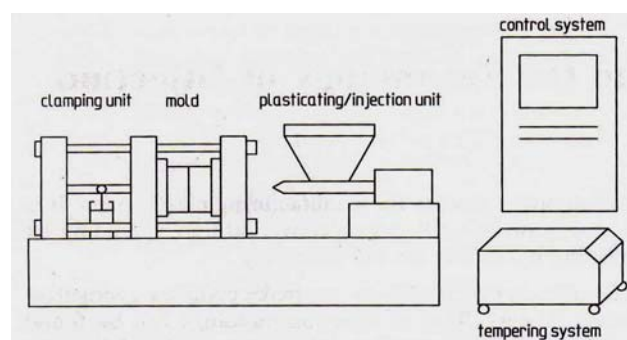


2. LANDASAN TEORI

2.1. *Injection Molding*

Injection molding merupakan metode yang penting dalam industri pembuatan plastik. *Injection molding* banyak dipilih karena memiliki beberapa keuntungan, yaitu kapasitas produksi yang tinggi, sisa penggunaan material (*useless material*) sedikit dan tenaga kerja minimal. Selain itu bahan baku yang digunakan juga dapat diolah dalam satu kali proses dan pada umumnya metode ini juga tidak memerlukan proses *finishing*. Keunggulan metode *injection molding* adalah kita dapat membuat suatu benda dengan bentuk geometri yang kompleks dalam satu langkah produksi yang dilakukan secara otomatis. Sedangkan kekurangannya, biaya investasi dan perawatan alat tinggi, serta perancangan produk harus mempertimbangkan pembuatan desain *molding*nya.

Dalam proses *injection molding* terdapat lima komponen penting, yaitu bagian *injection unit*, *molding unit*, *clamping unit*, *tempering system*, dan mesin pengendali sistem. Kelima komponen ini merupakan satu kesatuan yang saling berhubungan secara otomatis. Kelima komponen tersebut secara sederhana dapat dilihat pada gambar berikut:

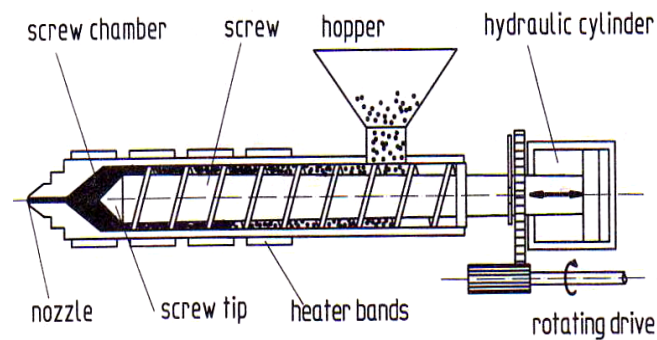


Gambar 2.1. Komponen *Injection Molding* (Pötsch, 1995)

2.1.1. *Plasticating* atau *Injection Unit*

Injection unit memiliki tiga fungsi utama, yang pertama yaitu untuk memanaskan dan melelehkan bahan baku yang akan masuk melalui bagian *hopper*. Setelah meleleh, bahan baku tersebut kemudian diinjeksikan ke dalam *cavity*. Fungsi yang terakhir adalah untuk memberikan tekanan selama proses pendinginan plastik. Ketiga fungsi utama ini juga mendukung proses *injection unit* untuk bergerak ke depan dan ke belakang pada saat berhubungan dengan *mold*, serta untuk memutuskan hubungan *nozzle* dengan tekanan yang tepat.

Gambar *injection unit* tersebut adalah sebagai berikut:



Gambar 2.1.1. *Injection Unit* (Pötsch, 1995)

Injection unit terdiri dari tujuh bagian, yaitu:

- *Hopper*

Hopper digunakan untuk menempatkan material plastik sebelum masuk ke *barrel*. Biasanya untuk menjaga kelembaban material plastik, digunakan tempat penyimpanan khusus yang dapat mengatur kelembaban, sebab apabila kandungan air terlalu besar pada udara, dapat menyebabkan hasil injeksi yang tidak bagus. Pada umumnya *hopper* mempunyai semacam jendela yang digunakan oleh operator untuk memeriksa pengisian bahan dengan mudah.

- *Motor dan transmission gear unit (rotating drive)*

Bagian ini berfungsi untuk menghasilkan daya yang digunakan untuk memutar *screw* pada *barrel*, sedangkan *transmission unit* berfungsi untuk memindahkan daya dari putaran motor ke dalam *screw*, selain itu *transmission unit* juga berfungsi untuk mengatur tenaga yang disalurkan sehingga tidak terjadi pembebanan yang terlalu besar.

- *Cylinder screw chamber*

Bagian ini berfungsi untuk mempermudah gerakan *screw* dengan menggunakan momen inersia sekaligus menjaga perputaran *screw* tetap konstan, sehingga dapat dihasilkan kecepatan dan tekanan yang konstan saat proses injeksi plastik dilakukan.

- *Screw*

Reciprocating screw berfungsi untuk mengalirkan plastik dari *hopper* menuju ke *nozzle*. Ketika *screw* berputar, material dari *hopper* akan tertarik mengisi *screw* yang selanjutnya dipanaskan dan kemudian didorong ke arah *nozzle*.

- *Nonreturn valve*

Valve ini berfungsi untuk menjaga aliran plastik yang telah meleleh agar tidak kembali saat *screw* berhenti berputar.

- *Nozzle*

Proses *plasticating* berakhir pada *nozzle*. Pada *nozzle* ini terjadi perputaran silinder pada *sprue brushing* yang terletak pada *mold*. Jika dibutuhkan, silinder tersebut tertutup pada saat proses *plasticating* dan fase pendinginan.

- *Barrel Tempering*

Alat ini merupakan tempat *screw* dan selubung yang menjaga aliran plastik ketika dipanasi oleh *heater*, pada bagian ini juga terdapat *heater* untuk memanaskan plastik sebelum masuk ke *nozzle*.

2.1.2. *Mold*

Mold adalah elemen kunci pada proses *injection molding*. *Molding unit* sebenarnya adalah bagian lain dari mesin *plastic injection*. *Molding unit* adalah bagian yang membentuk benda yang dibuat, secara garis besar *molding unit* memiliki dua bagian utama yaitu bagian *cavity* dan *core*, bagian *cavity* adalah bagian cetakan yang berhubungan dengan *nozzle* pada mesin, sedangkan bagian *core* adalah bagian yang berhubungan dengan *ejector*. *Ejector* adalah bagian dari mesin yang digunakan untuk melepas produk plastik yang sudah jadi dari cetakkannya. *Mold* harus dapat mendistribusikan *melt*, membentuk *melt* tersebut menjadi bentuk yang diinginkan, mendinginkan *melt* dan kemudian mengeluarkan (*eject*) produk yang sudah jadi. Selain *cavity* dan *core*, *mold* juga terdiri dari

runner system, dan *ejector system*. Penjabaran dari bagian-bagian mesin *mold* tersebut adalah sebagai berikut:

2.1.2.1. *Runner System*

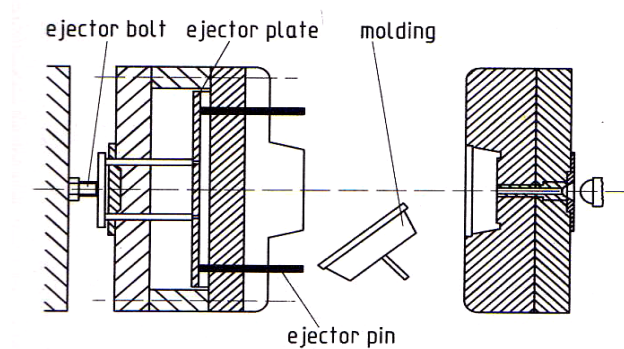
Fungsi dari *runner system* adalah untuk mengeluarkan *melt* panas dari *nozzle* pada *plasticating unit* dan kemudian mendistribusikannya pada *cavity*. Pada saat proses injeksi bagian *nozzle* berhubungan dengan *sprue brushing* dan menekan *melt* panas ke bagian *sprue*. Pada mesin *mold* yang memiliki beberapa *cavity*, *melt* tersebut kemudian didistribusikan melalui *runner* dan *gate* menuju ke *cavity-cavity* yang ada. *Gate* tersebut terhubung dengan saluran kecil yang menghubungkan *runner* dan *cavity*. Fungsi saluran ini adalah untuk mengurangi kecacatan pada saat *runner* dilepas dan untuk menambahkan gesekan panas yang dibutuhkan apabila *melt* tersebut mulai dingin pada saat mengalir melewati sistem *runner*.

2.1.2.2. *Cavity*

Fungsi *cavity* adalah mendistribusikan *melt*, membentuknya dan memberikan sentuhan akhir pada produk yang dihasilkan. *Cavity* mewakili bagian negatif dari dinding *molding*. Mesin *injection molding* seringkali merupakan bentuk geometri yang kompleks. Dalam beberapa kasus, harus berada pada bagian dinding *mold* yang bergerak yang kemudian kembali ke posisi awal pada saat *mold* menutup.

2.1.2.3. *Ejector System*

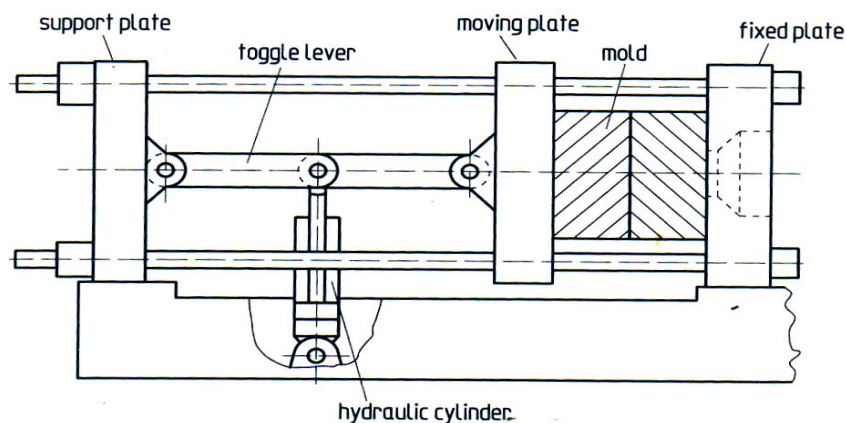
Mold minimal terdiri dari dua bagian sehingga produk yang sudah jadi dapat dikeluarkan dari mesin. Produk jadi tersebut dapat dikeluarkan secara manual dari mesin atau dapat menggunakan *ejector system* pada saat *mold* terbuka. Fungsi utama dari *ejector system* ini adalah untuk melepas produk jadi secara otomatis sehingga proses produksi lebih cepat dan tidak membahayakan operator. Gambar dari *ejector system* adalah sebagai berikut:



Gambar 2.1.2.3. *Ejector System* (Pötsch, 1995)

2.1.3. *Clamping Unit*

Clamping unit berfungsi untuk memegang dan mengatur gerakan *mold unit*, serta gerakan *ejector* saat melepas benda dari *molding unit*, pada *clamping unit* lah kita bisa mengatur berapa panjang gerakan *molding* saat dibuka dan seberapa panjang *ejector* harus bergerak. Gambar *clamping unit* secara umum adalah sebagai berikut:



Gambar 2.1.3. *Clamping Unit* (Pötsch, 1995)

Terdapat tiga macam *clamping unit* yang dipakai pada umumnya, yaitu *mechanical*, *hydraulic*, dan *hydraulic mechanical system*. *Mechanical clamping units* merupakan jenis mesin yang mana gerakan dan tekanan *clampingnya* dihasilkan oleh gerakan mekanik dari sistem mekanik. *Hydraulic clamping units* memiliki desain yang berbeda sama sekali dengan *mechanical clamping units*. Mesin ini memiliki bagian silinder hidrolis yang menggerakkan tekanan *clamping*.

Selain itu mesin ini juga dilengkapi silinder lebih kecil yang fungsinya untuk mengendalikan gerakan membuka dan menutup mesin tanpa memindahkan sejumlah besar minyak dalam tekanan tinggi. Yang terakhir, *hydraulic mechanical clamping units*. Mesin ini merupakan gabungan dari *mechanical clamping units* dan *hydraulic clamping units*. Dengan gabungan keduanya, mesin ini memiliki keunggulan, yaitu lebih cepat, hemat energi, serta tekanan *clamping* yang lebih mudah diulang. Karena keunggulan tersebut, mesin jenis ini harganya lebih mahal.

Semua jenis mesin *injection molding* yang sudah modern pasti dilengkapi dengan sistem hidrolis. Pada saat ini mesin hidrolis merupakan salah satu solusi terbaik untuk distribusi energi. Proses yang terjadi pada saat fase injeksi akan lebih ekonomis jika dibantu dengan adanya (minyak) hidrolis.

Keuntungan penggunaan sistem minyak hidrolis adalah cairan dapat didistribusikan dengan mudah melalui pipa atau slang dan tidak ada proses mekanik yang rumit seperti kabel, rak, balok, dan sebagainya. Selain itu, sistem hidrolis juga memiliki tekanan yang tinggi sehingga dapat digunakan pada volume desain kecil dengan berat serta momen inersia yang rendah. Tekanan mesin hidrolis juga dapat digunakan sebagai pencegah *overload*, tetapi hilangnya energi tidak bisa dihindarkan dan pasti terjadi dalam jumlah minimal. Viskositas minyak sistem hidrolis sangat dipengaruhi oleh temperatur dan tekanan, oleh karena itu minyak hidrolis harus selalu diganti karena efek dari kotoran, udara, air, dan waktu.

2.1.4. *Tempering System*

Fungsi utama dari *tempering system* adalah untuk mengendalikan suhu, tekanan dan waktu yang berhubungan dengan proses *injection molding*. *Tempering system* ini sangatlah penting karena dapat mempengaruhi kualitas produk jadi dan waktu pendinginan maupun pemanasan.

2.1.5. Mesin Pengendali Sistem

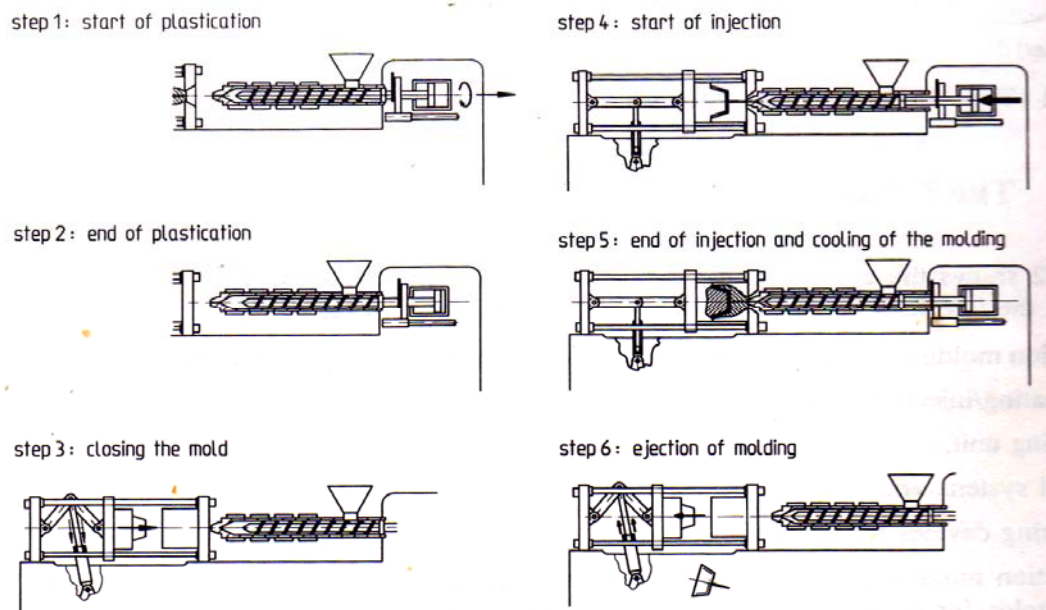
Mesin *injection molding* memiliki serangkaian alat pengendali yang digunakan untuk menjaga supaya proses tetap terkendali sesuai dengan prosedur.

Proses yang harus dikontrol antara lain adalah temperatur *plasticating unit* dan *mold*, posisi *plasticating unit*, *screw*, dan *mold*, kecepatan *screw* selama injeksi dan pada saat *mold* menutup, serta tekanan pada saat fase *injection* dan *clamping*. Pada mesin-mesin yang sudah modern, pengendalian ini dilakukan secara otomatis yang dilengkapi komponen digital. Proses yang ada dikendalikan dengan komputerisasi dan menggunakan sensor.

2.2. Proses *Injection Molding*

Langkah yang pertama dalam proses *injection molding* adalah bahan baku plastik injeksi berupa pelet atau bubuk dimasukkan ke dalam *hopper*. Setelah itu tekanan, kecepatan, dan parameter mesin disetting dan bahan baku plastik tersebut dimasukkan ke dalam *barrel* untuk kemudian dipanaskan. Selanjutnya *screw* berputar dan mengalirkan listrik sehingga bahan baku tadi mulai meleleh. Saat plastik akan diinjeksikan ke dalam *nozzle*, *molding unit* ditutup oleh *clamping unit*. Setelah ditutup dan ditekan oleh *clamping unit*, plastik dimasukkan ke dalam *molding unit* melalui *nozzle*. Pada saat plastik dimasukkan ke dalam *molding unit*, *screw* berhenti berputar, kemudian *clamping unit* menarik *core mold* sehingga *mold* terbuka. Setelah itu produk plastik yang telah dicetak dilepas dengan menekan *ejector* pada *molding unit*.

Produk yang dihasilkan dengan cara *injection molding* dapat mengalami kecacatan. Cacatan yang ditimbulkan antara lain adalah terbentuknya *short shots*, *flashing*, *sink material and voids*, dan *weld line*. *Short shots* adalah proses pengerasan plastik sebelum plastik tersebut mengisi rongga cetakan secara penuh yang diakibatkan kurang tepatnya temperatur maupun tekanan yang digunakan. *Flashing* adalah proses tertekannya polimer *melt* di antara dua *parting surface*. *Sink material* adalah kontraksi material bagian dalam yang terjadi pada saat pengerasan bagian luar sehingga mengakibatkan permukaan terdepresi ke dalam. Sedangkan *voids* adalah kontraksi material bagian dalam yang terjadi pada saat pengerasan bagian luar yang mengakibatkan rongga di bagian *internal* material. Cacat terakhir adalah terbentuknya *weld line* yang diakibatkan adanya pertemuan dua aliran *polymer melt* yang mengelilingi inti sehingga terbentuk garis. Gambar proses *injection molding* adalah sebagai berikut:



Gambar 2.2. Proses *Injection Molding* (Pötsch, 1995)

2.3. Bahan Baku yang Digunakan dalam Proses *Injection Molding*

Dalam proses *injection molding*, bahan baku yang digunakan adalah polimer. Ada beberapa jenis polimer, antara lain:

- *Thermoplastic Polymers*

Jenis polimer ini berbentuk padat (*solid*) pada suhu kamar dan mudah mencair pada suhu tinggi hingga beberapa ratus derajat. Sifatnya mudah dibentuk dengan pemanasan yang berulang-ulang, selain itu saat pemanasan struktur molekul juga tidak berubah dan tidak mengalami proses pengerasan (*curing*).

- *Amorphous Thermoplastics*

Jenis polimer ini memiliki sifat yang sama dengan *thermoplastic polymers*, tetapi perbedaannya terletak pada bentuk dan struktur kimianya. Bentuknya sangat kecil sehingga molekulnya hampir tidak dapat dilihat.

- *Semi-Crystalline Thermoplastics*

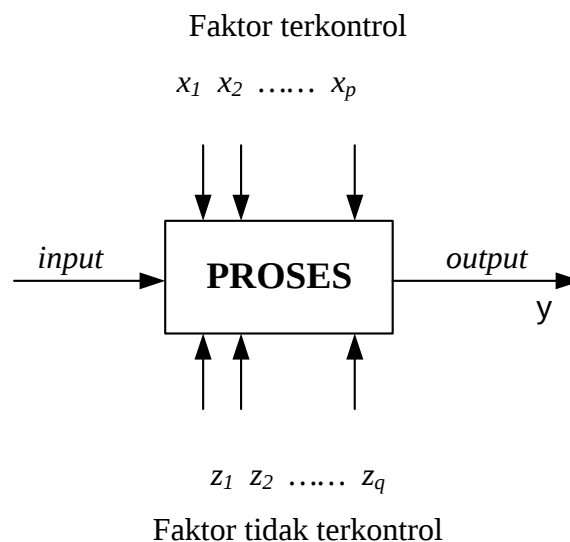
Polimer ini memiliki sifat yang sama dengan *thermoplastic polymers* tetapi bentuk strukturnya seperti kristal. Bentuk molekulnya sebesar 50 sampai 500 μm sehingga masih dapat dilihat dengan jelas.

- *Thermosets*

Jenis polimer ini akan mengalami perubahan kimia permanen pada struktur molekulnya (*cross-linking*) pada saat pemanasan dan pembentukan sehingga mengalami proses pengerasan (*curing*). Setelah mengeras, polimer tadi tidak dapat dicairkan melalui proses pemanasan ulang (*infusible solid*). Jika dipanaskan kembali, polimer ini akan mengalami degradasi dan menghitam.

2.4. Desain Eksperimen

Desain eksperimen merupakan serangkaian tes dengan menggunakan perubahan pada variabel *input* sehingga dapat mengidentifikasi perubahan korespondensi pada *output*. Desain ini digunakan untuk mempelajari kinerja dari proses atau sistem yang biasanya divisualisasikan sebagai kombinasi mesin, metode, orang dan bahan baku yang mempengaruhi proses perubahan input menjadi output yang ditunjukkan gambar 2.4. Desain eksperimen statistik adalah proses perancangan eksperimen untuk mengumpulkan data yang tepat sehingga dapat dianalisa dengan menggunakan metode statistik, sehingga kesimpulan yang diperoleh bersifat obyektif dan valid (Montgomery, 1997).



Gambar 2.4. Model Umum Suatu Proses atau Sistem (Montgomery,1997)

Dalam desain eksperimen terdapat dua jenis faktor, yaitu:

a. Faktor yang dapat dikendalikan (*controllable factors*).

Faktor ini dapat dengan mudah dikendalikan, contohnya seperti pemilihan jenis bahan baku, dan kecepatan potong mesin. Faktor ini kemudian dapat dibagi lagi menjadi dua, yaitu:

- Faktor yang dapat dikendalikan oleh pengguna, biasanya disebut sebagai faktor sinyal (*signal factor*). Faktor sinyal membawa maksud dari sudut pandang konsumen ke dalam sistem untuk mencapai kinerja target atau untuk menyatakan output yang diinginkan.
- Faktor yang dapat dikendalikan oleh perancang, yang terdiri dari faktor kendali variabilitas atau faktor pengendali, faktor kendali target, dan faktor netral.

b. Faktor yang tidak dapat dikendalikan (*uncontrollable or noise factors*).

Pada umumnya faktor ini bertanggung jawab pada karakteristik fungsional produk yang menyimpang dari nilai target.

Salah satu metode desain eksperimen yang seringkali digunakan untuk mengoptimalkan proses dengan beberapa level dan faktor yaitu metode 3^k *factorial design*. Desain faktorial tiga level adalah suatu rancangan faktorial yang terdiri dari k faktor, yang mana setiap faktor dibatasi oleh tiga level, yaitu level rendah, level menengah dan level tinggi. Desain faktorial ini juga disebut desain faktorial 3^k dengan jumlah percobaan sebanyak 3^k . Penggunaan rancangan desain faktorial 3^k ini biasanya untuk menyelesaikan masalah optimasi (Montgomery, 1997). Notasi-notasi yang digunakan dalam desain faktorial ini adalah level rendah yang dinotasikan dengan -1, (-) atau 0, level menengah yang dinotasikan dengan 0 atau 1 dan level tinggi dinotasikan dengan +1, (+) atau 2.

Pengujian statistik untuk menganalisa desain faktorial 3^k ini dilakukan dengan menggunakan anova dan analisa berikut:

- Analisa residual desain faktorial 3^k .
- Pembentukan model dasar desain faktorial 3^k .
- Pengujian statistik desain faktorial 3^k .
- Perbaikan model dasar desain faktorial 3^k .
- Penentuan kondisi optimum eksperimen.

Langkah-langkah eksperimen desain pada 3^k *factorial design* adalah sebagai berikut:

- a. Mencari efek utama faktor dan interaksi yang berpengaruh terhadap respon.
Untuk mengetahui efek-efek yang berpengaruh terhadap respon dapat dilakukan dengan membuat plot probabilitas normal untuk semua efek yang ada. Penyimpangan yang mencolok dari garis normal menunjukkan bahwa efek tersebut berpengaruh terhadap respon.
- b. Melakukan *coding*.
Setelah mengetahui efek-efek yang berpengaruh besar terhadap respon maka dilanjutkan dengan pengkodean yang menggunakan angka 0 untuk level rendah, -1 untuk level menengah dan 1 untuk level tinggi.
- c. Menentukan urutan eksperimen.
Setelah matriks eksperimen selesai dirancang maka langkah selanjutnya yaitu melakukan randomisasi dengan *software* Minitab.
- d. Melakukan eksperimen.
Setelah itu eksperimen dilakukan secara berurutan, sesuai dengan hasil randomisasi yang tertera pada kolom *RunOrder*.
- e. Melakukan pengujian statistik.
Pengujian residual harus memenuhi 3 asumsi yaitu : Identik, *Independent*, dan berdistribusi normal (IIDN). Uji IIDN ini merupakan pengujian yang dilakukan pada data yang diobservasi. Jika pengujian residual tersebut terpenuhi kemudian dilakukan uji faktor dan yang terakhir uji interaksi antar faktor dan level.
- f. Menentukan kombinasi faktor yang optimal.
Untuk menentukan level-level faktor yang paling berpengaruh maka perlu dibuat *plot* efek utama dan *plot* efek interaksi antar faktor. *Plot* interaksi yang akan dibuat hanya untuk efek interaksi yang berpengaruh secara signifikan. Kombinasi faktor yang optimal didapatkan dengan cara mengkombinasikan *plot* efek utama dan *plot* efek interaksi antar faktor.