



Analisis Numerik Perpindahan Panas Pada Saluran Pendingin Plastik Injeksi Molding Menggunakan Polyhedral Mesh

Angger Bagus Prasetyo^{1*}, Fauzun², Azhim Azyratul Azmi³, Rizqi ilmal Yaqin⁴, Binsar Maruli Pakpahan⁵

¹Institut Teknologi Nasional Yogyakarta, Sleman

²Universitas Gadjah Mada, Sleman

³Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Bantul

⁴Politeknik Perikanan dan Kelautan, Dumai ⁵Universitas Negeri Medan, Medan

[*angger.bagus@itny.ac.id](mailto:angger.bagus@itny.ac.id)

Abstract

The use of mesh types and mesh manufacturing density in a simulation play a very important role, this is because it minimizes computational time and cost and gets the desired analysis results. In this study, presents the CFD analysis of heat transfer that occurs in plastic injection mold cooling channels using polyhedral mesh. The most important part of the simulation is the select mesh types. Mesh is good, affects the calculation results of a simulation. The use of this type of mesh itself also affects the temperature field and the temperature profile that occurs in the cooling channel as well as the contour profile resolution. The use of polyhedral mesh for complex geometric shapes such as injection molds on plastic product cooling channels is able to reduce the iteration time of the simulation and can speed up the convergence of calculations, this is evidenced by the results of iteration simulation on the straight channel capable of converging at the 268th iteration of a total of about 1000 iterations and iterations of convergent conformal channel simulations on the 232nd iteration with a total of about 1000 iterations.

Keywords: CFD; Polyhedral Mesh; Injection Molding

Abstrak

Penggunaan jenis mesh dan kepadatan pembuatan mesh dalam sebuah simulasi memegang peranan yang sangat penting, hal ini dikarenakan meminimalisir waktu dan biaya komputasi serta mendapatkan hasil analisis yang diinginkan. Pada penelitian ini, menyajikan tentang analisa CFD perpindahan panas yang terjadi pada saluran pendingin mold injeksi plastik dengan menggunakan mesh polyhedral. Bagian yang terpenting dari simulasi adalah pemilihan jenis mesh. Mesh yang baik, mempengaruhi pada hasil perhitungan dari sebuah simulasi. Penggunaan jenis mesh sendiri juga mempengaruhi bidang suhu dan profil suhu yang terjadi pada saluran pendingin serta resolusi profil kontur. Penggunaan mesh polyhedral untuk bentuk geometri yang kompleks seperti mold injeksi saluran pendingin produk plastik mampu meminimalisir waktu iterasi simulasi dan dapat mempercepat konvergen perhitungan, hal tersebut dibuktikan dengan hasil iterasi simulasi pada saluran lurus mampu konvergen pada iterasi ke-268 dari total keseluruhan iterasi sekitar 1000 iterasi dan iterasi simulasi saluran konformal konvergen pada iterasi ke-232 dengan total keseluruhan iterasi sekitar 1000.

Kata kunci: CFD, Mesh Polihedral, Injeksi Molding

1. PENDAHULUAN

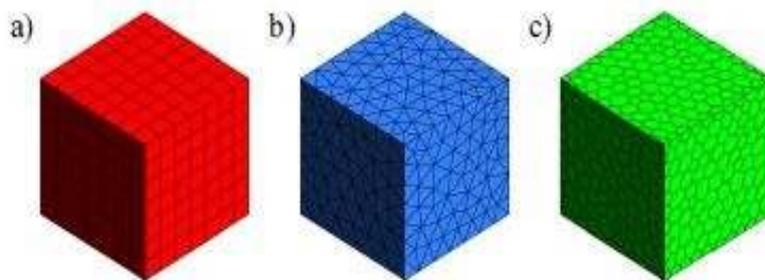
Injection molding adalah proses daur pembentukan plastik kedalam cetakan yang diinginkan dengan cara menekan plastik cair kedalam sebuah ruang (*cavity*) [1]. Proses tersebut sangat kompleks sebab melibatkan proses mekanik dan panas. Pada setiap proses sangat berpengaruh terhadap produk hasil injeksi. Proses yang tidak sempurna dapat menyebabkan cacat atau kegagalan pada produk. Cacat produk yang sering terjadi pada proses tersebut meliputi cacat penyusutan (*shrinkage*), *warpage*, *weld-*

line, sink-marks, retak (residual stress) dan kerusakan saat produk keluar dari cetakan (*mold*). Sistem pendinginan yang baik dapat menyerap panas dari cetakan secara merata sehingga produk yang dihasilkan memiliki kualitas yang baik. Demi mendapatkan penyusutan yang baik dan merata, maka diperlukan efisiensi sistem saluran pendingin.

Desain perancangan sistem pendinginan pada cetakan plastik dengan jumlah *cavity* banyak dapat didekati dengan menggunakan persamaan perpindahan kalor konduksi dua dimensi yang diselesaikan dengan menggunakan metode *finite element* dengan bantuan komputer [2]. Pada saat ini, banyak diterapkan berbagai metode matematika baru untuk menyelidiki beberapa kasus [3] yang berhubungan dengan sains kontemporer [4] dan teknologi [5-7]. *Computational Fluid Dynamics (CFD)* adalah salah satu metode yang dimaksud, penerapannya digunakan sebagai alat penelitian umum di bidang industri termasuk otomotif [8] dan [9], teknik sipil [10-14], teknik listrik [15, 16] dan lainnya [17].

Penggunaan CFD memungkinkan untuk desain dan peningkatan produk berbiaya komputasi yang rendah. Penggunaan metode numerik sebagai alat untuk menyelesaikan persamaan diferensial nonlinier yang menggambarkan aliran fluida, perpindahan panas dan massa, reaksi kimia (pembakaran) dan lainnya. Pada umumnya persamaan yang disebutkan di atas, tidak memiliki solusi analitis, oleh sebab itu, penggunaan metode numerik diharapkan mampu diterapkan untuk menyelesaikannya.

Computational Fluid Dynamic (CFD) merupakan sebuah metode pendekatan *numeric* yang mampu menggambarkan aliran fluida yang dapat dianalisa serta dapat digunakan untuk menyelesaikan suatu persamaan diferensial *nonlinear*. Penerapan metode *numeric* ini bertujuan untuk menyelesaikan metode analitik. Perbaikan *mesh* komputasi sangat berpengaruh terhadap hasil stabilitas numerik model dan akibatnya keakuratan hasil yang didapat [14, 16]. Selain itu, difusi numerik serta kualitas dan waktu konvergensi dipengaruhi oleh jenis *mesh* yang digunakan. Tiga jenis *mesh* yang diterapkan pada simulasi CFD dapat dilihat pada Gambar 1 [18].

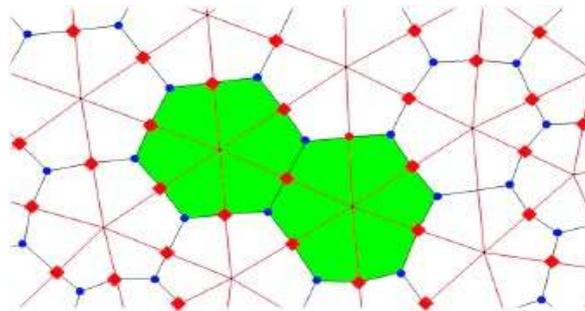


Gambar 1. (a) Mesh Hexahedral (b) Mesh Tetrahedral (c) Mesh Polyhedral

Beberapa peneliti telah menggunakan *mesh polyhedral* daripada elemen *tetrahedral* [19, 20]. Berdasarkan penelitian yang dilakukannya, mereka menyimpulkan bahwa jenis *mesh* polihedral dapat mengatasi perbedaan yang berkaitan dengan *mesh tetrahedral* dan *mesh hexahedral*. Namun, elemen *polyhedral* secara komputasi lebih mahal untuk beberapa kasus karena geometrinya yang kompleks [21]. Secara keseluruhan, keakuratan dalam perhitungan dan biaya komputasi ditentukan oleh berapa banyak jumlah sel yang dipergunakan, semakin banyak jumlahnya menunjukkan keakuratan dan biayanya tinggi, tetapi ini tidak selalu benar. Pemilihan jenis *mesh* yang tepat dan metodologi pembuatan grid dapat memperoleh solusi yang akurat dan handal, seperti halnya dalam pembentukan grid terstruktur dan tidak terstruktur. Pada bidang akademik dan industri, penggunaan jenis *mesh hexahedral*, *tetrahedral*, dan *polyhedral* dan kombinasinya sering dipergunakan untuk memecahkan permasalahan analisa CFD. Pada saat ini, elemen penggunaan jenis *mesh hexahedral* sering digunakan dalam kasus simulasi CFD hal ini dikarenakan keakuratan perhitungan mendekati nyata. Akan tetapi, pembuatan *mesh hexahedral* untuk geometri kompleks memerlukan banyak waktu dan kemampuan khusus. Sebaliknya, penggunaan *mesh* jenis tetrahedral sangat mudah untuk pembuatannya dan membutuhkan waktu dan biaya komputasi yang lebih sedikit bahkan untuk geometri yang kompleks [23].

Pada penelitian sebelumnya, penggunaan jenis *mesh polyhedral* untuk analisis CFD belum mendapat perhatian khusus, hal ini dikarenakan tidak ketersediaanya algoritma. Namun, mengingat perkembangan waktu dan tuntutan dunia industri dan akademik, beberapa tahun terakhir ini, elemen *mesh polihedral* mendapatkan perhatian. Dalam penelitian ini, kami mencoba menganalisis perpindahan

panas yang terjadi pada mold injeksi plasti dengan menggunakan *mesh polyhedral*. *Mesh polyhedral* akhir-akhir ini telah diperkenalkan oleh beberapa peneliti dengan tujuan untuk pembandingan hasil dari keuntungan penggunaan *mesh hexahedral* dan *mesh tetrahedral*. Difusi numerik dari mesh hexahedral yang rendah dan generasi *mesh tetrahedral* yang semi-otomatis dan cepat [5, 13, 14]. Diharapkan penggunaan jenis *mesh polyhedral* mengurangi efek difusi numerik dan dapat mencapai perhitungan yang akurat dengan jumlah *cell* yang rendah serta *mesh* jenis *polyhedral* tidak terlalu sensitif ketika peregangan, dan menjamin stabilitas numerik yang lebih stabil. [18].

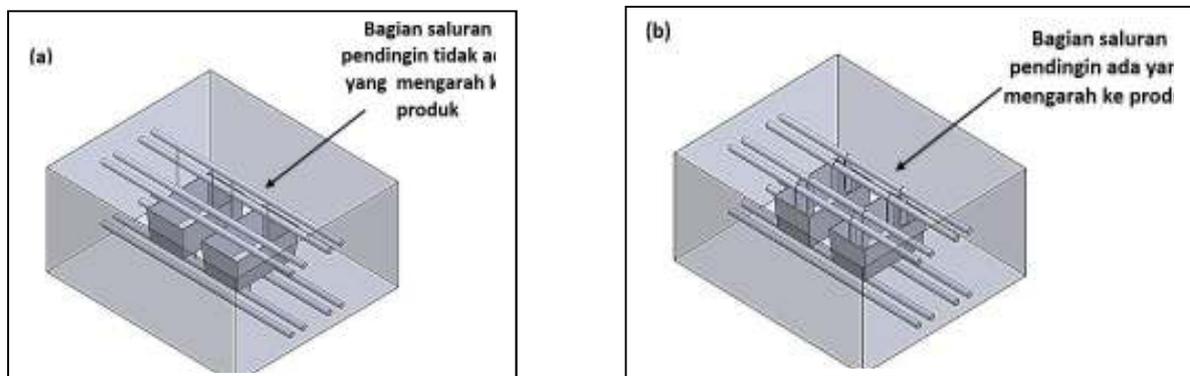


Gambar 2. Konversi Tetrahedral Mesh ke Polyhedral Mesh

2. METODE PENELITIAN

2.1 Penyederhanaan Geometri Mold

Mold Injeksi Plastik pada penelitian ini memiliki dimensi 300x260x140mm dengan dilengkapi saluran pendingin yang jaraknya sekitar 20 mm dari produk, kemudian untuk tebal produk sekitar 1 mm. penelitian analisa numerik perpindahan panas merupakan pengembangan penelitian sebelumnya [22]. Gambar CAD dilakukan menggunakan *software solidwork* disimpan dalam format **iges* hal ini dilakukan untuk memudahkan *software* simulasi dalam membaca gambar, kemudian gambar yang sudah jadi disimulasikan menggunakan *Fluent*

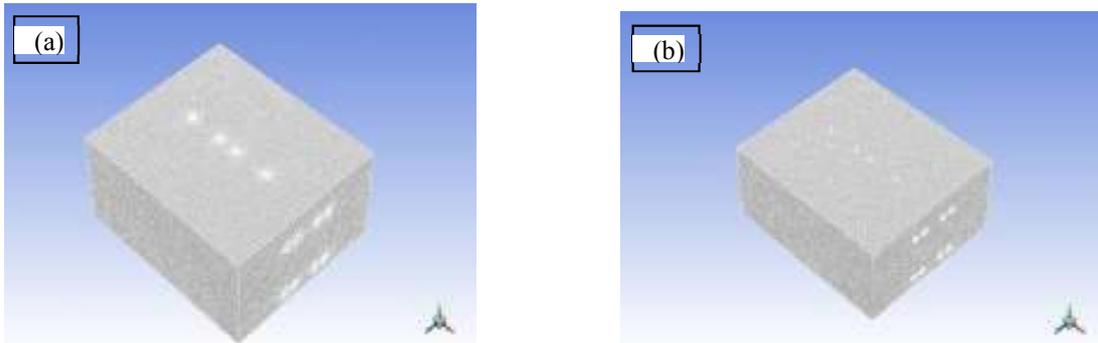


Gambar 3. Mold Saluran Pendingin (a) Lurus dan (b) Konformal

2.2 Pembuatan Mesh

Pada tahapan ini, ketika kita melakukan *meshing* sangat diperlukan pemahaman terhadap bagian-bagian yang sensitif terhadap hasil simulasi dan juga bagian yang dapat ditoleransi apabila elemen *mesh*-nya masih besar. Fokus pada penelitian yang kami lakukan adalah untuk menganalisa perpindahan panas yang melewati saluran pendingin pada *cavity plate* dan *core plate*. Kerapatan *mesh* dan jumlah mesh sangat berpengaruh dari juga mempengaruhi sebuah hasil simulasi, hal tersebut dibenarkan pada penelitian tentang perbedaan jumlah *mesh* pada simulasi *solidification PCM* [24]. Tahap berikutnya, sebelum melakukan simulasi sistem pendinginan injeksi *molding* adalah pembuatan domain komputasi. Jenis *mesh* yang dibentuk yakni jenis *mesh polyhedral* tersetruktur. Tahap awal yang harus dilakukan

adalah membuat mesh manual yakni kita membuat mesh tetrahedral kemudian di *converd* menjadi *mesh polyhedral*, adapun bentuk *mesh polyhedral* yang sudah dibuat dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Mesh Polyhedral Saluran Pendingin (a) Lurus, (b) Konformal [23].

Hasil dari perhitungan jumlah mesh yang dihasilkan melalui *software fluent* dapat dilihat pada Tabel 1 [23]. Tabel 1 Jumlah Mesh Polyhedral Pada Saluran Pendingin Mold Injeksi. Sebuah hasil simulasi dipengaruhi oleh jumlah mesh dan kerapatan [24]

Tabel 1. Jumlah Mesh Polyhedral Pada Saluran Pendingin Mold Injeksi

Saluran Pendingin	Jumlah Cell	
	Tetrahedral	Polyhedral
Lurus	5165769	1073499
Konformal	1683292	691619

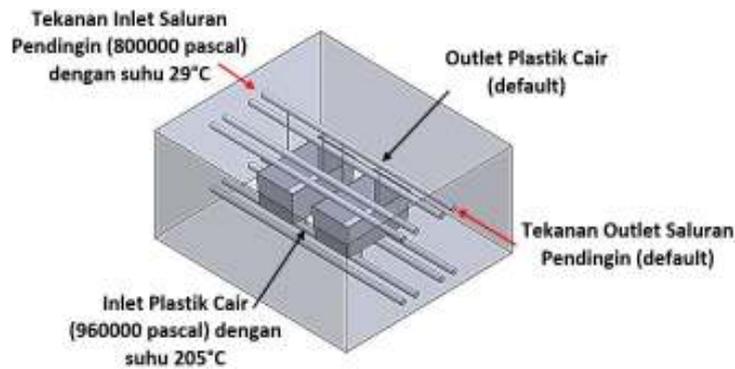
2.3 Langkah Setup

Pada tahapan ini merupakan pengisian parameter-parameter yang mendukung proses perhitungan simulasi, Pada tahap *general setup* kita harus melakukan penyekalaan *mesh*, hal ini dilakukan karena mesh yang dibentuk bersifat nondimensional sehingga perlu diberi dimensi sebelum melakukan simulasi. Jenis simulasi menggunakan *steady-state* dengan tipe *solver : pressure based*. Selanjutnya, untuk mengetahui fenomena terjadinya perpindahan panas yang dalam *modal* maka kita harus mengaktifkan model *energy*. Proses simulasi aliran fluida yang terjadi dalam pipa saluran pendingin dalam *modal* maka *viscous*-nya dengan model turbulen *k-epsilon*. Pemilihan model turbulen *k-epsilon* dipilih untuk analisis aliran fluida [28]. Analisa aliran fluida yang mengalir pada pipa yang berbelok yang mengakibatkan terjadinya turbulensi aliran. Kemudian untuk meningkatkan keakuratan dalam perhitungan waktu simulasi maka kita menggunakan model *realizable k-epsilon*. Model *realizable k-epsilon* ini mampu bekerja secara efektif dalam menganalisa sebuah aliran yang melibatkan putaran, dengan lapisan batas yang mempunyai gradien tekanan besar, serasi dan resirkulasi. Konstanta turbulensinya dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Model Turbulen

Model	Nilai
Cmu	0,09
C1-Epsilon	1,44
C2-Epsilon	1,92
TKE Prandl Number	1
TDR Prandl Number	1,3
Energy Prandl Number	0,85
Wall Prandl Number	0,85

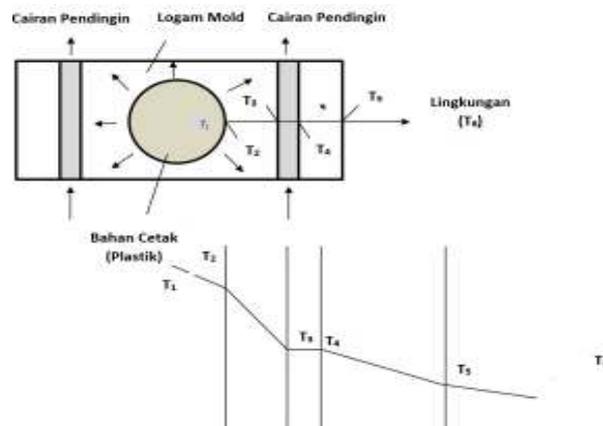
Boundary condition pada produk menggunakan parameter *pressure inlet*. *Pressure Inlet* pada *inlet* plastik sebesar 930700 *pascal* kemudian diberikan suhu sekitar 205 C, Kemudian inlet pada saluran pendinginnya sebesar 800000 *pascal* dengan suhu sekitar 29 C, *pressure outlet* menggunakan parameter *default* dengan *operating condition* sebesar 101325 *pascal*. *Boundary condition* pada simulasi ini dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Boundary Condition Mold

2.4 Perpindahan Panas Pada Mold

Pada satu siklus proses injeksi, plastik cair panas masuk ke dalam cetakan *mold* lalu didinginkan pada temperatur tertentu, plastik cair tersebut akan membeku dan siap dikeluarkan dari *mold* . Apabila cetakan *mold* dibuka sebelum plastik mencapai temperatur eaksi maka akan berakibat cacat produk. Sementara itu apabila produk kita didinginkan melebihi batas *ejection* temperature maka akan memperpanjang *cycle time*. Perpindahan panas yang terjadi didalam *mold* merupakan suatu kombinasi dari perpindahan panas secara *konduksi*, *konveksi* maupun *radiasi*. Ilustrasi dari perpindahan yang terjadi ketika melewati sistem saluran pendingin didalam *mold* dapat di ilustrasikan seperti Gambar 6:



Gambar 6. Ilustrasi perpindahan kalor pada *mold* [25]

Keterangan Gambar 5:

T1-T2: Konduksi dari plastik panas ke permukaan ruang *cavity* .

T2-T3: Konduksi melewati *mold* dari permukaan ruang *cavity* ke permukaan saluran pendingin T3-T4:

Konveksi paksa dari permukaan saluran pendingin ke air

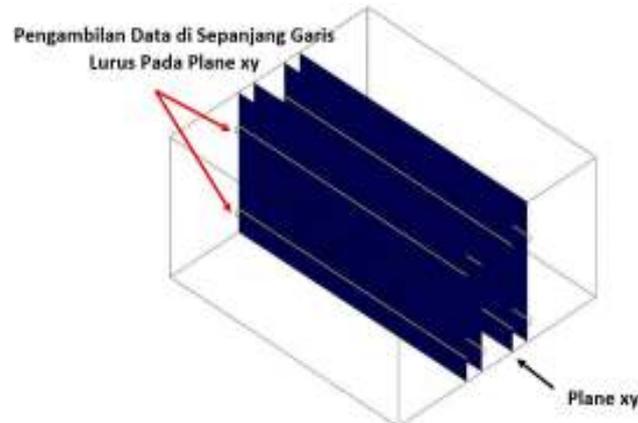
T4-T5: Konduksi dari *mold* ke permukaan dinding luar *cavity plate*

T5-T6: Konveksi bebas dari permukaan dinding luar *cavity plate* ke lingkungan

2.5 Pengambilan Data

Pada penelitian ini, Metode pengambilan data mengenai perpindahan panas sepanjang saluran pendingin dilakukan dengan membuat garis lurus sepanjang saluran pendingin, yang diletakkan di dalamnya, hal ini dilakukan untuk mengetahui panas yang diserap oleh saluran pendingin. Metode

pengambilan data didalam saluran pendingin untuk mengetahui penurunan tekanan [26]. Pengambilan data dari setiap metode dilakukan menggunakan *software CFD-Post* yang berupa kontur serta grafik profil temperatur seperti Gambar 7. Kontur peningkatan temperatur saluran pendingin diambil menggunakan *plane xy*. dengan jarak masing masing plane sekitar $z = 0,02$ mm.



Gambar 7. Pengambilan Data dengan *Plane* Vertikal

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Konvergensi

Perhitungan numerik menggunakan *software ANSYS Fluent 19.2* pada *Windows 10 workstation* yang dilengkapi dengan *Intel i7-4790K(4 Cores)* *Graphic Card AMD FirePro W1400* dan *RAM Team Elite DDR3 16 GB*. *Solver* beroperasi dalam mode paralel 16 processor. Pada penelitian ini, kriteria konvergensi grafik residunya berada pada level $1e-3$. Jumlah iterasi untuk konvergensi bervariasi tergantung pada jenis elemen *mesh* dan jumlah elemen *mesh*. Hasil iterasi pada simulasi saluran pendingin dapat dilihat pada Gambar 8 dan Gambar 9. Iterasi merupakan sebuah metode perhitungan yang berulang kali untuk menyelesaikan persamaan-persamaan tingkat tinggi. Pada kasus simulasi kali ini, iterasi dilakukan oleh komputer.

iter	continuity	x-velocity	y-velocity	z-velocity	energy	k	epsilon	time/iter
254	2.8177e-04	9.6362e-08	6.3649e-08	4.2921e-08	2.6661e-06	3.9335e-06	1.5116e-04	0:09:30 746
255	2.7967e-04	9.7256e-08	6.7492e-08	4.5525e-08	2.4803e-06	3.6914e-06	1.4677e-04	0:10:04 745
256	2.7913e-04	9.4100e-08	6.3377e-08	4.2468e-08	2.3053e-06	3.9354e-06	1.5118e-04	0:10:32 744
257	2.8039e-04	9.7538e-08	6.7361e-08	4.5512e-08	2.1407e-06	3.6933e-06	1.4677e-04	0:10:53 743
258	2.8342e-04	9.4943e-08	6.3394e-08	4.2488e-08	1.9867e-06	3.9310e-06	1.5116e-04	0:11:10 742
259	2.7972e-04	9.6922e-08	6.7185e-08	4.5229e-08	1.8426e-06	3.6879e-06	1.4677e-04	0:08:55 741
260	2.7900e-04	9.5836e-08	6.3746e-08	4.3043e-08	1.7085e-06	3.9236e-06	1.5111e-04	0:09:36 740
261	2.8451e-04	9.8341e-08	6.7718e-08	4.6114e-08	1.5831e-06	3.6919e-06	1.4678e-04	0:10:08 739
262	2.7645e-04	9.5659e-08	6.3860e-08	4.3293e-08	1.4669e-06	3.9282e-06	1.5115e-04	0:10:33 738
263	3.0907e-04	1.0191e-07	7.0203e-08	4.8381e-08	1.3588e-06	3.6928e-06	1.4675e-04	0:10:53 737
264	2.9069e-04	9.7740e-08	6.4828e-08	4.4105e-08	1.2590e-06	3.9338e-06	1.5112e-04	0:08:42 736
265	2.8767e-04	9.8630e-08	6.8104e-08	4.6543e-08	1.1661e-06	3.6904e-06	1.4671e-04	0:09:24 735
266	2.8409e-04	9.5377e-08	6.3622e-08	4.2948e-08	1.0801e-06	3.9355e-06	1.5113e-04	0:09:57 734
267	2.8773e-04	9.7331e-08	6.7607e-08	4.5724e-08	1.0017e-06	3.6942e-06	1.4674e-04	0:10:24 733
! 268 solution is converged								
268	2.8700e-04	9.5126e-08	6.3303e-08	4.2650e-08	9.2905e-07	3.9408e-06	1.5119e-04	0:10:45 732

Writing data to E:\ANGGER FOLDER\Angger Conference\Channel Lurus\WB\WB_files\dp0\FLU\Fluent\FFF.1.ip ...

x-coord
y-coord
z-coord
pressure
x-velocity
y-velocity
z-velocity
temperature
k
epsilon
hyb_init-0
hyb_init-1

Done.

Calculation complete.

Gambar 7. Hasil Iterasi Pada Saluran Pendingin Lurus

```

iter continuity x-velocity y-velocity z-velocity energy k epsilon time/iter
221 3.0827e-04 3.6794e-06 3.9588e-06 3.1580e-06 1.5202e-04 3.9504e-05 2.1402e-04 0:07:11 779
222 3.1294e-04 4.0354e-06 4.1545e-06 3.3593e-06 1.4357e-04 3.8556e-05 2.0822e-04 0:08:20 778
223 3.0251e-04 3.7288e-06 4.0052e-06 3.2013e-06 1.3979e-04 3.9348e-05 2.1400e-04 0:09:15 777
224 3.2140e-04 4.0450e-06 4.1451e-06 3.3710e-06 1.3383e-04 3.8738e-05 2.0847e-04 0:07:23 776
225 3.0276e-04 3.7050e-06 3.9781e-06 3.1885e-06 1.2854e-04 3.9140e-05 2.1381e-04 0:08:29 775
226 3.2030e-04 4.0014e-06 4.1101e-06 3.3572e-06 1.2906e-04 3.8555e-05 2.0852e-04 0:06:47 774
227 3.0372e-04 3.6742e-06 3.9464e-06 3.1606e-06 1.2824e-04 3.8938e-05 2.1342e-04 0:08:00 773
228 3.1902e-04 3.9454e-06 4.0746e-06 3.3378e-06 1.1314e-04 3.8306e-05 2.0840e-04 0:08:58 772
229 3.0623e-04 3.6384e-06 3.8883e-06 3.1224e-06 1.0884e-04 3.8833e-05 2.1351e-04 0:07:08 771
230 3.1416e-04 3.9364e-06 4.0282e-06 3.3110e-06 1.0414e-04 3.8265e-05 2.0836e-04 0:08:17 770
231 3.0841e-04 3.6064e-06 3.8452e-06 3.0978e-06 1.0034e-04 3.8794e-05 2.1346e-04 0:09:11 769

iter continuity x-velocity y-velocity z-velocity energy k epsilon time/iter
232 232 solution is converged
Writing data to E:\ANNOOR FCL208\Angger Conference\WB_files\dp0\FLD-1\Fluent\FFF.jp ...
a-coord
y-coord
z-coord
pressure
x-velocity
y-velocity
z-velocity
temperature
k
epsilon
hyb_init-0
hyb_init-1
Done.

Calculation complete.

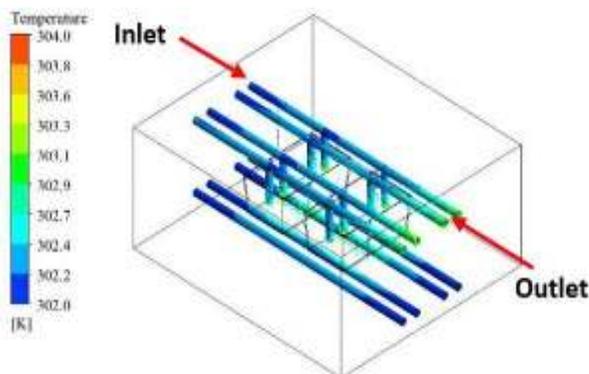
```

Gambar 8. Hasil Iterasi Pada Saluran Pendingin Konformal

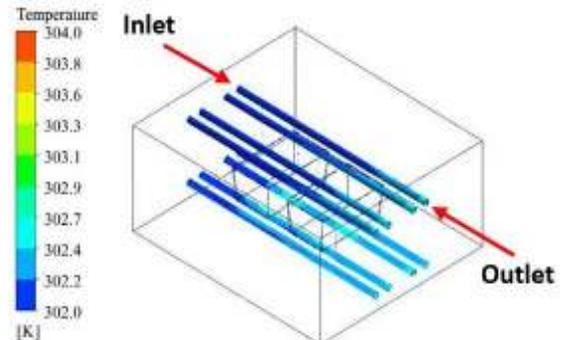
Berdasarkan Gambar diatas, dapat kita lihat nilai angka dari continuity, x-velocity, y-velocity, z-velocity, energy, k, epsilon terus mengalami penurunan sampai mencapai kriteria konvergensi yang telah ditentukan. Nilai tersebut merupakan hasil perhitungan yang dilakukan oleh komputer. *Mesh polyhedral* dapat mempercepat perhitungan secara konvergen dengan iterasi pada saluran pendingin lurus sekitar 268 iterasi, sedangkan untuk saluran pendingin konformal sekitar 232 iterasi, hal tersebut dikarenakan bentuk domain yang sedikit sehingga perhitungan yang dilakukan oleh komputer lebih cepat.

3.2 Kontur kenaikan Temperatur

Kontur kenaikan temperatur terjadi pada bagian ujung dekat dengan outlet saluran pendingin, kenaikan temperatur dihasilkan dari panas yang dibawa fluida ketika melintasi produk [22]. Pada hasil penelitian ini, kontur semua saluran pendingin konformal cenderung berwarna kuning kemerah-merahan dibanding dengan kontur pada saluran pendingin lurus, dan penyerapan panas yang banyak dialami oleh saluran pendingin konformal seperti Gambar 9 sampai Gambar 16.



Gambar 9. Saluran Pendingin Konformal



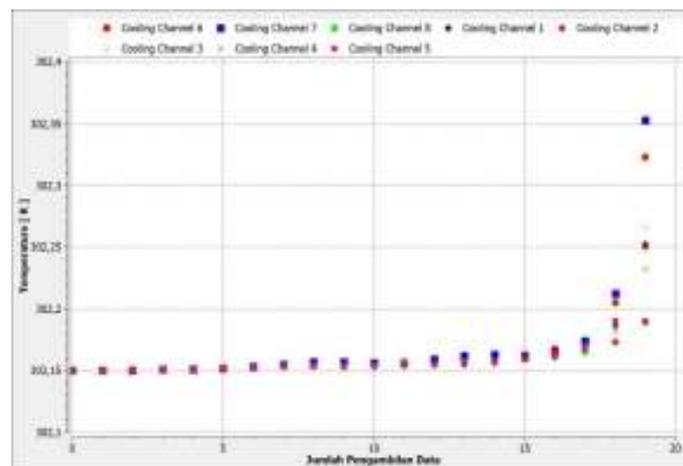
Gambar 10. Saluran Pendingin Lurus

Berdasarkan Gambar 9 menunjukkan saluran pendingin konformal lebih banyak menyerap panas hal ini dikarenakan adanya bentuk saluran pendingin yang mengarah ke bagian produk sehingga menyebabkan temperatur pada saluran outletnya berwarna hijau kekuning-kuningan. Sedangkan pada Gambar 10 menunjukkan bahwa saluran pendingin lurus yang paling banyak menyerap energi panas adalah pada bagian bawah, hal ini dikarenakan saluran pendingin yang bagian bawah lebih luas menyerap panasnya dibanding saluran bagian atas, sehingga kontur pada saluran bagian bawah lebih berwarna biru kehijauan.

Kontur tersebut menunjukkan terjadinya fenomena perpindahan panas secara konveksi. Resolusi penggunaan *mesh polyhedral* yang dihasilkan antara keduanya memiliki perbedaan, hal ini dikarenakan diskritisasi domain komputasi [18]. Semakin cepat gerakan fluida tersebut, maka semakin besar laju perpindahan panas konveksinya. Bila fluida tidak bergerak, maka mekanisme perpindahan panas akan menjadi mekanisme perpindahan konduksi kembali [27].

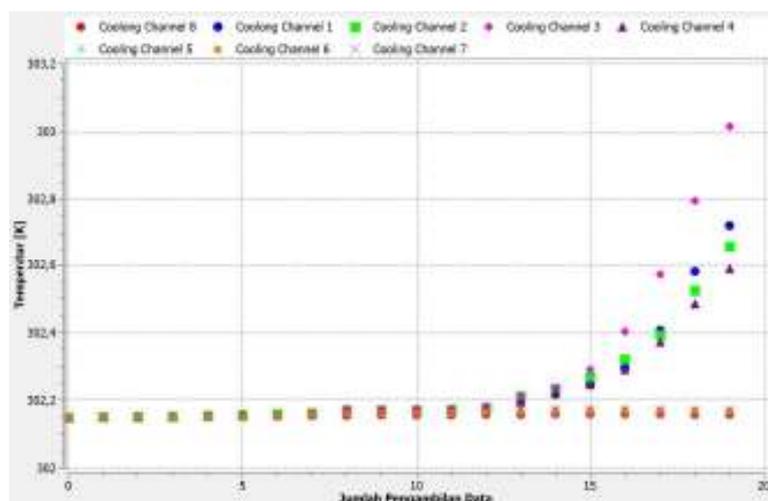
3.3 Grafik Kenaikan Temperatur

Kenaikan temperatur terjadi pada setiap saluran keluar pendingin, fenomena tersebut merupakan gambaran sebuah performa sistem pendinginan dari proses injeksi molding dalam efektifitas mendinginkan sebuah produk. Hasil pengambilan data temperatur sepanjang saluran pendingin pada masing-masing saluran, hasil grafik kenaikan temperatur sepanjang saluran pendingin dapat dilihat pada Gambar 11 dan Gambar 12.



Gambar 11. Grafik Kenaikan Temperatur Saluran Pendingin Lurus

Berdasarkan Gambar 11 grafik kenaikan temperatur tersebut menunjukkan bahwa telah terjadi karena adanya perpindahan panas dari produk plastik yang diserap oleh fluida pada masing-masing saluran pendingin. Kenaikan temperatur pada data ke-5 tidak begitu signifikan hal ini dikarenakan fluida belum melewati produk, sehingga panas yang diserap oleh fluida kecil sekali. Namun setelah data ke-15 temperatur mengalami kenaikan temperatur yang signifikan hal tersebut disebabkan oleh banyaknya temperatur yang diserap fluida.



Gambar 12 Grafik Kenaikan Temperatur Saluran Pendingin Konformal

Berdasarkan Gambar 12 grafik kenaikan temperatur diatas menunjukkan temperatur pada saluran 1 sampai dengan saluran 4 mengalami kenaikan temperatur di data ke-15 sampai data ke-20. Kenaikan temperatur yang signifikan disebabkan karena pada saluran pendingin ke-1 sampai saluran pendingin ke-4 ada bagian saluran yang mengarah ke arah produk sehingga banyak panas yang diserap oleh saluran pendingin. Kemudian grafik pada saluran ke-5 dan saluran ke-8 sedikit mengalami kenaikan temperatur hal ini dikarenakan panas pada produk sudah diserap banyak oleh saluran pendingin ke-1 dan saluran pendingin ke-4 sehingga mengakibatkan penyerapan panas pada saluran pendingin ke-5 sampai ke-8 sedikit sekali. Kenaikan suhu yang terjadi selama proses pendinginan berlangsung, kenaikan suhu tersebut terjadi pada masing-masing saluran pendingin hal ini dikarenakan adanya energi panas yang dibawa cairan ketika melintasi produk, kenaikan temperatur pada saluran keluar tidak begitu signifikan hal ini dipengaruhi oleh *specific heat* dari fluida. Pada saluran konformal terjadi kenaikan suhu yang tidak stabil hal ini dikarenakan bentuk saluran pendingin yang menyeluruh sehingga mengakibatkan panas yang diserap pada bagian saluran tersebut lebih banyak.

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis perpindahan panas pada *mold* injeksi plastik dengan menggunakan metode komputasi ini, membuktikan bahwa pentingnya pemilihan mesh sebelum melakukan simulasi. Penggunaan jenis *mesh* sendiri untuk juga mempengaruhi bidang suhu dan profil suhu yang terjadi pada saluran pendingin serta resolusi profil kontur. penelitian yang dilakukan bahwa penggunaan *mesh polyhedral* untuk bentuk geometri yang kompleks mampu meminimalisir waktu iterasi simulasi dan dapat mempercepat konvergen perhitungan, hal tersebut dibuktikan dengan hasil iterasi simulasi pada saluran lurus mampu konvergen pada iterasi ke-268 dari total keseluruhan iterasi sekitar 1000 iterasi dan iterasi simulasi saluran konformal konvergen pada iterasi ke-232 dengan total keseluruhan iterasi sekitar 1000.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Moerbani, J., 1999, *Plastic molding*, Jurnal Akademik Teknik Mesin Industri (ATMI), Surakarta.
- [2] Tang, L.Q., Chassapis, C & Manaachehri, S., 1997. Optimal Cooling System Design for *Multy Cavity Injection Molding*. *Jurnal of Fenite Elements in Analysis and Design*. Vol. 26., pp 229-251.
- [3] Yaqin, R.I., Siahaan, J.P., & Pranoto, S.H., "Analisis Tegangan *Propeller* Kapal Penangkap Ikan Di Kota Dumai Menggunakan *Finite Element Analysis*", *Jurnal Teknologi Terapan* 5(2), 57-65. 2019
- [4] Krzywanski, J., Grabowska, K., Herman, F., Pyrka, P., Sosnowski, M., Prauzner T., & Nowak, W. "Optimization of a three-bed adsorption chiller by genetic algorithms and neural networks". *Energy Conversion and Management*, 153, 313-322. 2017.
- [5] Mazal, J., Stodola, P., Prochazka, D., Kutej, L., Scurek, R., & Prochazka, J. "Modelling of the UAV Safety Manoeuvre for the Air Insertion Operations". *International Workshop on Modelling and Simulation for Autonomous Systems*, 337-346. 2016.
- [6] Sztékler, K., Kalawa, W., Nowak, W., Stefanski, S., Krzywanski, J., & Grabowska, K. "Using the adsorption chillers for utilisation of waste heat from rotary kilns". *International Conference on Experimental Fluid Mechanics (EFM)*, Mikulov, Czech Republic, 650-653. 2017.
- [7] Sztékler, K., Kalawa, W., Nowak, W., Stefanski, S., Krzywanski, J., & Grabowska, K. "Using the adsorption chillers for waste heat utilisation from the CCS installation". *International Conference on Experimental Fluid Mechanics (EFM)*, Mikulov, Czech Republic, 654-657. 2017.
- [8] Jamrozik, A., Tutak, W., Kociszewski, A., & Sosnowski, M. "Numerical simulation of two-stage combustion in SI engine with prechamber". *Applied Mathematical Modelling*, 37, 5, 2961-2982. 2013.
- [9] Jamrozik, A., Tutak, W., Gnatowski, A., Gnatowska, R., Winczek, J., & Sosnowski, M. "Modeling of thermal cycle CI engine with multi-stage fuel injection". *Advances in Science and Technology. Research Journal*, 11, 3, 179-186. 2017.
- [10] Gnatowska, R. "A study of downwash effects on flow and dispersion processes around buildings in tandem arrangement". *Polish Journal of Environmental Studies*, 24(4), 1571-1577. 2015.
- [11] Gnatowska, R. (2008). "Synchronization phenomena in systems of bluff-bodies". *International Journal of Turbo and Jet Engines*, 25, 2, 121-128. 2008.
- [12] Gnatowska, R. (2011). "Aerodynamic characteristics of three-dimensional surface-mounted objects in tandem arrangement". *International Journal of Turbo and Jet Engines*, 28, 1, 21-29. 2011
- [13] Moryn-Kucharczyk, E., & Gnatowska, R., "Pollutant dispersion in flow around bluffbodies arrangement". in *Wind Energy*, Springer, 49-53. 2007

- [14] Gnatowska, R., "Aerodynamic characteristics of two-dimensional sharp-edged objects in tandem arrangement". *Archives of Mechanics*, 60, 6, 475-490. 2008.
- [15] Krzywanski, J., Szyk, M., Nowak, W., & Kolenda, Z. "Experience in modelling of a single-stage silica gel-water adsorption chiller". *Technical Sciences/University of Warmia and Mazury in Olsztyn*. 2016.
- [16] Sosnowski, M., Krzywanski, J., & Gnatowska, R. "Polyhedral meshing as an innovative approach to computational domain discretization of a cyclone in a fluidized bed CLC unit in *Energy and Fuels*", 14, Suwala, W., Dudek, M., Leszczynski, J., & Lopata, S., Eds. 2017.
- [17] Sosnowski, M. "Computer aided optimization of a nozzle in around-the-pump fire suppression foam proportioning system". *Engineering Mechanics* 2017, 914-917. 2017
- [18] Sosnowski M., "The Influence of Computational Domain Discretization on CFD Results Concerning Aerodynamics of a Vehicle "Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics 2018, 17(1), 79-88, DOI: 10.17512/jamcm.2018.1.08
- [19] M. Peri C, "Simulation of flows in complex geometries: New meshing and solution methods", In *NAFEMS Seminar: Simulation of Complex Flows (CFD), Application and Trends*, 2004.
- [20] Rao V. Garimella, Jibum Kim, dan Markus Berndt, "Polyhedral mesh generation and optimization for non-manifold domains", Josep Sarrate dan Matthew Staten, editors, *Proceedings of the 22nd International Meshing Roundtable*, pages 313-330, Springer Internat. 2014.
- [21] Berg, M. De, Cheong, O., Kreveld, M. Van, dan M. O. Mark, "Computational Geometry Algorithms and Applications", Springer, 2008.
- [22] Angger B.P dan Fauzun, "Numerical Study of Effect of Cooling Channel Configuration and Size on The Product Cooling Effectiveness in The Plastic Injection Molding" *Matec Web of Conferences* 197, 0809., 2018
- [23] Angger B.P., Fauzun, Azhim A. A., Didi S.P., Rizqi I. Y., Pengaruh Perbedaan Mesh Terstruktur dan Mesh Tidak Terstruktur Pada Simulasi Sistem Pendinginan Mold Injeksi Produk Plastik". *Prosiding Nasional Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi XIII 2019 (ReTII)* ISSN: 1907-5995 pp 400-406
- [24] Ritcher O., Turnow J., Kornev N., Hased E., 2017 Numerical Simulation of Casting Processes : Coupled Mold Filling and Solidification using VOF and Enthalpy-Porosity Method. *Heat and Mass* 53 :1957-1969
- [25] Triono B., 2006 "Studi eksperimental dan simulasi perpindahan kalor pada injection molding dengan sistem pendinginan saluran lurus dan konformal"
- [26] Rusdi M.S., Abdullah M.Z., Mahmud A.S., Khor C.Y., Abdul Aziz M.S., Ariff M.Z., Abdullah M.K., 2016 *Numerical Investigation on the Effect of Pressure and Temperatur on Melt Filling Duriing Injection Molding Process*. *Arab J Sci Eng* 41: 1907-1919
- [27] Endri S., Marwan E., Tri T., 2016. Karakteristik Perpindahan Panas Dan Penurunan Tekanan Aliran Fluida Di Sekitar Pin Fin Cooling Diamond Pada Trailing Edge Sudu Turbin Gas
- [28] Yakhot, V., Orzag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.,B., and Speziale, C. G., 1992. *Development of Turbulence Models for Shear Flows by a Double Expansion Thecnique*. *Physic of Fluid A.: Fluid Dynamic*, 4(7) 1510. 1992