rate dan komsumsi energi pompa coolant (CR/PE) dan keseragaman temperatur produk selama proses pendingin (U). CR/PE dan U merupakan parameter penting untuk menilai unjuk kerja suatu mold. Penelitian ini dibatasi untuk mold-mold tanpa striple plate yang memproduksi cup plastik HDPE untuk semua dimensi dengan ketebalan maksimum 5 mm. Pemilihan bentuk di atas didasarkan pada pertimbangan bahwa produk ini sangat dominan di masyarakat. Sedangkan pembatasan ketebalan diambil untuk menghindari proses pendinginan yang terlalu timpang antara sisi dalam dan sisi luar produk akibat penempatan saluran pendingin pada sisi cavity saja. Penempatan saluran pendingin ini dengan pertimbangan untuk memudahkan proses manufakturnya mengingat salurannya berbentuk spiral seperti ditunjukkan dalam Gb.1. Bentuk ini dipilih dengan pertimbangan ia mempunyai kemampuan menyerap panas lebih seragam dengan jumlah panas persatuan massa coolant lebih besar.



Gb.1 Model mold yang diselidiki

2. Metodologi Penelitian

2.1 Prosedur penelitian

Secara umum langkah-langkah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengumpulkan data-data untuk simulasi.

2. Melakukan simulasi dengan variasi kombinasi material mold (k_1-k_2), bilangan Reynolds (Re) dan rasio panjang saluran pendingin dengan panjang produk (L_c/L_p). Untuk semua variasi kondisi operasi dijaga konstan.
3. Melakukan eksperimen proses molding dengan variasi seperti di atas secara sampling.
4. Melakukan validasi hasil-hasil simulasi dengan hasil-hasil eksperimen.
5. Menghitung CR/PE dan U untuk semua variasi.
6. Melakukan analisis hasil-hasil di atas.
7. Membuat ulasan dan kesimpulan.

2.2 Prosedur simulasi

Untuk setiap variasi, simulasi dilakukan dengan mengikuti step-step sebagai berikut:

1. Identifikasi masalah dan pra-komputasi
 - a. Mendefinisikan tujuan pemodelan
 - b. Mengidentifikasi domain model
 - c. Mendesain dan membuat grid model (Gambit)
 - d. Menspesifikasi tipe batas dan isi (Gambit)
 - e. Mengeksport file ke file msh. (Gambit)
2. Eksekusi solver (Fluent)
 - a. Mengimport file msh dari step 1.
 - b. Membangun model numerik (pemilihan solver, mendefinisikan sifat material dan kondisi batas)
 - c. Menjalankan iterasi dan memonitor solusi
3. Pasca komputasi
 - a. Menguji hasil (didasarkan pada nilai residual scale dan prinsip-prinsip konservasi)
 - b. Mempertimbangkan revisi-revisi terhadap model (jika diperlukan)

3. Model Matematik

3.1 Diskripsi fenomena fisik

Proses pendinginan dalam mold dapat dikatakan sebagai proses penurunan temperatur produk dengan memanfaatkan efek konduksi material mold yang didukung dengan efek konveksi aliran coolant di dalam saluran pendingin dan efek kombinasi konveksi dan radiasi udara atmosfer. Secara umum, selama proses tersebut ada tiga macam fenomena fisik di dalam mold yang berlangsung secara simultan dan berubah terhadap waktu. Ketiganya antara lain: proses pembekuan produk (HDPE) dalam ruang cavity, aliran panas dari produk ke coolant dan udara atmosfer dan aliran coolant di dalam saluran pendingin selama menyerap panas. Dalam pemodelan ini, proses pendinginan berlangsung mulai dari melt plastic memenuhi ruang cavity hingga temperatur ejeksi plastik tercapai, sehingga selama pendinginan, plastik dalam kondisi statik. Dan khusus untuk coolant, selama menyerap panas, ia tidak mengalami perubahan fasa karena jumlah panas yang diserap diperkirakan tidak akan menaikkan temperatur coolant hingga titik didihnya.



3.2 Pendekatan / Asumsi

Simulasi dalam penelitian ini mengambil beberapa pendekatan / asumsi berikut:

1. Proses pembekuan didekati sebagai pembekuan dinamis dengan kecepatan sangat rendah.
2. Domain komputasi hanya difokuskan pada cavity dan inner core tanpa core plate. Core plate dicakup di dalam Fluent ketika mendefinisikan kondisi batas.
3. Sifat-sifat fisik mold dan produk (HDPE) di setiap fasanya konstan dan seragam selama proses pendinginan.

Pendekatan/asumsi tersebut dilakukan untuk menyederhanakan kompleksitas geometri dan fenomena fisik dalam mold yang dipelajari dan karena adanya keterbatasan kemampuan software yang digunakan.

3.3 Persamaan-persamaan pembangun

Segala persamaan pembangun yang digunakan dalam simulasi ini menggunakan acuan sistem koordinat kartesius (x,y,z0). Dengan mempertimbangkan ragam fenomena fisik yang terjadi di dalam mold dan pendekatan yang dilakukan, maka persamaan-persamaan tersebut adalah sebagai berikut:

Kontinuitas:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

Momentum:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

Dimana tensor tegangan dinyatakan dengan:

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (3)$$

Energi:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\vec{v} \rho h) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h \quad (4)$$

Untuk daerah solidifikasi, H didefinisikan:

$$H = h + \Delta H \quad (5)$$

Dimana:

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (6)$$

$$\Delta H = \beta L \quad (7)$$

dan fraksi fasa cair, β didefinisikan:

$$\beta = 0 \text{ if } T < T_{solidus}$$

$$\beta = 1 \text{ if } T > T_{liquidus}$$

$$\beta = \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} \text{ if } T_{solidus} < T < T_{liquidus} \quad (8)$$

3.4 Sifat-sifat fisik material

Ada 4 macam material dalam sistem mold yang dipelajari, antara lain: steel and copper (mold), water (coolant), and HDPE (product). Sifat-sifat fisik keempatnya diasumsikan konstan karena selama proses

pendinginan perubahannya diperkirakan tidak signifikan. Untuk material yang mengalami perubahan fasa, konstan disini berarti konstan pada tiap fasanya. Detail sifat-sifat tersebut ditunjukkan dalam Tabel 1 berikut:

Tabel 1 Sifat-sifat material dalam sistem yang dipelajari

Properties	Steel	Water	HDPE
Density (kg/m ³)	8030	998.2	960
Specific heat (J/kg-K)	502.48	4182	2090
Thermal cond. (W/m-K)	16.27	0.6	0.33
Viscosity (kg/m-s)	-	1.003e-03	1.558e-05
Molecular weight (g/mol)	-	18.0152	28
Melting heat (J/kg)	-	-	23150
Solidus temp. (K)	-	-	473
Liquidus temp. (K)	-	-	473

3.5 Kondisi batas

Dinding luar mold didefinisikan memiliki batas konveksi dan radiasi, karena dinding tersebut kontak dengan udara atmosfer. Definisi yang sama juga diberikan untuk permukaan plat pendukung dan clamp tetapi dengan menambahkan ketebalannya. Sementara itu untuk coolant, bagian inlet didefinisikan sebagai inlet velocity dan untuk semua variasi, temperatur coolant pada inlet adalah 291 K. Dan untuk semua bagian outlet, ia didefinisikan sebagai pressure outlet dimana tekanan statiknya sama dengan tekanan atmosfer. Pendefinisian yang sama juga dikenakan pada bagian inlet maupun outlet plastik tetapi dengan nilai berbeda. Secara berturut-turut kecepatan dan temperatur melt plastik adalah 0.001 m/s dan 477 K. Kecepatan yang sangat rendah ini diambil supaya simulasi proses solidifikasi bisa mendekati proses yang sebenarnya (static solidification).

3.6 Definisi beberapa parameter

Parameter-parameter berikut digunakan untuk mengevaluasi hasil-hasil simulasi untuk semua variasi:

1. Cooling time (CT): Waktu yang dihitung mulai dari ruang cavity terisi penuh oleh molten plastic hingga mold akan dibuka.
2. Cooling rate (CR): Total panas yang dilepas oleh plastik per cooling time.
3. Coolant pumping energy (PE): Total energi yang diperlukan pompa untuk mengalirkan coolant ke dalam saluran pendingin selama proses pendinginan. Sistem perpipaan yang digunakan diasumsikan memiliki elevasi total 1 m dan panjang 1.8 m.
4. Uniformity (U): Tingkat keseragaman temperatur produk selama proses pendinginan. Secara matematik, parameter ini didefinisikan sebagai berikut:



$$\text{Uniformity} = 1 - \overline{\text{STD}}$$

$$= 1 - \frac{\sum_{j=1}^k \text{STD}_j}{k} \quad (9)$$

Where:

$$\bullet \quad \text{STD}_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}{n-1}} \quad (10)$$

- i = Titik-titik pengambilan data dalam produk.
- j = Step waktu pengambilan data
- Nilai maksimum untuk uniformity = 1 (the best)

4. Komputasi Numerik

4.1 Metode numerik

Persamaan-persamaan pembangun di atas diselesaikan dalam kerangka sistem koordinat kartesius dengan metode volume hingga (finite volume). Metode ini sama seperti yang dikenalkan oleh Patangkar [5]. Secara umum, langkah-langkahnya adalah sebagai berikut:

1. Membagi domain menjadi volume atur kecil-kecil menggunakan suatu grid komputasi.
2. Mengintegrasikan persamaan-persamaan pembangun di tiap volume atur untuk membangun persamaan-persamaan aljabar dengan variabel terikat diskret seperti kecepatan, temperatur, tekanan dan conserved scalars.
3. Linearisasi persamaan-persamaan diskret tersebut dan menyelesaiakannya untuk mendapatkan nilai-nilai dari variabel terikat di atas.

Dalam simulasi ini, software Fluent 6.1 digunakan sebagai solver numeriknya [6].

4.2 Sistem grid

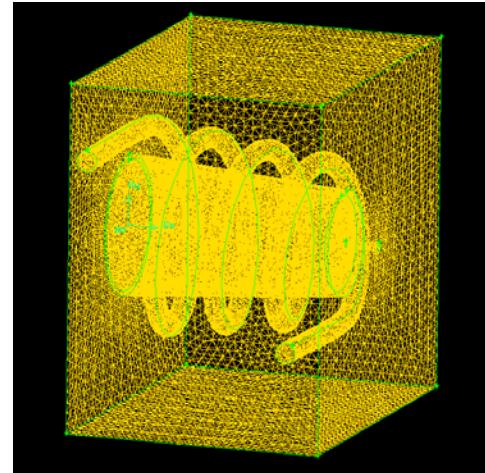
Sistem grid/mesh yang digunakan untuk mendiskritisasi persamaan-persamaan pembangun di kasus ini adalah tetrahedral grid (Tgrid). Ia digunakan karena pertimbangan kompleksitas geometri model. Gb.2 menunjukkan sebuah contoh model yang telah dimesh menggunakan Tgrid. Dalam simulasi ini jumlah elemen-element (grid/mesh) di tiap variasinya berkisar 400.000.

Term konveksi dalam persamaan-persamaan momentum dan energi dimodelkan dengan first-order upwind scheme dan term difusi dihitung menggunakan multi linear interpolation. Persamaan diskret akhir untuk variabel ϕ di tiap node adalah sebuah himpunan persamaan aljabar linear yang dapat dituliskan seperti berikut:

$$a_P \phi_P = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (11)$$

Dimana a_P adalah koefisien pusat/tengah, a_{nb} adalah koefisien tetangga, dan b adalah konstanta yang

berasal dari source term S_C in $S = S_C + \phi_{nb} S_p$ dan kondisi batas. Algoritma SIMPLE digunakan untuk menyelesaikan persamaan ter-couple antara kecepatan dan tekanan. Untuk menstabilkan iterasi dan mempercepat konvergensi dipilih faktor underrelaksasi seperti ditunjukkan dalam Tabel 2 di bawah.



Gb.2 Topologi Tgrid dalam model

Unknown variables	Under relaxation
Pressure	0.13
Density	0.2
Body forces	0.2
Momentum	0.17
Liquid fraction update	0.19
Energy	0.2

Tabel 2 Faktor under relaksasi yang digunakan

4.3 Kriteria konvergensi

Secara ideal, komputasi numerik dikatakan konvergen pada iterasi ke- n jika residual scale hasil iterasi di semua node sama dengan nol. Bagaimanapun, biasanya untuk residual scale dibawah nilai yang direkomendasikan dapat juga dikatakan telah konvergen karena hasil-hasilnya tidak menyimpang jauh dari prinsip konservasi ini jika dilakukan pengecekan. Dalam simulasi ini, kriteria konvergensi yang digunakan adalah 10^{-7} untuk persamaan energi dan 10^{-3} untuk persamaan-persamaan yang lain. Didasarkan pada solver used for other equations. Secara matematik, residual scale ini didefinisikan sebagai berikut:

$$\bar{R}^\phi = \frac{R_{\text{iteration } N}^\phi}{R_{\text{iteration } M}^\phi} \quad (12)$$

Dan,

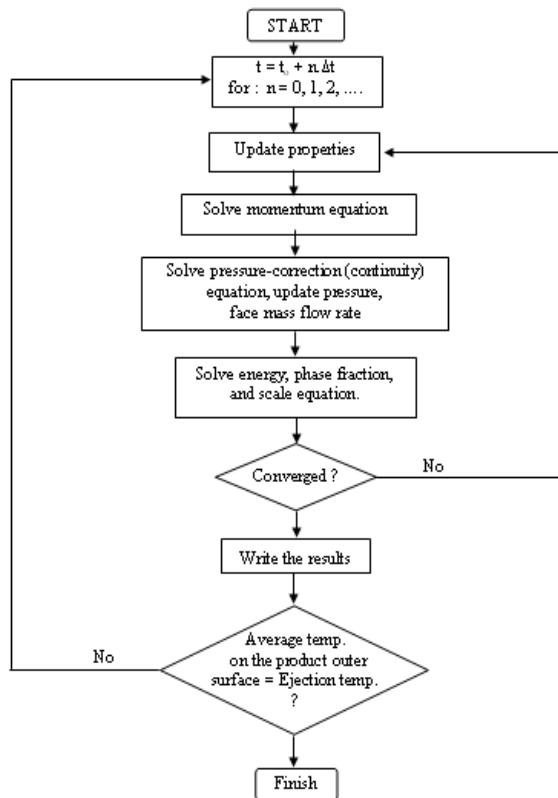


$$R^\phi = \sum_{\text{cells } P} \left| \sum_{\text{nb}} a_{\text{nb}} \phi_{\text{nb}} + b - a_P \phi_P \right| \quad (13)$$

Dimana $R^\phi_{iterationM}$ menotasikan nilai residual maksimum setelah iterasi ke-M dan ϕ diterapkan untuk p , v_i dan T .

3.4 Algoritma perhitungan

Solver yang dipilih dalam simulasi ini adalah segregated, karena untuk proses solidifikasi tak tunak, solver lain tidak bisa digunakan. Dengan solver ini, persamaan-persamaan pembangun diselesaikan secara berurutan dan karena persamaan-persamaan tersebut non-linear dan tercouple satu sama lain, beberapa looping iterasi dilakukan sebelum solusi konvergen diperoleh. Gambar berikut menunjukkan algoritma dari solver ini:



Gb.3 Algoritma penyelesaian segregated

5. Hasil dan Pembahasan

Seluruh hasil simulasi ini memiliki residual scale di bawah kriteria konvergensi yang direkomendasikan Flents dan ketidaksetimbangan konservasi massa maupun energi dibawah 5%. Hasil ini mengisyaratkan

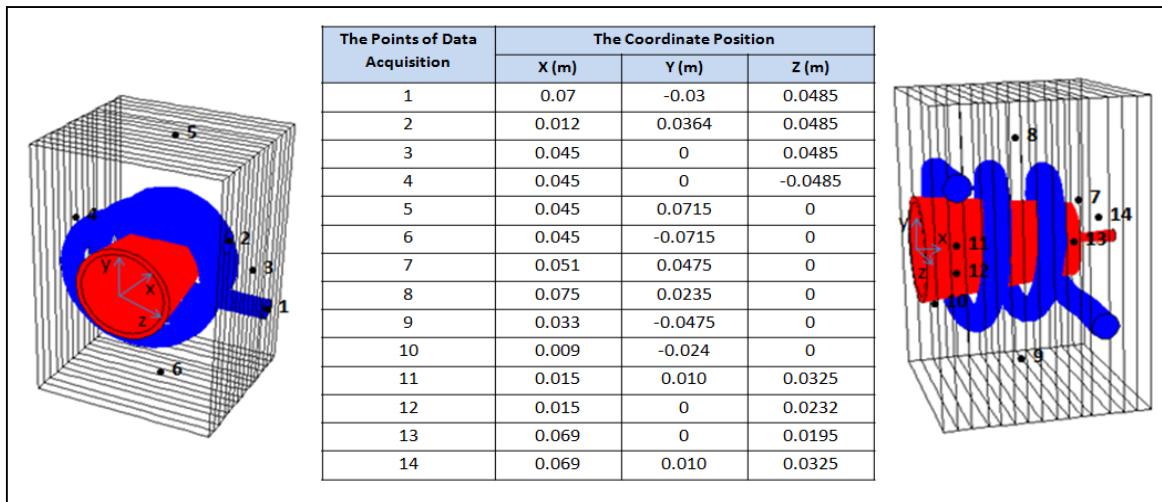
bahwa dari sisi komputasi, hasil-hasil simulasi ini tidak mengandung kesalahan yang berarti dan masih bisa diterima.

Selanjutnya validasi hasil simulasi ini dengan hasil eksperimen yang dilakukan secara sampling menggunakan 2 prototype staggered mold dengan kombinasi material plat mild steel-copper dan dengan pengambilan data secara random dan simultan selama proses pendinginan di lokasi seperti ditunjukkan dalam Gb.4 (untuk temperatur) menunjukkan bahwa prosentase deviasi temperatur, pressure drop dan cooling time secara rerata di bawah 5%. Ini berarti hasil-hasil simulasi ini telah memenuhi batasan yang direkomendasikan. Oleh karena itu, hasil-hasil simulasi ini cukup mewakili peristiwa aktualnya dan dapat dianalisa lebih lanjut untuk mencapai sasarnanya.

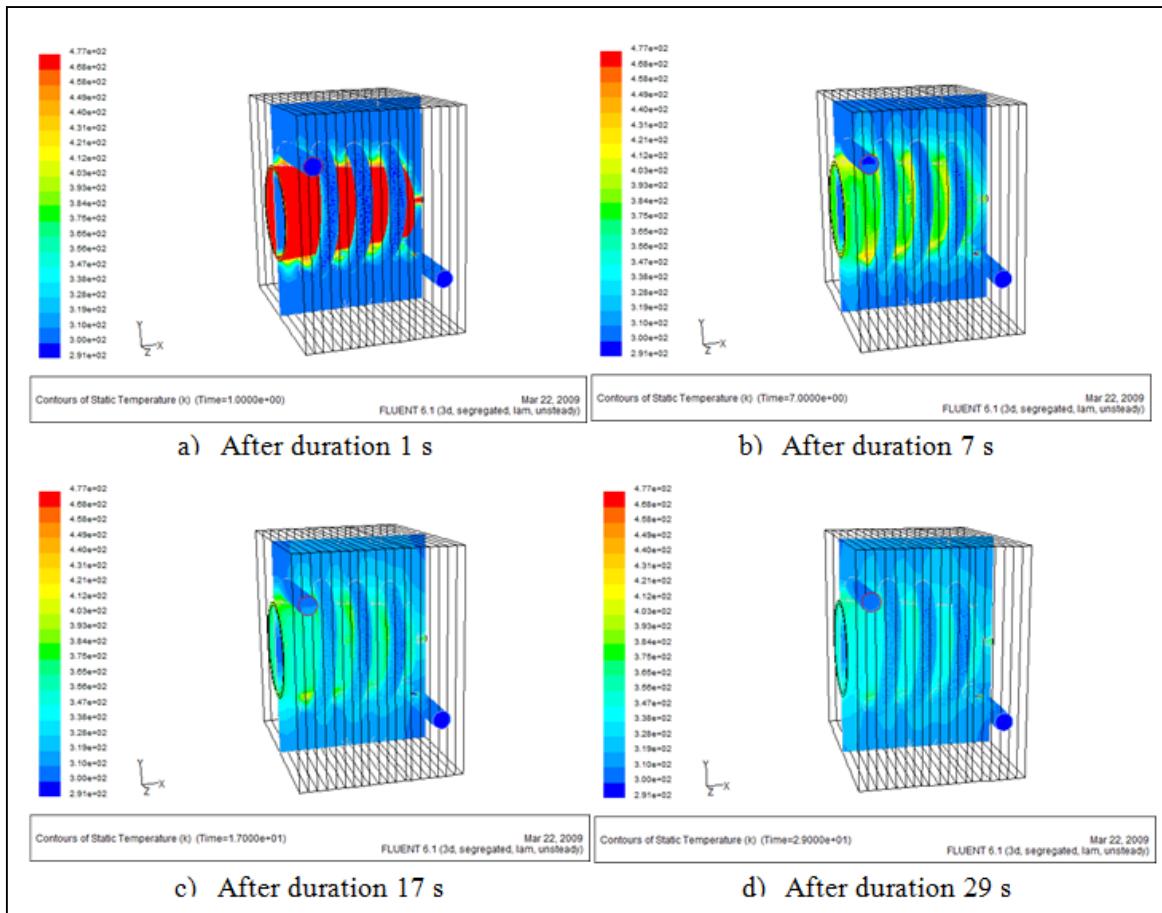
Secara umum, untuk semua variasi, hasil simulasi proses pendinginan di dalam staggered mold ini dapat digambarkan sebagai berikut: di bagian yang memiliki konduktivitas termal lebih tinggi, panas mengalir lebih cepat dan di lokasi sekitar produk yang berada dekat dengan saluran pendingin mempunyai gradien temperatur lebih tinggi. Sedangkan di bagian yang memiliki konduktivitas termal lebih rendah, panas mengalir lebih lambat termasuk di lokasi sekitar produk yang berada dekat saluran pendingin. Ini seperti terlihat pada Gb.5. Ini berimplikasi pada pola distribusi temperatur di dalam produk dan kronologi solidifikasinya. Bagian produk yang berada dekat dengan plat konduktivitas termal tinggi akan mendingin lebih cepat dibandingkan bagian lainnya sehingga ia akan membeku lebih dulu yang selanjutnya akan diikuti bagian lain yang berada di dekatnya atau di daerah yang memiliki gradien temperatur di bawahnya seperti ditunjukkan Gb.6. Kondisi tersebut menyebabkan keseragaman temperatur produk selama proses pendinginan (Uniformity) tidak setinggi uniformity pada bulk mold. Realitas tersebut akan bertambah parah jika selisih besar konduktivitas panas antara 2 jenis material plat yang digunakan semakin besar seperti terlihat pada Tabel 3. Bagaimanapun pengaruh selisih konduktivitas ini tidak signifikan terhadap CR/PE, karena parameter CR/PE ini lebih ditentukan oleh rata-rata konduktivitas termal material plat yang digunakan.

Untuk variasi Re, peningkatan Re menyebabkan mode pengambilan panas oleh pergerakan coolant dan gesekan antara coolant dengan dinding saluran pendingin akan bertambah besar. Secara otomatis, ia akan meningkatkan laju pendinginan produk dan coolant pressure drop. Dari kaca mata ekonomi, peningkatan laju pendinginan produk ini adalah keuntungan karena ia akan menurunkan produktion time. Sebaliknya, peningkatan coolant pressure drop merupakan kerugian karena akan meningkatkan komsumsi energi listrik di pompa pendingin. Dengan parameter CR/PE, Re optimum atau Re yang memberikan keuntungan optimal



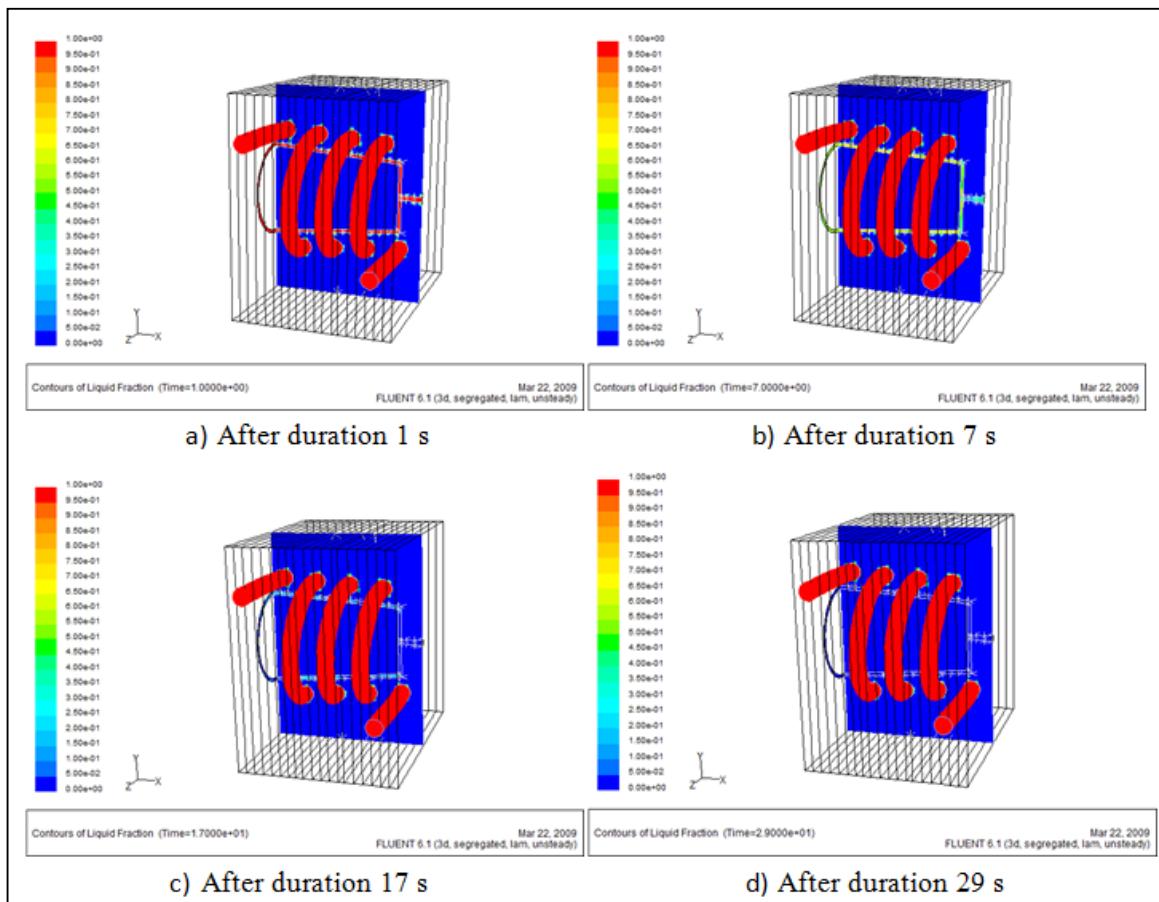


Gb.4 Titik-titik pengambilan data temperatur dalam mold yang dipelajari



Gb.5 Distribusi temperatur di dalam staggered mold (mild steel-copper) selama proses pendinginan





Gb.6 Distribusi fasa di dalam staggered mold (mild steel-copper) selama proses pendinginan

bagi kedua sisi tersebut. Dalam penelitian ini, optimasi Re tidak dilakukan mengingat minimnya data yang dipunyai, penyelidikan hanya diarahkan untuk mengetahui seberapa besar efek Re ini pada CR/PE dan U staggered mold. Hasil ini dapat dilihat pada Tabel 4, di sana terlihat bahwa CR/PE sangat dipengaruhi oleh Re, sedangkan U tidak demikian, U relatif tetap untuk berapapun nilai Re.

Tabel 3 Hasil simulasi untuk variasi ($k_1 - k_2$)

Kombinasi material plat untuk mold	$k_1 - k_2$ (W/m.K)	CR/PE (W/J)	U (%)
Copper - Mild steel	371,33	81.2272	88,54
Aluminum – Mild steel	186,13	72.1644	89,11
Copper - Aluminum	185,20	100.796	88,21

Untuk variasi Lc/Lp, peningkatan Lp/Lc berarti peningkatan luas dinding saluran pendingin. Ini memberikan efek ganda yang secara ekonomis saling kontradiksi yaitu peningkatan area perpindahan panas

dan area gesekan. Efek pertama akan berdampak pada pengurangan waktu pendinginan produk yang berujung pada peningkatan produktivitas, sedangkan efek kedua akan berdampak pada peningkatan coolant pressure drop yang berujung pada peningkatan komsumsi energi listrik pada pompa coolant.

Tabel 4 Hasil simulasi untuk variasi Re

Reynolds Number	CR/PE (W/J)	U (%)
2626	76,9657	87,11
2614	81,2272	88,54
2574	86,7681	86,98

Tabel 5 Hasil simulasi untuk variasi Lc/Lp

Panjang saluran pendingin dlm Lc/Lp	CR/PE (W/J)	U (%)
8,715	69,0825	96,11
9,836	71,2178	96,52
11,251	70,6136	97,13



Dengan parameter CR/PE bisa ditemukan nilai Lc/Lp yang memberikan efek maksimal pada kedua parameter di atas. Dalam penyelidikan ini, optimasi tidak dilakukan, penyelidikan hanya difokuskan untuk mengetahui pengaruh Lc/Lp terhadap CR/PE dan U staggered mold. Hasil ini dapat dilihat pada tabel 5, di sana terlihat bahwa CR/PE maupun U sangat dipengaruhi Lc/Lp, meskipun untuk U pengaruh ini tidak begitu besar. Untuk CR/PE, pengaruh tersebut tampak signifikan sekali, semakin tinggi Lc/Lp (saluran pendingin semakin panjang), semakin besar CR/PE. Bagaimanapun bentuk relasi seperti ini hanya terbatas sampai Lc/Lp optimum, setelah nilai ini relasi yang sebaliknya yang akan berlangsung.

6. Kesimpulan

Dari semua step yang dilakukan dalam penelitian ini, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Semakin besar selisih konduktivitas termal plat mold, semakin rendah nilai uniformitynya. Kondisi ini akan memperbesar peluang cacat maupun gagal produk. Peningkatan selisih tersebut tidak punya korelasi dengan CR/PE, parameter ini lebih ditentukan oleh nilai rata-rata konduktivitas termal kedua plat di atas.
2. Peningkatan Re berefek ganda yang saling kontradiktif pada penurunan product cooling time dan peningkatan coolant pressure drop. Efek ini tidak tampak pada keseragaman temperatur produk selama proses pendinginan karena nilai uniformitynya cenderung tetap.
3. Lc/Lp mempunyai pengaruh terhadap CR/PE dan U. Semakin besar Lc/Lp semakin tinggi nilai uniformitnya. Pola seperti ini tidak sepenuhnya terjadi pada CR/PE, ada nilai Lc/Lp optimum yang setelah nilai ini, peningkatan Lc/Lp akan memberikan efek sebaliknya (penurunan CR/PE).

Ucapan terima kasih

Melalui tulisan ini, kami menyampaikan penghargaan setinggi-tingginya kepada AUN/SEED-Net (JICA) atas dukungan finansial yang diberikan terhadap penelitian ini.

Daftar pustaka

- [1] Crawford, R.J., "Rubber and Plastic Engineering Design and Application", Applied Publisher Ltd., (1987), p.110.
- [2] Pun, K.F, Hui, I.K, Lewis, W.G, Lau, H.C.W., "A multiple-criteria environmental impact assessment for the plastic injection molding process: a methodology", Journal of Cleaner Production (2002), p.11–41.
- [3] Sachs, E, et al (2000), "Production of injection molding with conformal cooling channels using the 3D printing process", Polymer Engineering Science 40 (5) (2000), p.1232–1247.
- [4] Delgarno, K.W., "Layer manufactured production tooling incorporating conformal heating channels for transfer molding of elastomer compounds", Plastic Rubber Comp. 30 (8) (2001), p.384–388.
- [5] Patankar, S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere (1980), Washington, DC.
- [6] Fluent Users Guide, version 6.1, Fluent Inc. (1996), Lebanon, NH.

