

5. ANALISA HASIL PERCOBAAN

5.1. Analisa Variansi

Hasil dari pengolahan data di Bab 4. diketahui bahwa faktor *screw speed*, *cooling time*, dan *inject pressure* mempunyai efek yang signifikan terhadap respon. Untuk memastikan bahwa faktor-faktor yang dipilih benar-benar signifikan maka dilakukan analisa *Main effects plot* dan *Interaction plot* dengan bantuan program Minitab 13.1. (lihat di Lampiran 8). Dari hasil *main effect plot* menunjukkan bahwa faktor *screw speed* memberikan efek yang sangat kecil terhadap respon dibandingkan dengan faktor *cooling time* dan *inject pressure*, karena membentuk garis yang horizontal sehingga dapat disimpulkan bahwa *level-level* dari faktor *screw speed* tidak memberikan efek terhadap respon. Namun karena tingkat signifikan yang digunakan cukup tinggi, yaitu 95 % maka faktor *screw speed* tetap dianggap signifikan terhadap respon. Pada faktor *cooling time* dan *inject pressure* membentuk garis yang tidak horizontal, dimana garis tersebut menunjukkan *level* 33 detik untuk faktor *cooling time* dan *level* 95 Kg/cm² untuk faktor *inject pressure*; berada pada waktu yang terkecil, sehingga bisa dibilang faktor-faktor tersebut memberikan efek yang signifikan terhadap respon. Pada *interaction plot* menunjukkan bahwa semakin tinggi *screw speed* dan *inject pressure* akan memperoleh waktu siklus yang semakin singkat. Selain itu *cooling time* yang rendah akan mempercepat waktu siklus.

Untuk mengetahui variabilitas dari respon maka dilakukan analisa residual, dimana pada grafik *Histogram of the residuals* digambarkan beda antara kelas-kelas dalam distribusi residual. Dari grafik ini dapat dilihat bahwa nilai residual disekitar 0,0 memiliki frekuensi yang tinggi atau yang paling banyak muncul, sehingga grafik membentuk kurva. Hal ini menunjukkan bahwa variasi residual terdistribusi atau tersebar dengan merata. Dari melihat *Normal probability plot* terlihat bahwa *points of the plot* mendekati linier kekanan atas, ini menunjukkan bahwa residual memiliki nilai normal yang merata dari yang terkecil hingga terbesar bersamaan dengan makin besarnya nilai residual yang berarti model sudah terdistribusi normal. Pada *Residual versus fitted values* menggambarkan titik-titik yang menyebar merata disekitar 2 garis sejajar di daerah

0,0 dan tidak terlihat ada kecenderungan untuk membentuk kerucut, dari sini dapat dilihat bahwa residual memiliki variasi yang konstan terhadap *fitted value*. Penyebaran nilai residual secara acak pada *Residual versus the order of data* menunjukkan tidak adanya kecenderungan *error* secara kontinu pada eksperimen. Dari plot residual terhadap *level* dari tiap faktor, tidak terlihat adanya perbedaan mencolok pada variansi tiap *level*, yang mana hal ini menunjukkan tidak adanya kecenderungan tertentu dari data untuk menuju nilai tertentu diluar normal.

Dari analisa diatas, maka dapat diambil faktor-faktor yang paling signifikan dengan *level*-nya, yaitu :

- *Screw speed* 60 mm/detik
- *Cooling time* 33 detik
- *Inject pressure* 95 Kg/cm²

Faktor *screw speed* diambil 60 mm/detik, dengan pertimbangan bahwa ini adalah *level* yang tercepat dari tiga *level* yang digunakan.

5.2. Pengaruh Faktor Terhadap Respon

5.2.1. Screw Speed

Screw speed berhubungan dengan *inject pressure* yang berfungsi mempercepat pergerakan *screw* untuk injeksi. Namun dengan bertambahnya kecepatan *screw* tidak memberikan dampak yang sangat besar terhadap waktu yang dihasilkan untuk melakukan injeksi. Hal ini diperkuat dengan hasil penolahan data dengan *Main effect plot* yang telah dijelaskan diatas.

Dari hasil *response surface* untuk menyusun model dasar untuk mendapatkan suatu persamaan juga menunjukkan bahwa faktor *screw speed* tidaklah signifikan untuk masuk kedalam persamaan. Analisa yang bisa didapatkan adalah bahwa *screw speed* sangatlah tergantung dari besarnya *inject pressure*. Karena dalam melakukan injeksi yang paling utama adalah tekanan dari injeksi tersebut, sehingga dengan meningkatnya tekanan injeksi maka pergerakan dari *screw* otomatis juga ikut meningkat. Namun hal ini tidaklah berlaku untuk sebaliknya karena dari data percobaan dapat dilihat bahwa *screw speed* dari *level* 40 mm/detik hingga 60 mm/detik tidak memberikan perubahan waktu siklus yang signifikan pada saat *inject pressure* pada posisi 85 kg/cm², tetapi mulai ada

perubahan waktu yang cukup besar bila *inject pressure* dirubah menjadi 90 dan 95 kg/cm².

5.2.2. Cooling Time

Dari hasil perhitungan *anova* menunjukkan faktor *cooling time* memiliki pengaruh yang signifikan, hal ini didukung dari hasil *main effects plot* yang menunjukkan garis dari faktor *cooling time* memotong garis tengah dan mengarah pada *level* 33 detik, yang berarti *level* ini paling berpengaruh terhadap respon. Dan dari grafik *residual versus cooling time* menunjukkan bahwa *level - level* dari faktor ini semuanya mendekati residual 0.0, yang berarti bahwa *level-level* ini memberikan efek terhadap respon, namun *level* 33 detik adalah yang paling signifikan terhadap respon dibandingkan dengan *level* 35 detik dan 37 detik.

5.2.3. Inject Pressure

Pada *main effects plot*, faktor *inject pressure* menunjukkan pengaruh yang cukup besar terhadap respon dan *level* yang paling signifikan adalah 95 Kg/cm². Dan dari grafik *residual versus inject pressure* tidak terjadi penyimpangan dari tiap *level* namun lebih banyak mendekati residual 0.0 . Dari hasil grafik dapat disimpulkan bahwa dari *level* 85 Kg/cm², 90 Kg/cm², dan 95 Kg/cm²; *level* 95 Kg/cm² adalah yang paling berpengaruh terhadap respon dibandingkan *level* yang lain.

5.2.4. Interaksi Dari Faktor

Dari hasil percobaan menunjukkan bahwa faktor-faktor yang dipilih memiliki interaksi satu dengan yang lainnya sehingga menghasilkan waktu siklus yang lebih cepat. Faktor *screw speed* berhubungan dengan perubahan *inject pressure* dimana makin besar tekanan maka akan membuat waktu proses injeksi menjadi lebih cepat dan pada saat pendinginan *mold* faktor *cooling time* lebih pendek sehingga waktu siklus yang dihasilkan akan menjadi lebih singkat dan tidak menghasilkan cacat. Hal ini dapat dilihat dari hasil *interaction plot* dimana interaksi antara faktor *screw speed* dengan *cooling time* tidak menunjukkan perbedaan yang berarti dalam mempengaruhi respon, sehingga garis yang

terbentuk adalah sejajar dan berhimpitan. Demikian juga untuk interaksi antara faktor *screw speed* dengan *inject pressure*, namun perubahan terjadi pada interaksi faktor *inject pressure* dengan *cooling time*, sehingga dapat dianalisa bahwa faktor *screw speed* tidak memberikan efek yang besar terhadap respon.

5.3. Response Surface

Tujuan dari penggunaan *Response surface* adalah untuk mencari model dari respon, dengan menunjukkan variabel-variabel yang mempengaruhi respon dan menghasilkan menghasilkan respon yang optimal. Dari hasil analisa *anova*, menunjukkan bahwa respon menghasilkan model yang *curvature* bukan linier, maka *response surface* yang digunakan adalah model orde 2.

Pengolahan data untuk *Response surface* dilakukan dengan program Minitab 13.1. Hasil perhitungan dapat dilihat pada Lampiran 9.

Analisa yang didapat dari pengolahan data menunjukkan bahwa faktor *screw speed* sangatlah tidak signifikan karena memiliki *p-value* lebih besar dari α (0,05) dan interaksi faktor juga ada yang tidak signifikan, yaitu interaksi *screw speed* (A) dengan *screw speed* (A) , intraksi antara *screw speed* (A) dengan *cooling time* (B) karena waktu hasil percobaan yang didapatkan menunjukkan tidak adanya perbedaan yang berarti. Interaksi antara *screw speed* (A) dengan *inject pressure* (C), interaksi antara *cooling time* (B) dengan *cooling time* (B), dan interaksi antara *cooling time* (B) dengan *inject pressure* (C). Karena tidak signifikan maka haruslah dilakukan perbaikan dengan membuang faktor dan interaksi tersebut dan dilakukan pengolahan data ulang. Faktor yang dipakai untuk memperbaiki model adalah

- *Cooling time* (B)
- *Inject pressure* (C)
- Interaksi dari *inject pressure* (C) dengan *inject pressure* (C)

Model optimasi yang didapatkan adalah :

$$y = 208,049 + 0,992B - 4,128C + 0,021C^2 + \varepsilon$$

dimana :

- y adalah respon berupa angka waktu siklus dari pembuatan ember 4 galon dalam satuan detik.
- B adalah faktor *cooling time* dengan nilai input pada persamaan ini adalah 33 detik sampai dengan 37 detik.
- C adalah faktor *inject pressure* dengan nilai input pada persamaan ini adalah 85 Kg/cm² sampai dengan 95 Kg/cm².
- ε adalah *error*.

Setelah memperoleh persamaan, maka langkah selanjutnya adalah menentukan kondisi optimum dari faktor-faktor yang signifikan dari grafik plot kontur dan plot permukaan dari respon waktu pada Lampiran 10, dimana dari grafik diperoleh respon yang terbaik dan nilai optimum yaitu :

- *cooling time* = 33 detik
- *inject pressure* = 95 Kg/cm²

5.4. Analisa Molding

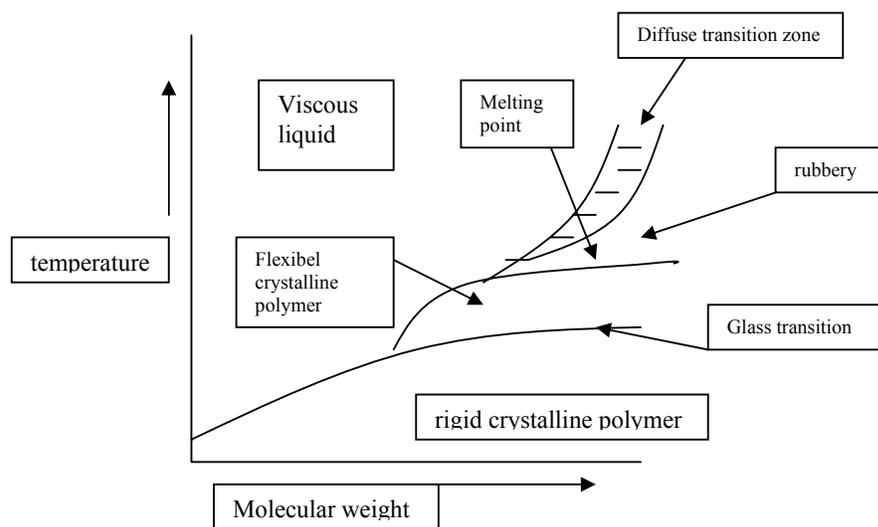
5.4.1. Screw Speed

Selama proses pemanasan biji plastik hingga menjadi *melting plastic* akan melewati beberapa *fase*, lihat Gambar 5.4.1. Perubahan *fase* terjadi bersamaan dengan meningkatnya temperatur *barrel*. Pada saat *melt plastic* akan diinjeksikan, plastik sudah memasuki *fase viscous liquid* dimana temperaturnya mencapai 300 °C. Pergerakan dari *melt plastic* dipengaruhi oleh berat dari molekul *polymer*, dimana makin besarnya berat molekul *polymer* maka *melt flow* akan menjadi lambat. Beratnya molekul *polymer* disebabkan karena masih adanya molekul-molekul yang mengelompok. Untuk mereduksi berat molekul maka perlu dilakukan pemecahan molekul-molekul tersebut yaitu dengan menurunkan viscositas dari *polymer*.

Kecepatan *screw* dapat mempengaruhi *viscosity* dari *melt plastic*. Pergerakan *screw* yang lambat akan menyebabkan *melt plastic* makin lama didalam *barrel*, sehingga temperatur *melt plastic* makin tinggi dan mengakibatkan

viscositasnya makin rendah. Dengan makin rendahnya viscositas maka aliran *melt plastic* akan makin cepat.

Namun bila kecepatan *screw* ditingkatkan, maka akan membuat *melting plastic* lebih cepat mencapai *fase rubbery*, dimana pada *fase* ini terjadi perubahan sifat *melt plastic* yang lebih elastis sehingga berat molekul *polymer* akan makin besar. Hal ini akan membuat pergerakan *melt plastic* menjadi lebih lambat, karena terjadi ikatan-ikatan yang kuat antar molekul *polymer*.



Gambar 5.4.1. Diagram *temperatur-molecular weight* (Ref. No.5)

5.4.2. Cooling Time

Melting plastic yang memasuki *mold* akan mengalami perubahan *fase* dari *viscous liquid* menjadi *fase rubbery* (lihat Gambar 5.4.1), dimana pada saat *fase rubbery* sudah terjadi ikatan-ikatan molekul yang kuat. Bersamaan dengan pendinginan *mold*, maka *fase rubbery* secara bertahap akan membentuk inti-inti kristal yang akan bergerak bersamaan dengan penyebaran *melting plastic* di dalam *mold*. Inti-inti kristal tersebar dalam bentuk *lamellar* sebagai molekul *polymer*, kemudian akan tumbuh menjadi *spherulites*, yaitu pertumbuhan struktur kristal. Dengan terjadinya pertumbuhan kristal, maka plastik akan membentuk *flexibel*

crystalline polymer hingga mencapai *fase glass-like*, yaitu dimana plastik sudah mencapai *freezing point*.

Kecepatan pendinginan *mold* berpengaruh terhadap kecepatan pertumbuhan *crystalline*. Waktu pendinginan yang cepat akan membuat pertumbuhan struktur kristal menjadi lebih besar karena temperatur *mold* masih didalam temperatur *fase glass transition* (60 °C), sehingga akan berpengaruh terhadap sifat elastisitas produk.

Temperatur *mold* yang terlalu dingin (< 60 °C) akan membuat molekul *polymer* akan saling mengikat hingga terjadi *frozen plastic*. Hal ini akan membuat produk akan mengalami *deforming stresses* dan mengakibatkan produk akan bersifat getas. Untuk menghindari terjadinya *deforming stresses* maka temperatur matras harus konstan ± 60 °C, dimana temperatur 60 °C adalah temperatur *fase glass transition*.

Tingginya temperatur *mold* akan membuat *melt plastic* yang sudah mencapai *fase rubbery* menjadi lebih lambat untuk masuk ke *fase glass-like*, sehingga pertumbuhan molekul *polymer* menjadi sangat besar dan akan mengurangi sifat *stiffness* pada produk.

Media pendingin *mold* yang digunakan adalah air. Suhu *mold* yang diijinkan adalah ± 60 °C (Ref.No.5) agar produk bisa terbentuk. Air yang dialirkan melalui *cooling channels* pada *mold* akan menjadi panas pada saat keluar dari *mold* dan didinginkan kembali dengan menggunakan *cooling tower*. Temperatur *mold* pada saat belum terisi adalah ± 40 °C, dimana air tetap bersirkulasi di dalam *mold* agar temperatur *mold* tetap konstan.

Waktu pendinginan matras juga tergantung dari bentuk matras, dimana untuk ember 4 galon cukup panjang bentuknya dan ketebalan yang dimiliki hanya 1,6 mm. Produk yang tipis dan permukaannya luas dapat lebih cepat melepas panas, sehingga untuk mencapai *freezing point* juga lebih cepat. Disamping itu diameter *cooling channels* yang sebesar 14 mm dan jarak dengan permukaan *mold* sebesar dua kali diameter *cooling channel* akan mempercepat dalam pendinginan *mold*.

5.4.3. Inject Pressure

Melt plastic memiliki karakteristik *viscoelastic*, yaitu campuran dari *viscosity* dan *elastically*. Sehingga *melt plastic* tidaklah mudah mengalir tanpa adanya tekanan yang besar untuk mendorong *melt plastic* masuk kedalam matras. *Viscoelastic* adalah sifat dari *melt plastic* yang sudah masuk ke dalam fase *rubbery*.

Melt plastic yang mengalir di dalam matras akan mengalami *shear flow*, dimana cairan plastik akan bergerak secara merata kedalam rongga cetakkan.

Rendahnya tekanan injeksi akan mengakibatkan aliran *melt plastic* didalam *mold* lambat, hal ini disebabkan juga karena peningkatan dari berat molekul *polymer*.

Kecepatan injeksi diperlukan untuk menghindari terjadinya *frozen plastic* pada saat *melt plastic* masih bergerak untuk mengisi rongga cetakan, oleh karena *frozen plastic* akan mengganggu *melt plastic* yang mengalami *shear flow* sehingga pengisian *mold* tidak merata. Tetapi bila tekanan yang diberikan terlalu tinggi maka akan ada *melt plastic* yang keluar dari rongga cetakan masuk ke dalam celah antar *mold* . Keluarnya *melt plastic* dari rongga cetakan biasa disebut sebagai cacat *flash*.

Produk ember 4 galon merupakan produk yang memiliki ketebalan 1,6 mm dan panjang 282 mm sehingga memerlukan tekanan yang besar untuk memasukkan *melting plastic* ke dalam *mold* . Hal ini disebabkan oleh *density* dari plastik HDPE yang sebesar 0,96 g/cm³ dan *melt flow* 0,28 g/10mnt (lihat di Lampiran 5), dibandingkan dengan *density* dari *polyethylene* yang sebesar 0,92 g/cm³. Tingginya *density* akan membuat *melt plastic* sangat lambat untuk memasuki *mold* dan disamping itu *mold* yang sudah tertutup akan membuat rongga di dalam *mold* menjadi hampa udara yang mengakibatkan adanya daya lawan dari udara di dalam rongga pada saat *melting plastic* diinjeksikan kedalam *mold* .

5.4.4. Interaksi Antar Faktor

Pada saat mencari *level* pada faktor *screw speed*, terjadi ketidakmampuan *screw* untuk melakukan injeksi yaitu pada saat kecepatan *screw* 50 mm/detik dan

tekanan injeksi 80 Kg/cm². Ketidakmampuan terjadi karena *viscosity* lelehan plastik pada saat kecepatan *screw* 50 mm/detik lebih tinggi dari pada saat kecepatan *screw* 40 mm/detik. Hal ini disebabkan karena aliran lelehan plastik pada saat kecepatan *screw* 40 mm/detik lebih lambat sehingga *melt plastic* lebih lama dalam menerima panas, sehingga viscositasnya menjadi rendah. Namun saat kecepatan *screw* menjadi 50 mm/detik pergerakan lelehan plastik menjadi cepat dan panas yang diterima juga lebih sedikit, sehingga viscositasnya tinggi. Akibat dari tingginya *viscosity* dan besarnya berat molekul *polymer* serta gesekan yang timbul makin besar, maka diperlukan daya tekan yang lebih besar yaitu mencapai 90 Kg/cm². Dan demikian juga saat *screw speed* pada level 60 mm/detik, *inject pressure* juga meningkat menjadi 95 Kg/cm². Bila makin meningkatnya *viscosity* maka temperatur *melt plastic* juga makin rendah, sehingga *cooling time* matras akan semakin singkat untuk mencapai *freezing point*. Hal ini terbukti pada saat penggunaan *cooling time* 33 detik, plastik yang berada pada temperatur *melting point* (220 °C - 310 °C) dapat turun menjadi ± 60 °C.

5.5. Perbandingan Setting Optimal dengan Setting Awal

Dengan menggunakan *setting* yang optimal hasil dari analisa *anova*, dilakukan percobaan ulang untuk menunjukkan bahwa dengan waktu siklus yang didapatkan dari *setting* yang optimal tidak akan mengalami perubahan yang jauh dari data percobaan pertama. Data hasil percobaan ulang ada di Lampiran 12, dimana rata-rata data *setting* optimal tersebut dibandingkan dengan rata-rata data *setting* awal (data sebelum dilakukan percobaan).

Rata-rata hasil waktu siklus yang didapatkan adalah :

- Rata-rata waktu siklus *setting* optimal: 39,24 detik per produk.
- Rata-rata waktu siklus *setting* awal : 49,53 detik per produk.

Dari hasil percobaan ulang menunjukkan bahwa *setting* mesin hasil desain eksperimen menunjukkan perubahan waktu siklus yang cukup signifikan terhadap hasil proses produksi ember 4 galon. Untuk mengetahui jumlah produk dan jumlah *reject* yang bisa dihasilkan, maka dilakukan percobaan dengan

menjalankan mesin *injection molding* dengan menggunakan *setting* optimal dalam 8 jam (1 *shift*) selama tiga hari berturut-turut dan hasil yang didapatkan dapat dilihat pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1.

Tabel Hasil Percobaan dengan *setting* optimal.

Hari ke	Jumlah Produk	Jumlah Reject	%
1	595	21	3,5
2	605	22	3,6
3	602	21	3,5

Hasil produksi diatas dibandingkan dengan hasil produksi sebelum dilakukan eksperimen, yaitu:

- Jumlah produk : ± 500 buah
- Jumlah *reject* : ± 18 buah (3,6 %)

Jika dilihat dari perbandingan diatas, maka dapat diketahui bahwa hasil desain eksperimen telah memberikan peningkatan hasil produksi sekitar 19 %, kemudian waktu siklus menjadi lebih cepat sekitar 20 % dan hasil *reject* yang terjadi tidak mencapai 5 %. Perubahan ini bisa dibilang cukup signifikan dan sesuai dengan yang diharapkan.