

ANALISIS *WARPAGE* BERDASARKAN ALIRAN MATERIAL DAN SISTEM PENDINGIN PADA CETAKAN INJEKSI PLASTIK DAN OPTIMASI PADA PRODUK KIPAS JARI

Harry Anggodo¹, Dadan Heryada²

(1) Mahasiswa Konsentrasi Teknik Rekayasa dan Pengembangan Produk
Program Studi Teknik Mesin dan Manufaktur Polman Bandung.

(2) Dosen Jur. Teknik Perancangan Manufaktur, Politeknik Manufaktur
Negeri Bandung, Jl. Kanayakan 21 Bandung 40135
E-mail: anggodoHarry@gmail.com

ABSTRAK

Produk kipas jari lingkaran merupakan varian produk baru, karena pada umumnya produk kipas jari berbentuk seperti kerang. Permukaan dinding kipas jari akan ditempel stiker (label) dari pemesan produk. Namun ketika produk ini diproduksi, bentuk permukaan dinding melenting (*warpage*), menyebabkan stiker sulit menempel pada dinding kipas jari tersebut. Penelitian dilakukan untuk mengetahui *warpage* pada produk dengan menganalisis aliran material plastik dalam rongga cetak (*fill analysis*) dan sistem pendingin pada cetakan (*cool analysis*), karena dianggap sebagai faktor utama produk melenting. Metode penelitian yang dilakukan yaitu; mensimulasikan dan mempelajari aliran plastik pada cetakan, mensimulasikan dan mempelajari sistem pendingin pada cetakan, melakukan *trial* pada cetakan sebelum diperbaiki dan setelah diperbaiki, melakukan pengukuran pada produk sebelum diperbaiki dan setelah diperbaiki, membandingkan hasil *trial*, dan menganalisis data yang didapatkan. Dari hasil analisis diketahui bahwa penyebab *warpage* diakibatkan oleh ketidakseragaman aliran material plastik pada rongga cetak dan ketidakseragaman pendinginan pada cetakan. Perbaikan desain produk dan saluran pendingin merupakan solusi dari permasalahan yang ada. Desain produk dan sistem pendingin yang baru pun dianalisis oleh *software* CAE dan divalidasi dengan melakukan *trial* produksi. Hasil analisis produk perbaikan serta *trial* produksi menunjukkan bahwa lentingan lebih kecil pada dinding kipas.

Kata Kunci: *Warpage, Fill Analysis, Cool Analysis.*

ABSTRACT

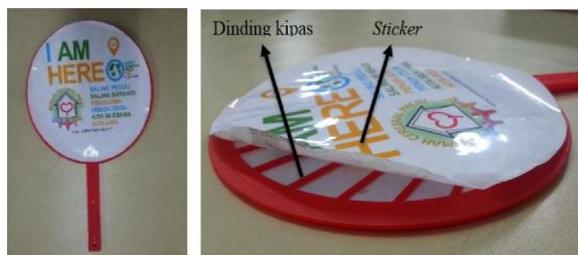
The Circle Kipas Jari is a new variant of hand fan product, because the Kipas Jari is generally shaped like a scallop. Surface wall of Kipas Jari will attached by sticker (label) of the customer. However, after the product was manufactured, the shape of surface wall was warpage, causes sticker difficult to attached on the surface of the fan wall. The purpose of this study is to determine the warpage on products by analyzing the flow of the plastic material in the molding cavity (fill analysis), and the cooling of the mold (cool analysis), because it is considered as a major factor of warpage on the product. The method of research that conducted are; simulate and study the flow of plastic in the mold, simulate and study the cooling system of the mold, trial on a mold before repaired and mold after repaired, measure the products before repaired and after repaired, compare the product results of trial, and analyzing data obtained. The results of analysis show that warpage caused by uneven flow of plastic material in the molding cavities and uneven of cooling in the mold. Improvements of product design and cooling system as the solution of existing problems. The new product design and new cooling system was analyzed by CAE software and validated by trial production. Results of analysis and trial production the improved product showed that warpage is getting smaller on the fan wall.

Keywords: *Warpage, Fill Analysis, Cool Analysis.*

PENDAHULUAN

Produk kipas plastik yang diproduksi di CV. Mulus Teknik merupakan kipas jari lingkaran yang dipasang stiker (label) dari pemesan yang dipasang pada dinding kipas.

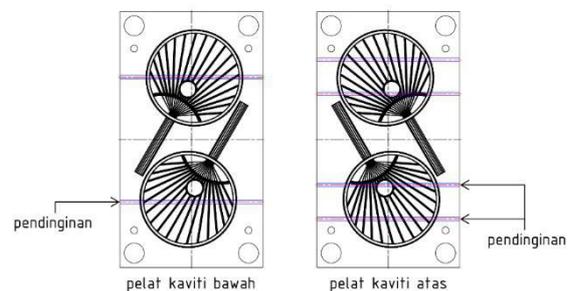
Produk ini diproduksi menggunakan mesin injeksi plastik dengan jenis cetakan *two plate*. Namun setelah diproduksi, terdapat lentingan (*warpage*) pada dinding kipas sehingga stiker tidak dapat di pasang dengan baik seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Produk kipas jari lingkaran

Produk kipas ini telah mengalami sejumlah perbaikan oleh produsen untuk mengatasi masalah tersebut. Perbaikan yang telah dilakukan yaitu menghaluskan permukaan dinding kipas pada pelat kaviti hasil pengerjaan proses EDM¹ menjadi halus dengan proses *polishing*. Penghalusan permukaan bertujuan untuk menambah bidang kontak stiker dengan dinding kipas, sehingga diharapkan stiker lebih melekat dibanding sebelumnya. Perbaikan juga telah dilakukan dengan memperbesar dimensi jari pada dinding kipas, dengan tujuan mempercepat aliran material plastik saat proses injeksi sehingga diharapkan terjadi penyusutan yang merata di daerah dinding kipas. Dari perbaikan permukaan hingga perubahan dimensi produk yang telah dilakukan, produk masih belum mengalami perbaikan *warpage* yang signifikan.

Terjadinya *warpage* pada dinding kipas pun kemungkinan besar diakibatkan oleh ketidakseimbangan *layout* pendingin yang ada pada cetakan. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2 bahwa saluran pendingin pada pelat kaviti atas dan bawah berbeda sehingga berpotensi menimbulkan perbedaan suhu kaviti yang mengakibatkan terjadinya *warpage*.



Gambar 2. Saluran pendingin pada cetakan

Dari latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis masalah yang ada berdasarkan aliran material yang terjadi, juga pengaruh sistem pendingin yang ada pada

¹ EDM, *Electro Discharge Machine*

cetakan dan melakukan optimasi rancangan yang dilakukan dengan bantuan *software* CAE.

Tujuan Penelitian

Analisis permasalahan yang dilakukan, bertujuan untuk menganalisis penyebab terjadinya *warpage* pada produk kipas jari lingkaran berdasarkan aliran material dan sistem pendingin pada cetakan.

Apa itu *Shrinkage* dan *Warpage*?

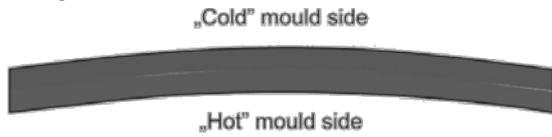
Shrinkage (penyusutan) pada produk dimungkinkan oleh sebuah reduksi geometrik pada ukuran produk. Apabila *shrinkage* seragam, produk tidak akan deformasi dan berubah bentuk, hanya menyusut. (Marciaswan, 2016)

Warpage terjadi ketika *shrinkage* tidak merata. Apabila daerah - daerah dari produk menyusut secara tidak seragam, akan terbentuk tegangan dalam pada produk tersebut, tergantung pada kekakuan produk yang memungkinkan menyebabkan produk deformasi atau berubah bentuk. Bahkan dalam jangka waktu lama produk bisa retak. (Marciaswan, 2016)

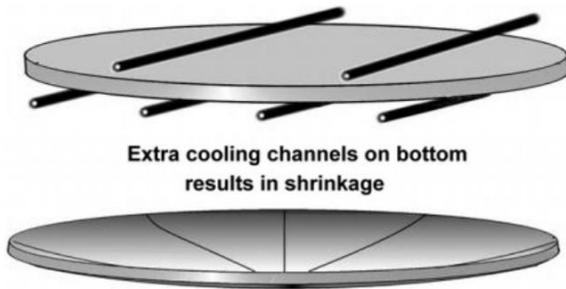
Warpage dari Dampak Perbedaan Pendingin

Menjamin suhu cetakan yang tepat untuk polimer tertentu sangatlah penting selain menjaga suhu konstan dan sama pada pelat kaviti. Perbedaan suhu cetakan dapat menyebabkan *warpage*. Alasannya karena terdapat tegangan pada produk. Penyusutan pada suhu yang tinggi sangat besar dibanding suhu rendah. Deformasi dari produk yang sederhana ditunjukkan pada

Gambar 3 dan Gambar 4. Karena perbedaan penyusutan, menyebabkan timbulnya momen bengkok pada produk. Produk menjadi cekung pada sisi “panas” dan cembung pada sisi “dingin”.



3. Dampak dari perbedaan suhu pada cetakan: menyebabkan produk cekung kearah sisi panas. (Fischer,2013)



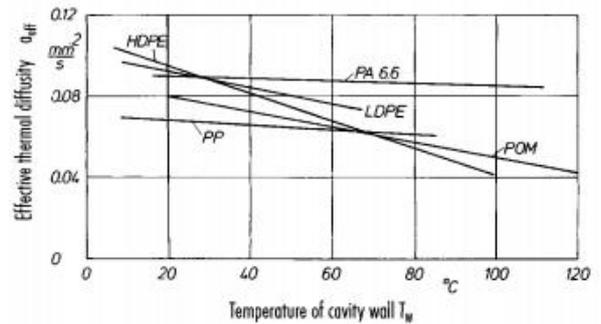
Gambar 4. *Warpage* akibat perbedaan suhu

Untuk meminimalisir *warpage*, penting untuk menjamin keseragaman suhu produk. Hal ini pun akan mencegah dari terjadinya *sink-mark* dan perbedaan penyusutan. *Sink-mark* ialah cekungan pada permukaan produk plastik. Peranan yang sangat penting dalam cetakan plastik adalah memainkan pendingin produk. Ini diwujudkan oleh saluran pendingin. Saluran ini dapat dirancang dalam berbagai kemungkinan pada cetakan yang sama, namun keseragaman suhu cetakan harus dijamin. Ketika hanya ada satu saluran pendingin yang panjang pada cetakan, cairan pendingin akan menguap sehingga tidak efisien. Sehingga salah satu rancangan yang baik adalah merancang banyak *inlet* dan *outlet* pada cetakan. Alasan dari *warpage* biasanya ketidakseragaman suhu cetakan atau perbedaan tebal dinding. (Tagizadeh, 2013)

Menentukan *Cooling Time* Menggunakan *Nomograms*

Gambar 5. *Nomograms* untuk perhitungan *cooling time*

Dengan bantuan dari nilai disfusifitas thermal (a_{eff}) pada Gambar 6, nomogram dapat digambar seperti pada Gambar 5, memberikan sebuah kesederhanaan tertentu dan penentuan cepat dari *cooling time*. *Cooling time* (t_c) direncanakan terhadap suhu dinding kaviti (T_w) untuk sejumlah *demolding temperature* yang konstan (T_E) dan tebal dinding (s). *Cooling time* yang ditunjukkan dari *nomogram* adalah valid untuk cetakan bidang dengan pendingin yang simetris.



Gambar 6 . Disfusifitas thermal *polypropylene*.

Perhitungan *Cooling Time* Menggunakan Persamaan

Hasil perhitungan *cooling time* menggunakan persamaan berikut tidak jauh berbeda dari hasil perhitungan menggunakan *nomogram*.

$$= \frac{1}{a_{eff}} \left(\frac{s^2}{2} \right) \quad (1)$$

Keterangan:

t_c : *cooling time* s :
tebal dinding

a_{eff} : nilai tengah disfusifitas thermal T_M :
melt temperature

T_w : suhu dinding kaviti

T_E : *demolding temperature*

METODE

Metode dijelaskan dalam bentuk diagram alir pada Gambar 7 yang digunakan sebagai dasar kegiatan untuk mencapai tujuan penelitian.

Gambar 7. Diagram alir penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi *Software* CAE

Analisis ini dilakukan menggunakan simulasi *fill analysis*, *cool analysis* dan *warp analysis* pada *software* CAE. Dalam pelaksanaannya diperlukan beberapa data proses yang akan digunakan pada simulasi *software* CAE.

Cycle Time

- a. Mold closing : 1,5 detik
- b. Injection time: 1,65 detik
- c. Holding time : 1,8 detik
- d. Cooling time : 10,55 detik
- e. Opening time : 1,3 detik
- f. Ejection time : 1,2 detik
- g. Close time : 1,5 detik

Parameter Proses

Simulasi dilakukan menggunakan parameter proses produksi yang digunakan oleh perusahaan dalam memproduksi produk kipas plastik ini sebelumnya. Berikut adalah data parameter proses produksi:

- a. *Injection pressure* : 66,8 MPa
- b. *Cycle time* : 19,5 detik

c. *Mould temperature* : 40 °C

d. *Melt temperature* : 250 °C

Mesh Parameter

Proses generate mesh akan mencoba untuk membuat mesh yang tepat untuk proses analisis yang akan dilakukan. Parameter mesh yang digunakan ialah sebagai berikut:

1. *Match mesh*.
2. *Calculate thickness for dual domain meshes*.
3. *Global edge length on surface*: 6,55 mm.

Hasil Simulasi Aliran Material (*Fill Analysis*)

Simulasi aliran material dilakukan untuk mengetahui kecenderungan aliran material plastik dalam rongga cetak, menggunakan *software*. Berikut adalah hasil analisis aliran (*fill analysis*) yang telah dilakukan:

1. *Fill Time*

Dari hasil simulasi ini dapat diketahui laju aliran material plastik dalam rongga cetak mulai dari *gate* hingga akhir pengisian. Melalui warna

yang ditunjukkan oleh *software* pada bentukan rongga cetak dapat diketahui bahwa aliran pada bentukan jari kecil lebih lambat dari pada aliran plastik pada dinding luar sehingga daerah tengah dinding menjadi aliran akhir pengisian. Daerah tengah kipas tidak banyak terisi oleh material plastik dari bentukan jari kecil, bahkan cenderung terisi oleh material plastik dari dinding luar.

2. *Temperature at Flow Front*

Simulasi *temperature at flow front* menunjukkan suhu aliran awal plastik ketika mengisi rongga cetak. Dari hasil simulasi diketahui bahwa pada bentukan jari kecil, suhu material plastik sudah mulai menurun lebih dulu dibanding daerah lain, begitu pun pada daerah tengah dinding.

3. *Orientation at Skin*

Simulasi ini menunjukkan kecenderungan arah alir dari aliran material dalam rongga cetak. Dilihat dari hasil simulasi dapat diketahui bahwa terdapat arah aliran yang tidak rata pada daerah jari kecil dan pada bentukan cincin ditengah dinding kipas yang arah alirannya tidak terarah.

4. *Pressure at End of Fill*

Simulasi ini menunjukkan tekanan injeksi plastik mulai dari *gate* hingga akhir pengisian. Dari hasil simulasi ini dapat diketahui bahwa tekanan di dalam rongga cetak tidak merata, terutama pada daerah jari kecil begitu pun pada daerah tengah dinding kipas memiliki tekanan injeksi yang rendah.

5. *Time to Reach Ejection Temperature*

Simulasi ini menunjukkan waktu yang dibutuhkan produk untuk siap *eject* dari rongga cetak. Dari hasil simulasi yang telah dilakukan dapat diketahui pada daerah jari kecil memiliki waktu siap *eject* yang singkat dibandingkan daerah lainnya. Sedangkan waktu siap *eject* yang paling lama berada pada bentukan tulang di dinding luar kipas.

6. *Volumetric Shrinkage at Ejection*

Simulasi ini dilakukan untuk mengetahui penyusutan yang terjadi pada produk setelah di *eject*. Penyusutan pada bentukan jari lebih besar dibandingkan dengan penyusutan pada daerah dinding luar kipas. Sedangkan penyusutan terbesar berada pada bagian tengah dinding kipas.

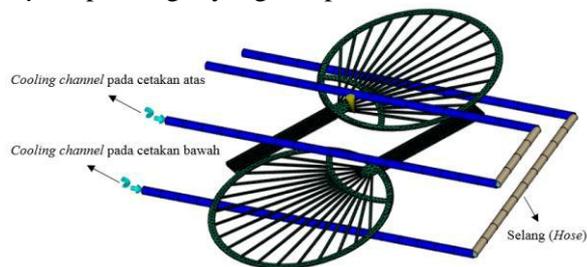
7. *Deflection Analysis*

Analisis *warp* ini dilakukan untuk menunjukkan *warp* yang terjadi pada produk. Dari hasil simulasi ini dapat diketahui bahwa defleksi terendah berada pada daerah jari kecil, sedangkan lentingan terbesar berada pada ujung

dinding kipas yang berlawanan dengan gagang kipas. Defleksi yang terjadi dari hasil simulasi sebesar 2,177 mm.

Hasil Simulasi Pendingin (*Cool Analysis*)

Simulasi sistem pendingin dilakukan untuk mengetahui pendinginan yang terjadi pada pelat kaviti, pada produk, dan juga pada cetakan menggunakan *software*. Analisis ini dilakukan setelah aliran material di optimasi, sehingga produk yang di analisis pada analisis sistem pendingin ini merupakan produk yang telah dilakukan optimasi aliran material plastik terlebih dahulu. Berikut ini adalah *layout* pendingin yang ada pada cetakan:



Gambar 8. *Layout* Pendingin pada Cetakan Lama

Layout pendingin pada cetakan yang ada menggunakan dua buah *cooling channel* pada pelat atas dan bawah yang disambung menggunakan selang karet (*hose*). Jarak lubang pendingin terhadap permukaan pelat kaviti sebesar 12 mm. Berikut adalah hasil simulasi

sistem pendingin (*cool analysis*) yang telah dilakukan:

1. *Temperature, Mold*

Dari hasil simulasi ini dapat kita ketahui suhu di dalam rongga cetak. Dari hasil simulasi dapat diketahui bahwa permukaan dinding pelat kaviti memiliki pendinginan yang tidak merata, pada daerah dinding atas kipas memiliki suhu yang lebih tinggi dibanding permukaan lain.

2. *Circuit Metal Temperature*

Simulasi ini dilakukan untuk mengetahui suhu pada lubang pendingin di cetakan. Dari simulasi ini dapat diketahui bahwa suhu lubang pendingin di daerah dekat permukaan rongga cetak lebih panas dibanding sisi luarnya.

3. *Temperature Mold, Boundary*

Simulasi ini dilakukan untuk mengetahui suhu pada keseluruhan pelat kaviti atas dan pelat kaviti bawah. Dari simulasi ini dapat diketahui bahwa pelat kaviti memiliki pendinginan yang tidak merata, terlihat pada daerah luar pelat kaviti yang tidak menerima lubang aliran

pendingin memiliki suhu yang lebih panas dibandingkan bagian pelat yang menerima pendinginan dari lubang pendingin.

4. *Temperature, Part*

Dari hasil simulasi ini dapat kita ketahui suhu produk didalam rongga cetak setelah diberikan pendinginan. Dari hasil simulasi dapat diketahui bahwa permukaan produk memiliki pendinginan yang tidak merata, pada daerah dinding atas kipas memiliki suhu yang lebih tinggi dibanding permukaan lain.

5. *Circuit Coolant Temperature*

Pada simulasi ini menunjukkan suhu pendingin yang melalui lubang pendingin pada cetakan. *Coolant* yang digunakan adalah air. Dari hasil simulasi yang telah dilakukan dapat diketahui suhu air pendingin pada *inlet* memiliki suhu yang paling rendah dan terus meningkat hingga suhu tertinggi berada pada *outlet*.

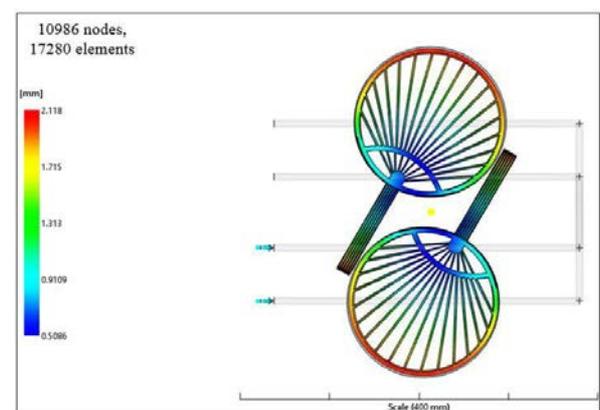
6. *Circuit Heat Removal Efficiency*

Simulasi ini dilakukan untuk mengetahui keefektifan pendingin dalam menyerap panas. Dari hasil simulasi ini menunjukkan bahwa pendinginan di daerah permukaan rongga cetak sudah cukup efektif dalam menyerap panas, dengan nilai keefektifannya sebesar 80%.

Berikut adalah hasil dari *warp analysis* dari produk kipas jari:

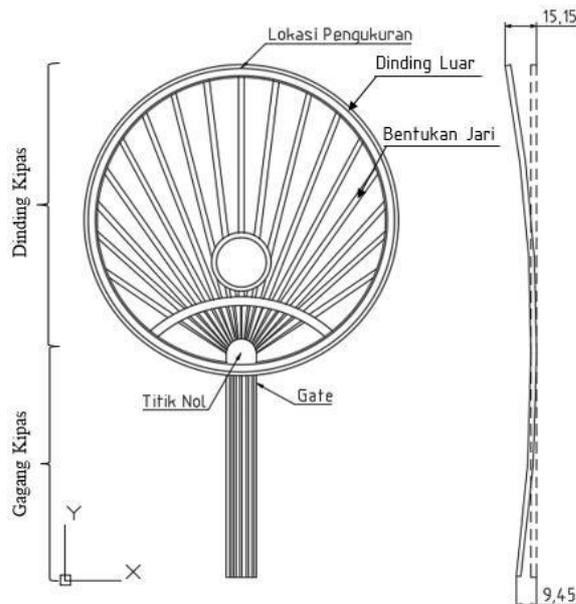
Analisis *warp* ini dilakukan untuk menunjukan *warp* yang terjadi pada produk. Dari hasil simulasi ini dapat diketahui bahwa defleksi

terendah berada pada daerah jari kecil, sedangkan lentingan terbesar berada pada ujung dinding kipas yang berlawanan dengan gagang kipas. Defleksi yang terjadi dari hasil simulasi sebesar 2,118 mm.



Gambar 9. Simulasi *Warp* pada Analisis Sistem Pendingin Lama

Identifikasi Masalah



Gambar 10. *Warpage* pada produk

Identifikasi masalah dituangkan ke dalam bentuk data produk sebagai berikut:

Nama produk : Kipas Jari Lingkaran
Material : PP (Polypropylene)
Dimensi warpage : 15,15 mm

Dari hasil pengukuran yang telah dilakukan diketahui bahwa produk memiliki *warpage* dengan pusat lentingan berada pada 'Titik Nol' pada Gambar 10, namun yang perlu diperhatikan pada produk adalah kerataan pada dinding kipas agar stiker dapat menempel dengan baik, sehingga lentingan pada gagang kipas dapat dihindarkan. Titik nol didapatkan dari hasil simulasi *software* CAE.

Hipotesa

Terdapat dua hipotesa yang diperoleh. Hipotesa pertama diperoleh dari identifikasi masalah. Dari identifikasi masalah yang telah dilakukan dapat dilihat kecenderungan pusat lentingan berada di daerah tengah produk dekat dengan lokasi *gate*. Hal ini dimungkinkan terjadi akibat tebal produk yang tidak merata pada daerah bentuk jari-jari dinding kipas dan bentuk tulang di gagang kipas. Perbedaan ketebalan ini menyebabkan penyusutan produk yang tidak merata, sehingga bentuk jari akan lebih dulu menyusut dibandingkan bentuk dinding luar yang lebih tebal. Penyusutan yang tidak merata ini menimbulkan tegangan dalam yang menyebabkan lentingan.

Pada produk awal, terdapat *warpage* pada dinding kipas sebesar 7,57 mm yang mengakibatkan lentingan hingga ujung dinding kipas sebesar 15,74 mm. Setelah dilakukan

pengukuran, dimensi *warpage* yang besar berada di daerah tengah dinding. Setelah produk diamati, pada ujung jari kecil awal dekat lokasi *gate* terdapat *flashing*. Maka dari itu terdapat satu hipotesa bahwa laju aliran material dari *gate* terhambat pada bagian tengah dinding kipas (kemungkinan besar berasal dari bentuk lingkaran pada dinding kipas) yang mengakibatkan *flashing* di daerah tersebut, sehingga material yang mengalir pada dinding luar kipas cenderung lebih cepat mengalir dan masuk ke bentuk jari besar dari ujung kipas hingga bertemu di tengah dinding kipas. Akibatnya material mengalami penyusutan tidak merata yang menyebabkan *warpage*.

Hipotesa yang kedua diperoleh dari simulasi menggunakan *software* CAE. Dari hasil simulasi yang telah dilakukan pada produk awal ini dapat diketahui kecenderungan dari aliran material yang terjadi, dimana terdapat pemampatan aliran pada daerah bentuk jari kecil akibat penampang jari yang terlalu kecil. Dari hasil simulasi ini didapat hipotesa bahwa terjadinya aliran material yang kurang baik diakibatkan oleh geometri produk itu sendiri, sehingga perlu dilakukan perubahan geometri produk.

Pembahasan Analisis Aliran Material (*Fill Analysis*)

Dari hasil analisis yang telah dilakukan secara keseluruhan terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan:

1. Bentuk jari kecil memiliki aliran material plastik yang kurang baik dibanding daerah lainnya.
2. Bentuk jari kecil mendapatkan tekanan injeksi yang lebih kecil dibandingkan tekanan injeksi pada daerah lainnya.
3. Suhu aliran awal material plastik pada daerah jari kecil sudah lebih rendah dibanding pada daerah lain.
4. Bentuk jari kecil dan cincin di tengah dinding memiliki arah aliran yang tidak berurutan.
5. Bentuk jari pada dinding kipas memiliki pendinginan yang tidak merata dengan daerah dinding lainnya.

Dari hasil analisis ini dapat diambil kesimpulan perlu dilakukan perbaikan terhadap bentuk jari kecil, bentuk cincin di tengah dinding kipas, dan bentuk jari pada dinding kipas.

Pembahasan Analisis Pendingin (*Cool*

Analysis)

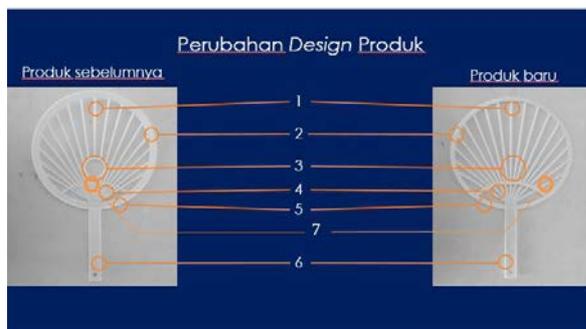
Dari hasil analisis yang telah dilakukan secara keseluruhan didapat bahwa pendinginan tidak merata baik pada produk maupun pada cetakan. Pendinginan pada daerah atas dinding kipas masih kurang, sehingga suhu pada daerah tersebut masih cenderung panas dibandingkan dengan daerah lain yang mendapatkan pendinginan. Akibat pendinginan yang tidak merata, daerah ujung dinding kipas ini tertarik oleh penyusutan daerah tengah dinding kipas.

Hasil Optimasi

Optimasi ini dilakukan berdasarkan hasil analisis aliran material dan analisis sistem pendingin yang telah dilakukan.

Hasil optimasi aliran material

Optimasi aliran material plastik ini dilakukan dengan cara merubah geometri produk. Dari analisis yang telah dilakukan dapat kita ketahui bahwa aliran plastik yang ada saat ini belum seragam disetiap bentuk produk, sehingga perlu dilakukan perbaikan di beberapa bentuk pada produk. Maka dilakukan beberapa perubahan pada geometri produk seperti dijelaskan pada Gambar 11, sebagai berikut.



Gambar 11. Perubahan *Design* Produk

Keterangan:

- 1) Perubahan tebal dan lebar dinding luar kipas
Dilakukan penyederhanaan bentuk dinding luar kipas, kemudian dilakukan penipisan tebal dindingnya. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk mempercepat proses aliran material dan mengurangi besaran variasi tebal dinding. Tebal dinding awal 1,5mm diubah menjadi 1mm.
- 2) Perubahan tebal jari pada dinding
Tebal jari sebelumnya dibuat sama besar dari ujung jari ke ujung jari, namun dilakukan perbaikan dengan meyamakan dimensi tebal jari dengan dimensi ujungnya. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk mempercepat

proses aliran material sehingga mendapatkan penyusutan yang merata.

- 3) Menghilangkan bentuk lingkaran pada dinding
Bentuk lingkaran yang terdapat pada dinding diperkirakan menghambat proses aliran materialnya, hal ini dibuktikan dengan adanya *flashing* di area sekitarnya, sehingga bentuk tersebut dihilangkan.
- 4) Mengurangi jumlah jari kecil
Pada bagian ini dimensi jari kecil sangat kecil sehingga membutuhkan tekanan injeksi yang tinggi, hal ini tentu sangat menghambat aliran material didalamnya, sehingga dilakukan penyederhanaan dengan mengurangi jumlah tulangnya.
- 5) Perubahan tebal tulang pada lingkaran luar dinding
Untuk menghindari variasi tebal dinding yang sangat besar antara tebal tulang bawah dengan tebal lingkaran luar dinding, maka dilakukan penipisan pada tebal dinding tulang ini.
- 6) Perubahan dimensi gagang kipas
Dimensi yang paling tebal pada produk ini berada pada gagang kipas, maka dilakukan penipisan tebal dindingnya dengan tujuan dapat mengurangi variasi tebal dinding yang terlalu besar.

Perubahan geometri produk berdampak pada berat produk. Setelah dilakukan penipisan pada tebal produk, maka produk hasil optimasi ini memiliki berat yang lebih ringan dari produk awal yaitu seberat 10,5 gr. Produk baru ini 42% lebih ringan dari produk awal seberat 18,02 gr.

Berikut adalah hasil simulasi *fill analysis* dari produk hasil optimasi:

1. Fill Time

Dari hasil simulasi *fill time* ini dapat diketahui bahwa aliran material plastik dalam rongga cetak lebih merata secara keseluruhan. Aliran plastik pada dinding kipas luar dan aliran plastik pada bentuk jari relatif merata. Aliran plastik pada bentuk jari kecil sudah tidak lagi terhambat.

2. Temperature at Flow Front

Dari hasil simulasi ini dapat kita lihat suhu aliran awal plastik pada bentuk jari kecil sudah tidak lebih cepat membeku seperti pada bentuk sebelumnya. Pada simulasi ini dapat diketahui bahwa aliran material pada bentuk jari besar diisi oleh aliran plastik dari bentuk jari kecil, bahkan sebagian bentuk dinding luar pun terisi oleh aliran plastik dari bentuk jari kecil.

3. Orientation at Skin

Simulasi ini menunjukkan kecenderungan arah alir dari aliran material dalam rongga cetak. Dilihat

dari hasil simulasi dapat diketahui bahwa arah aliran plastik pada rongga cetak sudah terarah sesuai dengan bentukan alirannya.

4. *Pressure at End of Fill*

Dari hasil simulasi ini dapat dilihat bahwa tekanan didalam rongga cetak sudah merata. Pada aliran awal material mulai dari *gate* memiliki tekanan injeksi yang tinggi hingga tekanan injeksi berakhir di akhir pengisian.

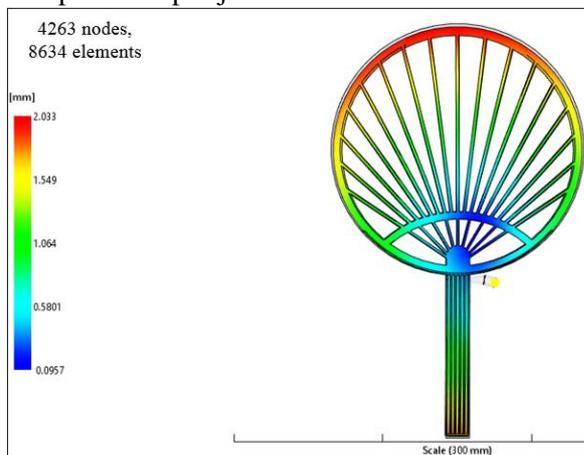
5. *Time to Reach Ejection Temperature*

Pada simulasi ini menunjukkan waktu yang dibutuhkan produk untuk siap *eject* dari rongga cetak. Dari hasil simulasi yang telah dilakukan dapat diketahui bahwa pembekuan produk sudah relatif merata dengan hasil simulasi *time to reach ejection temperature* yang sudah memiliki waktu yang relatif sama.

6. *Volumetric Shrinkage at Ejection*

Simulasi ini dilakukan untuk mengetahui penyusutan yang terjadi pada produk setelah di *eject*. Penyusutan pada produk sudah relatif merata dibandingkan produk sebelumnya. Penyusutan terbesar berada pada daerah ujung kipas dimana daerah ini merupakan daerah pengisian terakhir.

Berikut adalah hasil dari *warp analysis* dari produk kipas jari:



Gambar 12. Analisis *Warp Deflection* pada Optimasi Aliran Material

Analisis *warp* ini dilakukan untuk menunjukkan *warp* yang terjadi pada produk. Pada Gambar 12, titik nol produk ditunjukkan oleh warna biru, sedangkan defleksi tertinggi ditunjukkan oleh warna merah. Dari hasil simulasi ini dapat diketahui bahwa defleksi terendah berada pada daerah jari kecil, sedangkan lentingan terbesar berada pada ujung dinding kipas yang berlawanan dengan gagang kipas. Defleksi yang terjadi dari hasil simulasi sebesar 2,033 mm.

Hasil optimasi sistem pendingin

Optimasi sistem pendingin dilakukan dengan cara menghitung ulang *cooling time* dan merancang ulang *layiut* saluran pendingin pada cetakan. *Cooling time* dihitung ulang untuk mengontrol waktu pendinginan.

Perhitungan ulang *cooling time*

Perhitungan ulang *cooling time* dilakukan menggunakan dua acara yaitu perhitungan menggunakan persamaan dan menggunakan *nomograms*. Namun hasil perhitungan *cooling time* menggunakan *nomograms* yang digunakan pada simulasi *software* CAE.

1. Perhitungan *cooling time* menggunakan persamaan

$$t_c = \frac{2s^2}{\alpha} \ln \left(\frac{T_M - T_W}{T_E - T_W} \right)$$

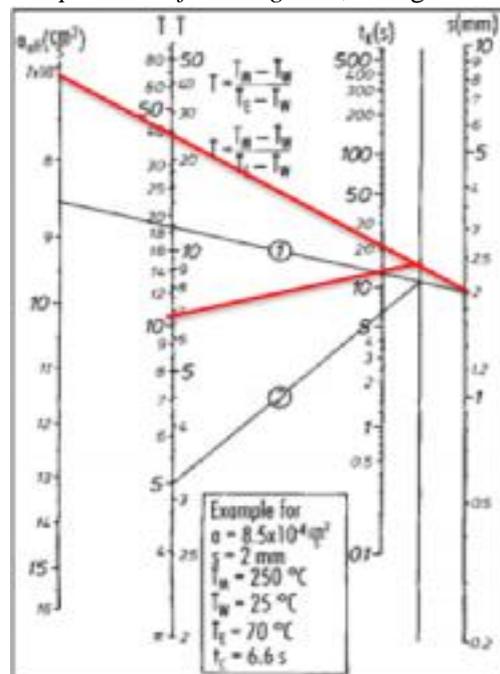
Keterangan:

- t_c : *cooling time*
- s : 2 mm
- α_{eff} : 0,07 mm²
- T_M : 250 °C
- T_W : 40 °C
- T_E : 60 °C

$$t_c = \frac{2^2}{0,07} \ln \left(\frac{250 - 40}{60 - 40} \right)$$

2. Menentukan *cooling time* menggunakan *nomograms*.

Penentuan *cooling time* menggunakan *nomogram for computation of cooling time*, sebagai berikut:



Gambar 13. *nomogram for computation of cooling time*

Thermal diffusivities $pp : 0,07 \text{ mm}^2$
 Tebal produk : 2 mm
 Demolding Temperature : 50° C
 Melt Temperature : 250° C
 Mold Temperature : 40° C

$$= \frac{250 - 40}{60 - 40} = 10,5$$

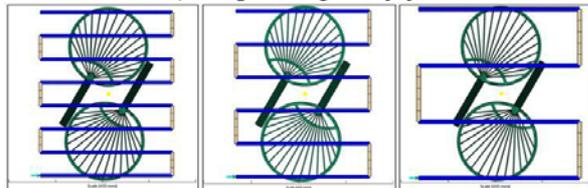
Didapat *Cooling Time* sebesar 13 detik.

Hasil optimasi *layout* saluran pendingin

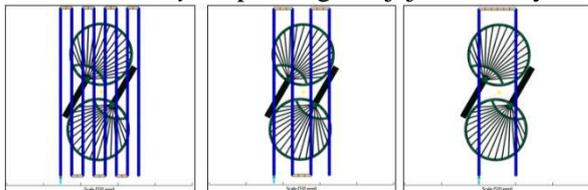
Setelah didapat *cooling time* dari perhitungan ulang menggunakan nomogram, maka hasil perhitungan tersebut digunakan pada simulasi pendingin untuk mendapatkan hasil pendinginan yang optimal. Jenis media pendingin yang digunakan adalah air. Setiap lubang pendingin disambungkan menggunakan selang karet.

Berikut adalah beberapa contoh alternatif *layout* pendingin yang disimulasikan:

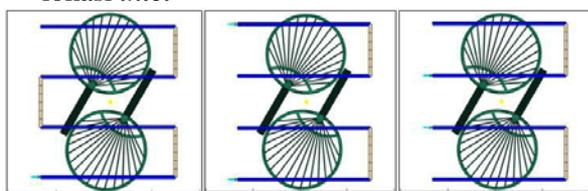
1. Alternatif *layout* pendingin sejajar sumbu x

Gambar 14. Alternative *layout* pendingin sejajar sumbu x

2. Alternatif *layout* pendingin sejajar sumbu y

Gambar 15. Alternative *layout* pendingin sejajar sumbu y

3. Alternatif *layout* pendingin berdasarkan lokasi *inlet*

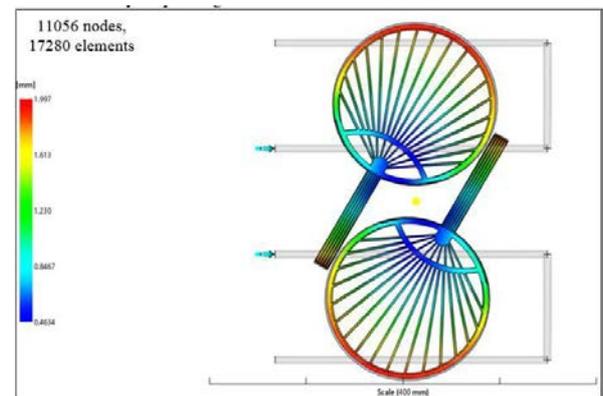
Gambar 16. Alternative *layout* pendingin berdasarkan lokasi *inlet*

Alternatif *layout* pendingin dibuat sejajar sumbu x dan terdapat pula alternatif *layout* pendingin yang dibuat sejajar sumbu y dengan jarak antar

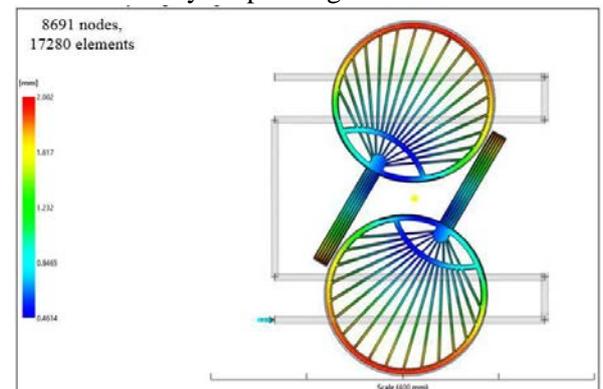
lubang pendingin yang berbeda-beda. Selain itu, terdapat tiga alternatif lokasi *inlet* pada setiap alternatif *layout*. *Layout* pendingin yang dibuat adalah simetris antara pelat kaviti atas dan pelat kaviti bawah. *Layout* pendingin yang dipilih ialah *layout* yang menghasilkan dimensi *warp* produk paling minimal dan dapat diterapkan pada cetakan yang ada. Berikut ini adalah beberapa hasil simulasi *warpage* terendah dari alternatif yang telah dilakukan:

1. Alternatif *layout* pendingin 6

Alternatif *layout* pendingin 6 ini memiliki jarak antar lubang sebesar 110mm dan jumlah saluran sebanyak empat saluran. Terdapat dua buah *inlet* pada kedua lubang di daerah tengah pelat. Hasil simulasi menunjukkan *warpage* sebesar 1,997mm. Hal ini dimungkinkan karena lokasi *inlet* yang dekat dengan lokasi *gate*, sehingga panas material plastik yang keluar dari *gate* mendapat pendinginan dari saluran pendingin ini.

Gambar 17. Alternative *layout* pendingin 6

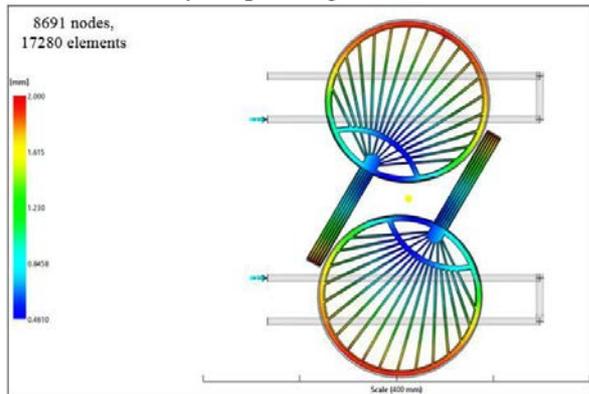
2. Alternatif *layout* pendingin 11

Gambar 18. Alternative *layout* pendingin 11

Alternatif *layout* pendingin 11 ini memiliki jarak antar lubang pendingin yang bervariasi, 165mm dan 50mm. Jumlah saluran sebanyak empat

saluran. Dari hasil simulasi diketahui terdapat *warpage* sebesar 2,003mm.

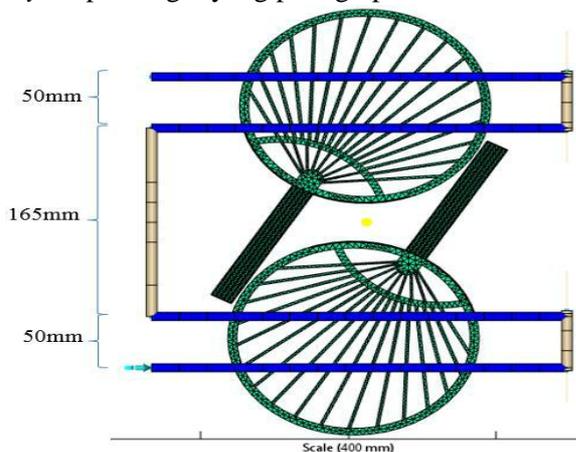
3. Alternatif layout pendingin 12



Gambar 19. Alternative layout pendingin 12

Alternatif *layout* pendingin 12 sama seperti alternatif *layout* pendingin 11 hanya alternatif *layout* pendingin 12 memiliki dua lokasi *inlet* yang berada di kedua lubang tengah pelat. Dari hasil simulasi diketahui terdapat *warpage* sebesar 2,000mm.

Dari hasil simulasi alternatif yang telah dilakukan, didapat alternatif yang paling optimal pada alternatif *layout* pendingin 6 dengan *warpage* sebesar 1,997mm. Namun alternatif rancangan ini tidak dapat diterapkan pada cetakan yang ada karena terdapat saluran pendingin akan bertabrakan dengan *ejector pin*. Maka berikutnya alternatif *layout* pendingin 11 dan 12 yang menjadi alternatif rancangan optimal, karena selain *warpage* yang ditimbulkannya minimum tapi rancangannya pun dapat diterapkan pada cetakan. Namun karena jumlah *inlet* yang ada pada mesin hanya terdapat dua *inlet* untuk satu cetakan sehingga alternatif 12 tidak dapat diterapkan pada mesin injeksi plastik yang ada. Maka dipilih alternatif *layout* pendingin 11 sebagai rancangan optimasi *layout* pendingin yang paling optimal.



Gambar 19. Layout pendingin terpilih

Dari hasil optimasi yang didapat *layout* yang digunakan seperti pada Gambar 19 dengan pendinginan berada pada daerah tengah dinding kipas saja, dengan arah lubang pendingin sejajar sumbu x. Lubang pendingin yang digunakan sebesar diameter 8mm dengan jarak pusat lubang ke permukaan kaviti sebesar 10mm. Selang karet (*hose*) digunakan untuk menyambungkan air pendingin dari satu lubang ke lubang lainnya dengan menggunakan satu inlet pada setiap pelat kavitanya. Berikut adalah hasil simulasi lengkap dari rancangan optimasi terpilih:

1. *Temperature, Mold*

Dari hasil simulasi ini dapat kita ketahui suhu di dalam rongga cetak. Dari hasil simulasi dapat diketahui bahwa permukaan dinding pelat kaviti memiliki pendinginan yang kurang merata, pada daerah ujung kipas dan daerah tengah dinding kipas yang mendapat aliran pendingin dari saluran pendingin memiliki suhu yang lebih dingin dibandingkan daerah dekat *gate*.

2. *Circuit Metal Temperature*

Simulasi ini dilakukan untuk mengetahui suhu pada saluran pendingin di cetakan. Dari simulasi ini dapat diketahui bahwa suhu saluran pendingin relative merata, namun di daerah dekat tengah bentukan dinding kipas memiliki suhu yang lebih panas dibanding sisi luarnya.

3. *Temperature, Part*

Dari hasil simulasi ini dapat kita ketahui suhu produk didalam rongga cetak setelah diberikan pendinginan. Dari hasil simulasi dapat diketahui bahwa permukaan produk memiliki pendinginan yang kurang merata, pada daerah ujung kipas dan daerah tengah dinding kipas yang mendapat aliran pendingin dari saluran pendingin sehingga memiliki suhu yang lebih dingin dibandingkan daerah dekat *gate*.

4. *Circuit Coolant Temperature*

Pada simulasi ini menunjukkan suhu pendingin yang melalui lubang pendingin pada cetakan. *Coolant* yang digunakan adalah air. Dari hasil simulasi yang telah dilakukan dapat diketahui suhu air pendingin pada *inlet* memiliki suhu yang paling rendah dan terus meningkat hingga suhu tertinggi berada pada *outlet*.

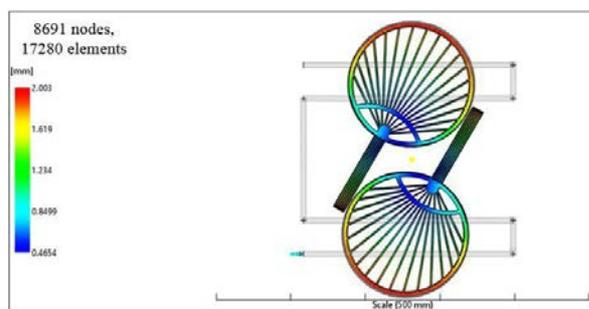
5. *Circuit Heat Removal Efficiency*

Simulasi ini dilakukan untuk mengetahui keefektifan pendingin dalam menyerap panas. Dari

hasil simulasi ini menunjukkan bahwa pendinginan di daerah permukaan *cavity* efektif dalam meyerap panas, dengan nilai keefektifannya sebesar 100%.

Berikut adalah hasil dari *warp analysis* dari produk kipas jari:

Analisis *warp* ini dilakukan untuk menunjukkan *warp* yang terjadi pada produk. Titik nol produk ditunjukkan oleh warna biru, sedangkan defleksi tertinggi ditunjukkan oleh warna merah. Dari hasil simulasi ini dapat diketahui bahwa defleksi terendah berada pada daerah jari kecil, sedangkan lentingan terbesar berada pada ujung dinding kipas yang berlawanan dengan gagang kipas. Defleksi yang terjadi dari hasil simulasi sebesar 2,003mm.



Gambar 20. Analisis *Warpage* pada Optimasi Sistem Pendingin

Perbandingan Hasil Analisis Simulasi Software CAE

Perbandingan analisis ini dilakukan untuk mengetahui *warpage* pada produk awal dan produk akhir dengan skema pada Gambar 21.



Gambar 21. Skema perbandingan *warpage* produk awal dengan produk baru

1. *Warpage* pada Produk Awal Tanpa Pendingin Pada analisis produk awal tanpa pendingin memiliki *warpage* yang cukup besar, yaitu sebesar 2,152mm.
2. *Warpage* pada Produk Awal Tanpa Pendingin Pada analisis produk baru hasil optimasi ini memiliki *warpage* yang lebih kecil 6% dibandingkan dengan *warpage* pada produk awal, yaitu sebesar 2,029mm.
3. *Warpage* pada Produk Awal dengan Sistem Pendingin Awal

Produk awal menggunakan sistem pendingin awal dianalisis, menghasilkan *warpage* yang lebih kecil dibanding produk awal tanpa pendingin, yaitu sebesar 2,107mm.

4. *Warpage* pada Produk Baru dengan Sistem Pendingin Awal

Analisis produk baru menggunakan sistem pendingin awal menghasilkan *warpage* yang lebih besar dari *warpage* produk baru tanpa pendingin, yaitu sebesar 2,118mm.

5. *Warpage* pada Produk Awal dengan Sistem Pendingin Baru

Produk awal dianalisis menggunakan sistem pendingin baru hasil optimasi menghasilkan *warpage* sebesar 2,075 mm. *Warpage* ini merupakan dimensi paling minimum diantara analisis pada produk awal lainnya.

6. *Warpage* pada Produk Baru dengan Sistem Pendingin Baru

Analisis produk baru dengan sistem pendingin baru menghasilkan *warpage* yang paling minimum diantara analisis lainnya, yaitu sebesar 2,002mm.

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan dapat diketahui bahwa geometri produk awal menghasilkan *warpage* 6% lebih besar dari produk baru hasil optimasi. Sistem pendingin awal pun tidak mendinginkan produk secara merata, hal ini dibuktikan berdasarkan pada analisis 4 yaitu analisis produk baru dengan sistem pendingin lama yang menghasilkan *warpage* sebesar 2,118mm, hasil ini lebih besar 4% dibanding analisis produk baru tanpa pendingin yang menghasilkan *warpage* sebesar 2,029mm. Sistem pendingin baru terbukti memberikan pendinginan yang lebih merata dari sistem pendingin awal, hal ini dibuktikan pada analisis produk awal dengan sistem pendingin baru yang menghasilkan *warpage* paling minimum diantara analisis produk awal lainnya yaitu sebesar 2,075mm. Maka dari keseluruhan hasil simulasi diperoleh rancangan yang paling optimal yaitu produk baru dengan sistem pendingin baru yang menghasilkan *warpage* sebesar 2,002mm dari hasil simulasi *software* CAE.

Perbandingan Ukuran Produk Hasil *Trial*

Perbandingan ukuran produk dilakukan untuk mengetahui ukuran *warp* pada produk hasil *trial* dari produk awal hingga setiap tahap optimasi yang dilakukan. Proses pengukuran dilakukan menggunakan jangka sorong dengan kecermatan 0,01mm dan menggunakan kaca sebagai alas produk. Ukuran yang didapat merupakan ukuran yang telah di rata-ratakan dari keseluruhan ukuran *sample* produk.

1. Perbandingan ukuran produk awal pendingin awal dengan produk baru pendingin awal
Warpage produk awal pendingin awal: 15,15mm
Warpage produk baru pendingin awal: 6,36mm
Besar perbaikan 58%.
2. Perbandingan ukuran produk baru pendingin awal dengan produk baru pendingin baru
Warpage produk baru pendingin awal: 6,36mm
Warpage produk baru pendingin baru: 1,75mm
Besar perbaikan 72%.
3. Perbandingan ukuran produk awal pendingin awal dengan produk baru pendingin baru
Warpage produk awal pendingin awal: 15,15mm
Warpage produk baru pendingin baru: 1,75mm
Besar perbaikan 88%.

SIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis, dapat ditarik beberapa kesimpulan yaitu:

1. *Warpage* pada produk kipas jari lingkaran terbentuk akibat tegangan dalam material produk pada cetakan. Tegangan dalam ini terjadi oleh penyusutan material yang tidak merata dari ketidakseragaman aliran material akibat dari geometri produk itu sendiri.
2. *Warpage* pada produk kipas jari lingkaran terbentuk akibat adanya ketidakseragaman pendinginan pada cetakan.
3. Optimasi yang dilakukan dari optimasi aliran material telah memberikan perbaikan sebesar 58%, optimasi sistem pendingin sebesar 72%, dan optimasi yang dilakukan secara keseluruhan sebesar 88%.
4. Berat produk hasil optimasi 10,5 gr \leq berat produk awal 18,02 gr.

DAFTAR PUSTAKA

- Menges/Michaeli/Mohren, 2001. How to Make Injection Molds, Carl Hanser Verlag, Munich.
- Jerry M. Fischer. 2013. Handbook of Molded Part Shrinkage and Warpage Second Edition. Great Britain: Elsevier.
- Tagizadeh, S., Özdemir, A., Uluer, O. 2013. Warpage prediction in Plastic Injection Molded Part Using Artificial Neural Network. The Islamic Republic of Iran, Shiraz University.
- Rees, Herbert, 2002. Mold Engineering, Carl Hanser Verlag, Munich.
- Marciaswan-weebly Upload*. Diunduh pada 15 Februari 2016, dari http://marciaswan.weebly.com/uploads/1/3/5/8/13585698/mfdg_low-res_proof_part2.pdf