

**PENENTUAN LEVEL PARAMETER PROSES MESIN
EXTRUDER DALAM PEMBUATAN PRODUK HASIL
DAUR ULANG BOTOL PLASTIK PET**

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat guna mencapai gelar
Sarjana dalam bidang ilmu Teknik Industri

Disusun oleh:

Nama : Lusi Handranto

NPM : 2014610114



**PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
BANDUNG
2018**

**FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
BANDUNG**



Nama : Lusi Handranto
NPM : 2014610114
Program Studi: Teknik Industri
Judul Skripsi : **PENENTUAN LEVEL PARAMETER PROSES MESIN
EXTRUDER DALAM PEMBUATAN PRODUK HASIL DAUR
ULANG BOTOL PLASTIK PET**

TANDA PERSETUJUAN SKRIPSI

Bandung, Agustus 2018

Ketua Program Studi Sarjana Teknik Industri

(Romy Loice, S.T., M.T.)

Pembimbing Utama

(Hanky Fransiscus, S.T., M.T.)

Ko-Pembimbing

(Dr. Sugih Sudhama Tjandra, S.T., M.Si.)



Program Studi Teknik Industri
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Katolik Parahyangan

Pernyataan Tidak Mencontek atau Melakukan Tindakan Plagiat

Saya, yang bertanda tangan di bawah ini,

Nama : Lusi Handranto

NPM : 2014610114

dengan ini menyatakan bahwa skripsi dengan judul :

“PENENTUAN LEVEL PARAMETER PROSES MESIN *EXTRUDER* DALAM PEMBUATAN PRODUK HASIL DAUR ULANG BOTOL PLASTIK PET”

adalah hasil pekerjaan saya dan seluruh ide, pendapat atau materi dari sumber lain telah dikutip dengan cara penulisan referensi yang sesuai.

Pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya dan jika pernyataan ini tidak sesuai dengan kenyataan, maka saya bersedia menanggung sanksi yang akan dikenakan kepada saya.

Bandung, 31 Juli 2018

Lusi Handranto
2014610114

ABSTRAK

Seiring dengan berkembangnya populasi penduduk di Indonesia, sampah yang dihasilkan dari aktivitas penduduk pun semakin meningkat. Berdasarkan hasil penelitian Jambeck pada tahun 2015, Indonesia menempati posisi kedua sebagai penyumbang sampah plastik ke laut terbesar setelah negara China. Metode *Reuse*, *Reduce*, dan *Recycle* merupakan metode yang paling mudah untuk dilakukan dan menjadi salah satu komitmen Indonesia dalam upaya menjaga lingkungan sekitar. Pengamatan juga dilakukan di lingkungan sekitar UNPAR dan didapati bahwa 41% dari total sampah anorganik yang dihasilkan berasal dari botol kemasan plastik. Salah satu alat yang dapat digunakan untuk melakukan proses daur ulang sampah botol kemasan plastik adalah dengan menggunakan *extruder machine*. Dengan metode daur ulang, sampah plastik yang awalnya tidak dapat digunakan kembali dapat dialih fungsikan menjadi barang-barang yang bernilai guna. Laboratorium Proses Produksi, Program Studi Teknik Industri, Universitas Katolik Parahyangan mempunyai sebuah mesin *extruder*, dimana parameter-parameter yang mempengaruhi proses *extrusion* terutama untuk daur ulang plastik berbahan *polyethylene terephthalate* (PET) belum diketahui secara pasti.

Perancangan eksperimen digunakan dalam penentuan parameter proses mesin *extruder* yang berpengaruh dalam pembuatan produk hasil daur ulang botol plastik PET. Penelitian pendahuluan dilakukan sebelum merancang sebuah eksperimen dan dilanjutkan dengan penentuan respon, faktor, level faktor, dan pengacakan *treatment*. Pengumpulan data hasil *extrusion* menggunakan metode *completely randomized design*. Variabel respon dari eksperimen adalah hasil penilaian kualitas produk daur ulang botol plastik PET dengan melibatkan 3 orang *expert*. Proses penilaian dilakukan berdasarkan tingkat kepentingan dari kriteria kualitas produk yang telah ditetapkan.

Hasil pengujian ANOVA menunjukkan bahwa parameter temperatur *barrel* dan frekuensi *input* tidak mempengaruhi variabel respon serta tidak ada interaksi antar kedua parameter jika temperatur *barrel* berada pada 255°C atau 270°C dan frekuensi *input* yang digunakan adalah 30Hz atau 50Hz. Kesimpulan yang didapat berdasarkan hasil penelitian adalah produk hasil daur ulang PET dapat menghasilkan nilai kualitas antara 5,154 hingga 6,978 dengan menggunakan level pada penelitian ini.

ABSTRACT

In line with the growth of Indonesian population, waste generated from the population activity is also increasing. According to the result of Jambeck's research in 2015, Indonesia was on the second position as the biggest plastic waste contributor after China. Reuse, Reduce, and Recycle are the easiest method and become one of Indonesia's commitment for maintaining the environment. The observation also held around UNPAR and found that 41% from total inorganic waste came from plastic bottle packaging. One of machines that can be used for plastic bottle recycling is extruder machine. With recycling method, plastic waste that can not be reused before can be converted as an useful things. Production Process Laboratory of Industrial Engineering Department, Parahyangan Catholic University, has an extruder machine, but parameters that affect the extrusion process especially for polyethylene terephthalate (PET) plastic recycling are not yet known for certain.

Design experiment was used for determining the extruder machine's process parameters that affect PET plastic recycling product. Initial research had held before designed the experiment and continued with determining the respond, factor, level factor, and treatment randomization. Completely randomized design method was used for collecting extrusion data. Response variable from this experiment is PET plastic bottle recycled product's quality assessment by three experts. The assessment process is carried out based on the level of importance of the product quality criteria that have been set.

The result of ANOVA Test indicate barrel temperature and input frequency don't effect the response variable, and also there is no interaction between temperature and input frequency if the barrel temperature parameter are set into 255°C or 270°C and input frequency are set into 30 Hz or 50 Hz. The conclusion based on the research result is PET recycled product can be produce with the quality value range between 5,154 to 6,978 by using the level in this study.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa karena berkat dan rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul “Penentuan Level Parameter Proses Mesin *Extruder* dalam Pembuatan Produk Hasil Daur Ulang Botol Plastik PET” dengan baik dan tepat waktu. Laporan tugas akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat mencapai gelar Sarjana dalam bidang ilmu Teknik Industri di Universitas Katolik Parahyangan.

Dalam proses pengerjaan tugas akhir ini, terdapat beberapa kesulitan dan hambatan yang dialami. Segala kesulitan dan hambatan tersebut dapat dilewati dan diselesaikan berkat bantuan serta dukungan dari banyak pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada banyak pihak yang telah membantu dalam penyelesaian laporan tugas akhir ini yaitu:

1. Bapak Hanky Fransiscus, S.T., M.T. dan Bapak Dr. Sugih Sudharma Tjandra, S.T., M.Si. selaku dosen pembimbing yang telah membimbing serta memberikan banyak ilmu, masukan, waktu, dan dukungan penuh dari awal hingga akhir penyelesaian laporan tugas akhir.
2. Bapak Marihot Nainggolan, S.T., M.T., MS. dan Bapak Alfian Tan, S.T., M.T. selaku dosen penguji proposal atas kritik, usulan, dan masukan yang berguna dalam penyusunan laporan tugas akhir.
3. Bapak Y. M. Kinley Aritonang, Ph.D. dan Ibu Titi Iswari, S.T., MBA., M.Sc. selaku dosen penguji sidang skripsi yang telah memberikan kritik, usulan, dan masukan yang berguna dalam penyempurnaan laporan tugas akhir.
4. Orang tua penulis yang telah memberikan dukungan penuh, doa, dan semangat kepada penulis dalam menyelesaikan laporan tugas akhir.
5. Bapak Mohamad Hasbi Ma'arif, A.Md. selaku laboran di Laboratorium Proses Produksi, Program Studi Teknik Industri dan Bapak Yana Mulyana, A.Md. selaku laboran Program Studi Teknik Kimia, Universitas Katolik Parahyangan yang telah banyak membantu penulis terkait dengan penyetelan dan perbaikan mesin ekstrusi pada tugas akhir ini.

6. Monika Pangestu selaku teman seperjuangan, teman satu topik penelitian, dan teman berbagi cerita yang telah banyak membantu dan selalu mendukung penulis hingga laporan tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.
7. Bapak Adi Mursanto selaku manajer produksi di PT. Indo Tirta Abadi yang telah memberikan masukan dan saran terkait proses dan hasil penelitian yang telah dilakukan.
8. Seluruh dosen Program Studi Teknik Industri, Universitas Katolik Parahyangan yang telah memberikan banyak ilmu dan pelajaran selama masa perkuliahan.
9. Teman-teman penulis yaitu Hona, Nadya, Herdin, Aldy, Chandra, Jessel, Yuyu, Riri, Reni, There, Arlene, dan Bella yang selalu menemani, membantu, menghibur dan memberikan semangat selama proses penelitian berlangsung.
10. Rekan-rekan asisten Laboratorium Proses Produksi periode 2016/2017, 2017/2018, dan 2018/2019 atas kerjasama, semangat dan hiburan yang telah diberikan selama penyusunan laporan tugas akhir.
11. Teman-teman kelas B angkatan 2014 atas segala pengalaman, kerjasama, dan kenangan selama 4 tahun masa perkuliahan.
12. Teman-teman semasa SMA yaitu Melissa, Feli, Bu Linda, Jeffry, Valentinus, Valerian, Edwin, dan Jeco yang bersedia mendengarkan seluruh pengalaman penulis selama penelitian berlangsung.
13. Seluruh teman dan pihak lainnya yang tidak dapat disebutkan satu per satu atas bantuan dan saran selama proses pengerjaan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa laporan tugas akhir ini masih belum sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan dan menerima semua kritik dan saran yang bersifat membangun. Laporan tugas akhir ini diharapkan dapat bermanfaat bagi pembaca dan penelitian selanjutnya. Terima kasih.

Bandung, 31 Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR LAMPIRAN	xi
BAB I PENDAHULUAN	I-1
I.1 Latar Belakang Masalah.....	I-1
I.2 Identifikasi dan Rumusan Masalah.....	I-7
I.3 Pembatasan Masalah dan Asumsi Penelitian.....	I-9
I.4 Tujuan Penelitian	I-10
I.5 Manfaat Penelitian	I-10
I.6 Metodologi Penelitian	I-11
I.7 Sistematika Penulisan	I-14
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	II-1
II.1 Klasifikasi Plastik.....	II-1
II.2 <i>Polyethylene Terephthalate</i> (PET).....	II-2
II.2.1 Karakteristik yang Mempengaruhi Kualitas PET	II-3
II.2.2 <i>PET Recycling</i>	II-4
II.3 <i>Extrusion Molding</i>	II-6
II.4 <i>Quality</i>	II-8
II.5 <i>Design of Experiment</i>	II-8
II.6 Skala Pengukuran Variabel	II-13
II.7 <i>Analysis of Variance</i>	II-15
BAB III PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA	III-1
III.1 Penelitian Pendahuluan	III-1
III.2 <i>Design of Experiment</i>	III-14
III.2.1 Penentuan Variabel Respon.....	III-14

III.2.2 Penentuan Faktor	III-15
III.2.3 Penentuan Level Faktor.....	III-17
III.2.4 Pengacakan <i>Treatment</i> dan Pengumpulan Data Hasil <i>Extrusion</i>	III-21
III.2.5 Pengumpulan Data Respon.....	III-23
III.2.6 Pengolahan Data	III-26
BAB IV ANALISIS	IV-1
IV.1 Analisis Proses Penelitian Pendahuluan	IV-1
IV.2 Analisis Penentuan Respon, Faktor dan Level Faktor.....	IV-6
IV.3 Analisis Hasil Pengujian ANOVA	IV-8
IV.4 Analisis Usulan Peningkatan Nilai Kualitas Produk	IV-11
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	V-1
IV.1 Kesimpulan.....	V-1
IV.2 Saran	V-1
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	
RIWAYAT HIDUP PENULIS	

DAFTAR TABEL

Tabel II.1 Sifat Keempat Jenis Skala	II-15
Tabel II.2 <i>Analysis of Variance</i> untuk <i>Two-Factor Factorial, Fixed Effects Model</i>	II-17
Tabel III.1 Rekapitulasi Percobaan dengan Variasi Temperatur <i>Barrel</i>	III-19
Tabel III.2 Rekapitulasi Percobaan dengan Variasi Frekuensi <i>Input</i>	III-20
Tabel III.3 Pembagian Kriteria Penentuan Level Faktor	III-21
Tabel III.4 Penugasan <i>Treatment</i> dengan Menggunakan <i>Random Number</i> ...	III-22
Tabel III.5 Urutan Pengambilan Data dari Hasil Pengacakan <i>Treatment</i>	III-22
Tabel III.6 Hasil Pembobotan Setiap Kriteria Kualitas Produk Daur Ulang PET	III-24
Tabel III.7 Hasil Penilaian Setiap Kriteria Kualitas Produk	III-24
Tabel III.8 Nilai Rata-Rata Kualitas Produk Hasil <i>Extrusion</i>	III-26
Tabel III.9 Data Residual Hasil Eksperimen	III-27

DAFTAR GAMBAR

Gambar I.1 Volume Timbunan Sampah Plastik di 22 Kota Metropolitan dan Besar.....	I-2
Gambar I.2 Persentase Rumah Tangga dengan Perlakuan Terhadap Sampah Menurut Daerah Tempat Tinggal.....	I-3
Gambar I.3 Hasil Pemilahan Sampah Anorganik Area UNPAR 2017.....	I-4
Gambar I.4 Jenis Sampah Anorganik Area UNPAR 2017.....	I-5
Gambar I.5 Contoh Hasil <i>Extrusion</i> dengan Pengisian Tidak Sempurna.....	I-8
Gambar I.6 Metodologi Penelitian.....	I-13
Gambar II.1 Proses Pembentukan Rantai Polimer PET.....	II-2
Gambar II.2 Karakteristik PET.....	II-3
Gambar II.3 <i>Physical Properties</i> Berbagai Jenis Plastik.....	II-3
Gambar II.4 Laju Reaksi Berbagai Jenis PET.....	II-4
Gambar II.5 Skema Aliran Material PET.....	II-5
Gambar II.6 Komponen dan Fitur Mesin <i>Extruder</i> Plastik dan Elastomer (<i>Single-Screw</i>).....	II-7
Gambar II.7 Model Umum Sebuah Proses atau Sistem.....	II-9
Gambar II.8 Kombinasi <i>Treatment 2² Factorial Design</i>	II-10
Gambar II.9 Penugasan <i>Treatment</i> pada Setiap Unit Eksperimen dalam CRD.....	II-12
Gambar III.1 Mesin <i>Extruder</i> Laboratorium Proses Produksi.....	III-1
Gambar III.2 Konstruksi Cetakan Mesin <i>Extruder</i> dengan Bentuk (a) Silinder (b) <i>Gear</i>	III-3
Gambar III.3 PET <i>Flakes</i>	III-3
Gambar III.4 Produk Hasil Percobaan (a) Pertama (b) Kedua (c) Ketiga.....	III-5
Gambar III.5 Hasil Modifikasi Bagian Cetakan dan <i>Control Panel</i>	III-6
Gambar III.6 Posisi Lubang Venturi Cetakan <i>Gear</i>	III-7
Gambar III.7 Produk Hasil Percobaan pada Suhu (a) 255°C (b) 275°C (c) 265°C.....	III-7
Gambar III.8 Perubahan Posisi Penempatan <i>Termocouple</i> (a) Awal (b) Akhir.....	III-8
Gambar III.9 Contoh Kondisi 2 Produk <i>Gear</i> Saat Pembukaan Cetakan.....	III-9

Gambar III.10 Contoh Kondisi Produk <i>Gear</i> Saat Pelepasan Produk.....	III-9
Gambar III.11 Produk Hasil Percobaan Setelah Modifikasi II dan Proses Perakitan.....	III-10
Gambar III.12 Produk Hasil Percobaan ke 14 s/d 18 Setelah Perakitan.....	III-11
Gambar III.13 Konstruksi Mesin Sebelum Modifikasi Bagian <i>Nozzle</i>	III-12
Gambar III.14 Konstruksi Mesin Setelah Modifikasi Bagian <i>Nozzle</i>	III-13
Gambar III.15 Hasil Percobaan I Produk Silinder	III-14
Gambar III.16 Hasil Uji Coba PET <i>Flakes</i> dengan Variasi Waktu Proses <i>Barrel</i>	III-16
Gambar III.17 Hasil <i>Extrusion</i> dengan Frekuensi 30Hz dan Temperatur <i>Barrel</i> (a) 255°C (b) 260°C (c) 265°C (d) 270°C (e) 275°C.....	III-18
Gambar III.18 Hasil <i>Extrusion</i> dengan Temperatur <i>Barrel</i> 260°C dan Frekuensi (a) 20Hz (b) 40Hz (c) 50Hz.....	III-20
Gambar III.19 Kriteria Kualitas Produk Hasil <i>Extrusion</i> (a) <i>Short Shot</i> (b) <i>Vacuum Voids</i> (c) <i>Flow Lines</i> (d) <i>Burn Marks</i> (e) <i>Preform</i> <i>Color Failure</i>	III-23
Gambar III.20 Uji Normalitas Data Residual Hasil <i>Extrusion</i>	III-27
Gambar III.21 Uji Variansi Data Residual Hasil <i>Extrusion</i>	III-28
Gambar III.22 Uji Independensi Data Residual Hasil <i>Extrusion</i>	III-28
Gambar III.23 Hasil Pengujian ANOVA untuk Hasil <i>Extrusion</i> PET <i>Flakes</i>	III-29
Gambar IV.1 Contoh Sistem Pengeringan Resin PET	IV-12
Gambar IV.2 Contoh Penambahan Pendingin saat Pemrosesan Resin PET	IV-13

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A: Proyeksi Amerika Komponen Cetakan dan Komponen Mesin

Lampiran B: Hasil *Extrusion* untuk Produk Hasil Daur Ulang PET

BAB I

PENDAHULUAN

Bab pendahuluan berisikan pembahasan mengenai latar belakang masalah, identifikasi dan rumusan masalah, pembatasan masalah dan asumsi penelitian, tujuan penelitian, manfaat penelitian, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan. Poin-poin tersebut berguna untuk menggambarkan secara detail mengapa sebuah penelitian perlu dilakukan.

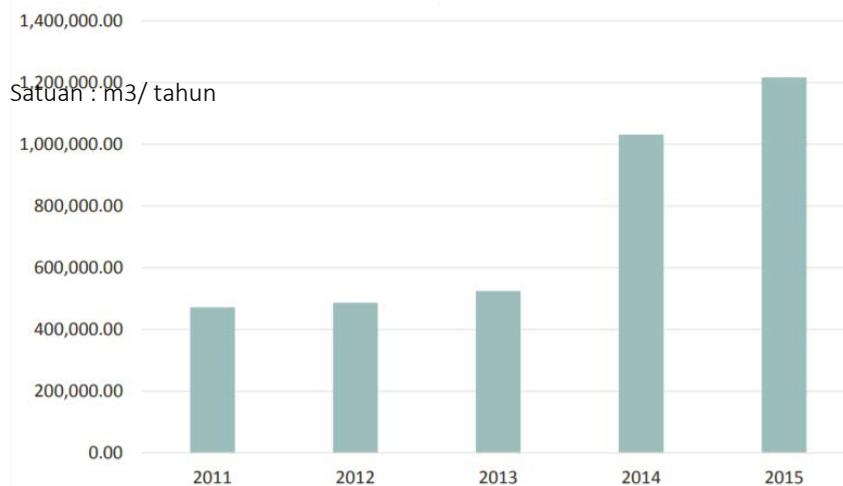
I.1 Latar Belakang Masalah

Seiring dengan berkembangnya populasi penduduk di Indonesia, sampah yang dihasilkan dari aktivitas penduduk pun semakin meningkat. Definisi sampah menurut *World Health Organization* (WHO) adalah sesuatu yang tidak digunakan, tidak dipakai, tidak disenangi, atau sesuatu yang dibuang yang berasal dari kegiatan manusia dan tidak terjadi dengan sendirinya (Chandra, 2006). Salah satu jenis sampah yang menjadi permasalahan utama saat ini adalah sampah plastik. Menurut Peraturan Pemerintah No. 81 Tahun 2012, sampah dapat dikelompokkan menjadi 5 jenis utama yaitu sampah yang mengandung bahan berbahaya dan beracun, sampah yang mudah terurai, sampah yang dapat digunakan kembali, sampah yang dapat didaur ulang, dan sampah lainnya.

Sampah plastik merupakan salah satu contoh dari jenis sampah yang dapat digunakan kembali atau sampah anorganik yang tidak mudah terurai di alam, sehingga seringkali mengakibatkan pencemaran lingkungan. Berdasarkan hasil penelitian Jambeck, Geyer, Wilcox, Siegler, Perryman, Andrady, Narayan, dan Law (2015) yang berjudul "*Plastic Waste Inputs from Land into The Ocean*", Indonesia menempati posisi kedua sebagai penyumbang sampah plastik ke laut terbesar setelah negara China. Penggunaan bahan baku plastik berkembang secara luas dikarenakan fleksibilitasnya, beratnya yang ringan, tahan lama dan relatif murah. Hal ini membuat hampir seluruh aktivitas manusia tidak terlepas dari penggunaan plastik. Bahan baku plastik sering digunakan dalam kehidupan sehari-hari seperti untuk kemasan

makanan, mainan anak, alat rumah tangga, hingga pembuatan komponen elektronik.

Peningkatan penggunaan bahan baku plastik ini akan berdampak pada banyaknya sampah plastik yang dihasilkan dari tahun ke tahun. Berdasarkan data Sekretariat Adipura KLHK (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan) tahun 2015, volume timbulan sampah plastik cenderung mengalami peningkatan setiap tahunnya yang dapat dilihat pada Gambar I.1.

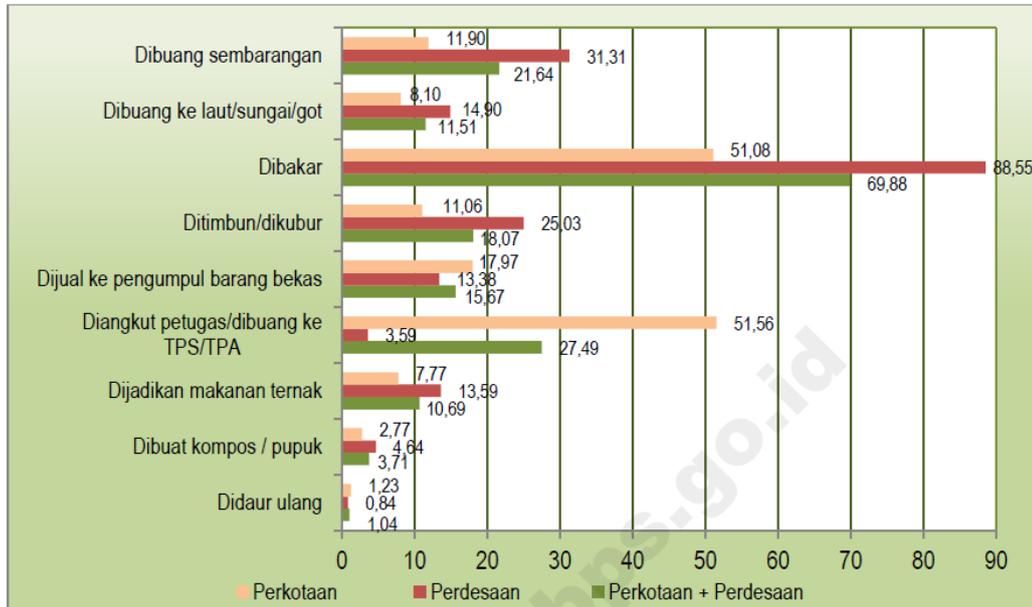


Gambar I.1 Volume Timbulan Sampah Plastik di 22 Kota Metropolitan dan Besar
(Sumber: <http://ditjenppi.menlhk.go.id>)

Timbulan merupakan total volume atau berat dari sampah yang dihasilkan di suatu wilayah dalam periode waktu tertentu. Peningkatan sampah plastik setiap tahunnya membuat permasalahan sampah di Indonesia semakin kompleks. Berdasarkan artikel Media Indonesia (10 Maret 2018), Dirjen Pengelolaan Limbah, Sampah, dan Bahan Beracun Berbahaya (PSLB3) Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), Rosa Vivien Ratnawati mengatakan bahwa terkait sampah plastik di laut, Presiden Joko Widodo pada G-20 Summit tahun 2017 di Jerman menyampaikan komitmen Indonesia akan mengurangi limbah melalui metode 3R (*Reuse, Reduce, dan Recycle*) sebanyak 30% dan menargetkan pengurangan sampah plastik di laut sebanyak 70% pada tahun 2025. Sampah plastik membutuhkan waktu puluhan bahkan ratusan tahun untuk dapat terurai secara alami. Laju penggunaan plastik setiap tahunnya tidak sebanding dengan jumlah sampah plastik yang dapat terurai secara alami.

Salah satu penghasil sampah terbesar di Indonesia bersumber dari rumah tangga yaitu sebesar 48% (Kementerian Lingkungan Hidup, 2013).

Rekapitulasi perlakuan rumah tangga terhadap sampah yang dihasilkan menurut Badan Pusat Statistik dapat dilihat pada Gambar I.2.



Gambar I.2 Persentase Rumah Tangga dengan Perlakuan Terhadap Sampah Menurut Daerah Tempat Tinggal (Sumber: Badan Pusat Statistik, 2015)

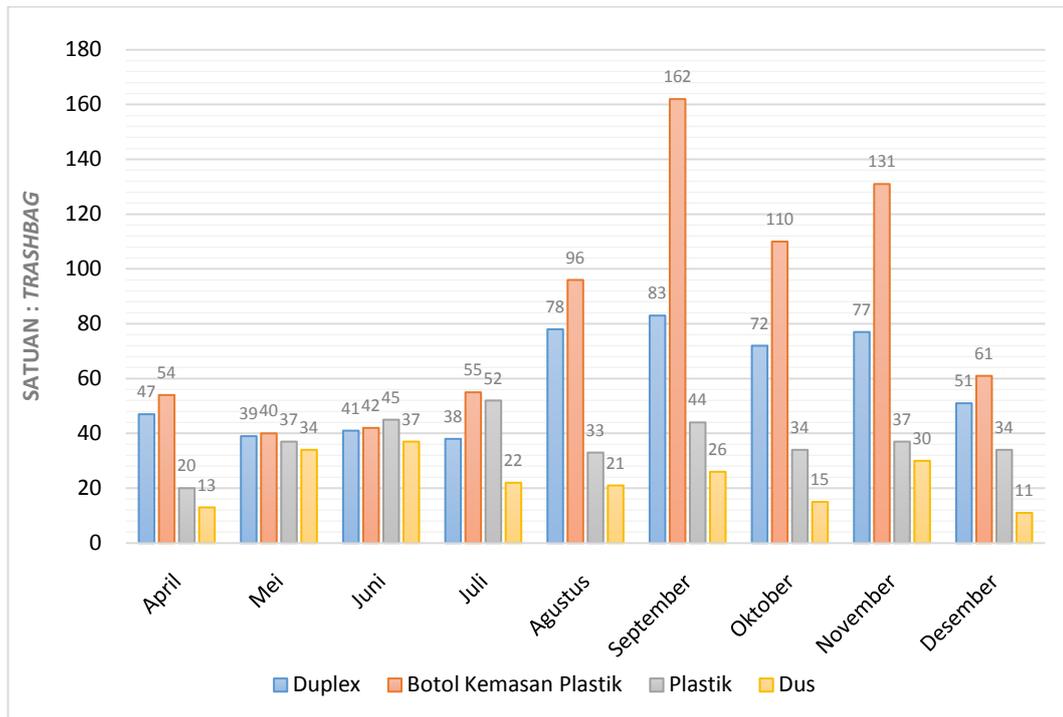
Metode 3R merupakan metode yang paling mudah untuk dilakukan saat ini dan menjadi salah satu komitmen Indonesia sebagai upaya dalam menjaga lingkungan sekitar. Berdasarkan Gambar I.2, terlihat bahwa persentase perilaku rumah tangga yang menggunakan metode *recycle* atau daur ulang sangatlah kecil dibandingkan dengan perilaku lainnya dimana hanya 1,23 % penduduk perkotaan, 0,84% penduduk pedesaan, dan 1,04% gabungan dari keduanya yang mendaur ulang sampah yang dihasilkan. Metode daur ulang ini termasuk ke dalam salah satu metode 3R yang perlu ditingkatkan mengingat kesadaran masyarakat untuk mendaur ulang sampah masih cukup minim. Penggunaan plastik yang terus meningkat tidak dapat dihindari ataupun dihilangkan sepenuhnya. Kegiatan pengelolaan sampah perlu dilakukan secara menyeluruh untuk menghindari kerusakan lingkungan hidup akibat sampah plastik. Dengan metode daur ulang, sampah plastik yang awalnya tidak dapat digunakan kembali dapat dialih fungsikan menjadi barang-barang yang bernilai guna.

Sampah plastik yang umum ditemui di lingkungan sekitar dengan jumlah yang relatif banyak adalah botol kemasan plastik. Berdasarkan data yang dikeluarkan oleh *Beverage Marketing Corporation and International Bottled Water*

Association, Indonesia merupakan negara dengan perkembangan industri botol plastik minuman yang cukup pesat. Pada tahun 2016, Indonesia telah mengkonsumsi sebanyak 4,82 miliar botol plastik minuman dengan jumlah penduduk sekitar 259 juta jiwa (PT Sukses Sejahtera Energi, 2017). Pencemaran sampah plastik mengakibatkan banyaknya dampak negatif bagi lingkungan seperti dangkalnya sungai, banjir, pencemaran air dan tanah, terganggunya penyerapan air, dan sebagainya. Selain itu senyawa racun yang terdapat pada plastik yang sulit terurai juga dapat membunuh mikroorganisme pengurai di dalam tanah.

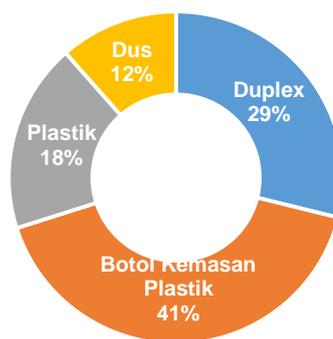
Pengamatan juga dilakukan di lingkungan sekitar Universitas Katolik Parahyangan untuk mengetahui bagaimana pengelolaan sampah selama tahun 2017. Berdasarkan hasil wawancara dengan Kepala Bagian Lingkungan UNPAR, sistem pengelolaan sampah mulai dikembangkan sejak awal tahun 2017 dengan membuat bank sampah serta bekerja sama dengan Perusahaan Daerah (PD) Kebersihan Kota Bandung. Dengan adanya bank sampah ini, petugas kebersihan akan melakukan kegiatan pemilahan dan pengumpulan sampah sesuai dengan jenisnya.

Sampah yang terdapat di lingkungan sekitar kampus UNPAR terdiri atas sampah organik dan anorganik. Hal yang menjadi fokus utama adalah sampah anorganik dikarenakan jenis sampah ini lebih sulit terurai dibandingkan dengan sampah organik. Data mengenai hasil pemilahan sampah UNPAR periode April hingga Desember tahun 2017 dapat dilihat pada Gambar I.3.



Gambar I.3 Hasil Pemilahan Sampah Anorganik Area UNPAR 2017
Sampah anorganik area UNPAR dibagi atas 4 jenis utama yaitu dupleks,

botol kemasan plastik, plastik, dan dus. Pada Gambar I.3, terlihat bahwa jenis sampah botol kemasan plastik memiliki jumlah yang paling besar hampir di setiap bulannya dibandingkan jenis sampah anorganik lainnya. Jenis sampah anorganik yang terdapat di lingkungan sekitar kampus UNPAR beserta persentasenya dapat dilihat pada Gambar I.4.



Gambar I.4 Jenis Sampah Anorganik Area UNPAR 2017

Pada Gambar I.4 dapat dilihat bahwa jenis sampah yang paling banyak dihasilkan adalah botol minuman plastik dengan persentase sebesar 41% pada tahun 2017. Berdasarkan hasil wawancara dengan Kepala Bagian Lingkungan Biro Umum dan Teknik UNPAR, terdapat visi yang ingin dicapai oleh UNPAR

saat ini terkait dengan permasalahan limbah atau sampah yang dihasilkan di lingkungan sekitar kampus. Visi tersebut adalah mengelola seluruh sampah dengan baik dan mengubahnya menjadi sesuatu yang lebih bermanfaat khususnya bagi lingkungan sekitar kampus UNPAR. Selama satu tahun terakhir, Biro Umum dan Teknik (BUT) baru dapat mengembangkan cara pengolahan terhadap sampah organik saja. Oleh karena itu, perlu dikembangkan cara pengolahan sampah anorganik khususnya botol kemasan plastik dengan persentase jumlah terbanyak dibandingkan dengan jenis sampah anorganik lainnya.

Botol kemasan plastik yang diproduksi umumnya berbahan dasar *polyethylene terephthalate* (PET) dengan warna yang jernih dan transparan. Botol plastik berbahan PET hanya diperuntukkan untuk satu kali pemakaian saja. Hal ini membuat jumlah botol plastik PET yang diproduksi akan terus meningkat setiap tahunnya seiring dengan kebutuhan konsumen. Sampah botol plastik PET ini dapat didaur ulang kembali, namun tidak dapat digunakan sebagai barang yang berhubungan dengan konsumsi makanan atau minuman. Proses daur ulang ini diharapkan dapat memberikan manfaat yaitu dengan dihasilkannya berbagai produk baru dengan kualitas yang baik meskipun terbuat dari barang-barang bekas. Dengan adanya daur ulang terhadap sampah plastik, diharapkan sampah plastik tidak hanya terbuang dan berakhir di lautan Indonesia, namun akan tercipta siklus hidup baru bagi kemasan plastik.

Salah satu alat yang dapat digunakan untuk melakukan proses daur ulang sampah plastik adalah dengan menggunakan *extruder machine*. Proses daur ulang sampah plastik menggunakan mesin *extruder* perlu diteliti lebih lanjut agar dapat menghasilkan produk yang bernilai guna. *Extruder machine* tidak hanya digunakan dalam skala industri, namun dapat digunakan oleh rumah tangga sehingga dapat membantu menghindari kerusakan lingkungan akibat banyaknya sampah plastik. Sebuah proyek daur ulang plastik dengan sebutan "*Precious Plastic*" telah dipopulerkan oleh Dave Hakkens sejak tahun 2013. Proyek ini mencoba untuk menyebarkan perilaku daur ulang plastik secara mendunia dengan menyediakan informasi mulai dari pembuatan mesin daur ulang sederhana hingga pengetahuan mengenai jenis-jenis bahan plastik yang sering digunakan secara gratis.



Gambar 1.5 Mesin *Extruder* Sederhana Karya Dave Hakkens
(Sumber: <https://preciousplastic.com/>)

Berbagai jenis plastik telah berhasil melalui proses daur ulang menggunakan *extruder machine* sederhana buatan Dave Hakkens dan timnya. Proses pengaturan mesin ini dimulai dengan memanaskan *heater* sesuai dengan temperatur dari jenis plastik yang akan didaur ulang. Temperatur *heater* pada bagian ujung cetakan dibuat sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan temperatur *heater* pada bagian *barrel* yang bertujuan untuk memudahkan plastik mengalir keluar dari cetakan. *Extruder machine* dapat mendaur ulang plastik menjadi berbagai bentuk produk yang dapat digunakan kembali.

Menurut Johnson (1984), terdapat beberapa keuntungan dalam proses *extrusion* antara lain peralatan yang dibutuhkan lebih murah dibandingkan dengan proses *injection molding* dan ketebalan material dapat diatur secara akurat. Sebagai tambahan, proses *extrusion* juga dapat membuat produktivitas menjadi tinggi dan dapat menghasilkan benda dengan bentuk yang kompleks. Hal ini yang membuat *extruder machine* dapat dijadikan sebagai pertimbangan alat yang dapat digunakan untuk mendaur ulang sampah plastik.

I.2 Identifikasi dan Rumusan Masalah

Peningkatan jumlah sampah plastik yang dihasilkan tidak dapat dihindari ataupun dihilangkan sepenuhnya. Hal yang dapat dilakukan adalah dengan mengelola sampah plastik tersebut, salah satunya dengan cara daur ulang. Salah satu alternatif yang dapat digunakan untuk proses daur ulang sampah plastik adalah dengan menggunakan mesin *extruder*. *Extrusion* merupakan

sebuah metode pembentukan dimana sejumlah logam atau plastik dipanaskan dan kemudian akan mengisi rongga cetakan dengan bentuk tertentu.

Secara umum, mesin *extruder* terdiri atas beberapa komponen utama yaitu motor listrik (dinamo), *screw*, *hopper*, *barrel*, *die* dan *heater*. Mesin *extruder* digerakkan dengan menggunakan sebuah dinamo yang dapat menggerakkan *screw*. *Heater* akan memanaskan material plastik yang dimasukkan melalui *hopper* dan selanjutnya gerakan *screw* akan mendorong material plastik yang telah meleleh melewati bagian *nozzle* dan masuk ke dalam bagian cetakan atau *die*.

Laboratorium Proses Produksi, Program Studi Teknik Industri, Universitas Katolik Parahyangan mempunyai sebuah mesin *extruder*, dimana parameter-parameter yang mempengaruhi proses *extrusion* terutama untuk plastik berbahan dasar PET belum diketahui secara pasti. Mesin tersebut merupakan mesin buatan lokal yang mengambil konsep dari pembuatan mesin *extruder* sederhana karya Dave Hakkens dan timnya. Mesin ini belum terstandarisasi sehingga tidak semua faktor yang terdapat dalam mesin ekstrusi pada umumnya dapat ditemukan dan diatur dengan mesin *extruder* Laboratorium Proses Produksi.

Setiap jenis plastik yang akan diolah memiliki karakteristik masing-masing, sehingga perlu diketahui parameter yang pengaruh terhadap proses ekstrusi dalam pembuatan produk hasil daur ulang plastik berbahan PET. Menurut Rauwendaal (2010), terdapat beberapa parameter yang mempengaruhi proses *extrusion* yaitu *screw speed*, *motor load*, *barrel temperatures*, *die temperatures*, *power draw of various heaters*, *cooling rate of the various cooling units*, dan *vacuum level in vented extrusion*. Selain parameter yang telah disebutkan, banyak faktor lain yang dapat mempengaruhi proses *extrusion* seperti suhu lingkungan, kelembaban, aliran udara di sekitar *extruder*, dan sebagainya.

Hasil pengamatan dan percobaan awal mesin *extruder* Laboratorium Proses Produksi menunjukkan bahwa proses *extrusion* sering mengalami kendala terutama saat dilakukannya proses *setting* atau pengaturan parameter mesin yang menyebabkan terjadinya cacat atau kegagalan pada proses pencetakan material plastik. Hasil *extrusion* seringkali mengalami cacat yang dapat dilihat secara visual. Salah satu contohnya adalah hasil *extrusion* yang

terputus atau pengisian cetakan yang tidak sempurna. Beberapa contoh dari fenomena tersebut dapat dilihat pada Gambar I.6.



Gambar I.6 Contoh Hasil *Extrusion* dengan Pengisian Tidak Sempurna

Pengisian yang tidak sempurna terhadap produk hasil daur ulang plastik secara umum terjadi karena memadatnya material plastik sebelum dapat mengisi seluruh rongga cetakan. Material yang digunakan merupakan botol kemasan plastik bekas berbahan PET. Berdasarkan Gambar I.6, dapat dilihat pula secara visual telah terjadinya perubahan warna pada produk. Perubahan warna ini menandakan bahwa telah terjadinya degradasi dari plastik PET bekas yang menyebabkan sifat material mungkin berubah. Hal ini dapat membuat kualitas produk daur ulang plastik PET yang dihasilkan dari proses *extrusion* dan produktivitas mesin menjadi menurun. Penurunan kualitas produk daur ulang yang dihasilkan akan mengurangi harga jual produk di pasaran.

Oleh karena itu, parameter proses tersebut perlu untuk diteliti agar proses *extrusion* plastik PET bekas yang dilakukan pada mesin *extruder* dapat menghasilkan produk daur ulang yang berkualitas. Kualitas produk hasil daur ulang dapat dinilai secara kualitatif dengan melihat bentuk atau tampilan produk secara visual dan melibatkan beberapa kriteria kualitas. Proses *extrusion* dapat membantu permasalahan pengelolaan sampah plastik dengan menghasilkan berbagai macam barang hasil daur ulang plastik yang bernilai guna dan dapat dimanfaatkan sesuai dengan keinginan. Proses daur ulang dengan mesin *extruder* ini diharapkan dapat mengurangi jumlah botol plastik PET bekas yang terbuang sia-sia terutama di lingkungan sekitar kampus UNPAR.

Berdasarkan identifikasi masalah yang telah dijabarkan di atas, didapatkan beberapa rumusan masalah yang akan diteliti yaitu:

1. Apa saja parameter-parameter dan bagaimana interaksinya yang dapat mempengaruhi proses pembuatan produk hasil daur ulang plastik PET dengan menggunakan *extruder machine*?
2. Berapakah nilai parameter terbaik yang dapat mempengaruhi proses pembuatan produk hasil daur ulang plastik PET menggunakan *extruder machine*?

I.3 Pembatasan Masalah dan Asumsi Penelitian

Pembatasan masalah diperlukan dengan tujuan untuk membatasi cakupan permasalahan yang akan diteliti dan agar penelitian terfokus sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai. Berikut adalah poin-poin yang menjadi batasan masalah dalam penelitian ini.

1. Penelitian yang dilakukan hanya menggunakan *extruder machine* yang terdapat di Laboratorium Proses Produksi, Jurusan Teknik Industri, Universitas Katolik Parahyangan.
2. Material utama yang digunakan adalah botol plastik bekas yang terbuat dari bahan *polyethylene terephthalate* (PET) serta menggunakan material *virgin PET resin* sebagai bahan pencampur.
3. Produk hasil daur ulang plastik PET merupakan produk berukuran kecil dan menggunakan sistem cetakan tertutup.

Selain pembatasan masalah, asumsi juga diperlukan dalam melakukan suatu penelitian. Asumsi dalam penelitian bertujuan untuk menyederhanakan dan menjelaskan cakupan penelitian yang akan dilakukan. Berikut adalah poin-poin yang menjadi asumsi dalam penelitian ini.

1. Berbagai macam produk botol plastik bekas yang akan didaur ulang memiliki komposisi bahan yang sama.
2. Performansi *extruder machine* selama proses *extrusion* dilakukan tidak berubah-ubah atau konstan.
3. Parameter lain seperti suhu lingkungan, kelembaban udara, dan aliran udara di sekitar area mesin *extruder* Laboratorium Proses Produksi dianggap tidak berubah saat pengambilan data dilakukan.

I.4 Tujuan Penelitian

Dalam melakukan suatu penelitian, perlu diketahui tujuan yang hendak dicapai dari penelitian. Berdasarkan rumusan masalah yang ada, penelitian tentang penentuan parameter proses pada *extruder machine* memiliki tujuan sebagai berikut :

1. Mengetahui parameter-parameter dan bagaimana interaksinya yang dapat mempengaruhi proses pembuatan produk hasil daur ulang plastik PET dengan menggunakan *extruder machine*.
2. Mengetahui nilai parameter terbaik yang dapat mempengaruhi proses pembuatan produk hasil daur ulang plastik PET menggunakan *extruder machine*.

I.5 Manfaat Penelitian

Penelitian yang dilakukan mengenai penentuan parameter proses *extrusion* pada produk hasil daur ulang diharapkan dapat memberi manfaat baik bagi pihak yang terkait maupun pembaca. Berikut merupakan manfaat yang diharapkan dari hasil penelitian yang dilakukan.

1. Mengetahui dengan baik teknik fabrikasi plastik PET terutama r-PET (*recycled* PET) yang tepat dengan menggunakan mesin *extruder*.
2. Parameter-parameter proses *extrusion* yang telah diketahui dapat digunakan untuk mengembangkan berbagai macam produk hasil daur ulang dengan bahan utama botol plastik PET.
3. Mengurangi pencemaran lingkungan akibat sampah botol plastik yang dihasilkan terutama di sekitar lingkungan kampus UNPAR.
4. Produk-produk yang dihasilkan dari proses daur ulang menggunakan mesin *extruder* dapat memiliki nilai jual di pasaran.
5. Dapat dijadikan sebagai referensi atau acuan bagi penelitian selanjutnya.

I.6 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian akan membahas tentang tahapan apa saja yang akan dilakukan dalam penelitian terkait dengan penentuan parameter proses *extrusion* produk hasil daur ulang botol plastik PET. Berikut adalah metodologi penelitian yang perlu dilakukan.

1. Identifikasi dan Perumusan Masalah

Identifikasi masalah memuat tentang masalah-masalah apa saja yang timbul terutama saat dilakukannya pengamatan secara langsung baik terhadap kondisi lingkungan sekitar kampus UNPAR maupun mesin *extruder* Laboratorium Proses Produksi. Berdasarkan identifikasi masalah, akan ditetapkan beberapa rumusan masalah yang dianggap penting untuk diselesaikan sesuai dengan metode yang terdapat pada studi literatur.

2. Studi Literatur

Studi literatur bertujuan untuk mengumpulkan informasi-informasi terkait topik penelitian. Studi literatur yang dilakukan mencakup pengumpulan informasi yang berhubungan dengan proses *extrusion* dan hal-hal penting terkait dengan proses perancangan eksperimen.

3. Pembatasan Masalah dan Asumsi Penelitian

Pembatasan masalah bertujuan untuk membatasi cakupan permasalahan yang akan diteliti sehingga tujuan penelitian yang telah ditetapkan sebelumnya dapat tercapai dan menunjukkan bahwa adanya keterbatasan dalam penelitian. Asumsi dibuat dengan tujuan untuk menyederhanakan dan menjelaskan cakupan penelitian yang akan dilakukan.

4. Penelitian Pendahuluan

Penelitian pendahuluan bertujuan untuk mengetahui faktor apa saja yang mungkin untuk diteliti dalam penentuan parameter proses mesin *extruder* Laboratorium Proses Produksi UNPAR yang berpengaruh dalam pembuatan produk hasil daur ulang botol plastik PET. Pada tahap ini juga akan diketahui bagaimana cara pengoperasian ataupun proses *setting* dari mesin *extruder* secara detail. Berdasarkan hasil penelitian pendahuluan, akan didapatkan hasil percobaan awal yang menunjukkan bahwa seluruh *input factor* yang ada bekerja dengan baik.

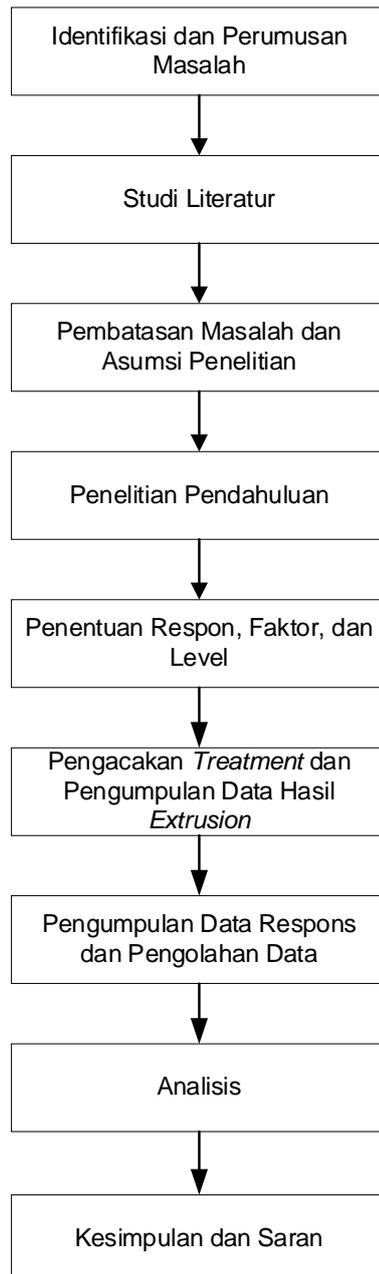
5. Penentuan Respon, Faktor, dan Level

Variabel respon yang ditetapkan dalam eksperimen ini adalah nilai kualitas dari bentuk atau tampilan produk hasil daur ulang botol plastik PET dengan menggunakan mesin *extruder*. Pada bagian ini akan ditentukan apa saja *input factor* yang diperlukan dalam penentuan parameter mesin *extruder*. Penentuan faktor didapat dari hasil

pengamatan langsung pada mesin *extruder* dan penelitian pendahuluan yang dilakukan. Setelah penentuan faktor, akan dilakukan percobaan secara bertahap untuk melihat rentang nilai setiap level dari faktor-faktor yang akan diuji dalam eksperimen.

6. Pengacakan *Treatment* dan Pengumpulan Data Hasil *Extrusion*
Pengacakan atau *random order* dilakukan pada saat pemberian *treatment* dalam eksperimen. Hal ini bertujuan untuk mengurangi bias pada hasil eksperimen. Proses pengacakan akan menggunakan *uniform random numbers* yang melambangkan kombinasi dari level-level faktor tertentu yang akan diuji cobakan dalam menghasilkan sebuah produk.
7. Pengumpulan Data Respon dan Pengolahan Data
Pada tahap ini akan dilakukan pengumpulan data respon sesuai dengan hasil pengacakan *treatment* yang didapat. Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan model statistik ANOVA untuk melihat apa saja parameter dan nilainya yang dapat mempengaruhi proses *extrusion* produk hasil daur ulang botol plastik berbahan PET.
8. Analisis
Analisis dilakukan terhadap hasil pengolahan data yang didapat. Pada tahap ini, seluruh proses yang dilakukan dalam penelitian juga akan dianalisis agar dapat menjawab rumusan masalah yang telah ditetapkan. Analisis terhadap usulan pengolahan plastik PET bekas kedepannya menggunakan mesin *extruder* Laboratorium Proses Produksi juga akan dibahas dengan tujuan untuk menyempurnakan hasil penelitian yang telah didapatkan.
9. Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan berisikan poin-poin penting yang didapatkan dari proses pengolahan data dan analisis yang telah dilakukan. Selain itu, kesimpulan bertujuan untuk menjawab rumusan masalah yang telah ditetapkan sebelumnya. Saran yang diberikan dapat berguna bagi penelitian selanjutnya dan para pembaca.



Gambar I.7 Metodologi Penelitian

I.7 Sistematika Penulisan

Penelitian ini menggunakan sistematika penulisan yang terdiri atas lima bagian utama yaitu:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang pembahasan mengenai latar belakang masalah, identifikasi dan rumusan masalah, pembatasan masalah dan asumsi penelitian, tujuan penelitian, manfaat penelitian, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan. Poin-poin tersebut berguna untuk menggambarkan secara detail alasan sebuah penelitian perlu dilakukan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisikan pembahasan mengenai studi literatur yang didapat terkait dengan penentuan parameter proses mesin *extruder* yang berpengaruh dalam pembuatan produk hasil daur ulang plastik PET. Studi literatur terkait topik penelitian yang akan dibahas terdiri atas klasifikasi plastik, *polyethylene terephthalate* (PET), karakteristik yang mempengaruhi kualitas PET, PET *recycling*, *extrusion molding*, *quality*, *design of experiment*, skala pengukuran variabel, dan *analysis of variance*.

BAB III PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

Bab ini berisikan pembahasan mengenai keseluruhan proses atau tahapan yang dilakukan khususnya dalam merancang sebuah eksperimen terkait penentuan parameter proses mesin *extruder* yang berpengaruh dalam pembuatan produk hasil daur ulang botol plastik PET. Perancangan eksperimen akan dibagi menjadi beberapa tahapan yaitu mulai dari penelitian pendahuluan, pengumpulan data, hingga pengolahan data.

BAB IV ANALISIS

Pada bab ini dijelaskan secara rinci mengenai proses penelitian pendahuluan yang dilakukan, serta penentuan faktor dan level faktor. Selain itu dijelaskan juga analisi terhadap hasil pengujian ANOVA dan usulan yang dapat diberikan dalam rangka peningkatan nilai kualitas produk.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi tentang kesimpulan yang dapat diperoleh dari keseluruhan hasil penelitian. Kesimpulan yang diperoleh akan menjawab rumusan masalah

yang telah ditetapkan sebelumnya. Selain itu terdapat pula saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Bab tinjauan pustaka berisikan pembahasan mengenai studi literatur yang didapat terkait dengan penentuan parameter proses mesin *extruder* yang berpengaruh dalam pembuatan produk hasil daur ulang plastik PET. Studi literatur terkait topik penelitian yang akan dibahas terdiri atas klasifikasi plastik, *polyethylene terephthalate* (PET), karakteristik yang mempengaruhi kualitas PET, PET *recycling*, *extrusion molding*, *quality*, *design of experiment*, *likert scale* dan *analysis of variance*.

II.1 Klasifikasi Plastik

Plastik merupakan salah satu bagian dari dua jenis polimer dengan penggunaan yang cukup luas. Menurut Groover (2010), polimer secara umum dibagi menjadi dua bagian utama yaitu plastik dan *rubber*. Klasifikasi plastik terdiri atas dua kategori utama yaitu:

1. *Thermoplastic Polymers* (TP)

Termoplastik merupakan material yang berbentuk padat dalam suhu ruangan, namun akan berubah bentuk menjadi cair ketika dilakukan pemanasan. Karakteristik tersebut membuat material ini menjadi mudah dan ekonomis untuk dibentuk menjadi berbagai jenis produk. Selain itu struktur material juga tidak berubah selama dilakukannya proses pemanasan dan pembentukan secara berulang. Jenis plastik ini paling umum digunakan dimana lebih dari 70% dari total plastik yang ada terbentuk dari material termoplastik.

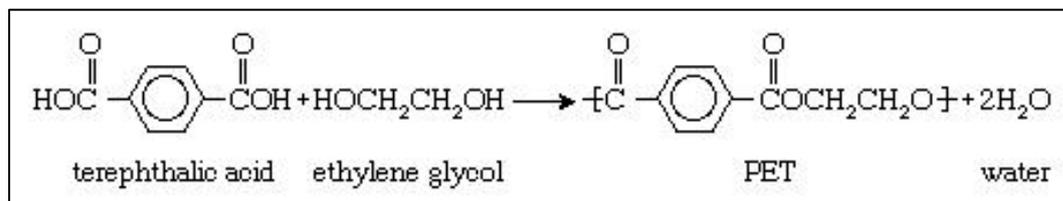
2. *Thermosetting Polymers* (TS)

Pemanasan dan pembentukan berulang tidak dapat digunakan untuk material termoset. Pada awal pemanasan, material ini akan melunak dan mencair. Namun peningkatan suhu selama pemanasan akan memberikan reaksi kimia yang menyebabkan terjadinya pengerasan secara permanen. Jika dipanaskan kembali, maka material akan cenderung mengalami degradasi dan hangus.

Menurut Sulyman, Haponiuk, & Formela (2016), beberapa contoh material yang termasuk ke dalam kategori termoplastik adalah *polyethylene terephthalate* (PET), *polypropylene* (PP), *polyvinyl acetate* (PVA), *polyvinyl chloride* (PVC), *polystyrene* (PS), *low density polyethylene* (LDPE), dan *high density polyethylene* (HDPE). Sedangkan beberapa contoh material yang termasuk ke dalam kategori termoset adalah *bakelite*, *epoxy resins*, *melamine resins*, *polyesters*, *polyurethane*, *urea-formaldehyde*, dan *alkyd resins*.

II.2 Polyethylene Terephthalate (PET)

Menurut Sulyman, Haponiuk, & Formela (2016), *polyethylene terephthalate* (PET) merupakan material yang paling sering digunakan dari berbagai contoh material termoplastik lainnya. Menurut *PET Resin Association* (2015), PET berbentuk transparan, kuat, dan ringan dimana material ini banyak digunakan untuk membuat kemasan makanan dan minuman. PET terbentuk dari campuran antara *ethylene glycol* (EG) dan *terephthalic acid* (TPA) yang membentuk sebuah rantai polimer. Sintesis PET terdiri atas dua langkah yaitu esterifikasi dan polikondensasi (Scheirs, 2003). Esterifikasi antara TPA dan EG akan menghasilkan *prepolymer* dan selanjutnya akan dilakukan proses polikondensasi dimana reaksi transesterifikasi berlangsung dalam fasa cair. Proses pembentukan rantai polimer PET terdiri atas *liquid phase polymerization* dan *solid-state polymerization*. Setelah proses polimerisasi, PET akan diproses menjadi produk akhir dan selanjutnya akan didistribusikan ke konsumen. Proses pembentukan rantai polimer PET dapat dilihat pada Gambar II.1.



Gambar II.1 Proses Pembentukan Rantai Polimer PET
(Sumber: www.britannica.com/science/polyethylene-terephthalate)

Material PET yang dipanaskan mencapai titik lelehnya akan mudah untuk diekstrusi atau dibentuk menjadi berbagai jenis produk. Sifat mekanik berbagai contoh material termoplastik akan tergantung pada temperatur. PET merupakan material yang dapat didaur ulang sepenuhnya. Berikut adalah karakteristik dari *polyethylene terephthalate* (Groover, 2010).

Representative polymer:	Polyethylene terephthalate (C ₂ H ₄ -C ₈ H ₄ O ₄) _n	Elongation:	200%
Symbol:	PET	Specific gravity:	1.3
Polymerization method:	Step (condensation)	Glass transition temperature:	70°C (158°F)
Degree of crystallinity:	Amorphous to 30% crystalline	Melting temperature:	265°C (509°F)
Modulus of elasticity:	2300 MPa (333,590 lb/in ²)	Approximate market share:	About 2%
Tensile strength:	55 MPa (7975 lb/in ²)		

Gambar II.2 Karakteristik PET
(Sumber: Groover, 2010)

Menurut *Precious Plastic* (2017), setiap jenis plastik memiliki *physical properties* yang berbeda. *Physical properties* memuat informasi mengenai rentang *thermal properties*, *strength*, dan *density*. *Physical properties* untuk setiap jenis plastik dapat dilihat pada Gambar II.3.

Plastic	Thermal Properties				Strength		Density
	Tm	Tg	Td	Cte	Tensile	Compressive	
Abbreviation - Brand name	°C	°C	°C	ppm/°C	psi	psi	g/cc
PET - Polyethyleneterephthalate	245 265	73 80	21 38	65	7000 10500	11000 15000	1.29 1.40
LDPE - Low density polyethylene	98 115	-25	40 44	100 220	1200 4550		0.917 0.932
HDPE - High density polyethylene	130 137		79 91	59 110	3200 4500	2700 3600	0.952 0.965
PP - polypropylene	168 175	-20	107 121	81 100	4500 6000	5500 8000	0.900 0.910
PVC - polyvinylchloride		75 105	57 82	50 100	5900 7500	8000 13000	1.30 1.58
PS - polystyrene		74 105	68 96	50 83	5200 7500	12000 13000	1.04 1.05

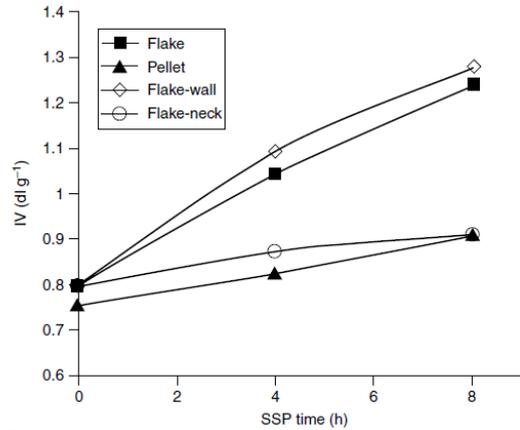
Tm - crystalline melting temperature (some plastics have no crystallinity and are said to be amorphous).
Tg - glass transition temperature (the plastic becomes brittle below this temperature).
Td - heat distortion temperature under a 66 psi load.
Cte - coefficient of linear thermal expansion.
Tensile Strength - load necessary to pull a sample of the plastic apart.
Compressive Strength - load necessary to crush a sample of the plastic.
Density - aka specific gravity/mass of plastic per unit volume.

Gambar II.3 *Physical Properties* Berbagai Jenis Plastik
(Sumber: Precious Plastic, 2017)

II.2.1 Karakteristik yang Mempengaruhi Kualitas PET

Menurut *Reliance Industries Limited* (2013), terdapat karakteristik kritis yang dapat mempengaruhi kualitas dari material PET yaitu *intrinsic viscosity* (IV), *residual acetaldehyde* (AA) *content*, *colour*, *crystallinity*, dan *dust content*. *Intrinsic viscosity* (IV) mengukur rata-rata panjang rantai molekular polimer atau berat molekular material. Semakin panjang rantai molekular, maka nilai IV akan

semakin tinggi. Karakteristik ini mempengaruhi *melt viscosity*, perilaku proses PET dan sifat dari produk yang dihasilkan. Nilai IV akan sangat dipengaruhi oleh jenis pelarut murni yang digunakan dan kondisi temperatur dalam viskometer.



Gambar II.4 Laju Reaksi Berbagai Jenis PET
(Sumber: Scheirs, 2003)

Berdasarkan Gambar II.4, dapat dilihat bahwa nilai IV yang dibutuhkan untuk PET berjenis *flakes* atau pelet adalah sekitar 0,8. Selanjutnya, kandungan residual *acetaldehyde* (AA) merupakan hasil dari degradasi polimer yang terkena temperatur berlebih dalam waktu yang lama. Semakin sensitif kegunaan dari produk PET, maka kandungan residual AA harus semakin rendah. *Colour* merupakan sensasi visual yang dihasilkan oleh cahaya dari perbedaan panjang gelombang yang terlihat pada daerah spektrum. Alat yang secara umum digunakan untuk melihat distribusi panjang gelombang cahaya PET adalah *colormetric spectrophotometer*.

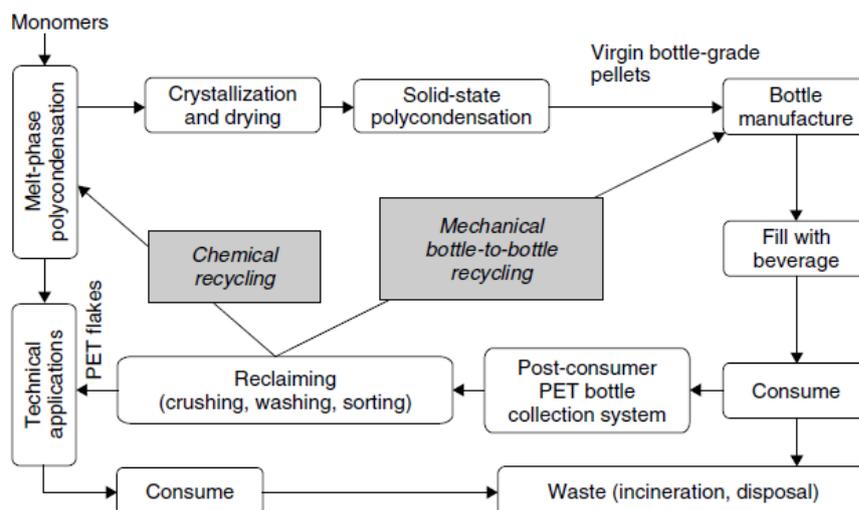
Crystallinity mengukur tingkat keteraturan dari molekul PET. *Crystallinity* sebaiknya lebih dari 50% sehingga material tidak melunak dan membentuk gumpalan selama proses *drying* sebelum dicetak. Kandungan “*dust*” dalam PET sebisa mungkin diminimalisir agar proses pencetakan bebas masalah ataupun tidak ada bintik pada produk akhir.

II.2.2 PET Recycling

Scheirs (2003) mengatakan bahwa PET merupakan material yang ideal untuk didaur ulang. Material PET dapat diproses berulang kali dan tersedia dalam jumlah yang besar, dimana sebagian besar dari material ini bersifat tunggal (*mono-material*). Daur ulang botol PET semakin berkembang diiringi

dengan jumlah konsumsi dan tingkat pengumpulan botol PET di pasar dunia yang terus meningkat. Setelah digunakan, botol PET akan berakhir di dalam sistem penanganan limbah. Pemisahan secara manual ataupun menggunakan berbagai metode lainnya dapat diterapkan untuk memisahkan PET dari kumpulan limbah. Selanjutnya PET juga dipisahkan dari label, perekat label, tutup, kotoran, dan sisa cairan yang terdapat di dalam kemasan.

Serpihan PET atau yang selanjutnya disebut sebagai PET *flakes* yang telah bersih dapat diolah, baik melalui pemrosesan ulang secara langsung (*mechanical bottle recycling*) ataupun melalui depolimerisasi rantai polimer PET menjadi monomer yang dapat digunakan sebagai sumber alternatif dalam pembuatan PET (*chemical bottle recycling*). Skema yang menjelaskan aliran material PET dapat dilihat pada Gambar II.5.



Gambar II.5 Skema Aliran Material PET
(Sumber: Scheirs, 2003)

Menurut Scheirs (2003), pada saat proses daur ulang PET *flakes*, terdapat beberapa aspek yang perlu diperhatikan yaitu:

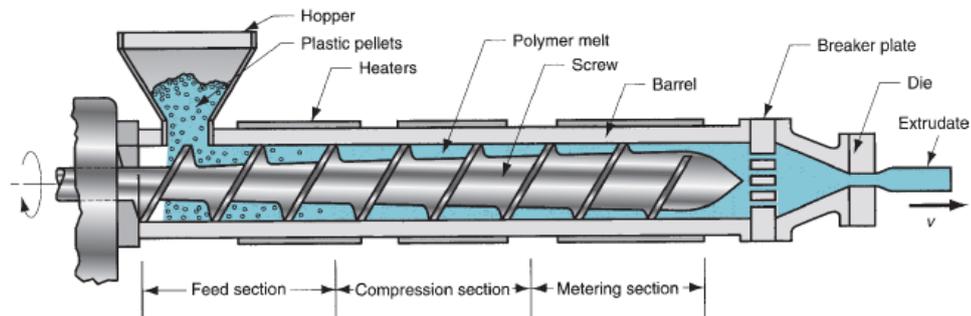
1. Kumpulan PET *bottle flakes* memiliki ketebalan yang berbeda. *Flakes* yang berasal dari bagian leher dan dasar botol cenderung lebih tebal dan memiliki rata-rata peningkatan IV (*Intrinsic Viscosity*) yang lebih rendah dibandingkan bagian dinding botol.
2. *Bulk density* dari *flakes* berada antara rentang 250-450 kg/m³ dimana virgin PET berada antara rentang 750-850 kg/m³. Penghancuran limbah

- PET menjadi *flakes* akan meningkatkan *bulk density* dan meningkatkan homogenitas.
3. Sebaiknya dilakukan pemisahan terhadap PET *flakes* yang hancur atau tidak berbentuk sebelum memasuki *solid state polycondensation* (SSP) untuk menghindari resiko menempel dan meningkatkan homogenitas produk.
 4. Perhatian khusus perlu diberikan terhadap adanya kemungkinan kontaminasi dengan PVC (*polyvinyl chloride*). Residu PVC akan terlihat sebagai partikel hitam yang tidak akan meleleh hingga akhir proses. Salah satu alternatif yang dapat dilakukan untuk menghilangkan residu PVC yang telah terurai adalah dengan melakukan pemisahan setelah proses SSP dilakukan.

II.3 **Extrusion Molding**

Menurut Groover (2010), proses *extrusion* merupakan salah satu proses pembentukan dasar menggunakan bahan logam, keramik, maupun polimer. *Extrusion* merupakan proses penekanan dimana material yang terdesak akan melewati lubang cetakan untuk menghasilkan produk secara kontinu sesuai dengan bentuk lubang yang dirancang. Proses ini juga digunakan untuk termoplastik dan elastomer untuk menghasilkan produk secara masal seperti tabung, pipa, selang karet, bentuk struktural, lembaran, *continuous filament*, dan lain-lain. Produk yang dihasilkan secara kontinu akan dipotong sesuai dengan panjang yang diinginkan.

Proses *extrusion* dapat dianalogikan seperti alat penggiling daging rumahan dimana plastik ekstrudat akan terbentuk secara kontinu (Chanda & Roy, 2009). Menurut Groover (2010), material mentah baik dalam bentuk pellet ataupun bubuk akan dimasukkan ke dalam *extrusion barrel* dimana pada bagian ini material mentah akan dipanaskan dan meleleh, kemudian mengalir melewati cetakan akibat adanya *screw* yang berputar. Dua komponen utama dari sebuah mesin *extruder* adalah *barrel* dan *screw*. Cetakan bukanlah komponen dari mesin *extruder* melainkan merupakan sebuah alat yang harus diproduksi khusus sesuai dengan bentuk yang diinginkan. Komponen dan fitur dari sebuah mesin *extruder* plastik dapat dilihat pada Gambar II.6.



Gambar II.6 Komponen dan Fitur Mesin *Extruder* Plastik dan Elastomer (*Single-Screw*) (Sumber: Groover, 2010)

Hopper berisi material mentah dipasangkan pada ujung *barrel* yang berlawanan dengan *die* atau cetakan. Material akan turun dengan memanfaatkan gaya gravitasi dan masuk ke dalam *screw* yang berputar. Putaran *screw* akan mengendalikan pergerakan material di sepanjang *barrel*. Pada awalnya, *electric heater* digunakan untuk melelehkan material padat, mencampurkan, dan selanjutnya material secara mekanik akan menimbulkan panas tambahan untuk menjaga material agar tetap cair. Dalam beberapa kasus, panas yang disalurkan pada saat proses pencampuran dan pemotongan sudah cukup dan tidak membutuhkan pemanasan secara eksternal. Upaya yang dapat dilakukan untuk mencegah terjadinya *overheating* pada material adalah dengan memasang pendingin eksternal pada bagian *barrel*.

Material akan melewati *barrel* menuju ke bagian *die* akibat adanya *extruder screw* yang berputar dengan kecepatan sekitar 60 revolusi/ menit. *Screw* memiliki beberapa fungsi sesuai dengan bagiannya. Berikut adalah tiga bagian dari *screw* beserta fungsinya (Groover, 2010).

1. *Feed Section*, bagian dimana material mentah akan bergerak dari *hopper* dan dipanaskan terlebih dahulu (*preheat*).
2. *Compression Section*, bagian dimana polimer akan berubah bentuk menjadi cair, udara yang terperangkap di sekitar *barrel* akan hilang, dan material dimampatkan.
3. *Metering Section*, bagian dimana material cair akan homogen dan tekanan yang cukup dapat memompanya melewati bagian cetakan.

Chanda & Roy (2008) mengatakan bahwa pelelehan material polimer dibantu oleh beberapa *external heater* ataupun panas dari gesekan yang

terbentuk saat proses penekanan pada *screw* dan pemotongan polimer. Pada mesin *extruder* modern dengan *screw* berkecepatan tinggi, panas dari gesekan memberikan sebagian besar panas yang dibutuhkan untuk pengoperasian yang konstan. *External heater* hanya digunakan untuk memisahkan material dan mencegah terjadinya *error* pada mesin terutama saat material dalam keadaan dingin.

Barrel dapat terbagi atas tiga sampai empat area pemanasan yang berbeda. Temperatur paling rendah terdapat pada bagian *feed* dan temperatur tertinggi terdapat pada bagian ujung *die*. Temperatur diatur secara teliti dengan mengatur keseimbangan antara proses pemanasan dan pendinginan. Keseimbangan antara kedua proses ini dapat meningkatkan kualitas dari produk ekstrudat yang dihasilkan.

II.4 Quality

Kualitas dari sebuah produk atau jasa berhubungan dengan kesesuaian dimana produk atau jasa yang dihasilkan dapat memenuhi atau bahkan melebihi spesifikasi yang ditetapkan oleh pengguna (Mitra, 1998). Seiring dengan kebutuhan pengguna yang berubah-ubah, perusahaan harus dapat meningkatkan kualitas dari produk ataupun jasanya. Secara umum, kualitas bukan sesuatu yang dapat ditetapkan secara baku, dimana syarat kualitas akan berbeda tergantung pada tingkat ekspektasi dari sebuah kelompok pengguna.

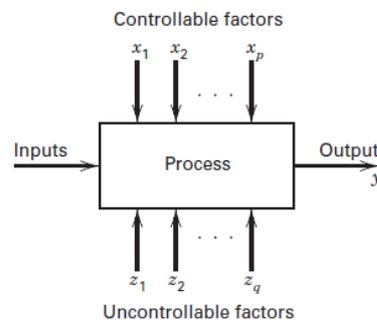
Karakteristik kualitas terdiri atas dua bagian utama yaitu variabel dan atribut. Variabel merupakan karakteristik yang terukur dan dapat dinotasikan dalam bentuk angka. Sedangkan atribut merupakan karakteristik yang tidak terukur dan tidak dapat dinotasikan ke dalam bentuk angka. Diameter dari sebuah roda gigi dapat disebut sebagai variabel dan aroma dari bubuk kopi dapat disebut sebagai atribut. Giles, Wagner, dan Mount (2005) mengatakan bahwa kualitas tidak dapat diteliti pada produk, namun membutuhkan keputusan kualitatif dari tim dimana produk yang berada di luar spesifikasi namun masih dalam batas toleransi akan dinyatakan sebagai produk yang dapat diterima.

II.5 Design of Experiment

Menurut Montgomery (2013), eksperimen didefinisikan sebagai sebuah tes atau serangkaian percobaan dimana dilakukan perubahan-perubahan secara

sengaja pada variabel *input* dari sebuah proses atau sistem sehingga perubahan pada respon dapat diketahui dan diidentifikasi penyebabnya. Eksperimen memegang peranan penting dalam komersialisasi teknologi dan aktivitas realisasi produk yang terdiri atas rancangan produk baru, pengembangan proses manufaktur, dan peningkatan proses. Tujuan yang ingin dicapai adalah menghasilkan sebuah proses yang *robust* atau dengan kata lain adalah mengurangi variabilitas yang terjadi akibat munculnya faktor eksternal.

Secara umum, eksperimen sering digunakan untuk mempelajari bagaimana performansi dari sebuah proses atau sistem (Montgomery, 2013). Model umum dari sebuah sistem dapat dilihat pada Gambar II.7.



Gambar II.7 Model Umum Sebuah Proses atau Sistem
(Sumber: Montgomery, 2013)

Menurut Mitra (1998), faktor-faktor yang dapat dikendalikan dalam sebuah eksperimen disebut *controllable factor* yang terdiri atas faktor kuantitatif dan kualitatif. Pada faktor kuantitatif dibutuhkan penentuan level yang dapat diatur dalam eksperimen. *Output* yang dihasilkan dari sebuah proses atau sistem disebut variabel respon. *Treatment* atau perlakuan merupakan kombinasi tertentu dari level faktor yang mempengaruhi variabel respon. Ada tiga prinsip utama dalam desain eksperimen yaitu randomisasi, replikasi, dan *block* (Montgomery, 2013). Randomisasi berarti melakukan setiap percobaan dalam eksperimen secara acak. Replikasi merupakan banyaknya pengulangan untuk setiap *treatment* yang ditetapkan. *Block* merupakan faktor yang diduga mempengaruhi respon tetapi tidak dijadikan sebagai parameter dalam tujuan penelitian. *Block* bertujuan untuk mengurangi atau menghilangkan variabilitas akibat *error* yang muncul saat dilakukannya eksperimen.

Menurut Mitra (1998), terdapat dua model perancangan eksperimen yaitu *fixed effects model* dan *random effects model*. *Fixed effects model*

merupakan model dimana efek dari *treatment* dianggap tetap sehingga kesimpulan yang ditarik dari hasil analisis hanya berkaitan dengan *treatment* yang digunakan dalam penelitian. *Random effects model* merupakan model dimana pemilihan *treatment* dilakukan secara acak dari suatu populasi *treatment*. Model ini digunakan agar didapat kesimpulan dari seluruh populasi *treatment*.

Menurut Montgomery (2013), *factorial design* dapat digunakan di dalam eksperimen yang melibatkan beberapa faktor. 2^k *factorial design* memiliki 2 level yang dapat ditetapkan secara kuantitatif ataupun kualitatif. Banyaknya faktor yang ingin diteliti dilambangkan dengan k . Asumsi yang dapat digunakan dalam 2^k *factorial design* adalah faktor tetap, desain eksperimen yang digunakan adalah *completely randomized*, dan asumsi normalitas dipenuhi. Level kuantitatif dapat berupa temperatur, tekanan, ataupun waktu. Level kualitatif dapat berupa 2 mesin ataupun 2 operator dengan level tinggi dan rendah untuk setiap faktor. Berikut adalah contoh kombinasi *treatment* 2^2 *factorial design* dengan replikasi sebanyak 3 kali.

Factor		Treatment Combination	Replicate			Total
A	B		I	II	III	
-	-	A low, B low	28	25	27	80
+	-	A high, B low	36	32	32	100
-	+	A low, B high	18	19	23	60
+	+	A high, B high	31	30	29	90

Gambar II.8 Kombinasi *Treatment* 2^2 *Factorial Design*
(Sumber: Montgomery, 2013)

Menurut Montgomery (2013), prosedur dalam merancang sebuah eksperimen terdiri atas 7 tahapan yaitu:

1. Penentuan masalah

Pernyataan masalah yang jelas dapat membantu dalam memahami fenomena yang akan diteliti dan solusi akhir dari permasalahan dengan lebih baik. Alasan dilakukannya sebuah eksperimen terdiri atas:

- a. *Factor screening or characterization*, digunakan apabila sebuah sistem atau proses belum pernah diteliti sebelumnya.
- b. *Optimization*, digunakan apabila faktor yang mempengaruhi respon telah diketahui, sehingga dapat ditentukan pengaturan yang optimal.

- c. *Confirmation*, digunakan apabila ingin memeriksa apakah sebuah sistem berjalan konsisten sesuai dengan teori ataupun pengalaman.
 - d. *Discovery*, digunakan apabila ingin menyelidiki hasil penelitian jika dilakukan perubahan dalam penggunaan material, faktor, ataupun rentang dari setiap faktor.
 - e. *Robustness*, digunakan apabila ingin meminimasi variabilitas akibat *uncontrollable factors* dengan menggunakan *controllable factors*.
2. Pemilihan variabel respon
Dalam memilih variabel respon, perlu dipastikan bahwa variabel respon yang dipilih benar-benar memberikan informasi yang bermanfaat terkait dengan proses yang akan diteliti.
 3. Penentuan faktor, level, dan rentang
Ketika mempertimbangkan faktor yang mungkin mempengaruhi sebuah proses atau sistem, faktor tersebut diklasifikasikan sebagai *potential design factor* atau *nuisance factor*.
 4. Penentuan desain eksperimental
Tahap ini dilakukan dengan melihat jumlah replikasi atau *sample size*, pemilihan urutan percobaan, dan menentukan apakah pembatasan pengacakan lainnya terlibat.
 5. Menjalankan eksperimen
Saat menjalankan eksperimen, sangat penting melakukan pengawasan terhadap proses untuk memastikan semua hal berjalan sesuai dengan rencana. Kesalahan dalam prosedur eksperimen pada tahap ini seringkali akan merusak validitas eksperimen.
 6. Analisis statistik terhadap data
Metode statistik digunakan untuk menganalisis data sehingga hasil dan kesimpulan yang didapat bersifat objektif. Jika model statistik digabungkan dengan teknik dan pengetahuan mengenai proses yang baik, maka hasil akan mengarah pada kesimpulan yang jelas.
 7. Kesimpulan dan saran
Saat proses analisis terhadap data selesai dilakukan, dapat diketahui kesimpulan dari hasil dan saran yang dapat diberikan.

Tiga tahapan awal sering disebut sebagai *pre-experimental planning*. Eksperimen bersifat iteratif dan merupakan bagian penting dari proses pembelajaran. Eksperimen dimulai dengan merumuskan hipotesis dari sistem, melakukan eksperimen untuk menyelidiki hipotesis, merumuskan hipotesis baru berdasarkan hasil yang didapat, dan seterusnya. *Pre-experimental planning* yang baik biasanya akan membuat proses eksperimen berhasil dilakukan dengan baik. Kegagalan dalam perencanaan biasanya akan mengakibatkan terbuangnya waktu, uang, sumber daya lainnya, dan lain-lain.

Menurut Mitra (1998), *Completely Randomized Design* (CRD) merupakan sebuah desain yang paling sederhana dan paling tidak membatasi. *Treatment* diberikan secara acak terhadap unit-unit eksperimen dan setiap unit memiliki peluang yang sama untuk mendapatkan setiap jenis *treatment*. Salah satu cara yang dapat digunakan dalam menjalankan desain ini adalah dengan menggunakan *uniform random number*.

Sebagai contoh, terdapat empat buah *treatment* yaitu A, B, C, dan D yang akan ditugaskan pada tiga unit eksperimen sehingga dihasilkan total 12 unit eksperimen. Dalam istilah perancangan eksperimen, setiap *treatment* pada contoh kasus ini akan direplikasikan sebanyak tiga kali sehingga dibutuhkan 12 *random numbers*. Pada tabel *random number*, diberikan 12 *random number* dengan 3 digit yang terletak dalam satu kolom. Setiap *treatment* akan ditugaskan untuk setiap *random number* secara berurutan. Kemudian *random number* akan diurutkan dari bilangan terkecil hingga terbesar dengan peringkat yang sesuai dengan angka pada unit eksperimen. Skema penugasan *treatment* pada setiap unit eksperimen dapat dilihat pada Gambar II.9.

Random Number	Rank of Random Number (Experimental Unit)	Treatment
682	10	A
540	8	A
102	2	A
736	11	B
089	1	B
457	6	B
198	3	C
511	7	C
294	4	C
821	12	D
304	5	D
658	9	D

Gambar II.9 Penugasan *Treatment* pada Setiap Unit Eksperimen dalam CRD
(Sumber : Mitra, 1998)

Menurut Mitra (1998), *completely randomized design* memiliki beberapa kelebihan. Pertama adalah jumlah dari *treatment* atau replikasi yang digunakan bersifat bebas. Sebuah *treatment* tidak harus menggunakan jumlah replikasi yang sama dengan *treatment* lainnya, sehingga perancangan menjadi fleksibel. Jika semua *treatment* menggunakan jumlah replikasi yang sama, maka eksperimen tersebut dikatakan “seimbang” dan sebaliknya. Analisis statistik dapat dengan mudah dilakukan pada kasus eksperimen yang “tidak seimbang”, meskipun perbandingan antar efek *treatment* pada kasus eksperimen “seimbang” akan lebih presisi.

Kelebihan kedua adalah CRD memberikan *degree of freedom* terbesar bagi *experimental error*. Hal ini membuat proses estimasi terhadap *experimental error* menjadi lebih presisi. Kekurangan yang terdapat dalam desain ini adalah tingkat kepresisian akan menurun jika unit eksperimen tidak *uniform* atau seragam. Hal yang dimaksudkan adalah adanya *blocking*, *grouping*, atau unit homogen sejenis lainnya.

II.6 Skala Pengukuran Variabel

Menurut Sekaran (2003), skala merupakan sebuah alat atau mekanisme yang digunakan untuk membedakan satu individu dengan individu yang lain berdasarkan suatu variabel yang menjadi fokus penelitian. Skala dapat mengkategorikan individu secara umum atau dapat juga dapat membedakan individu dengan tingkat kedetailan yang bervariasi. Ada empat jenis utama skala yaitu *nominal*, *ordinal*, *interval*, dan *ratio*. Tingkat kedetailan akan semakin tinggi mulai dari skala *nominal* hingga *ratio*. Informasi sebuah variabel akan lebih detail jika menggunakan skala *interval* dan *ratio* dibandingkan dengan skala *nominal* dan *ordinal*. Dengan menggunakan skala yang lebih kuat, maka peningkatan kedetailan analisis data dapat dilakukan karena variabel tertentu akan lebih mudah untuk diteliti dengan skala yang lebih kuat dibandingkan dengan skala lainnya.

Skala *nominal* memungkinkan peneliti untuk menetapkan subjek atau individu ke dalam kategori atau kelompok tertentu. Contoh variabel ini adalah jenis kelamin yang dapat dikelompokkan dalam dua kategori yaitu laki-laki dan perempuan. Kategori individu yang didapat bersifat *mutually exclusive* atau saling bebas dan *collectively exhaustive* atau semua kategori tersedia. Informasi yang

diperoleh dari skala *nominal* adalah persentase atau frekuensi dari tiap kategori dalam sampel yang diambil.

Skala *ordinal* tidak hanya mengkategorikan variabel untuk melihat perbedaan, tetapi juga *rank-orders* atau mengurutkan kategori. Sebagai contoh, ketika responden diminta untuk menunjukkan preferensinya dalam mengurutkan tingkat kepentingan dari lima karakteristik berbeda dalam pekerjaan. Skala *ordinal* menyediakan lebih banyak informasi dibandingkan skala *nominal*. Walaupun dapat mengurutkan kategori, skala *ordinal* tidak dapat menunjukkan besarnya perbedaan di antara *rank* atau urutan tersebut.

Skala *interval* memungkinkan untuk dilakukannya operasi aritmetik tertentu terhadap data yang dikumpulkan dari responden. Pada saat skala *nominal* hanya memungkinkan untuk membentuk kelompok-kelompok secara kualitatif dalam kategori *mutually exclusive* dan *collectively exhaustive* dan skala *ordinal* mengurutkan preferensi, skala *interval* memungkinkan untuk mengukur jarak antara dua titik pada skala. Skala ini membantu dalam mengukur rata-rata dan standar deviasi dari variabel respon. Skala *interval* tidak hanya mengelompokkan individu berdasarkan kategori tertentu dan mengurutkannya, namun juga mengukur besarnya preferensi di antara individu.

Skala *ratio* menutupi kekurangan dari skala *interval* yaitu *arbitrary origin point* atau titik acuan yang bebas dengan menyediakan titik nol yang mutlak dimana merupakan titik pengukuran yang berarti. Dengan demikian skala *ratio* tidak hanya mengukur besarnya perbedaan antar poin pada skala, namun juga mengukur proporsi perbedaan. Skala *ratio* merupakan skala terkuat dari jenis skala yang ada karena memiliki titik nol yang unik dan memasukkan semua sifat dari ketiga skala lainnya. Keseimbangan timbangan adalah contoh yang baik untuk skala *ratio*.

Dalam mendapatkan respon, penggunaan skala *nominal* terdapat pada skala dikotomi dan kategori. Penggunaan skala *interval* terdapat pada skala diferensial semantik, numerikal, *rating item* terperinci, *Likert*, stapel, dan konsensus. Salah satu jenis skala *interval* yang sering digunakan adalah skala *Likert*. Sedangkan penggunaan skala *ordinal* terdapat pada skala jumlah konstan dan *rating* grafis. Kesimpulan mengenai sifat dari keempat jenis skala dapat dilihat pada Tabel II.1.

Tabel II.1 Sifat Keempat Jenis Skala

Jenis Skala	Highlights				Ukuran Central Tendency	Ukuran Dispersion	Uji Signifikansi
	Perbedaan	Urutan	Jarak	Titik Asal Unik			
<i>Nominal</i>	Ya	Tidak	Tidak	Tidak	Modus	-	χ^2
<i>Ordinal</i>	Ya	Ya	Tidak	Tidak	Median	Rentang Semi-Interkuartil	Korelasi Rank-Order
<i>Interval</i>	Ya	Ya	Ya	Tidak	Rata-Rata Arimetrik	Standar Deviasi, Variansi, Koefisien Variansi	t, F
<i>Ratio</i>	Ya	Ya	Ya	Ya	Rata-Rata Aritmetik dan Geometrik	Standar Deviasi, Variansi, Koefisien Variansi	t, F

(Sumber: Sekaran, 2003)

II.7 Analysis of Variance

Analysis of Variance atau yang sering disebut dengan ANOVA merupakan model statistik yang digunakan untuk menguji perbedaan rata-rata antara dua atau lebih level dalam eksperimen (Montgomery & Runger, 2003). Terdapat beberapa asumsi yang digunakan dalam ANOVA yaitu:

1. Data berdistribusi normal
2. Independen atau berasal dari populasi yang saling bebas
3. Variansi antar *treatment* atau antar level faktor sama besar

Pemenuhan ketiga asumsi ANOVA dapat diperiksa dengan menggunakan data residual. Residual merupakan perbedaan antara nilai observasi (y_{ij}) dengan nilai estimasi ($\hat{y}_{ij} = \bar{y}_{i\cdot}$) yang didapat melalui model statistik yang digunakan (Montgomery & Runger, 2003).

$$e_{ij} = y_{ij} - \bar{y}_{i\cdot} \quad (\text{Pers. II-1})$$

Keterangan: e_{ij} = residual data

y_{ij} = nilai observasi

$\bar{y}_{i\cdot} = \hat{y}_{ij}$ = nilai estimasi

Menurut Montgomery & Runger (2003), terdapat 8 langkah pengujian ANOVA yaitu:

1. Identifikasi *parameter of interest* dari konteks permasalahan.
2. Tentukan *null hypothesis* atau hipotesis awal, H_0 .
3. Tentukan alternatif hipotesis yang tepat, H_1 .
4. Pilih *significant level*, α .
5. Lakukan uji statistik untuk ANOVA yaitu:

$$F_0 = \frac{MS_{Treatment}}{MS_{Error}} \quad (\text{Pers. II-2})$$

Keterangan: F_0 = F hitung

$MS_{Treatment}$ = Mean squares treatment

MS_{Error} = Mean squares error

6. Tentukan daerah penolakan, dimana H_0 akan ditolak jika:

$$F_0 > F_{\alpha, a-1, ab(n-1)} \quad (\text{Treatment A})$$

$$F_0 > F_{\alpha, b-1, ab(n-1)} \quad (\text{Treatment B})$$

$$F_0 > F_{\alpha, (a-1)(b-1), ab(n-1)} \quad (\text{Interaksi}) \quad (\text{Pers. II-3})$$

7. Lakukan perhitungan yang diperlukan ($SS_A, SS_B, SS_{AB}, SS_{Error}, SS_{Total}$).
8. Tarik kesimpulan dari hasil perhitungan.

Perhitungan yang dilakukan pada model statistik ANOVA *Two-Factor Factorial* pada *fixed effect model* dapat dilihat pada Tabel II.2.

Tabel II.2 *Analysis of Variance* untuk *Two-Factor Factorial, Fixed Effects Model*

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	F_0
A treatments	SS_A	$a - 1$	$MS_A = \frac{SS_A}{a - 1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B treatments	SS_B	$b - 1$	$MS_B = \frac{SS_B}{b - 1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
Interaction	SS_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	SS_E	$ab(n - 1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n - 1)}$	
Total	SS_T	$abn - 1$		

(Sumber: Montgomery, 2013)

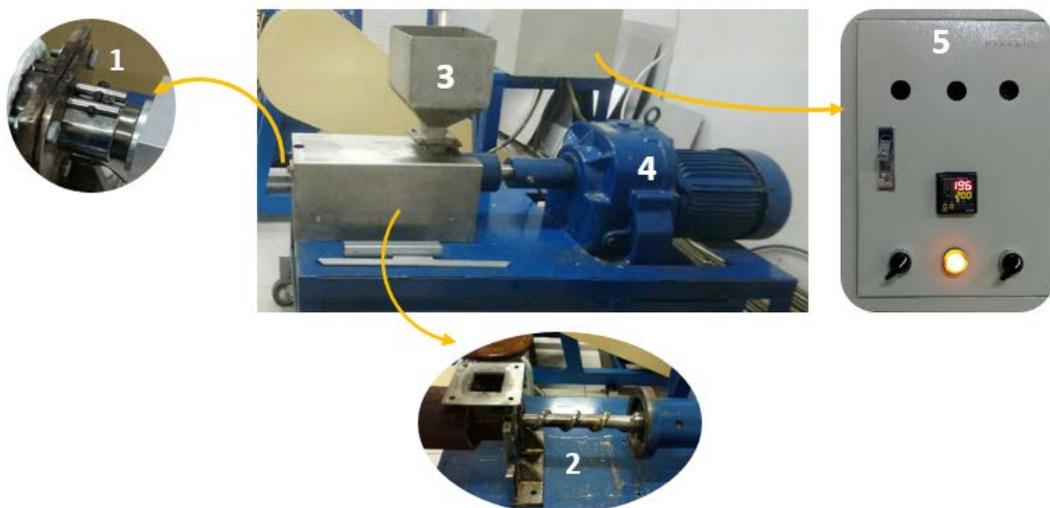
BAB III

PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

Pada bab ini akan dibahas mengenai keseluruhan proses atau tahapan yang dilakukan khususnya dalam merancang sebuah eksperimen terkait penentuan parameter proses mesin *extruder* yang berpengaruh dalam pembuatan produk hasil daur ulang botol plastik PET. Perancangan eksperimen akan dibagi menjadi beberapa tahapan yaitu penelitian pendahuluan, penentuan respon, faktor, dan level, pengacakan *treatment* dan pengumpulan data hasil *extrusion*, pengumpulan data respon, dan pengolahan data.

III.1 Penelitian Pendahuluan

Penelitian pendahuluan dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui faktor-faktor apa saja yang mungkin untuk diteliti dan diatur dalam penentuan parameter proses mesin *extruder* yang berpengaruh dalam pembuatan produk hasil daur ulang botol plastik PET. Faktor atau parameter yang mungkin mempengaruhi kualitas hasil *extrusion* didapat dari hasil pengamatan awal secara langsung dan proses *setting* terhadap mesin *extruder*. Proses pengamatan awal bertujuan untuk melihat konstruksi mesin *extruder* secara keseluruhan. Konstruksi mesin *extruder* Laboratorium Proses Produksi dapat dilihat pada Gambar III.1.



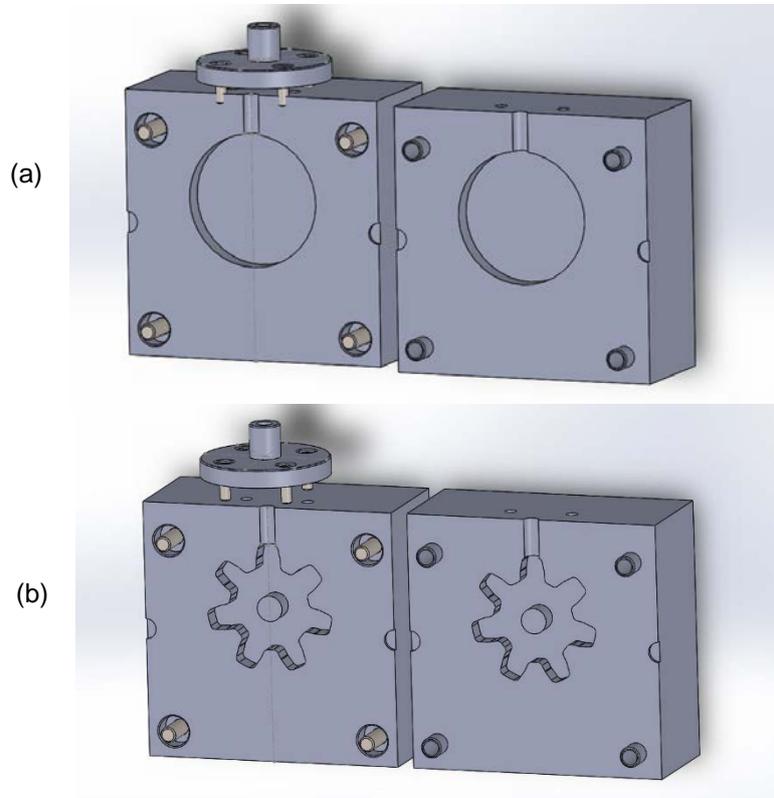
Gambar III.1 Mesin *Extruder* Laboratorium Proses Produksi
Berdasarkan Gambar III.1, komponen-komponen utama yang terdapat

pada mesin *extruder* Laboratorium Proses Produksi terdiri atas:

1. *Nozzle Assembled*, yang terdiri atas *band heater* dan *flow adjuster*. Bagian ini secara umum berfungsi untuk mengatur aliran material dari *barrel* menuju *dies* atau cetakan.
2. *Barrel* dan *Screw*, yang berfungsi untuk melelehkan, mencampur, dan mendorong material plastik dari *hopper* menuju ke bagian *nozzle*. Pada *barrel* juga terdapat 2 buah *band heater* yang dapat mengatur temperatur selama proses pelelehan dilakukan.
3. *Hopper*, yang berfungsi sebagai wadah material plastik serta mengarahkan material menuju ke bagian *barrel*.
4. Motor listrik atau dinamo, yang berfungsi untuk mengatur kecepatan putar *screw* saat mencampur ataupun mendorong material plastik.
5. *Control Panel*, yang terdiri atas rangkaian listrik mesin, *inverter*, *temperature controller*. *Inverter* berfungsi untuk mengatur kecepatan motor listrik AC dengan cara mengubah frekuensi *input*-nya. Rentang nilai frekuensi motor listrik berada antara 0 Hz - 50 Hz. *Temperature controller* akan menunjukkan suhu aktual yang didapat dari hasil pembacaan suhu *heater* dengan menggunakan *termocouple*. *Set point* untuk suhu yang diinginkan juga dapat diatur pada bagian *temperature controller*.

Saat percobaan awal dilakukan, dapat diamati bahwa pada mesin *extruder* ini, terdapat tiga hal yang mungkin untuk diteliti dalam menentukan parameter mesin. Hal yang mungkin untuk diteliti berdasarkan hasil pengamatan dan percobaan awal adalah temperatur, kecepatan putar *screw*, dan lamanya proses pelelehan material di dalam *barrel*. Penelitian pada mesin *extruder* Laboratorium Proses Produksi menggunakan cetakan atau *mold* dengan dua bentuk yang berbeda yaitu silinder dan *gear*. Silinder merupakan produk dari hasil daur ulang botol plastik PET menggunakan mesin *extruder* yang masih tergolong sederhana. Sedangkan *gear* merupakan produk dari hasil daur ulang dengan kompleksitas bentuk yang lebih tinggi dibandingkan dengan produk silinder. Pada bagian atas kedua cetakan dibuat sebuah pengait atau *mounting*

dengan sistem ulir yang dapat dipasang pada bagian *nozzle*. Konstruksi dari kedua cetakan yang digunakan dapat dilihat pada Gambar III.2.



Gambar III.2 Konstruksi Cetakan Mesin *Extruder* dengan Bentuk (a) Silinder (b) *Gear*

Kedua cetakan berbahan aluminium tersebut dibuat dengan menggunakan mesin *CNC-Mill* Laboratorium Proses Produksi sehingga dapat dihasilkan bentuk yang kompleks dan akurat. Dimensi dari setiap cetakan yang digunakan dapat dilihat pada Lampiran A. Percobaan awal dilakukan pada cetakan dengan bentuk produk berupa *gear* untuk melihat apakah material plastik dapat terbentuk dan mengisi seluruh rongga cetakan dengan sempurna. Sebelum percobaan dilakukan, botol plastik PET bekas perlu dihancurkan terlebih dahulu menjadi *PET flakes* menggunakan mesin *crusher*. *PET Flakes* yang dihasilkan telah melewati proses pembersihan dan pemisahan dari label serta tutup botol.



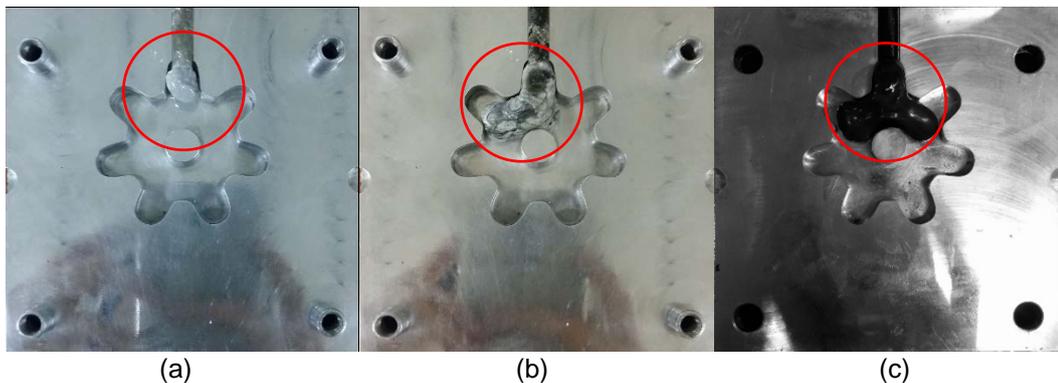
Gambar III.3 PET *Flakes*

Percobaan awal dilakukan dengan menggunakan rata-rata dari rentang suhu yang terdapat dalam informasi mengenai *physical properties* berbagai jenis plastik bekas menurut *Precious Plastic* yang dapat dilihat pada Gambar II.3. Rata-rata dari rentang titik leleh material plastik PET yang akan digunakan adalah sebesar 255°C. Kecepatan putar *screw* minimal yang dibutuhkan untuk menghasilkan bentuk produk *gear* belum diketahui, sehingga dilakukan percobaan dengan menggunakan frekuensi *input* sebesar 30Hz. Lamanya proses pelelehan minimal yang dibutuhkan belum diketahui pula, sehingga dilakukan percobaan selama 30 menit. Pengecekan terhadap proses pelelehan juga terus dilakukan dengan membuka *flow adjuster* yang terdapat pada bagian *nozzle* dan melihat bentuk dari material plastik yang dipanaskan. Banyaknya material yang digunakan dalam percobaan awal adalah sebanyak 300 gr dimana jumlah tersebut membuat bagian *barrel* terisi penuh.

Percobaan awal dilakukan sebanyak tiga kali untuk melihat kualitas dari produk yang dihasilkan. Pada percobaan pertama, dapat dilihat bahwa lelehan PET *flakes* hanya dapat mengisi penuh bagian *sprue* atau jalur masuk material dan telah memadat sebelum memenuhi seluruh rongga cetakan. Dugaan awal dari percobaan pertama ini adalah lamanya proses pelelehan dalam *barrel* atau temperatur yang kurang tepat. Percobaan selanjutnya dilakukan dengan menambahkan waktu *barrel* menjadi 50 menit dan faktor lainnya tetap. Hasil percobaan kedua terlihat bahwa lelehan PET *flakes* telah berhasil memenuhi bagian *sprue* namun hanya dapat mengisi dua dari total keseluruhan jumlah gigi yang terdapat pada *gear*.

Selanjutnya percobaan kembali dilakukan dengan mengubah temperatur yang digunakan dari 255°C menjadi 275°C, waktu *barrel* menjadi 50 menit, dan frekuensi *input* sebesar 30Hz. Hasil percobaan ketiga menunjukkan bahwa lelehan PET berhasil mengisi sekitar tiga dari total keseluruhan jumlah gigi pada *gear*. Perubahan warna yang signifikan terlihat pada produk ketiga, dimana warna telah berubah menjadi hitam yang menandakan bahwa plastik telah terdekomposisi. Namun berdasarkan ketiga percobaan yang telah dilakukan, keseluruhan dari produk tetap tidak dapat mengisi seluruh rongga cetakan dengan sempurna.

Hal tersebut mungkin disebabkan karena *slurry* atau lelehan PET *flakes* tidak dapat mengisi celah-celah sempit yang terdapat pada rongga cetakan dan membeku secara cepat. Karakteristik material PET yang sensitif terhadap udara akan mempercepat laju pendinginan produk. Tekanan udara di dalam cetakan yang cukup tinggi juga membuat banyaknya udara yang terperangkap sehingga lelehan plastik tidak dapat masuk lebih jauh ke dalam cetakan. Ketika plastik PET telah membeku pada bagian *sprue* atau jalur masuk pada cetakan, maka lelehan plastik selanjutnya tidak akan bisa mendorong material yang beku untuk dapat mengisi rongga cetakan. Perubahan produk hasil *extrusion* PET *flakes* dalam tiga kali percobaan dapat dilihat pada Gambar III.4.



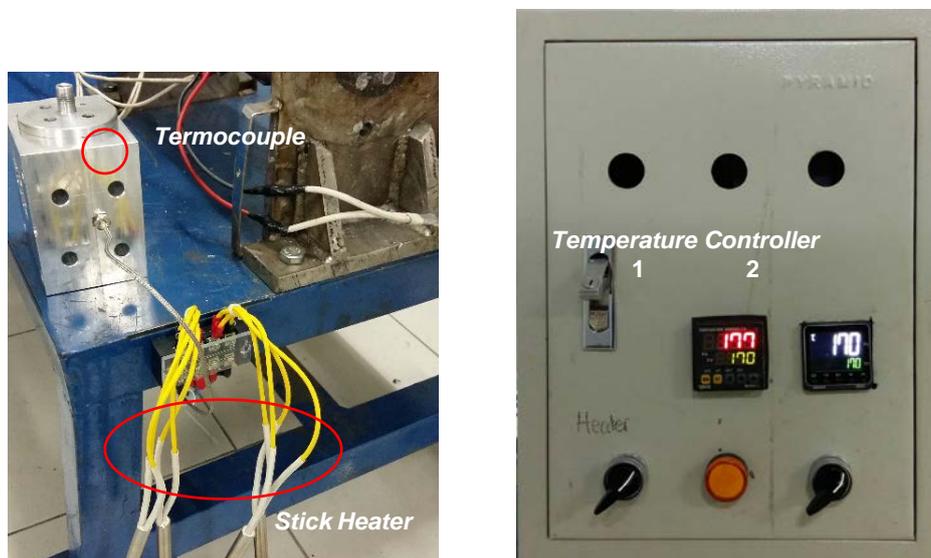
Gambar III.4 Produk Hasil Percobaan (a) Pertama (b) Kedua (c) Ketiga

Lamanya waktu pengisian cetakan ditetapkan selama 15 menit untuk setiap percobaan yang dilakukan dengan mempertimbangkan kecepatan putar *screw* dan volume dari cetakan yang cukup kecil. Kesimpulan sementara yang dapat ditarik dari ketiga hasil percobaan pada Gambar III.5 yaitu:

1. Waktu dalam *barrel* ditingkatkan hingga berada diantara 40-50 menit agar plastik dapat mengisi rongga cetakan.

2. Temperatur yang digunakan sebaiknya tidak lebih dari 275°C sehingga PET *flakes* tidak terdekomposisi.
3. Perlu dilakukan modifikasi dengan menambahkan *stick heater* dan *termocouple* pada bagian dalam cetakan sehingga suhu dari material tidak turun secara drastis dan tetap terjaga.
4. Pembacaan suhu aktual cetakan dengan *termocouple* akan menggunakan *temperature controller* yang terpisah dengan pembacaan suhu aktual *barrel*.

Proses modifikasi terhadap cetakan meliputi proses pembuatan 4 buah lubang dengan diameter 10 mm dan kedalaman sebesar 80 mm. Ulir bagian dalam juga dibuat pada kedua jenis cetakan agar *termocouple* dapat membaca temperatur cetakan dengan baik. Penempatan *termocouple* pada bagian dalam cetakan akan membuat pembacaan temperatur menjadi akurat karena *termocouple* tidak akan terpengaruh dengan aliran udara di lingkungan sekitar. Hasil modifikasi pada bagian cetakan dan *control panel* dapat dilihat pada Gambar III.5.



Gambar III.5 Hasil Modifikasi Bagian Cetakan dan *Control Panel*

Percobaan berikutnya kembali dilakukan dengan menggunakan temperatur sebesar 255°C, frekuensi *input* sebesar 30Hz, waktu *barrel* 40 menit, dan waktu pengisian selama 15 menit. Hasil percobaan keempat menunjukkan bahwa material plastik belum dapat mengisi keseluruhan rongga cetakan, namun

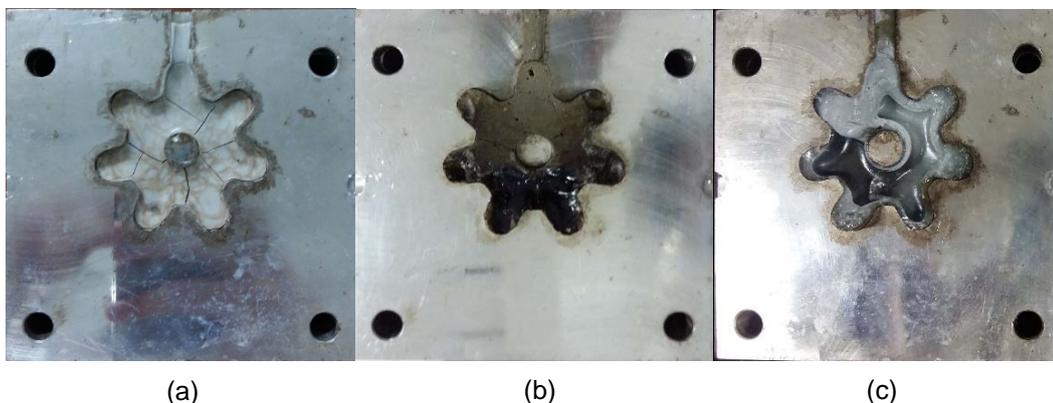
sudah dapat memenuhi 5 dari keseluruhan jumlah gigi pada *gear*. Permasalahan udara yang terjebak di dalam cetakan diduga mempengaruhi hasil pengisian yang tidak sempurna. Hal yang dapat dilakukan adalah dengan memberikan lubang venturi pada bagian dimana material tidak dapat terisi secara penuh.

Lubang venturi dibuat dengan diameter sebesar 2,5 mm pada salah satu sisi cetakan agar udara yang terjebak dapat keluar saat proses pencetakan berlangsung. Posisi lubang venturi dibuat tegak lurus terhadap sumbu mesin *extruder* dan berada di bagian sisi atas cetakan. Pemberian lubang venturi pada bagian atas cetakan juga berfungsi untuk memberikan informasi apakah cetakan telah terisi penuh atau tidak. Posisi lubang venturi yang ditetapkan berdasarkan percobaan keempat dapat dilihat pada Gambar III.6.



Gambar III.6 Posisi Lubang Venturi Cetakan Gear

Percobaan dilanjutkan dengan pengulangan sebanyak tiga kali dimana hanya dilakukan perubahan untuk temperatur *barrel*. Temperatur *barrel* yang digunakan untuk setiap percobaan secara berurutan adalah 255°C, 275°C, dan 265°C. Hasil percobaan setelah modifikasi pertama dilakukan dapat dilihat pada Gambar III.7.



Gambar III.7 Produk Hasil Percobaan pada Suhu (a) 255°C (b) 275°C (c) 265°C

Berdasarkan hasil percobaan pada Gambar III.8, material PET dapat mengisi seluruh celah sempit pada salah satu sisi cetakan. Pengisian sempurna untuk kedua sisi cetakan belum didapatkan sehingga dilakukan kembali pengamatan dan pengecekan pada konstruksi mesin. Berbeda dengan dua percobaan sebelumnya, percobaan ketiga juga menunjukkan kondisi produk yang sangat menempel pada rongga cetakan. Hal ini dikarenakan proses pendinginan yang dilakukan secara cepat dengan menyiram cetakan menggunakan air sehingga temperatur cetakan menurun drastis. Masalah ini menyebabkan cetakan harus diproses dan dibersihkan kembali menggunakan mesin CNC-Mill. Proses pembersihan produk yang menempel kuat pada kedua sisi cetakan *gear* membutuhkan waktu sekitar 3 jam. Kesimpulan yang didapat adalah proses penyiraman cetakan dengan air atau pendinginan secara cepat tidak boleh dilakukan untuk material plastik jenis PET.

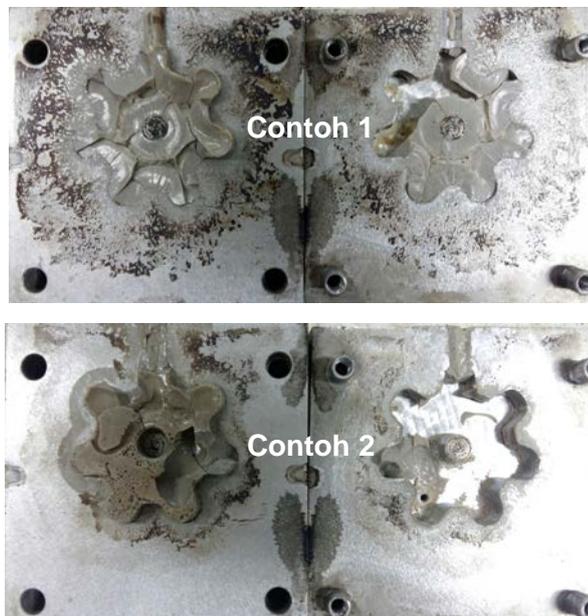
Selanjutnya dilakukan pengecekan terhadap konstruksi mesin dan ditemukan pula bahwa pembacaan temperatur aktual untuk bagian *barrel* dan *nozzle* menggunakan *termocouple* yang sama. *Termocouple* untuk bagian *barrel* dan *nozzle* diletakkan pada sisi belakang *band heater*. Kondisi ini dapat menyebabkan pembacaan temperatur di kedua bagian mesin *extruder* menjadi tidak akurat. Ketika *termocouple* mendeteksi temperatur *barrel heater* belakang telah mencapai *set point* pada *temperature controller*, maka otomatis keseluruhan *heater* akan mati. Kemungkinan yang dapat terjadi adalah *heater* bagian *nozzle* belum atau sudah melewati *set point* pada *temperature controller* dikarenakan jaraknya yang cukup jauh dari *termocouple*. Secara tidak langsung, hal ini mempengaruhi aliran material PET yang dapat menyebabkan pengisian menjadi tidak sempurna. Posisi penempatan *termocouple* sebelum dan setelah dilakukan perubahan dapat dilihat pada Gambar III.8.



Gambar III.8 Perubahan Posisi Penempatan *Termocouple* (a) Awal (b) Akhir

Pemindahan kabel listrik bagian *band heater nozzle* juga dilakukan dimana rangkaian tersebut disatukan dengan pembacaan *temperature controller* 2 dikarenakan jarak *termocouple* cetakan yang lebih dekat dibandingkan kondisi sebelumnya. Pemberian *draft angle* sebesar 3 derajat pada kedua cetakan juga dilakukan agar dapat memudahkan proses pelepasan produk. Setelah dilakukan modifikasi kedua terhadap mesin *extruder* Laboratorium Proses Produksi dan cetakan, dilakukan uji coba kembali sebanyak dua kali untuk masing-masing variasi temperatur yang digunakan. Variasi temperatur yang digunakan adalah 255°C, 260°C, dan 265°C.

Hasil percobaan yang dilakukan menunjukkan bahwa sebagian besar dari produk yang dihasilkan retak, menempel dan sulit untuk dikeluarkan dari cetakan. Hal ini disebabkan karena permukaan cetakan yang tidak rata akibat terdapatnya pengotor yang berasal dari sisa material yang tertinggal di dalam cetakan. Sisa material tersebut menyebabkan permukaan rongga cetakan menjadi tidak rata. Kondisi produk *gear* setelah proses pembukaan cetakan dilakukan dapat dilihat pada Gambar III.9.



Gambar III.9 Contoh Kondisi 2 Produk *Gear* Saat Pembukaan Cetakan

Proses pengeluaran produk yang retak mengakibatkan produk terpecah menjadi beberapa bagian. Pecahan-pecahan yang terbentuk berukuran cukup kecil dan sulit untuk dirakit. Selain itu, proses pengeluaran produk yang

menempel juga mengakibatkan sejumlah kerusakan pada rongga cetakan. Contoh dari kondisi produk yang terpecah saat proses pengeluaran produk dilakukan dapat dilihat pada Gambar III.10.



Gambar III.10 Contoh Kondisi Produk Gear Saat Pelepasan Produk
Proses perakitan dilakukan pada bagian produk yang terpecah untuk

melihat apakah material PET flakes dapat mengisi seluruh permukaan cetakan atau tidak. Perakitan yang dilakukan tidak dapat menghasilkan produk yang lengkap dikarenakan terdapat beberapa pecahan yang cukup kecil sehingga sulit untuk dirakit. Enam produk hasil percobaan setelah proses perakitan dilakukan dapat dilihat pada Gambar III.11.



Gambar III.11 Produk Hasil Percobaan Setelah Modifikasi II dan Proses Perakitan

Pada Gambar III.11, terlihat bahwa produk 1 dan 2 dapat memenuhi hampir seluruh rongga cetakan, dapat dikeluarkan dengan mudah, dan tidak terpecah. Namun pada produk 3 dan seterusnya terlihat bahwa produk mengalami retak di beberapa titik dan terdapat pengisian yang tidak sempurna. Retak yang terdapat pada permukaan produk membuat produk menjadi sulit untuk dikeluarkan dan akan terpecah saat dilakukan proses pengeluaran. Percobaan kembali dilakukan untuk melihat apakah material plastik PET dapat membentuk produk *gear* secara berulang dan stabil. Berikut adalah hasil percobaan ke 14 hingga 18 dengan adanya variasi terhadap temperatur dan komposisi material.





Gambar III.12 Produk Hasil Percobaan ke 14 s/d 18 Setelah Perakitan

Tiga percobaan awal menunjukkan semakin parahnya produk *gear* hasil daur ulang plastik PET. Jumlah bagian yang retak semakin meningkat karena kerusakan dari cetakan *gear* yang terakumulasi. Pada awalnya material yang digunakan adalah 100% PET *flakes*. Sifat produk yang dihasilkan dari penggunaan 100% material bekas adalah sangat rapuh dan mudah retak. Dua percobaan terakhir dilakukan perubahan terhadap komposisi material yaitu 98% PET *flakes* dan 2% *virgin* PET resin. Penetapan komposisi material telah melalui percobaan sebanyak empat kali hingga dicapai bentuk produk yang cukup kuat serta berkurangnya retakan yang dihasilkan.

Hasil dari dua percobaan terakhir menunjukkan bahwa produk yang dihasilkan lebih kuat dari sebelumnya, namun produk belum dihasilkan secara stabil. Pada dua percobaan terakhir terlihat bahwa masih terdapat sedikit retakan dan pengisian yang tidak sempurna. Jika dilihat dari kondisi kerusakan cetakan, kondisi produk, dan tingkat kemampuan material plastik untuk dapat membentuk produk *gear* secara berulang dan stabil, maka dapat disimpulkan bahwa pada penelitian ini, material PET *flakes* belum dapat membentuk produk dengan bentuk yang kompleks. Kerusakan juga terjadi beberapa kali pada bagian *band*

heater nozzle yang menyebabkan proses penggantian *heater* perlu dilakukan. Hal ini disebabkan karena terdapat lelehan material yang memasuki celah-celah antara *flow adjuster*. Lelehan plastik yang keluar dari celah *flow adjuster* pada akhirnya menyentuh bagian dalam *band heater*. Kontaminasi dari lelehan plastik ini menyebabkan makin besarnya hambatan pada arus listrik *heater* hingga menyebabkan kerusakan total pada *heater*.

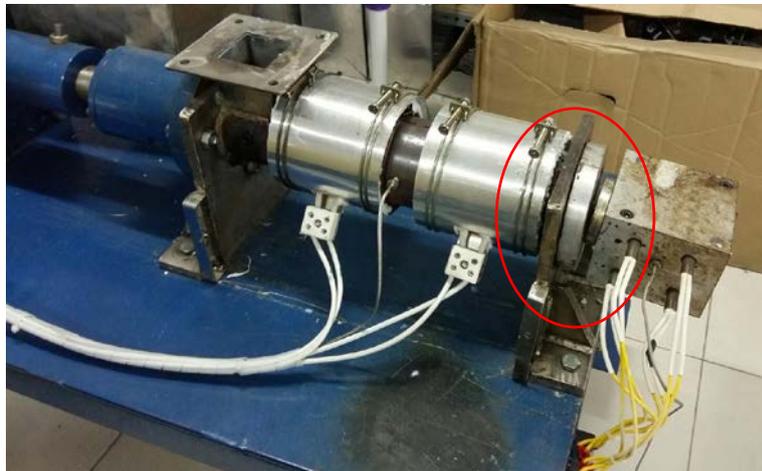
Alternatif selanjutnya yang dapat dilakukan adalah dengan mengubah konstruksi bagian depan mesin sehingga *band heater nozzle* tidak lagi dibutuhkan selama proses pencetakan berlangsung. Konstruksi mesin sebelum modifikasi bagian *nozzle* dilakukan dapat dilihat pada Gambar III.13.



Gambar III.13 Konstruksi Mesin Sebelum Modifikasi Bagian *Nozzle*

Gambar III.13 menunjukkan bahwa terdapat jarak yang cukup jauh antara ujung *barrel* dengan pengait atau *mounting* yang dipasang pada cetakan. Hal ini menyebabkan diperlukannya *heater* agar material tidak membeku sebelum dapat memasuki rongga cetakan. Proses modifikasi dilakukan dengan membuat sebuah piringan aluminium yang berfungsi sebagai pengganti *nozzle* sebelumnya. Ketebalan dari piringan aluminium tersebut hanya sekitar 20mm sehingga rambatan panas dari *band heater barrel* masih dapat menjaga temperatur dari lelehan plastik PET. Konstruksi piringan dibuat semirip mungkin dengan *nozzle* sebelumnya dimana bagian dalam berbentuk seperti kerucut atau corong yang dapat mengarahkan material secara langsung menuju ke bagian cetakan. Dimensi dari bagian *nozzle* sebelum dan sesudah dilakukannya

modifikasi dapat dilihat pada Lampiran A. Konstruksi mesin setelah modifikasi bagian *nozzle* dilakukan dapat dilihat pada Gambar III.14.



Gambar III.14 Konstruksi Mesin Setelah Modifikasi Bagian *Nozzle*

Hasil uji coba yang dilakukan setelah modifikasi bagian *nozzle* berhasil membuat lelehan plastik dapat mengalir dan memasuki cetakan dengan baik tanpa terjadinya pepadatan material. Dengan adanya modifikasi ini, fungsi dari *band heater nozzle* dapat dihilangkan sepenuhnya. Setelah modifikasi, percobaan kembali dilakukan dengan menggunakan cetakan *gear* dimana hasil yang didapat masih tetap sama seperti percobaan sebelumnya. Produk *gear* belum dapat memenuhi seluruh rongga cetakan dengan baik dan terpecah menjadi beberapa bagian seperti contoh pada Gambar III.12.

Penelitian selanjutnya difokuskan pada cetakan silinder dengan tingkat kompleksitas yang lebih rendah dibandingkan dengan cetakan *gear*. Pada cetakan ini, bagian *core cavity* yang sebelumnya terdapat pada cetakan berbentuk *gear* juga dihilangkan. Berdasarkan hasil penelitian, bagian *core cavity* yang berbentuk silinder kecil pada bagian tengah cetakan *gear* juga menyulitkan proses pengisian dan pengeluaran produk. Cetakan silinder memiliki ukuran yang sama dengan cetakan *gear* jika dilihat dari segi diameter dan tebal produk. Seluruh proses modifikasi yang dilakukan pada cetakan *gear* juga dilakukan pada cetakan silinder.

Selanjutnya dilakukan percobaan pertama pembuatan produk dengan menggunakan cetakan silinder. Hasil percobaan pertama menunjukkan bahwa produk silinder dapat dikeluarkan dengan mudah dari cetakan. Jumlah bagian yang retak juga berkurang dibandingkan dengan ketika cetakan *gear* digunakan.

Temperatur *barrel*, frekuensi *input*, waktu proses di dalam *barrel* yang digunakan adalah sebesar 255°C, 30Hz, dan 45 menit. Hasil percobaan pertama dengan menggunakan cetakan silinder dapat dilihat pada Gambar III.15.



Gambar III.15 Hasil Percobaan I Produk Silinder

Berdasarkan Gambar III.15, terlihat bahwa masih produk dapat dikeluarkan secara utuh dari cetakan silinder dan tidak terdapat retakan pada produk yang dihasilkan. Komposisi material yang digunakan adalah 98% PET *flakes* dan 2% *virgin* PET resin dengan total material sebanyak 150 gram. Namun pengisian produk masih belum sempurna sehingga dilakukan modifikasi pada cetakan dengan menambahkan 1 lubang venturi pada sisi lain cetakan. Lubang venturi dibuat dengan diameter sebesar 2,5 mm pada salah satu sisi cetakan agar udara yang terjebak dapat keluar secara maksimal saat proses pencetakan berlangsung. Posisi lubang venturi dibuat tegak lurus terhadap sumbu mesin *extruder* dan berada di bagian sisi bawah cetakan. Proses penambahan lubang ini memberikan hasil dimana terdapat penambahan volume terhadap produk yang dihasilkan sehingga pengisian produk menjadi lebih sempurna.

III.2 *Design of Experiment*

Dalam merancang sebuah eksperimen dibutuhkan penentuan mengenai respon, faktor, dan lever untuk setiap faktor yang jelas. Pada bagian ini akan dibahas mengenai tahapan perancangan yang dilakukan mulai dari penentuan variabel respon dan faktor, penentuan level faktor, pengacakan *treatment* dan pengumpulan data hasil *extrusion*, pengumpulan data respon, hingga pengolahan data. Berikut akan dijabarkan secara jelas mengenai poin-poin dari tahapan perancangan yang telah disebutkan.

III.2.1 Penentuan Variabel Respon

Variabel respon yang ditetapkan dalam penelitian ini adalah nilai kualitas dari bentuk ataupun tampilan produk hasil daur ulang botol plastik PET dengan menggunakan mesin *extruder*. Penilaian kualitas dilakukan dengan melibatkan beberapa kriteria yang berhubungan langsung dengan kualitas tampilan produk hasil daur ulang plastik. Kriteria kualitas produk hasil daur ulang plastik PET didapatkan dengan mengumpulkan beberapa jenis kriteria yang cocok dengan produk berdasarkan literatur dan hasil wawancara dengan *expert* yang ahli di bidang produksi kemasan plastik.

Menurut Groover (2010), terdapat beberapa jenis cacat yang umum ditemukan pada produk dengan sistem cetakan *injection molding* yaitu pengisian tidak sempurna (*short shot*), keluarnya lelehan plastik dari *mold cavity* (*flashing*), adanya udara yang terperangkap (*voids*), adanya cekungan yang tidak sengaja terbentuk pada produk (*sink marks*), terbentuknya garis akibat pertemuan dua aliran material dan kemudian membeku (*weld lines*). Berdasarkan hasil wawancara dengan *expert*, terdapat beberapa jenis cacat yang mempengaruhi kualitas produk plastik secara visual yaitu *flow lines*, *burn marks*, dan *preform color failure*. *Flow lines* berarti terdapat garis-garis, pola, atau *off toned color* yang muncul pada produk plastik yang dihasilkan. *Burn marks* berarti terdapatnya perbedaan warna di beberapa titik pada permukaan produk yang dikarenakan telah terjadinya degradasi material plastik akibat temperatur yang berlebihan. *Preform color failure* berarti terjadinya perlunturan warna asli dari material plastik yang digunakan secara keseluruhan atau terjadinya fenomena *yellowish* (kekuning-kuningan).

Beberapa jenis cacat yang telah disebutkan dapat dijadikan sebagai kriteria penilaian kualitas produk hasil daur ulang plastik PET dengan menggunakan mesin *extruder*. Berdasarkan literatur dan hasil wawancara, dapat ditentukan lima jenis kriteria yang berpengaruh secara langsung terhadap nilai kualitas produk yaitu *short shot*, *vacuum voids*, *flow lines*, *burn marks*, dan *preform color failure*. Kelima kriteria tersebut selalu muncul dan terlihat langsung pada produk yang dihasilkan.

III.2.2 Penentuan Faktor

Penentuan faktor didapat dari hasil pengamatan langsung terhadap mesin *extruder* Laboratorium Proses Produksi dan penelitian pendahuluan yang

telah dilakukan. Faktor yang akan digunakan dalam eksperimen merupakan faktor yang terdapat langsung pada mesin dan memiliki pengaturan yang jelas serta rentang nilai yang dapat diatur secara akurat pada mesin *extruder*. Berdasarkan hasil penelitian pendahuluan, terdapat tiga faktor yang dapat dijadikan sebagai *input factor* yaitu temperatur, frekuensi *input* yang mengatur kecepatan putar *screw*, dan lamanya material PET *flakes* diproses dalam *barrel*. Pada faktor temperatur dan frekuensi *input* terdapat cara pengaturan yang jelas serta rentang nilai yang dapat diatur secara akurat melalui tampilan pada *temperature controller* dan *inverter* mesin. Sedangkan untuk lamanya material diproses di dalam *barrel*, tidak terdapat indikator yang mengukur faktor tersebut secara jelas. Faktor ketiga ini akhirnya tidak dimasukkan ke dalam perancangan eksperimen.

Pembuatan produk hasil daur ulang botol plastik PET hanya melibatkan dua faktor yaitu temperatur *barrel* dan frekuensi *input*. Faktor-faktor lainnya yang tidak dapat diukur secara langsung pada mesin, akan berada pada nilai yang tetap selama eksperimen berlangsung. Waktu proses material dalam *barrel* ditetapkan selama 40-45 menit dimana nilai waktu tersebut merupakan lama waktu terbaik yang didapatkan selama penelitian pendahuluan dilakukan. Hasil uji coba pelelehan PET *flakes* dengan lamanya waktu proses di dalam *barrel* yang bervariasi dapat dilihat pada Gambar III.16.



Gambar III.16 Hasil Uji Coba PET *Flakes* dengan Variasi Waktu Proses *Barrel*

Hasil percobaan pada Gambar III.16 menggunakan suhu paling minimum yang dapat berhasil mengisi seluruh rongga cetakan yaitu 255°C. Hasil percobaan tersebut menunjukkan jika waktu proses *barrel* kurang dari 40 menit, maka lelehan plastik belumlah sempurna. Hal ini pernah diuji cobakan dan hasil yang didapat adalah dengan waktu kurang dari 40 menit, material PET tidak dapat mengisi rongga cetakan dikarenakan masih terdapat sisa *flakes* yang belum meleleh secara sempurna. Ketika waktu minimum yang digunakan berada

antara 40-45 menit, maka dihasilkan lelehan material yang sempurna, dapat mengisi seluruh rongga cetakan dan tidak terdapat perubahan warna yang signifikan. Waktu proses dalam *barrel* selama 40-45 menit dipilih karena rentang tersebut merupakan rentang yang paling tepat untuk menghasilkan produk yang sesuai dengan spesifikasi. Percobaan juga dilakukan untuk setiap variasi temperatur mulai dari 255°C hingga 275°C. Kesimpulan yang didapat untuk setiap variasi temperatur adalah jika waktu proses di dalam *barrel* melebihi 60 menit, maka akan terjadi perubahan warna secara drastis pada produk yang menandakan material plastik telah mengalami dekomposisi.

III.2.3 Penentuan Level Faktor

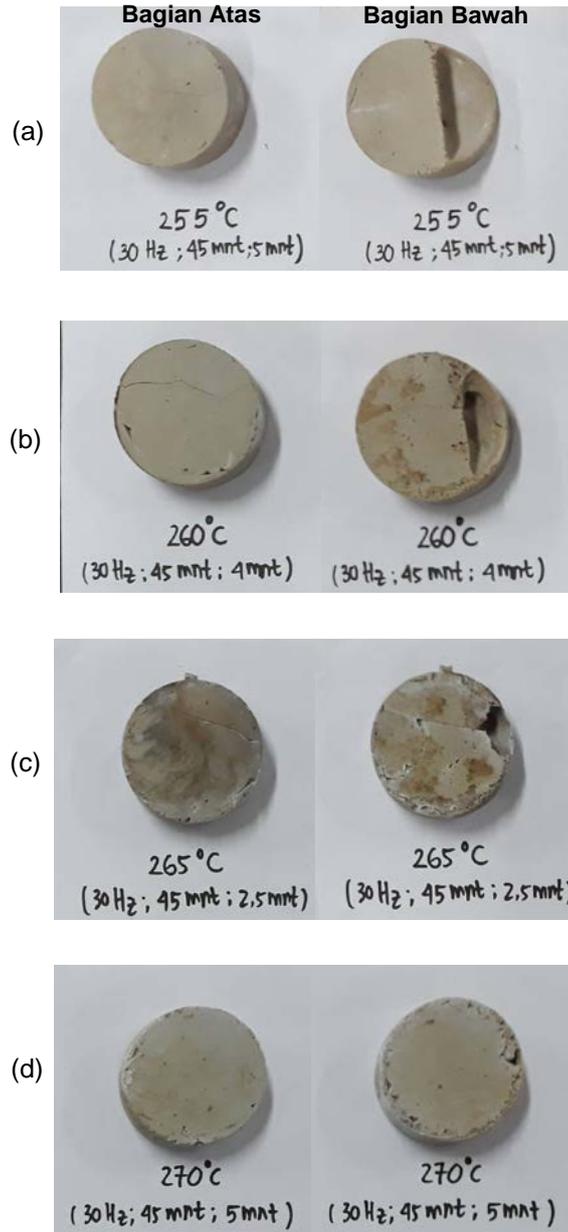
Pada saat menentukan faktor yang mungkin mempengaruhi hasil *extrusion*, akan ditentukan pula level dari setiap faktor yang akan digunakan dalam eksperimen. Penentuan ini didasarkan pada hasil percobaan awal setelah proses penelitian pendahuluan dilakukan. Jenis perancangan eksperimen yang digunakan adalah 2^2 *factorial design* dimana terdapat masing-masing 2 level untuk setiap faktor yang ada. Level tersebut akan dibagi menjadi dua yaitu *low level* dan *high level*. Nilai level faktor yang lebih rendah akan ditetapkan sebagai *low level* dan nilai level faktor yang lebih tinggi akan ditetapkan sebagai *high level*.

Tahap pertama akan ditentukan nilai ekstrim atau rentang dari faktor temperatur *barrel* yang akan diteliti. Percobaan dilakukan sebanyak enam kali dimana rentang temperatur yang digunakan berada antara 250°C hingga 275°C dan frekuensi *input* sebesar 30Hz. Berdasarkan hasil percobaan, pada temperatur 250°C, material plastik tidak meleleh dengan sempurna sehingga tidak berhasil membentuk produk. Rentang dari faktor temperatur *barrel* ditetapkan antara 255°C sampai 275°C.

Tahap kedua akan ditentukan nilai ekstrim atau rentang dari faktor frekuensi *input* yang akan diteliti. Percobaan dilakukan sebanyak lima kali dimana rentang frekuensi *input* yang digunakan berada antara 10Hz hingga 50Hz dan temperatur *barrel* tetap yaitu sebesar 260°C. Pemilihan nilai temperatur *barrel* dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa kriteria seperti warna produk, waktu pengisian cetakan, dan pengisian produk. Berdasarkan hasil percobaan, pada frekuensi *input* sebesar 10Hz, material plastik tidak

berhasil masuk ke dalam rongga cetakan sehingga tidak dapat membentuk produk. Frekuensi *input* yang rendah mengakibatkan aliran material menjadi lambat serta diikuti dengan proses pembekuan yang cepat. Rentang dari faktor frekuensi *input* ditetapkan antara 20Hz sampai 50Hz.

Hasil percobaan dengan menggunakan frekuensi 30Hz dan rentang temperatur *barrel* antara 255°C hingga 275°C dapat dilihat pada Gambar III.17.





Gambar III.17 Hasil *Extrusion* dengan Frekuensi 30Hz dan Temperatur *Barrel*
 (a) 255°C (b) 260°C (c) 265°C (d) 270°C (e) 275°C

Berdasarkan hasil penelitian *Precious Plastic* (2017), dikatakan bahwa temperatur pada bagian *nozzle* harus sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan temperatur bagian *barrel*. Dikarenakan proses modifikasi yang membuat penggunaan *heater* pada bagian *nozzle* dihilangkan, maka peningkatan temperatur sebesar 5°C diberikan pada *heater* cetakan. Hasil rekapitulasi percobaan yang dilakukan dengan variasi temperatur *barrel* dapat dilihat pada Tabel III.1.

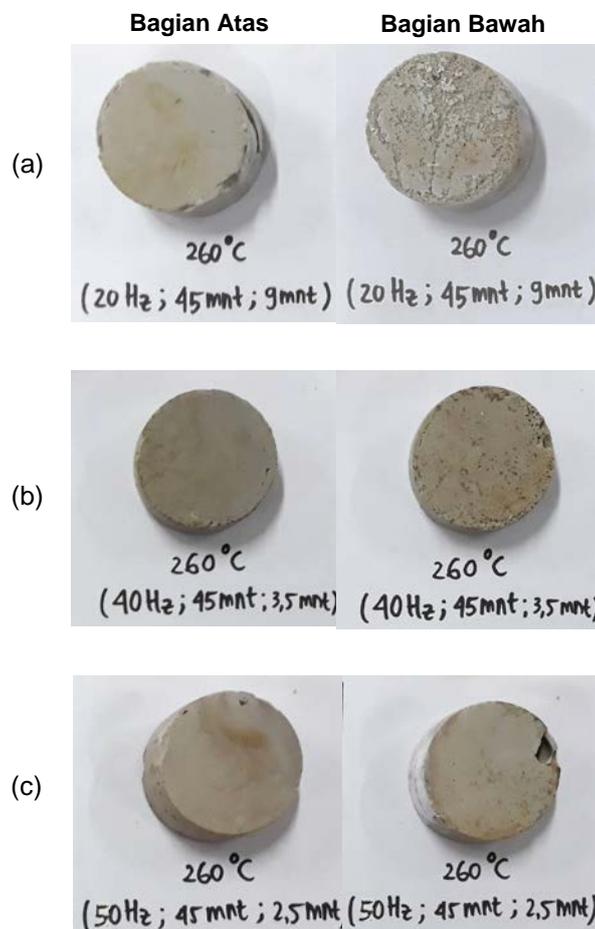
Tabel III.1 Rekapitulasi Percobaan dengan Variasi Temperatur *Barrel*

Percobaan Ke-	Frekuensi <i>Input</i>	Temperatur <i>Barrel</i>	Waktu Pengisian Cetakan
1	30Hz	255°C	± 5 menit
2	30Hz	260°C	± 4 menit
3	30Hz	265°C	± 2,5 menit
4	30Hz	250°C	(tidak ada produk yang dihasilkan)
5	30Hz	270°C	± 5 menit
6	30Hz	275°C	± 3 menit

Selanjutnya dilakukan pemilihan terhadap nilai temperatur *barrel* yang akan digunakan dalam penentuan rentang dari faktor frekuensi *input* yang akan digunakan. Temperatur *barrel* yang digunakan adalah sebesar 260°C. Pemilihan nilai temperatur *barrel* dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa kriteria seperti warna produk, waktu pengisian cetakan, dan pengisian produk. Pada temperatur 255°C dan 260°C, produk dihasilkan dengan warna yang cukup terang. Dari kedua produk tersebut, temperatur 260°C memiliki waktu pengisian cetakan yang lebih cepat dibandingkan temperatur 255°C. Pengisian produk dengan temperatur 260°C juga lebih sempurna dibandingkan dengan temperatur

255°C. Oleh karena itu, nilai temperatur yang digunakan dalam penentuan rentang nilai frekuensi *input* yang digunakan adalah 260°C.

Percobaan dilakukan sebanyak tiga kali dimana rentang frekuensi *input* yang digunakan berada antara 20Hz hingga 50Hz dengan temperatur *barrel* sebesar 260°C. Pada percobaan ini, material PET *flakes* dapat mengisi rongga cetakan dengan baik pada kedua sisi cetakan. Hasil percobaan dengan menggunakan temperatur 260°C dan rentang frekuensi antara 20Hz hingga 50Hz dapat dilihat pada Gambar III.18.



Gambar III.18 Hasil *Extrusion* dengan Temperatur *Barrel* 260°C dan Frekuensi (a) 20Hz (b) 40Hz (c) 50Hz

Berdasarkan Gambar III.18, terlihat bahwa pada temperatur 260°C dan frekuensi *input* 40Hz, mulai terbentuk jenis cacat *vacuum voids* yang terlihat dari tampilan luar produk hasil daur ulang. Hasil rekapitulasi percobaan yang dilakukan dengan variasi frekuensi *input* dapat dilihat pada Tabel III.2.

Tabel III.2 Rekapitulasi Percobaan dengan Variasi Frekuensi *Input*

Percobaan Ke-	Frekuensi <i>Input</i>	Temperatur <i>Barrel</i>	Waktu Pengisian Cetakan
1	40	260°C	± 3,5 menit
2	50	260°C	± 2,5 menit
3	20	260°C	± 9 menit

Selanjutnya dilakukan penentuan level untuk setiap faktor yang akan diteliti. Setiap faktor yang diteliti memiliki kriteria yang berbeda dengan mempertimbangkan kriteria yang mungkin mempengaruhi sebuah faktor saat eksperimen berlangsung. Penentuan level untuk setiap faktor didasarkan pada beberapa kriteria yang dapat dilihat pada Tabel III.3.

Tabel III.3 Pembagian Kriteria Penentuan Level Faktor

Faktor	Kriteria
Temperatur <i>Barrel</i>	-perubahan warna -adanya <i>flow lines</i> (<i>off toned color</i> pada produk)
Frekuensi <i>Input</i>	-pengisian produk -kualitas permukaan - <i>bubbles</i>

Berdasarkan Tabel III.3, ditetapkan bahwa hasil pemilihan *low level* dan *high level* untuk faktor temperatur *barrel* secara berurutan adalah sebesar 255°C dan 270°C. Pada Gambar III.17, terlihat bahwa warna produk pada temperatur 255°C dan 270°C masih memenuhi spesifikasi atau dengan kata lain material tidak mengalami dekomposisi. *Flow lines* yang terbentuk pada temperatur 255°C dan 270°C lebih sedikit dibandingkan dengan hasil percobaan lainnya. Selanjutnya ditetapkan hasil pemilihan *low level* dan *high level* untuk faktor frekuensi *input* secara berurutan adalah sebesar 30Hz dan 50Hz. Pada Gambar III.18, terlihat bahwa kualitas permukaan produk yang dihasilkan pada frekuensi 30Hz dan 50Hz lebih baik dibandingkan dengan hasil percobaan lainnya. Jenis cacat *vacuum voids* atau *bubbles* juga lebih sedikit meskipun pengisian produk pada frekuensi 30Hz dan 50Hz belum sempurna.

III.2.4 Pengacakan *Treatment* dan Pengumpulan Data Hasil *Extrusion*

Pengacakan *treatment* selanjutnya dilakukan sebelum proses pengumpulan data hasil *extrusion*. Pengacakan dilakukan dengan menggunakan *uniform random numbers* yang melambangkan kombinasi *treatment* yang akan

dilakukan dalam eksperimen. Kombinasi *treatment* terdiri atas empat jenis perlakuan yang dilambangkan dengan *treatment* A, B, C, dan D. Kombinasi *treatment* ditentukan berdasarkan 2^2 *factorial design* yang akan menghasilkan kombinasi sebanyak empat buah. Empat buah kombinasi ini melihat jumlah level dari banyaknya faktor yang diteliti dalam eksperimen. Pada tabel *uniform random number*, akan diberikan 12 *random number* dimana setiap *treatment* akan ditugaskan secara berurutan. *Random* atau acak berarti peluang terpilihnya *treatment* yang dilibatkan sama besar. Hasil penugasan *treatment* menggunakan bilangan acak dapat dilihat pada Tabel III.4.

Tabel III.4 Penugasan *Treatment* dengan Menggunakan *Random Number*

<i>Random Number (Unsorted)</i>	<i>Rank of Random Number (Experimental Unit)</i>	<i>Treatment</i>	Temperatur Barrel (°C)	Frekuensi Input (Hz)
0,874088056	11	A	255	30
0,687704453	9	A	255	30
0,918936950	12	A	255	30
0,392725259	7	B	255	50
0,702578117	10	B	255	50
0,235853395	4	B	255	50
0,361704179	6	C	270	30
0,150949121	3	C	270	30
0,012723822	1	C	270	30
0,527523227	8	D	270	50
0,244968628	5	D	270	50
0,103447947	2	D	270	50

Percobaan dilakukan sebanyak 12 kali dimana pada setiap kombinasi *treatment* terdapat replikasi sebanyak tiga kali. Selanjutnya dilakukan pengurutan terhadap bilangan acak yang dihasilkan dari bilangan terkecil hingga terbesar. Hasil pengurutan *treatment* berdasarkan pengacakan yang telah dilakukan dapat dilihat pada Tabel III.5.

Tabel III.5 Urutan Pengambilan Data dari Hasil Pengacakan *Treatment*

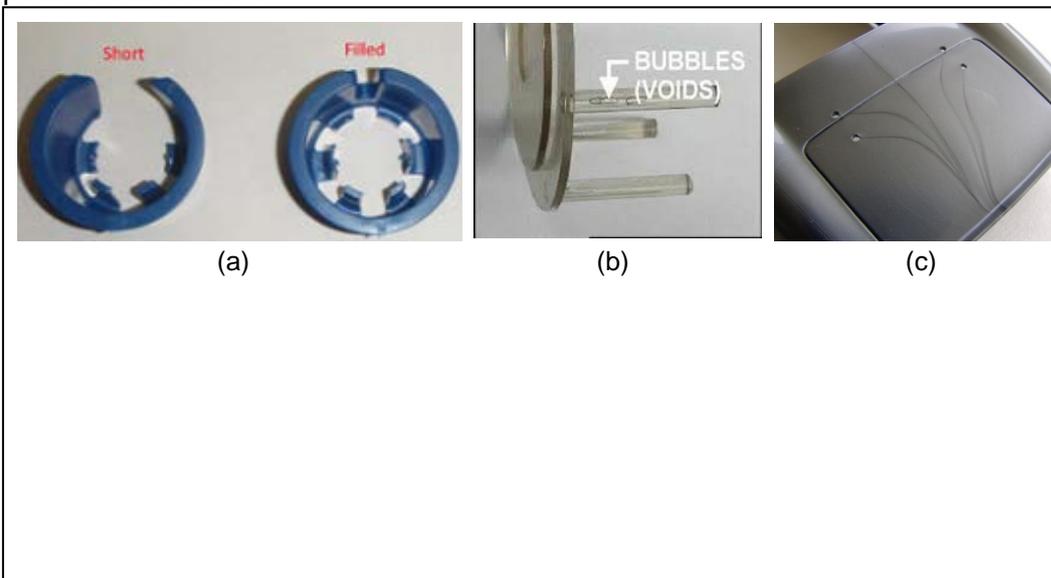
Pengambilan ke-	<i>Random Number (Sorted)</i>	<i>Rank of Random Number (Experimental Unit)</i>	<i>Treatment</i>	Temperatur Barrel (°C)	Frekuensi Input (Hz)
1	0,01272382	1	C	270	30
2	0,10344795	2	D	270	50
3	0,15094912	3	C	270	30

4	0,23585339	4	B	255	50
5	0,24496863	5	D	270	50
6	0,36170418	6	C	270	30
7	0,39272526	7	B	255	50
8	0,52752323	8	D	270	50
9	0,68770445	9	A	255	30
10	0,70257812	10	B	255	50
11	0,87408806	11	A	255	30
12	0,91893695	12	A	255	30

Berdasarkan Tabel III.4, unit eksperimental pertama yang akan dilakukan dengan menggunakan material PET *flakes* adalah *treatment C* dengan kombinasi temperatur *barrel* sebesar 270°C dan frekuensi *input* sebesar 30Hz. Setelah urutan pengambilan data berhasil didapat, maka selanjutnya akan dilakukan eksperimen dengan hasil *extrusion* yang dapat dilihat pada Lampiran B.

III.2.5 Pengumpulan Data Respon

Variabel respon yang ditetapkan dalam penelitian adalah nilai kualitas produk hasil *extrusion* material PET *flakes*. Berdasarkan sub bab III.2.1, terdapat lima jenis kriteria yang berpengaruh secara langsung terhadap nilai kualitas produk yaitu *short shot*, *vacuum voids*, *flow lines*, *burn marks*, dan *preform color failure*. Sebagai contoh, beberapa jenis cacat yang mempengaruhi kualitas produk plastik secara visual dan dijadikan sebagai kriteria kualitas dapat dilihat pada Gambar III.19.





Gambar III.19 Kriteria Kualitas Produk Hasil *Extrusion*
 (a) *Short Shot* (b) *Vacuum Voids* (c) *Flow Lines* (d) *Burn Marks* (e) *Preform Color Failure*
 (Sumber: www.creativemechanisms.com)

Setelah didapat kriteria kualitas yang akan digunakan dalam penilaian kualitas produk dari segi tampilan atau bentuk, dilakukan pembobotan terhadap tingkat kepentingan dari setiap kriteria. Pembobotan dibuat dalam bentuk persentase sehingga dapat diketahui kriteria yang memiliki persentase tingkat kepentingan tertinggi dibandingkan kriteria kualitas lainnya. Penentuan tingkat kepentingan didapat dari hasil pengisian kuesioner oleh tiga orang penilai dengan menggunakan sistem pembobotan dimana terdapat rentang nilai antara satu sampai dengan lima. Semakin tinggi nilai yang diberikan, akan menunjukkan semakin besarnya bobot untuk suatu kriteria kualitas. Hasil pembobotan setiap kriteria kualitas produk daur ulang PET dapat dilihat pada Tabel III.6.

Tabel III.6 Hasil Pembobotan Setiap Kriteria Kualitas Produk Daur Ulang PET

No	Kriteria Kualitas Produk	Penilai 1	Penilai 2	Penilai 3	Rata-Rata	Bobot (%)
1.	<i>Flow Lines</i>	2	4	3	3,000	16,667
2.	<i>Short Shot</i>	5	5	5	5,000	27,778
3.	<i>Air Bubbles</i>	3	5	4	4,000	22,222
4.	<i>Burn Marks</i>	3	4	3	3,333	18,519
5.	<i>Preform Color Failure</i>	3	3	2	2,667	14,815

Persentase bobot untuk setiap kriteria didapat melalui pembagian antara nilai rata-rata setiap kriteria dengan total rata-rata keseluruhan. Berdasarkan Tabel III.6, dapat dilihat bahwa kriteria *short shot* memiliki tingkat kepentingan tertinggi yaitu sebesar 27,778%. Kemudian penilaian 12 produk hasil *extrusion* dilakukan untuk setiap kriteria kualitas yang ada. Skala penilaian setiap produk untuk setiap kriteria kualitas menggunakan prinsip skor atau skala rasio dimana terdapat nilai dari 0 sampai 10. Nilai 0 berarti kualitas produk sangat tidak baik

dan nilai 10 berarti kualitas produk sangat baik. Hasil penilaian ketiga *expert* atau penilai dapat dilihat pada Tabel III.7

Tabel III.7 Hasil Penilaian Setiap Kriteria Kualitas Produk

Produk	Kriteria Kualitas Produk				
	<i>Flow Lines</i>	<i>Short Shot</i>	<i>Air Bubbles</i>	<i>Burn Marks</i>	<i>Preform Color Failure</i>
Penilai 1					
1	6	7	5	6	4
2	7	6	5	7,5	3
3	7,5	5	4	6	7
4	7,5	7,5	6	6,5	7
5	7	6	5	6	6,5
6	7	7	4	6	6
7	5	5	4	5	5
8	6	7,5	7	6	6,5
9	6	7	7	6	7
10	6	7,5	7	5	7,5
11	7	6	5	6	6,5
12	5	7,5	7	7	6,5

(lanjut)

Tabel III.7 Hasil Penilaian Setiap Kriteria Kualitas Produk (lanjutan)

Produk	Kriteria Kualitas Produk				
	<i>Flow Lines</i>	<i>Short Shot</i>	<i>Air Bubbles</i>	<i>Burn Marks</i>	<i>Preform Color Failure</i>
Penilai 2					
1	4	6	5	5	4
2	3	4	4	7	3
3	7	4	3	6	6
4	8	7	8	8	7
5	6	4	4	6	5
6	6	5	5	5	5
7	6	3	3	6	5
8	5	7	7	5	5
9	7	6	6	7	7
10	8	7	7	3	8
11	6	5	5	5	6
12	6	6	6	4	6
Penilai 3					
1	9	7	6	5	4
2	9	5	6	5	4

3	7	8	6	7	5
4	6	4	7	6	6
5	9	4	7	7	6
6	7	5	5	6	7
7	8	4	7	7	7
8	8	7	7	6	7
9	8	5	7	7	7
10	8	9	7	6	8
11	7	6	7	6	8
12	8	8	7	7	7

Selanjutnya masing-masing nilai dari ketiga penilai untuk setiap kriteria kualitas produk dirata-ratakan. Hal ini akan menghasilkan nilai rata-rata produk untuk setiap kriteria kualitas produk. Nilai rata-rata kualitas untuk satu produk secara keseluruhan didapat dari hasil perkalian antara bobot tingkat kepentingan masing-masing kriteria dengan nilai rata-rata untuk setiap kriteria. Nilai rata-rata kualitas produk hasil *extrusion* dapat dilihat pada Tabel III.8.

Tabel III.8 Nilai Rata-Rata Kualitas Produk Hasil *Extrusion*

Produk	Kriteria Kualitas Produk					Nilai Rata-Rata Kualitas Produk
	<i>Flow Lines</i> (16,667%)	<i>Short Shot</i> (27,778%)	<i>Air Bubbles</i> (22,222%)	<i>Burn Marks</i> (18,519%)	<i>Preform Color Failure</i> (14,815%)	
1	6,333	6,667	5,333	5,333	4,000	5,673
2	6,333	5,000	5,000	6,500	3,333	5,253
3	7,167	5,667	4,333	6,333	6,000	5,793
4	7,167	6,167	7,000	6,833	6,667	6,716
5	7,333	4,667	5,333	6,333	5,833	5,741
6	6,667	5,667	4,667	5,667	6,000	5,660
7	6,333	4,000	4,667	6,000	5,667	5,154
8	6,333	7,167	7,000	5,667	6,167	6,565
9	7,000	6,000	6,667	6,667	7,000	6,586
10	7,333	7,833	7,000	4,667	7,833	6,978
11	6,667	5,667	5,667	5,667	6,833	6,006
12	6,333	7,167	6,667	6,000	6,500	6,602

Melalui Tabel III.8 terlihat bahwa nilai rata-rata kualitas produk hasil *extrusion* hanya berada pada rentang nilai 5 hingga 6 saja. Perbedaan nilai rata-rata kualitas produk tidak terlalu jauh meskipun kombinasi *treatment* yang digunakan berbeda. Selanjutnya data respon ini akan dianalisis dengan menggunakan model statistik ANOVA.

III.2.6 Pengolahan Data

Metode statistik ANOVA Multifaktor (*Analysis of Variance*) digunakan pada pengolahan data eksperimen untuk mengetahui pengaruh kedua faktor terhadap variabel respon produk hasil daur ulang PET. Sebelum dilakukan pengujian dengan ANOVA, perlu dilakukan pengujian terhadap pemenuhan asumsi penggunaan uji ini. Pengujian ketiga asumsi ANOVA menggunakan data residual yang didapat dari selisih antara nilai observasi dengan nilai estimasi. Hasil perhitungan data residual untuk 12 produk yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel III.9.

Tabel III.9 Data Residual Hasil Eksperimen

Produk Ke-	<i>Treatment</i>	Temperatur <i>Barrel</i> (°C)	Frekuensi <i>Input</i> (Hz)	Residual
1	C	270	30	-0,03567
2	D	270	50	-0,60000
3	C	270	30	0,08433
4	B	255	50	0,43333
5	D	270	50	-0,11200
6	C	270	30	-0,04867
7	B	255	50	-1,12867
8	D	270	50	0,71200
9	A	255	30	0,18800
10	B	255	50	0,69533
11	A	255	30	-0,39200
12	A	255	30	0,20400

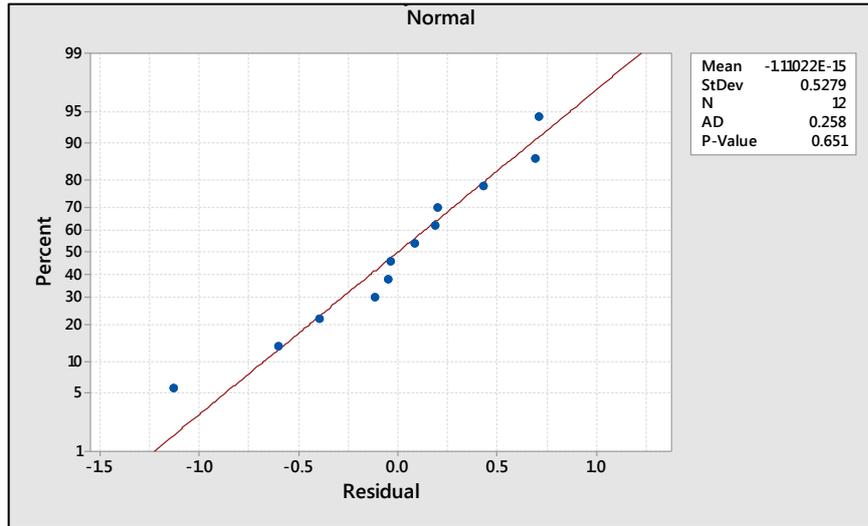
Hipotesis awal (H_0) dan hipotesis tandingan (H_1) dalam pengujian normalitas dan homogenitas variansi ANOVA terhadap data residual terdiri atas:

- H_0 : Data berdistribusi normal

H_1 : Data tidak berdistribusi normal
- H_0 : $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_n^2$

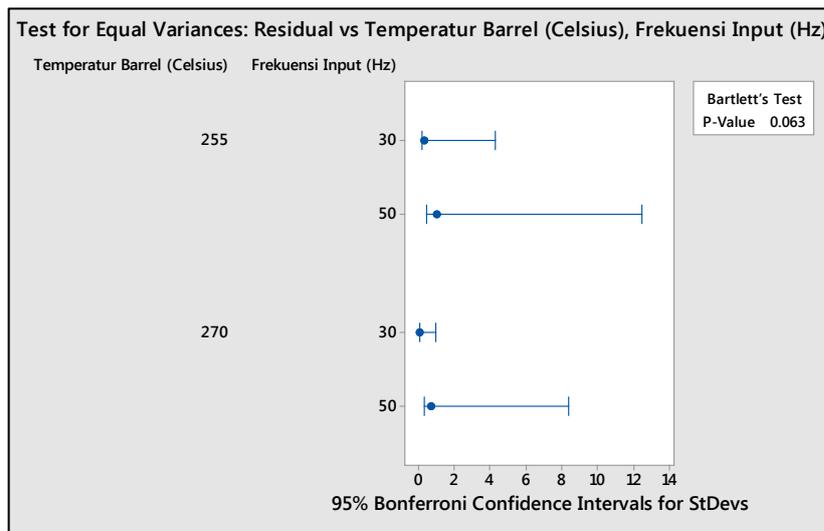
H_1 : Minimal salah satu σ_i^2 berbeda

Pengujian asumsi normalitas data dapat dilakukan dengan membuat *normal probability plot* dari data residual. Pengujian normalitas data menggunakan *software* Minitab dengan *significant level* (α) sebesar 0,05 dan didapat hasil pada Gambar III.20.



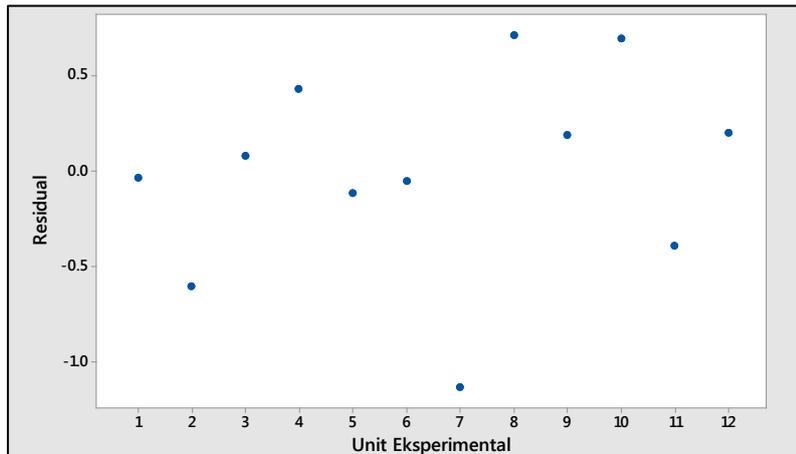
Gambar III.20 Uji Normalitas Data Residual Hasil *Extrusion*

Berdasarkan Gambar III.20, dapat dilihat bahwa nilai *p-value* data residual lebih besar dari nilai α yang digunakan sehingga disimpulkan bahwa data hasil eksperimen berdistribusi normal. Selanjutnya dilakukan pengujian asumsi variansi antar populasi yang sama besar dengan melakukan *test for equal variances* Hasil pengujian asumsi kedua dapat dilihat pada Gambar III.21.



Gambar III.21 Uji Variansi Data Residual Hasil *Extrusion*

Gambar III.21 menunjukkan bahwa nilai *p-value* data residual berdasarkan uji *Bartlett* lebih besar dari nilai α yang digunakan sehingga disimpulkan bahwa variansi antar populasi hasil *extrusion* sama besar. Uji *Bartlett* digunakan apabila data residual berdistribusi normal. Pengujian asumsi independensi juga dilakukan dengan membuat *scatter plot* dari data residual menggunakan *software* Minitab. Hasil pengujian asumsi independensi data dapat dilihat pada Gambar III.22.



Gambar III.22 Uji Independensi Data Residual Hasil *Extrusion*

Gambar III.22 menunjukkan bahwa tidak terdapat sebuah pola atau kecenderungan pada data residual sehingga tidak ada keterkaitan antara satu produk hasil *extrusion* terhadap produk lainnya. Pengujian asumsi pada penelitian ini menunjukkan bahwa data hasil eksperimen dapat dianalisis dengan akurat menggunakan model statistik ANOVA. Hipotesis awal (H_0) dan hipotesis tandingan (H_1) dalam pengujian ANOVA untuk kedua faktor terdiri atas:

1. H_0 : Tidak ada pengaruh antara parameter temperatur terhadap rata-rata nilai kualitas hasil *extrusion*.
 H_1 : Ada pengaruh antara parameter temperatur terhadap rata-rata nilai kualitas hasil *extrusion*.
2. H_0 : Tidak ada pengaruh antara parameter frekuensi *input* terhadap rata-rata nilai kualitas hasil *extrusion*.
 H_1 : Ada pengaruh antara parameter frekuensi *input* terhadap rata-rata nilai kualitas hasil *extrusion*.
3. H_0 : Tidak ada interaksi antara parameter temperatur dan frekuensi *input*.
 H_1 : Ada interaksi antara parameter temperatur dan frekuensi *input*.

Pengujian ANOVA dilakukan dengan menggunakan *software* Minitab. Nilai *significant level* (α) yang digunakan adalah sebesar 0,05. Hasil pengujian ANOVA untuk hasil *extrusion* material PET *flakes* dapat dilihat pada Gambar III.23.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Temperatur Barrel	1	0.93912	0.939121	2.45	0.156
Frekuensi Input	1	0.00063	0.000631	0.00	0.969
Temperatur Barrel*Frekuensi Input	1	0.05057	0.050570	0.13	0.726
Error	8	3.06602	0.383252		
Total	11	4.05634			

Gambar III.23 Hasil Pengujian ANOVA untuk PET *Flakes Extrusion*

Berdasarkan Gambar III.23, didapatkan nilai *p-value* untuk masing-masing faktor serta interaksi antar faktor terhadap variabel respon yaitu nilai rata-rata kualitas produk. Hipotesis awal dapat ditolak apabila nilai *p-value* yang didapat lebih kecil dibandingkan nilai α . Kesimpulan yang dapat ditarik dari hasil pengujian ANOVA hasil *extrusion* PET *flakes* adalah sebagai berikut.

1. Tidak ada pengaruh antara parameter temperatur terhadap rata-rata nilai kualitas hasil *extrusion*.
2. Tidak ada pengaruh antara parameter frekuensi *input* terhadap rata-rata nilai kualitas hasil *extrusion*.
3. Tidak ada interaksi antara parameter temperatur dan frekuensi *input*.

Kesimpulan yang didapat berdasarkan hasil penelitian adalah produk hasil daur ulang PET menghasilkan rata-rata nilai kualitas yang seragam untuk temperatur *barrel* sebesar 255°C atau 270°C dan frekuensi *input* sebesar 30Hz dan 50 Hz. Tidak adanya interaksi menunjukkan bahwa tidak adanya pengaruh interaksi kedua faktor terhadap rata-rata nilai kualitas.

BAB IV

ANALISIS

Pada bab ini dijelaskan secara terperinci mengenai proses penelitian pendahuluan yang dilakukan, serta penentuan faktor dan level faktor. Selain itu dijelaskan juga analisis terhadap hasil pengujian ANOVA dan usulan yang dapat diberikan dalam rangka peningkatan nilai kualitas produk. Dalam sebuah penelitian, diperlukan analisis sebagai bagian dari proses evaluasi hasil pengolahan data yang telah dilakukan. Berikut merupakan pembahasan mengenai setiap poin analisis terkait dengan topik penelitian.

IV.1 Analisis Proses Penelitian Pendahuluan

Melalui penelitian pendahuluan dapat diketahui faktor-faktor apa saja yang mungkin untuk diatur dan diteliti terkait dengan penentuan parameter proses mesin *extruder*. Selain itu juga diketahui bagaimana proses *setting* pada mesin sehingga proses penelitian dapat berlangsung. Proses pengamatan dan percobaan awal dilakukan secara langsung untuk melihat faktor apa saja yang mungkin untuk diteliti dalam penelitian. Pada awalnya, penelitian ini terfokus pada penggunaan 100% material bekas yaitu PET *flakes* dalam menghasilkan produk-produk dengan bentuk yang kompleks. Penggunaan 100% material bekas ini bertujuan untuk meneliti bagaimana kemampuan dari bahan yang digunakan dalam menghasilkan produk berukuran kecil dengan bentuk yang kompleks. Kemampuan bahan dilihat melalui tampilan luar terlebih dahulu tanpa melihat ketahanan dari produk yang dihasilkan. Dugaan awal yang muncul dari penelitian ini adalah penggunaan 100% material PET bekas akan mengurangi ketahanan produk.

Penelitian pendahuluan diawali dengan dilakukannya percobaan untuk menghasilkan produk dengan bentuk yang kompleks seperti *gear* atau roda gigi. Cetakan dengan sistem *injection molding* digunakan dalam penelitian ini dimana komponen-komponen dasar yang terdapat dalam *molding* seperti *cope* dan *drag*, *sprue*, *mounting*, *cavity*, dan *core cavity* digunakan dalam proses perancangan cetakan. Terdapat satu buah cetakan lainnya dengan kompleksitas lebih rendah

dibandingkan produk *gear* yaitu cetakan dengan produk berbentuk silinder. Pada cetakan silinder ini, *core cavity* yang terdapat pada cetakan berbentuk *gear* dihilangkan untuk menyederhanakan bentuk produk. Produk berbentuk *gear* dan silinder dikembangkan dengan tujuan untuk menghasilkan produk dari material plastik bekas yang memiliki nilai guna yaitu dapat dijadikan sebagai souvenir.

Alasan penggunaan cetakan dengan bentuk yang lebih kompleks pada awal penelitian pendahuluan adalah agar didapatkan parameter proses mesin *extruder* dalam pembuatan produk hasil daur ulang PET yang lebih bermanfaat dan dapat digunakan secara umum. Parameter yang dapat digunakan secara umum berarti jika terdapat produk dengan tingkat kompleksitas yang mirip dengan produk *gear*, maka nilai parameter terbaik dari hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan untuk menghasilkan produk.

Proses *setting* pada mesin dibagi menjadi beberapa tahapan. Tahap pertama yang dilakukan adalah *pre-heating* mesin hingga mencapai temperatur yang diinginkan. Pada proses *pre-heating*, seluruh komponen *heater* dipanaskan hingga mencapai *set point* temperatur yang diinginkan. Temperatur komponen *heater* yang telah mencapai *set point* ditandai dengan menyalnya lampu indikator mesin. Selanjutnya material PET *flakes* dimasukkan melalui bagian *hopper* dengan jumlah tertentu. Beberapa percobaan telah dilakukan untuk menentukan jumlah material yang dibutuhkan setiap kali mesin dioperasikan. Pada awalnya bagian *barrel* diisi sebanyak 350gram PET *flakes* dimana kondisi ini membuat *barrel* terisi penuh. Percobaan ini menyebabkan terlalu banyak material sisa proses ekstrusi yang terbuang sia-sia. Material tersebut tidak dapat dilelehkan kembali karena telah terjadi perubahan struktur kimiawi dari material akibat pemanasan yang terlalu lama.

Pada akhirnya, dengan pengisian *barrel* sebanyak 150 gram telah dapat membentuk produk dengan berat total produk *gear* yang dihasilkan berkisar antara 35-38 gram. Selanjutnya akan dilakukan proses pelelehan material secara menyeluruh yang membutuhkan waktu sekitar 40-45 menit. Proses pelelehan dibantu dengan *screw* yang berfungsi untuk mencampurkan dan mengaduk material. Setelah material meleleh dengan sempurna, selanjutnya putaran *screw* akan mendorong material memasuki rongga cetakan. Rongga cetakan yang telah terisi penuh ditunjukkan dengan keluarnya lelehan plastik dari lubang venturi. Selanjutnya proses pendinginan dilakukan dengan bantuan kipas angin

agar temperatur dapat turun secara bertahap hingga mencapai 160°C. Temperatur sebesar 160°C digunakan saat proses pelepasan produk dari cetakan. Berdasarkan hasil percobaan, temperatur akhir produk yang terlalu rendah akan menyebabkan produk menjadi lengket dan sulit untuk dikeluarkan.

Selama proses penelitian pendahuluan berlangsung, dilakukan percobaan secara terus-menerus hingga didapatkan produk hasil daur ulang yang sesuai dengan spesifikasi. Proses percobaan yang dilakukan diiringi dengan proses modifikasi pada beberapa komponen mesin *extruder*. Proses modifikasi pertama yang dilakukan adalah menambahkan empat buah komponen *heater stick* pada bagian cetakan. Berdasarkan percobaan yang dilakukan sebelumnya, hampir seluruh material plastik dengan variasi pada temperatur *barrel* dan frekuensi *input* tidak dapat mengisi rongga cetakan dengan sempurna. Penambahan *heater* pada bagian cetakan bertujuan agar suhu dari lelehan plastik PET *flakes* dapat terjaga dan berhasil membentuk produk *gear*.

Temperature controller pada bagian cetakan dibuat terpisah dengan bagian *heater barrel*. Hal ini dikarenakan posisi *termocouple* bagian *heater barrel* yang cukup jauh dari bagian *nozzle* sehingga jika *controller* tidak dipisahkan maka pembacaan suhu aktual pada bagian *heater barrel* dan *heater* cetakan menjadi tidak akurat. *Termocouple* diletakkan sedekat mungkin dengan posisi *heater* yang akan diukur temperatur aktualnya. Proses modifikasi ini belum dapat menghasilkan produk *gear* yang utuh sehingga dilakukan proses modifikasi lainnya. Proses modifikasi tersebut dimulai dari pembuatan lubang venturi pada salah satu sisi cetakan hingga perubahan pada konstruksi bagian *nozzle*.

Modifikasi dilakukan pada bagian rongga kedua cetakan dengan menambahkan kemiringan atau *draft angle* sebesar tiga derajat. Menurut Schwartz (2016), *draft angle* merupakan sebuah persyaratan dalam mendesain cetakan dengan sistem *injection molding*. Aturan penggunaan *draft angle* sebesar 1,5 hingga 2 derajat berlaku untuk cetakan produk dengan kedalaman hingga dua inchi. Berdasarkan hasil percobaan, jika tidak terdapat kemiringan pada celah-celah rongga cetakan, proses pengeluaran produk akan menjadi semakin sulit diiringi dengan kerusakan produk akibat menempelnya material pada cetakan. *Draft angle* akan semakin membesar pada bagian *parting line* atau pertemuan antara kedua sisi cetakan. Hal ini dilakukan agar meminimalisir terkuncinya material pada dinding rongga cetakan.

Berdasarkan seluruh hasil percobaan produk *gear* dan proses modifikasi yang telah dilakukan pada penelitian pendahuluan, dapat dilihat bahwa material produk PET *flakes* belum dapat mengisi produk secara sempurna. Hal ini dikarenakan material PET bekas belum mampu mengisi seluruh celah sempit pada cetakan *gear* dan terdapatnya fenomena *yellowing* pada produk yang dihasilkan. Berdasarkan hasil wawancara dengan *expert*, diketahui bahwa ketika material PET mengalami perubahan warna dari transparan menjadi kekuningan atau *yellowing*, maka telah terjadi degradasi atau kerusakan pada rantai polimer PET. *Expert* dalam penelitian ini merupakan seorang ahli yang telah menekuni bidang PET *plastic forming* selama lebih dari 10 tahun dan telah memahami proses pembentukan produk PET dengan baik.

Menurut Scheirs (2003), warna polimer dianggap sebagai parameter kualitas dimana PET berkualitas rendah akan menunjukkan perubahan warna menjadi kekuningan. Warna PET biasanya akan diukur dengan sistem CIELAB dimana terdapat tiga parameter yaitu L^* , a^* , dan b^* . Fenomena *yellowing* pada polimer disebabkan oleh *thermal degradation* maupun *oxidative degradation*. *Oxidative degradation* merupakan masalah terberat dalam sintesis PET. *Thermal degradation* dapat dicegah dengan mengurangi temperatur reaksi. *Oxidative degradation* dapat diminimalisir dengan operasi secara hati-hati terhadap atmosfer gas lemah.

Atmosfer gas lemah yang dimaksud adalah kondisi *vacuum* pada saat proses pelelehan dalam *barrel* dilakukan. Pada penelitian ini, *oxidative degradation* tidak dapat diminimalisir karena tidak terdapat komponen yang mengatur kondisi *vacuum* selama proses pelelehan dilakukan. Fenomena *yellowing* beserta efek yang ditimbulkan tidak dapat dihindari dikarenakan kedua penyebab yaitu degradasi termal dan degradasi oksidatif tidak dapat dihilangkan sepenuhnya. Oleh karena itu, indikator keberhasilan warna produk menggunakan mesin *extruder* Laboratorium Proses Produksi hanya melihat perubahan warna yang terjadi yaitu apakah warna tersebut berubah menjadi lebih gelap atau mengarah ke warna hitam.

Berdasarkan hasil diskusi dengan *expert*, degradasi *thermal* ini disebabkan oleh *latent heat* yang tidak dapat dihentikan secara cepat. Setiap jenis polimer memiliki sifat *latent heat* yang akan mengubah wujud dari material yang telah diproses. Perubahan wujud akibat munculnya *latent heat*

menyebabkan sifat dari produk PET menyerupai kristal. Sifat kristal yang dimaksud adalah getasnya produk yang mengakibatkan produk mudah retak ataupun pecah. Keretakan pada produk hasil percobaan makin diperparah dengan bentuk produk *gear* yang kompleks sehingga material plastik akan lebih sulit untuk dikeluarkan dalam keadaan utuh dan menjadi terpecah.

Berdasarkan hasil pengamatan, material plastik juga cenderung terkunci pada celah-celah sempit dalam rongga cetakan berbentuk *gear*. *Latent heat* dapat diatasi dengan dilakukannya pendinginan produk dengan sangat cepat sehingga perubahan warna tidak muncul pada hasil ekstrusi. Namun proses pendinginan dengan sangat cepat belum dapat dilakukan pada mesin *extruder* Laboratorium Proses Produksi dikarenakan tidak adanya komponen mesin yang dapat mendukung proses tersebut. Tindakan yang dapat dilakukan hanyalah dengan menggunakan bantuan tiga buah kipas angin sehingga proses pendinginan menjadi lebih cepat.

Berdasarkan hasil wawancara dengan *expert*, juga diketahui bahwa proses pendinginan harus dilakukan dalam waktu hitungan detik saja sehingga diperlukan udara dengan temperatur sekitar 7-11°C. Udara tersebut ditembakkan ke bagian luar cetakan sehingga *latent heat* dapat dihentikan dengan cepat sebelum material mengalami degradasi. Hal selanjutnya yang dilakukan adalah dengan mengurangi kompleksitas dari bentuk produk yang akan dibuat. Pada tahap ini digunakan cetakan berbentuk silinder dan dihasilkan produk dengan jumlah retak dan pecahan yang lebih sedikit dibandingkan dengan cetakan berbentuk *gear*.

Produk *gear* pada awalnya ingin dijadikan sebagai produk souvenir hasil daur ulang botol plastik PET yang lebih bernilai guna. Namun dikarenakan perlakuan yang diberikan oleh mesin *extruder* laboratorium belum dapat memenuhi standar dalam menghasilkan produk PET, maka produk silinder yang dihasilkan merupakan produk yang berada pada tahap pengembangan. Fenomena *yellowing* pada produk silinder masih ditemukan, namun produk yang dihasilkan jauh lebih baik dibandingkan produk *gear*. Tahap pengembangan ini sangat berguna untuk mengetahui karakteristik proses mesin *extruder* yang belum diteliti sebelumnya khususnya untuk material PET bekas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan berdasarkan tujuan *characterization* dimana pada

percobaan selanjutnya digunakan cetakan silinder sebagai produk hasil pengembangan awal.

Proses percobaan selanjutnya akan menggunakan perbandingan 98% PET *flakes* dan 2% *virgin* PET resin. Hal ini dikarenakan berdasarkan hasil pengamatan terhadap percobaan dengan pencampuran material, produk yang dihasilkan lebih kuat dan tidak terlalu rapuh dibandingkan dengan sebelum dilakukannya pencampuran. Selain itu diduga pula bahwa pada *virgin* PET resin memiliki rantai polimer yang stabil sehingga dapat mengurangi efek yang ditimbulkan dari degradasi yang terbentuk seperti mudah rapuh, retak, dan lengket.

IV.2 Analisis Penentuan Respon, Faktor dan Level Faktor

Pada penelitian awal telah diketahui proses *setting* yang tepat dalam pembuatan produk daur ulang botol plastik PET. Selanjutnya akan ditentukan variabel respon yaitu nilai kualitas dari bentuk ataupun tampilan produk hasil daur ulang botol plastik PET dengan menggunakan mesin *extruder*. Penilaian melibatkan beberapa kriteria yang berhubungan langsung dengan kualitas tampilan produk PET. Kriteria kualitas produk didapatkan dari hasil studi literatur dan wawancara dengan *expert*. Terdapat banyak jenis cacat yang dapat dijadikan sebagai kriteria dalam menilai produk PET. Namun jika dilihat dari produk hasil daur ulang yang dihasilkan, tidak seluruh kriteria dapat dijadikan sebagai bagian dari penilaian produk.

Kriteria kualitas yang ditetapkan dalam penelitian ini telah melihat apa saja jenis cacat yang sering muncul dan terlihat langsung pada produk silinder yang dihasilkan. Berdasarkan literatur dan hasil wawancara, dapat ditentukan lima jenis kriteria yang berpengaruh secara langsung terhadap nilai kualitas produk yaitu *short shot*, *vacuum voids*, *flow lines*, *burn marks*, dan *preform color failure*. Kriteria kualitas diberikan saat penilaian agar respon yang didapat lebih akurat dan mengurangi tingkat subjektivitas dari penilai. Dengan adanya kriteria kualitas produk, maka penilaian tidak hanya dilakukan secara keseluruhan namun dapat dilihat rata-rata dari nilai setiap kriteria dari tiga orang penilai.

Faktor yang akan diteliti dalam penentuan parameter mesin *extruder* adalah temperatur *barrel* dan frekuensi *input* pada inverter. Temperatur *barrel* merupakan temperatur *setting* yang diberikan pada saat proses pelelehan

material dilakukan. Frekuensi *input* juga merupakan frekuensi *setting* yang dapat mengatur kecepatan putar *screw* yang terdapat pada mesin. Kedua faktor ini memiliki indikator pengukuran yang dapat diatur secara langsung dan memiliki nilai yang jelas. Lamanya waktu di dalam *barrel* ditetapkan sama untuk setiap percobaan yang dilakukan yaitu selama 40-45 menit. Nilai tersebut tidak tepat berada pada satu titik dikarenakan adanya variasi waktu pada saat proses *setting* dilakukan. Percobaan telah dilakukan untuk setiap variasi temperatur mulai dari 250°C sampai 275°C dan didapat kesimpulan jika waktu di dalam *barrel* melebihi 60 menit, maka akan terjadi perubahan warna secara dratis pada produk yang menandakan material plastik telah terdekomposisi. Waktu 40-45 menit didapat dari hasil percobaan dengan menggunakan temperatur *barrel* sebesar 255°C dan didapatkan bahwa pada rentang waktu tersebut material belum mengalami dekomposisi. Waktu 40-45 menit ditetapkan untuk setiap percobaan dengan pertimbangan bahwa rentang tersebut dapat dihasilkan dengan baik dan sesuai dengan spesifikasi. Spesifikasi yang diinginkan peneliti adalah tidak terjadinya dekomposisi pada produk yang ditandai dengan warna menjadi lebih gelap, lelehan dapat mengisi seluruh permukaan silinder bagian luar, dan pelelehan yang sempurna.

Penelitian ini menggunakan 2^2 *factorial design* dimana terdapat 2 faktor dengan masing-masing faktor terdiri dari 2 level. Pada awalnya dilakukan percobaan dengan mengacak faktor temperatur *barrel*. Percobaan ini dilakukan untuk mengetahui rentang nilai temperatur *barrel* yang dapat menghasilkan produk silinder secara utuh. Frekuensi *input* ditetapkan sebesar 30Hz dimana pada penelitian pendahuluan, nilai tersebut berhasil membentuk produk silinder.

Berdasarkan enam hasil percobaan penentuan rentang nilai faktor temperatur, ditentukan *low level* sebesar 255°C dan *high level* sebesar 270°C. Penentuan kedua level ini melihat kriteria masing-masing faktor yang ditentukan oleh peneliti. Berdasarkan kriteria perubahan warna dan *flow lines*, produk dengan temperatur 255°C dan 270°C terlihat cukup berbeda, namun masih sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan. Pada temperatur 255°C, warna produk belum terdekomposisi dan dapat dikeluarkan dengan mudah dari cetakan. Sedangkan pada temperatur 270°C, terdapat perbedaan warna dan *flow lines* yang cukup terlihat dari 255°C. Pada temperatur 270°C, warna produk yang dihasilkan masih belum terdekomposisi dan banyaknya *flow lines* yang dimiliki

sangat minim dibandingkan dengan hasil percobaan variasi temperatur lainnya. Waktu pengisian produk yang relatif sama juga mempengaruhi alasan pemilihan kedua temperatur sebagai level faktor temperatur.

Berdasarkan empat hasil percobaan penentuan rentang nilai faktor frekuensi *input*, ditentukan *low level* sebesar 30Hz dan *high level* sebesar 50Hz. Sama halnya dengan penentuan level temperatur, terdapat pula kriteria dalam penentuan *low* dan *high level* untuk faktor frekuensi *input* yaitu pengisian produk, kualitas permukaan, dan *bubbles*. Pengisian produk pada frekuensi 30Hz tidak sempurna dibandingkan produk dengan variasi frekuensi lainnya. Kualitas permukaan yang dihasilkan pada frekuensi 30Hz dan 50Hz lebih baik dilihat tingkat kekasaran kedua sisi permukaan. *Bubbles* atau gelembung udara yang didapat pada produk dengan frekuensi 30Hz dan 50Hz lebih minim dibandingkan hasil percobaan lainnya. Dari ketiga kriteria tersebut, dua diantaranya telah berhasil di menangkan oleh produk dengan variasi frekuensi *input* sebesar 30Hz dan 50Hz. Penentuan nilai kedua level untuk setiap faktor yang diteliti diusahakan tidak terlalu berdekatan sehingga diharapkan hasil yang berbeda dari variabel respon untuk kedua level dan akurat.

IV.3 Analisis Hasil Pengujian ANOVA

Sebelum pengujian ANOVA, dilakukan proses pengumpulan data hasil *extrusion* dan data respon. Data respon yang diperoleh terdiri atas nilai kualitas setiap produk hasil *extrusion* dengan kelima kriteria yang ada. Setiap kriteria akan memiliki bobot tingkat kepentingan yang ditentukan oleh masing-masing penilai. Sistem pembobotan dengan rentang nilai satu sampai dengan lima digunakan dalam penilaian kualitas produk hasil daur ulang PET. Bobot digunakan dalam menentukan tingkat kepentingan setiap kriteria dikarenakan peneliti ingin mengetahui apakah masing-masing kriteria mempunyai beban yang sama dalam menyatakan kualitas sebuah produk.

Kriteria yang dipilih dalam penelitian ini didapat berdasarkan literatur dan hasil wawancara sehingga kelima kriteria tersebut memang telah terbukti mempengaruhi produk plastik yang dihasilkan. Selain itu, dalam kondisi ideal terdapat banyak kriteria kualitas yang dapat digunakan dalam menilai produk polimer. Namun dari sekian banyak kriteria, dipilihlah kriteria yang memang dapat diteliti pada produk hasil daur ulang PET sehingga hanya didapatkan lima jenis

kriteria kualitas yaitu *short shot*, *vacuum voids*, *flow lines*, *burn marks*, dan *preform color failure*.

Pengujian faktor atau parameter menggunakan model statistik ANOVA menunjukkan hasil dimana faktor temperatur *barrel* dan frekuensi *input* tidak mempengaruhi nilai rata-rata kualitas produk yang dihasilkan. Selain itu tidak terdapat interaksi antar temperatur *barrel* dan frekuensi *input* sehingga tidak akan ada pengaruh yang dihasilkan terhadap variabel respon. Hal ini dibuktikan dengan membandingkan nilai *p-value* dengan besarnya level signifikansi yang digunakan dalam penelitian ini. Level signifikansi ditetapkan sebesar 5% yang berarti tingkat *error* yang diijinkan atau kemungkinan terjadinya penyimpangan terhadap hasil perhitungan adalah sebesar 5%.

Hasil pengujian ANOVA menunjukkan bahwa produk hasil daur ulang PET dapat menghasilkan nilai kualitas antara 5,154 hingga 6,978 jika parameter temperatur *barrel* berada pada 255°C atau 270°C dan frekuensi *input* yang digunakan adalah 30Hz atau 50Hz. Nilai tersebut masih tergolong rendah dikarenakan belum dapat dihasilkannya produk PET yang sesuai dengan standar. Perancangan eksperimen dalam rangka penentuan parameter proses mesin *extruder* menggunakan model perancangan *fixed effects model*. Pada model ini, efek dari *treatment* dianggap tetap sehingga kesimpulan tidak dapat digeneralisasikan untuk seluruh populasi *treatment*. Kesimpulan yang didapat hanya berhubungan dengan *treatment* yang terdapat dalam penelitian. Oleh karena itu, ketika *input factor* yang diberikan berada antara rentang level pada setiap faktor atau tidak tepat pada nilai level yang telah diuji, maka belum tentu akan menghasilkan rata-rata kualitas produk yang sama dengan hasil yang telah didapatkan pada penelitian ini.

Jumlah replikasi yang diberikan untuk keempat kombinasi *treatment* yang dihasilkan adalah sebanyak 3 kali. Penentuan jumlah replikasi telah mempertimbangkan variansi dari produk yang dihasilkan dan waktu proses pembuatan per satu produk hasil daur ulang PET. Ketika terdapat perbedaan hasil produk pada dua replikasi awal, maka kesimpulan dapat ditarik dengan melihat produk hasil replikasi ketiga. Sebagai contoh, pada saat kombinasi *treatment* A pada replikasi pertama menunjukkan terdapat banyaknya *air bubbles*, replikasi kedua menunjukkan sedikit *air bubbles*, dan replikasi ketiga kembali muncul banyaknya *air bubbles*, maka dapat disimpulkan bahwa hasil

kombinasi *treatment* A menghasilkan banyak *air bubbles*. Waktu proses per produk yang cukup lama yaitu sekitar 3 hingga 4 jam membuat jumlah replikasi yang ditetapkan tidak lebih dari tiga kali.

Penilaian telah dilakukan oleh 3 orang penilai dengan tujuan agar data respon yang didapat lebih akurat dan terarah. Ketiga orang penilai merupakan orang yang telah bekerja kurang lebih 5 tahun di bidang polimer. Berdasarkan literatur, faktor atau parameter temperatur *barrel* dan kecepatan *screw* (frekuensi *input*) seharusnya berpengaruh terhadap proses pembuatan produk. Hasil pengujian ANOVA menunjukkan bahwa menurut ketiga penilai, memang tidak terdapat perbedaan antara kedua belas produk yang dihasilkan. Selama proses penilaian kualitas produk dilakukan, ketiga penilai cukup kesulitan dalam menyatakan performansi atau kualitas dari kedua belas produk. Hal ini dikarenakan adanya keterbatasan dari mesin dan proses yang dapat dilakukan sehingga produk yang dihasilkan masih memiliki kekurangan. Oleh karena itu, level untuk setiap faktor yang digunakan dalam penelitian ini tidak mempengaruhi kualitas produk yang dihasilkan.

Berdasarkan hasil percobaan yang telah dilakukan, terdapat beberapa hal yang mungkin dapat mempengaruhi hasil uji ANOVA yang didapat. Pertama adalah penentuan jenis kriteria kualitas belum dapat mengakomodasi nilai kualitas produk secara keseluruhan. Kriteria kualitas yang belum mengakomodasi produk membuat setiap nilai yang diberikan tidak dapat mempengaruhi kualitas produk dari segi tampilan. Penentuan jumlah faktor dan level yang digunakan juga dapat mempengaruhi hasil pengujian yang didapat.

Penentuan level untuk setiap faktor mungkin belum tepat dimana tidak terdapat perbedaan yang cukup jelas pada 12 produk hasil kombinasi *treatment*. Hasil penilaian menunjukkan bahwa rata-rata kualitas tidak berbeda jauh meskipun kombinasi *treatment* yang diberikan berbeda-beda. Selain itu terdapat indikasi bahwa material PET *flakes* yang dihasilkan mempengaruhi proses pembentukan produk. Pada penelitian ini, botol plastik PET telah dipisahkan dari tutup botol, label botol, dan perekat label. Namun berdasarkan Scheirs (2003), proses pemilahan plastik bekas perlu diperhatikan secara khusus dimana sebaiknya setiap komponen botol dipisahkan satu per satu. Bagian leher botol, dinding botol, dan dasar botol dibentuk dengan ketebalan yang berbeda-beda. Terdapat alasan pemilahan tidak dilakukan sampai dengan pemisahan

komponen leher, dinding, dan dasar botol. Salah satunya adalah keterbatasan dari limbah botol plastik yang dapat dikumpulkan. Limbah tersebut terdiri atas berbagai macam merk sehingga terdapat kemungkinan bahwa spesifikasinya tidak homogen. Penelitian dengan menggunakan satu merk botol plastik PET sulit untuk dilakukan mengingat material yang dibutuhkan cukup banyak.

Campuran PET *flakes* berbagai merk dan ketebalan hasil cacahan membuat proses pelelehan menjadi tidak seragam. Hal lainnya yang mempengaruhi adalah nilai setiap kriteria untuk setiap produk yang diberikan penilai memang menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan yang cukup jelas antara hasil kombinasi *treatment* yang dilakukan pada penelitian ini. Oleh karena itu, hasil penilaian kualitas produk dan pengujian ANOVA menunjukkan bahwa kedua faktor dan interaksinya tidak mempengaruhi hasil produk daur ulang botol plastik PET.

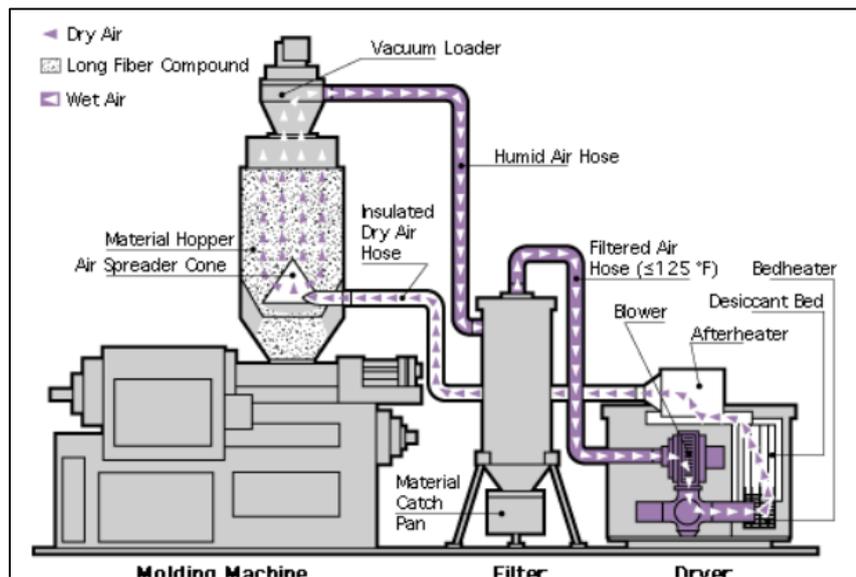
Kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini adalah kedua parameter yang diteliti tidak berpengaruh terhadap rata-rata nilai kualitas hasil *extrusion* dan tidak terdapat interaksi antar keduanya. Produk hasil daur ulang PET dapat menghasilkan nilai kualitas antara 5,154 hingga 6,978 jika parameter temperatur *barrel* yang digunakan adalah 255°C atau 270°C dan frekuensi *input* yang digunakan adalah 30Hz atau 50Hz.

IV.4 Analisis Usulan Peningkatan Nilai Kualitas Produk

Rata-rata nilai kualitas produk yang dihasilkan dari perancangan eksperimen ini hanya berada pada kisaran nilai lima hingga enam saja. Usulan perlu diberikan agar kualitas produk hasil daur ulang botol plastik PET dapat dikembangkan secara terus menerus. Hal utama yang perlu dilakukan adalah perlu diteliti lebih lanjut perilaku yang tepat terhadap pemrosesan material PET *flakes* sehingga tidak timbul fenomena *yellowing* atau kekuningan yang mengakibatkan kualitas produk menjadi menurun. Warna kekuningan pada produk akibat terjadi degradasi sebisa mungkin harus dihilangkan agar tidak terjadi perubahan dari sifat produk yang dihasilkan. Perilaku yang tepat dapat ditunjang dengan melakukan proses modifikasi atau penambahan fitur tertentu pada komponen mesin.

Selain itu ditemukan juga beberapa fakta terkait dengan penentuan parameter mesin *extruder* khususnya pada saat mendaur ulang limbah botol

plastik PET. Fakta tersebut dikumpulkan berdasarkan literatur, hasil analisa selama penelitian dilakukan, dan berdasarkan hasil diskusi dengan *expert*. Fakta pertama adalah PET bersifat higroskopik. Higroskopik merupakan sifat dimana material PET secara natural akan menyerap kandungan air dari lingkungan sekitarnya. Sifat tersebut mengakibatkan perlu diberikannya perlakuan khusus pada *raw material* yang digunakan sehingga dapat mengurangi kegagalan pada produk yang dihasilkan. Perlakuan khusus yang dapat diberikan adalah proses pengeringan *raw material* dengan menggunakan alat pengering. Proses pengeringan penting dilakukan untuk menurunkan *moisture level* pada PET flakes. Pengeringan dilakukan hingga temperatur PET *flakes* mulai mencapai 140-160°C. Tingkat kelembaban yang tinggi akan merusak rantai polimer material atau dengan kata lain akan terjadinya degradasi. Sistem pengeringan resin PET yang diusulkan dapat dilihat pada Gambar IV.1.



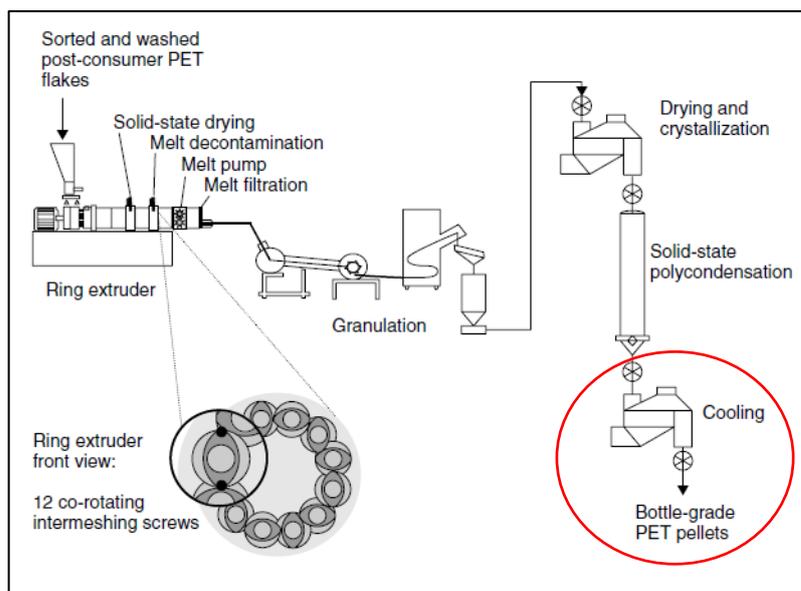
Gambar IV.1 Contoh Sistem Pengeringan Resin PET
(Sumber: www.rtpcompany.com)

Pada Gambar IV.1 terlihat bahwa terdapat komponen *dryer* yang akan mengeringkan resin atau material dengan memberikan panas sehingga uap air yang dihasilkan dapat ditarik oleh bagian *filter*. Selain itu kondisi *vacuum* pada bagian *hopper* didapatkan dengan menarik seluruh udara kering menggunakan *filter* yang akan mengalirkannya kembali menuju ke bagian *dryer*. Berdasarkan observasi selama penelitian, juga ditemukan fakta bahwa material PET sangat sensitif terhadap udara dimana lelehan plastik dapat langsung membeku sesaat

setelah melewati bagian *nozzle*. Oleh karena itu pengaturan terhadap faktor lain seperti temperatur dan aliran udara di lingkungan sekitar sebaiknya perlu dilakukan.

Kandungan *moisture* pasti terdapat pada setiap jenis plastik baik di permukaan ataupun yang diserap oleh resin. Berdasarkan hasil wawancara dengan *expert*, kandungan *moisture* tidak boleh melebihi 0,5%. Material yang akan diproses ke dalam *hopper* adalah material dengan kondisi panas atau *hot resin* sehingga kandungan *moisture* dapat diminimalisir. Apabila proses pengeringan yang tepat tidak dilakukan, maka kandungan *moisture* tersebut akan berubah menjadi uap dan akan menyebabkan kegagalan pada produk yang dihasilkan. Kegagalan tersebut terlihat dari banyaknya jenis cacat yang muncul pada produk dikarenakan terjadinya degradasi material akibat material yang belum dikeringkan. Jenis cacat yang ditimbulkan secara visual akibat kandungan *moisture* adalah *opaqueness* atau berkabut, *flashes* atau terdapat bagian material yang keluar dari rongga cetakan, *bubbles* atau gelembung udara, dan cacat dimensional.

Fakta selanjutnya adalah dalam pengolahan material plastik PET, terdapat dua hal yang perlu diperhatikan yaitu proses pemanasan dan pendinginan. Proses pemanasan atau pengeringan *raw material* dilakukan sebelum material memasuki *extruder*. Sedangkan untuk proses pendinginan dilakukan saat terbentuknya produk hasil cetakan silinder. Contoh skema penambahan komponen pendingin pada mesin dapat dilihat pada Gambar IV.2.



Gambar IV.2 Contoh Penambahan Pendingin saat Pemrosesan Resin PET
(Sumber: Scheirs, 2003)

Contoh diatas merupakan salah satu metode pembentukan yang dapat digunakan untuk menghasilkan produk botol berbahan resin PET *virgin*. Proses pendinginan secara cepat perlu dilakukan sesaat setelah plastik selesai mengisi rongga cetakan. Udara tersebut ditembakkan ke bagian luar cetakan sehingga *latent heat* dapat dihentikan dengan cepat sebelum material mengalami degradasi. Jika hal tersebut tidak dilakukan, maka struktur material PET *flakes* akan terpengaruh oleh lingkungan sekitar dan menyebabkan proses *latent heat* tidak dapat dihentikan. Perlu diingat pula bahwa ketika wujud dari produk yang dihasilkan telah berubah menjadi *yellowing*, kekuningan atau tidak transparan, maka sifat material akan mirip seperti kristal dimana produk akan menjadi sangat rapuh karena ikatan rantai polimernya menjadi lemah dan tidak seragam. Proses pendinginan dapat dilakukan dengan memberikan komponen tambahan pada mesin ekstruder yang berfungsi sebagai *chiller*.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini dilakukan penarikan kesimpulan yang diperoleh dari keseluruhan hasil penelitian. Selain itu terdapat pula beberapa saran yang dapat diberikan terkait penelitian penentuan parameter proses mesin *extruder* yang berpengaruh dalam pembuatan produk hasil daur ulang botol plastik PET. Berikut merupakan kesimpulan dan saran terkait dengan keseluruhan hasil penelitian.

V.1 Kesimpulan

Berdasarkan sub bab pendahuluan dan pengolahan data yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa poin kesimpulan. Kesimpulan yang diberikan akan menjawab rumusan masalah dan memberikan gambaran akhir dari hasil penelitian yang didapat. Kesimpulan yang dapat ditarik terkait dengan hasil penelitian terdiri atas:

1. Parameter proses *extruder machine* seperti temperatur *barrel* dan frekuensi *input* tidak mempengaruhi proses pembuatan produk hasil daur ulang plastik PET. Selain itu, tidak terdapat interaksi antara parameter temperatur *barrel* dan frekuensi *input* yang digunakan.
2. Nilai parameter terbaik tidak dapat ditentukan dalam penelitian ini dimana rentang dari rata-rata nilai kualitas yang dihasilkan produk daur ulang plastik PET menggunakan *extruder machine* saat ini berada antara 5,154 hingga 6,978. Nilai parameter temperatur *barrel* yang digunakan memiliki *low level* sebesar 255°C dan *high level* sebesar 270°C. Sedangkan nilai parameter frekuensi *input* yang didapat dari hasil penelitian memiliki *low level* sebesar 30 Hz dan *high level* sebesar 50 Hz. Kedua level dari setiap faktor tersebut akan menghasilkan nilai kualitas yang seragam untuk produk hasil daur ulang botol plastik PET menggunakan mesin *extruder*.

V.2 Saran

Berikut adalah beberapa saran yang dapat diberikan penelitian ini dan penelitian selanjutnya agar dapat berjalan lebih baik.

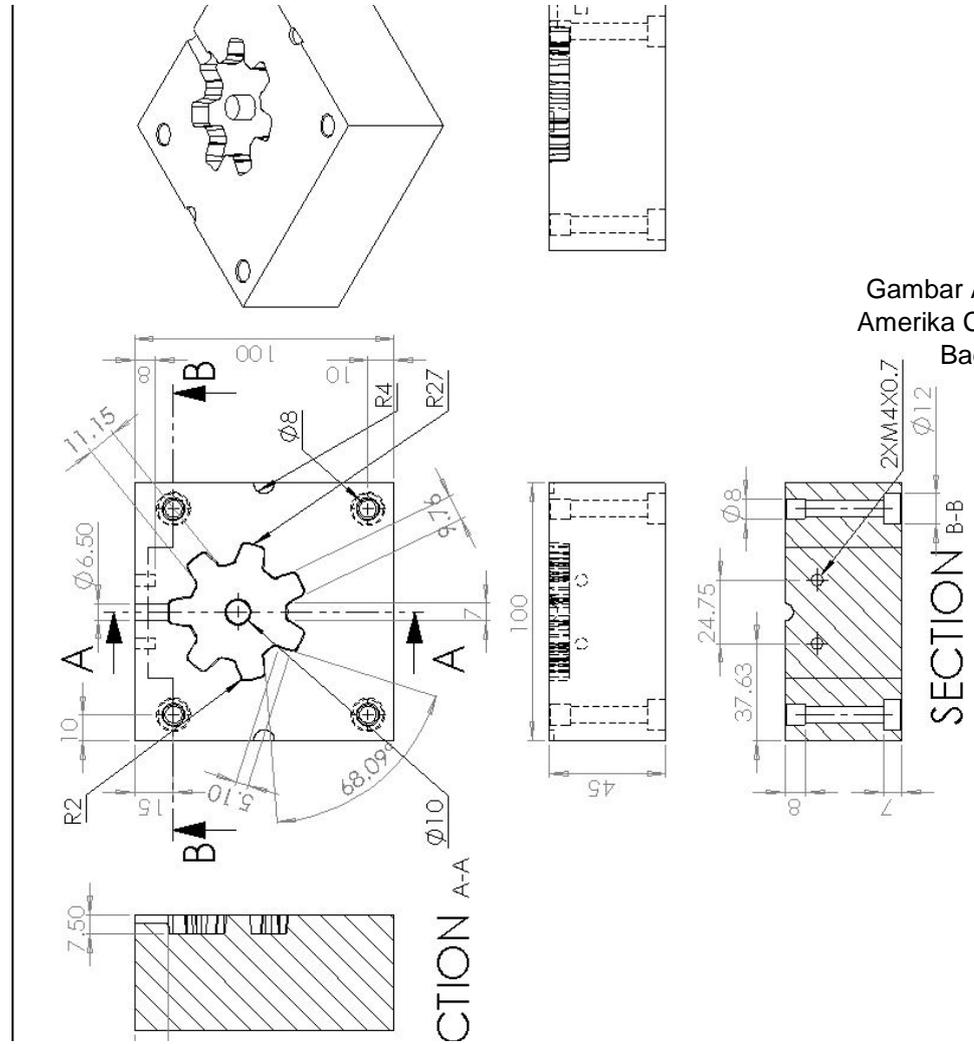
1. Sebaiknya perlu diteliti lebih lanjut bagaimana perlakuan yang tepat untuk penggunaan material plastik PET *flakes* agar dapat membentuk produk yang lebih kompleks.
2. Perlu diketahui bagaimana mekanisme sintesis PET pada saat pembentukan produk dan fenomena yang terjadi secara lengkap.
3. Pengukuran karakteristik yang mempengaruhi kualitas PET sebaiknya dilakukan agar produk dapat dikembangkan dengan baik.
4. Penelitian dapat dikembangkan dengan mengeksplorasi penggunaan material baru dan faktor lain dengan rentang level faktor yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Pusat Statistik. (2015). *Indikator Perilaku Peduli Lingkungan Hidup 2014*. Jakarta: Badan Pusat Statistik.
- Chanda, M., & Roy, S. K. (2009). *Plastics Fabrication and Recycling*. USA: CRC Press.
- Chandra, B. (2006). *Pengantar Kesehatan Lingkungan*. Jakarta: Penerbit Buku Kedokteran EGC.
- Direktorat Jenderal Pengendalian Perubahan Iklim. (2017). *Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional*. Diakses pada 13 Desember 2017, dari Pengantar Penyusunan Naskah Akademik Rapermen LHK tentang Sistem Informasi Persampahan Nasional: http://ditjenppi.menlhk.go.id/reddplus/images/resources/ws_transperancy_framework/r4_02_sampah_klhk.pdf
- Giles, H. F., Wagner, J. R., & Mount, E. M. (2005). *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*. United States of America: William Andrew Publishing.
- Groover, M. P. (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing (4th ed.)*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., & Law, K. L. (2015). *Plastic Waste Inputs from Land into The Ocean*. New York: Science Magazine.
- Johnson, H. V. (1984). *Manufacturing Processes (2nd ed.)*. USA: Glencoe Publishing Company.
- Kementerian Lingkungan Hidup. (2012). *Peraturan Pemerintah Nomor 81 Tahun 2012 Tentang Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga*. Diakses pada 9 Desember 2017, dari Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia: <http://www.menlh.go.id/peraturan-pemerintah-nomor-81-tahun-2012-tentang-pengelolaan-sampah-rumah-tangga-dan-sampah-sejenis-sampah-rumah-tangga/>

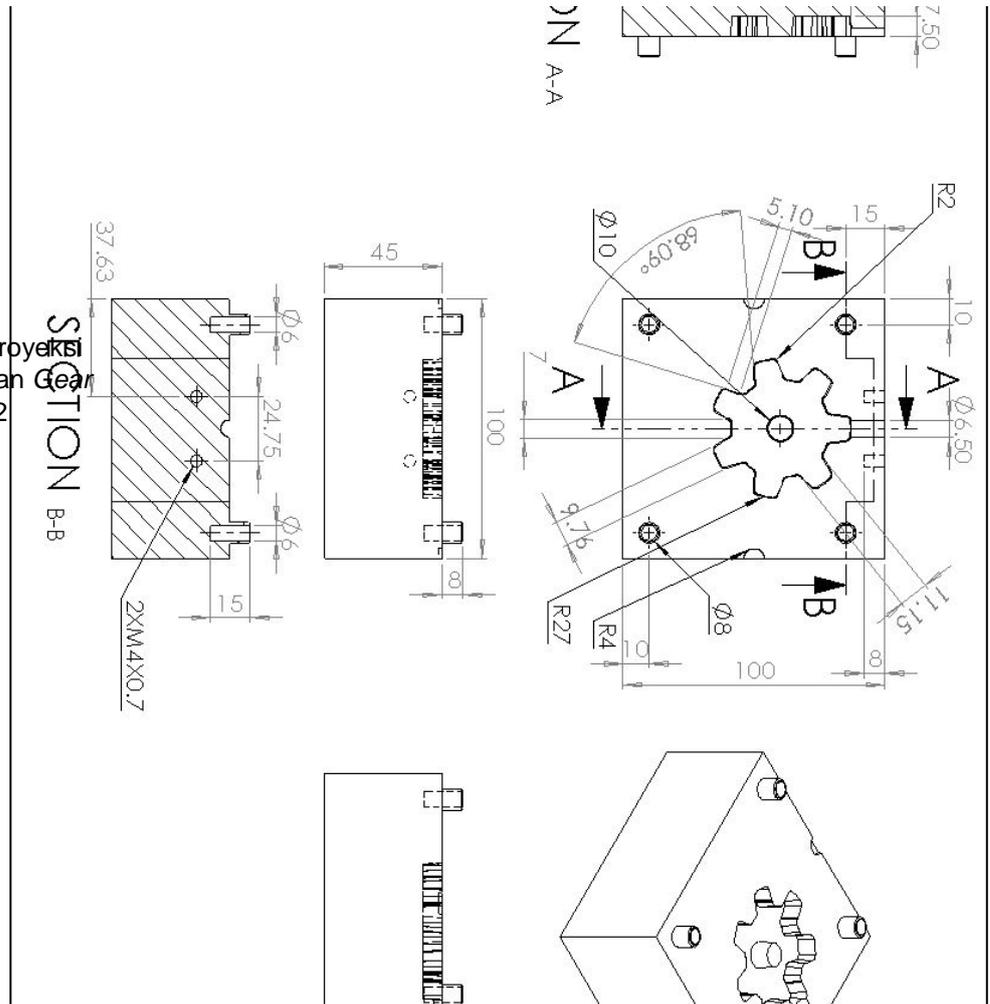
- Mitra, A. (1998). *Fundamentals of Quality Control and Improvement*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2003). *Applied Statistics and Probability for Engineers* (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons Inc.
- Montgomery, D. C. (2013). *Design and Analysis of Experiments* (8th ed.). United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- PET Resin Association. (2015). *An Introduction to PET*. Diakses pada 9 Februari 2018, dari PET Resin Association Website: http://www.petresin.org/news_introtoPET.asp
- Precious Plastic. (2017). *About*. Diakses pada 9 Desember 2017, dari Precious Plastic: <https://preciousplastic.com/en/info/about.html>
- PT Sukses Sejahtera Energi. (2017, Desember 21). *Sampah Botol Plastik, Akan Diapakan?* Diambil kembali dari PT SSE more than recycling: <http://ptsse.co.id/berita/detail/sampah-botol-plastik-akan-diapakan>
- Rauwendaal, C. (2010). *Understanding Extrusion*. In C. Rauwendaal, *Understanding Extrusion* (2nd ed., pp. 19-20). Ohio: Hanser Publisher.
- Scheirs, J. (2003). *Modern Polyesters: Chemistry and Technology of Polyesters and Copolyesters*. (T.E. Long, Penyunt.) Chicester: John Wiley&Sons Ltd.
- Schwartz, J. (2016, Maret 30). *Injection Molding Best Practices: Draft Angles For Every Part*. Diambil kembali dari RevPart: <https://revpart.com/draft-angles-for-injection-molding/>
- Sekaran, U. (2003). *Research Methods For Business: A Skill Building Approach* (4th ed.). New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Sulyman, M., Haponiuk, J., & Formela, K. (2016). Utilization of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) in Engineering Materials: A Review. *International Journal of Environmental Science and Development*, 7, 100-108. Diambil kembali dari <http://www.ijesd.org/vol7/749-A707.pdf>
- Tyas, S. (2016). *Bahaya Pencemaran Sampah Plastik dan Cara Penanggulangannya*. Diakses pada 25 Januari 2018, dari Kompasiana: https://www.kompasiana.com/syifanatyas9/bahaya-pencemaran-sampah-plastik-dan-cara-penanggulangannya_583d750e6723bde0083dfbc3

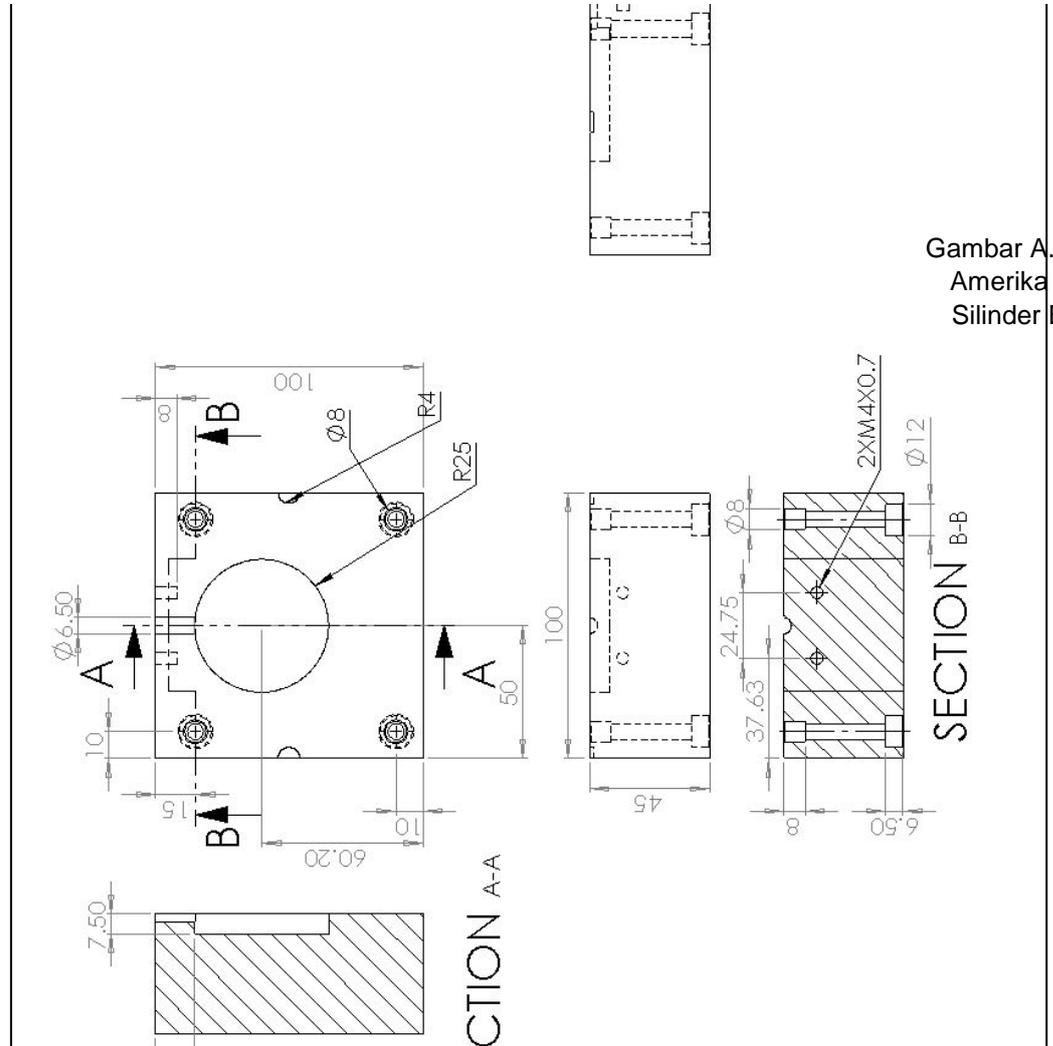
LAMPIRAN A
PROYEKSI AMERIKA KOMPONEN CETAKAN DAN
KOMPONEN MESIN



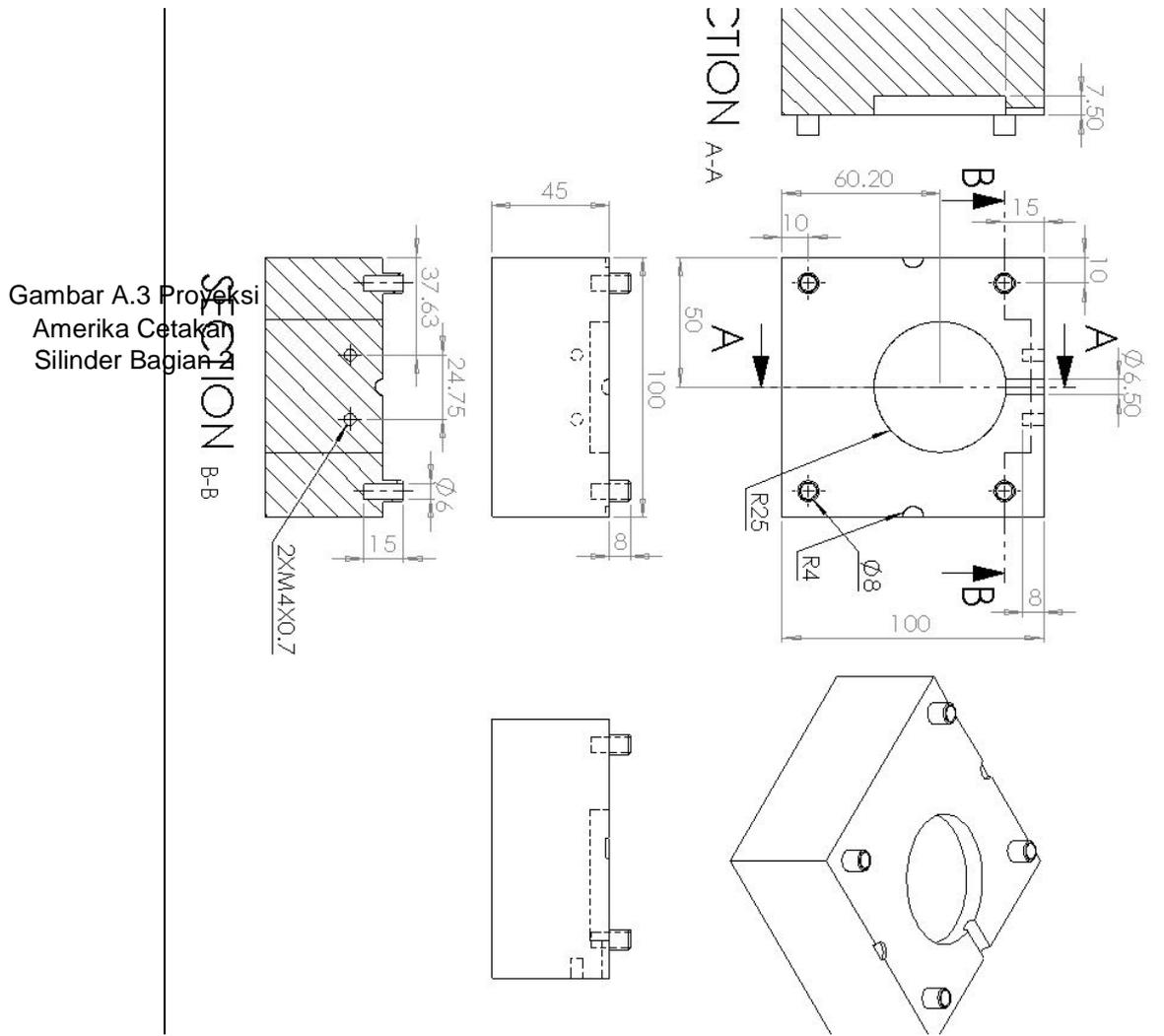
Gambar A.1 Proyeksi Amerika Cetakan Gear Bagian 1

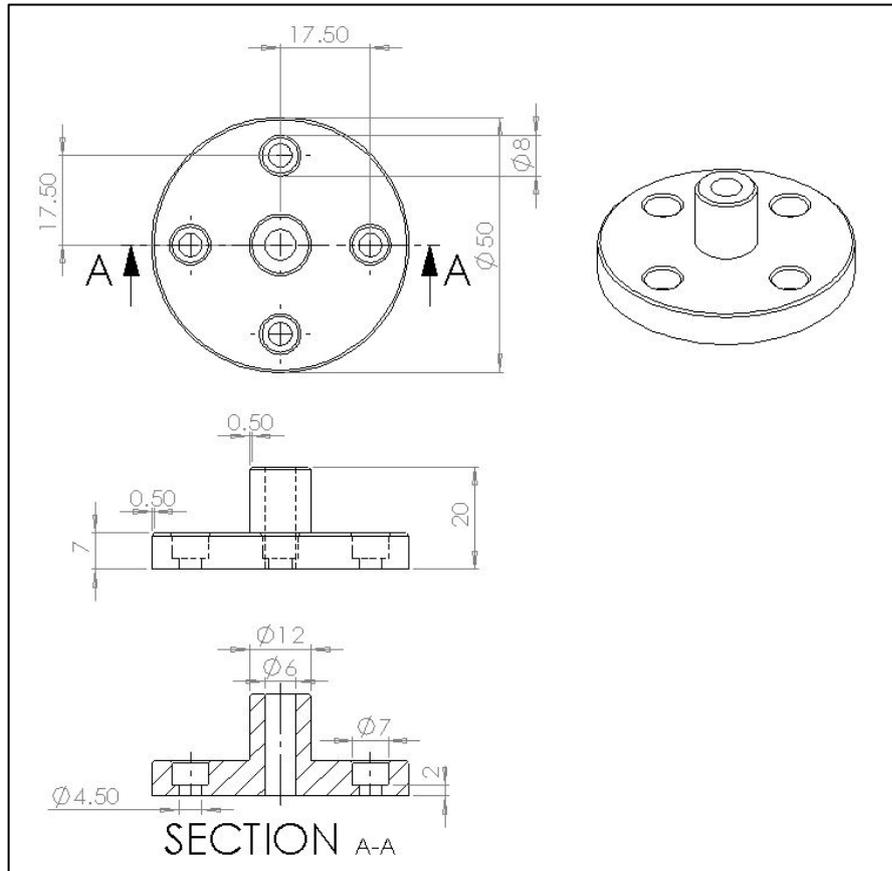
Gambar A.2 Proyeksi Amerika Cetakan Gear
Bagian 2



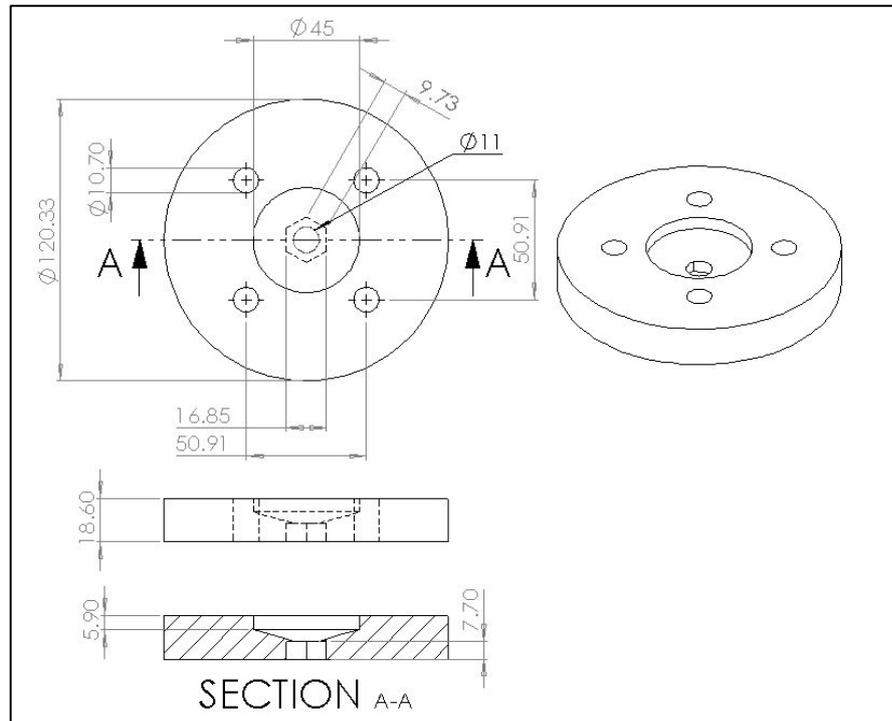


Gambar A.3 Proyeksi Amerika Cetakan Silinder Bagian 1





Gambar A.4 Proyeksi Amerika *Mounting* pada Cetakan



Gambar A.5 Proyeksi Amerika *Nozzle* Setelah Modifikasi

LAMPIRAN B
HASIL *EXTRUSION* UNTUK PRODUK DAUR ULANG PET



Gambar B.1 Hasil *Extrusion* Unit Eksperimen 1



Gambar B.2 Hasil *Extrusion* Unit Eksperimen 2



Gambar B.3 Hasil *Extrusion* Unit Eksperimen 3



Gambar B.4 Hasil *Extrusion* Unit Eksperimen 4



Gambar B.5 Hasil *Extrusion* Unit Eksperimen 5



Gambar B.6 Hasil *Extrusion* Unit Eksperimen 6



Gambar B.7 Hasil *Extrusion* Unit Eksperimen 7



Gambar B.8 Hasil *Extrusion* Unit Eksperimen 8



Gambar B.9 Hasil *Extrusion* Unit Eksperimen 9



Gambar B.10 Hasil *Extrusion* Unit Eksperimen 10



Gambar B.11 Hasil *Extrusion* Unit Eksperimen 11



Gambar B.12 Hasil *Extrusion* Unit Eksperimen 12

RIWAYAT HIDUP PENULIS

Data Pribadi

Nama Lengkap : Lusi Handranto
Tempat, Tanggal Lahir : Padang, 19 Januari 1997
Alamat : Jl. Hos Cokroaminoto No.92 C
Padang, Sumatera Barat
Agama : Katolik
E-mail : lusihandranto@gmail.com



Pendidikan

- 2014 – 2018 Universitas Katolik Parahyangan Bandung
- 2011 – 2014 SMA Don Bosco Padang
- 2008 – 2011 SMP Maria Padang
- 2002 – 2008 SD Agnes Padang

Pengalaman Organisasi

- Kesekretariatan Acara *Asia Pacific Design Challenge* 2017
- Bendahara Acara *Industrial Challenge Goes to School* 2016
- Panitia Divisi Konsumsi Acara LIGHT 2016
- Panitia Divisi Konsumsi Acara LIGHT 2015
- Anggota UKM Badminton UNPAR Periode 2014/2015

Pengalaman Kerja

- Asisten Laboratorium Proses Produksi (Praktikum Pemrograman CNC) Program Studi Teknik Elektro UNPAR Periode 2017/2018
- Staff Divisi *Production Planning and Inventory Control* PT. Betawimas Cemerlang, Bekasi (*Internship* Periode Juni-Juli 2017)
- Asisten Laboratorium Proses Produksi (Praktikum Proses Manufaktur) Program Studi Teknik Industri UNPAR Periode 2016/2017 dan 2017/2018