



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**KARAKTERISASI NOSEL DENGAN VARIASI SUDUT LUBANG  
*BAFFLE* DAN JARAK TEMBAK TERHADAP GAYA IMPAK  
UNTUK APLIKASI *GENE GUN***

**SKRIPSI**

**MUHAMMAD SATRIO UTOMO**

**0806330283**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JULI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**KARAKTERISASI NOSEL DENGAN VARIASI SUDUT LUBANG  
*BAFFLE* DAN JARAK TEMBAK TERHADAP GAYA IMPAK  
UNTUK APLIKASI *GENE GUN***

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**MUHAMMAD SATRIO UTOMO**

**0806330283**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JULI 2012**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Muhammad Satrio Utomo

NPM : 0806330283

Tanda Tangan : 

Tanggal : 12 Juli 2012

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Muhammad Satrio Utomo  
NPM : 0806330283  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul Skripsi : Karakterisasi Nosel dengan Variasi Sudut Lubang *Baffle*  
dan Jarak Tembak terhadap Gaya Impak untuk Aplikasi  
*Gene Gun*

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Danardono Agus Sumarsono, DEA

Penguji 1 : Prof. Dr. Ir. Bambang Sugiarto, M.Eng

Penguji 2 : Dr. Ir. Gatot Prayogo, M.T

Penguji 3 : Dr. Yudan Whulanza, S.T, M.Sc

Penguji 4 : Jos Istiyanto, S.T, M.T, PhD.

Ditetapkan di : Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok

Tanggal : 12 Juli 2012

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat dan ridho-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan karya tulis ini dengan usaha dan hasil yang optimal. Penulisan skripsi ini dilakukan dengan tujuan memenuhi salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik di Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia. Penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibuku Rudatin, Bapakku Pung Harsono, dan adikku Muhammad Adi Nugroho serta keluarga besar Winarno Danuatmodjo dan Purbohusodo yang selalu mendukung penulis dalam bentuk apapun di manapun dan kapanpun sehingga penulis dapat menjalani kuliah dan menyelesaikan skripsi ini tanpa hambatan yang berarti.
2. Bapak Dr. Ir. Danardono A.S, DEA selaku dosen pembimbing yang telah mengajak penulis ke dalam proyek riset dan mau menyediakan waktu, tenaga, serta pikirannya membimbing penulis sehingga skripsi ini dapat ditulis dengan baik.
3. Para guru dan dosen yang, tanpa mengurangi rasa hormat penulis, tidak mungkin disebutkan satu persatu atas keikhlasannya mengajarkan, memberikan ilmunya selama ini tanpa henti sehingga penulis dapat mencapai gelar Sarjana Teknik.
4. Dr. Budiman Bela, dr. Fera, dr. Silvi, dan staf IHVCB – FKUI, Salemba lainnya yang telah memberikan penulis kesempatan untuk bekerja sama dalam proyek riset gene gun.
5. Saudara seperjuanganku, “Anak Mesin”, mahasiswa Departemen Teknik Mesin FTUI angkatan 2008, para senior dan junior yang tidak mungkin penulis sebutkan satu persatu.

6. Rekan-rekan mahasiswa FTUI, para penghuni “Pondok Bunayya”, teman-teman SMA Labschool Kebayoran khususnya kelas Akselerasi angkatan 2006, SMP Labschool Kebayoran angkatan 2003, SDN 012 Grogol Utara, dan TK Kartini yang selama ini telah terlibat secara langsung maupun tidak langsung pada penulisan skripsi ini.
7. Para karyawan Departemen Teknik Mesin FTUI, khususnya Pak Syarif, Pak Yasin, dan Pak Udiyono, karyawan FTUI, dan sivitas akademi UI lainnya yang telah menjalankan tugasnya dengan sungguh-sungguh dan membantu penulis baik langsung maupun tidak langsung dalam menjalani masa kuliah di Departemen Teknik Mesin FTUI.

Pada akhirnya, penulis hanya dapat berharap semoga Tuhan Yang Maha Esa selalu memberikan semua makhluk-Nya rahmat, ridho, dan apa yang dianggap sebagai keputusan terbaik oleh-Nya. Semoga skripsi ini dapat memberikan hal positif dan digunakan sebagaimana mestinya bagi kepentingan perkembangan peradaban manusia.

Penulis

Juli 2012

**HALAMAN PERNYATAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Satrio Utomo  
NPM : 0806330283  
Program Studi : Teknik Mesin  
Departemen : Teknik Mesin  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**“Karakterisasi Nosel dengan Variasi Sudut Lubang *Baffle* dan Jarak Tembak terhadap Gaya Impak untuk Aplikasi *Gene Gun*”**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 12 Juli 2012

Yang menyatakan,



Muhammad Satrio Utomo

## Abstrak

Nama : Muhammad Satrio Utomo

Program Studi : Teknik Mesin

Judul : Karakterisasi Nosel dengan Variasi Sudut Lubang *Baffle* dan Jarak Tembak terhadap Gaya Impak untuk Aplikasi *Gene Gun*

Pengembangan *gene gun* sebagai instrumen administrasi vaksin intradermal memerlukan banyak penelitian di berbagai hal, salah satunya pada pengaplikasian teknologi nosel terhadap dampak yang ditimbulkan. Pengujian dilakukan untuk mendapatkan desain nosel yang memiliki keluaran gaya impak terendah dengan mengetahui karakteristik nosel melalui pengaruh sudut lubang *baffle* dan jarak tembak terhadap gaya impak. Variasi nosel yang diuji adalah nosel standar tanpa lubang *baffle* dan nosel dengan sudut lubang *baffle* sebesar 30°, 90°, dan 150°. Keempat nosel tersebut diuji pada tiga jarak tembak, yaitu 0 mm, 10 mm, dan 20 mm. Hasil eksperimen dan analisa secara statistik menunjukkan pola yang menyatakan adanya hubungan antara variasi sudut lubang *baffle* dan jarak tembak terhadap gaya impak dengan adanya indikasi titik jarak tembak optimal untuk tiap variasi nosel dan kecenderungan menurunnya gaya impak seiring dengan meningkatnya besar sudut lubang *baffle*. Adapun besar gaya impak terkecil dihasilkan oleh nosel dengan sudut lubang *baffle* 150° pada jarak tembak 0 mm. Metode simulasi komputasi memberikan hasil berupa profil kecepatan dan nilai dari beberapa parameter aliran di dalam dan luar nosel yang menunjukkan bahwa nosel yang digunakan termasuk kategori nosel supersonik.

Kata kunci : gaya impak, *gene gun*, jarak tembak, nosel, sudut lubang

## Abstract

Name : Muhammad Satrio Utomo

Study Program: Mechanical Engineering

Title : Characterisation of Nozzle through Baffle Holes Angle and Shooting Distance Variations to Impact Force for Application of Gene Gun

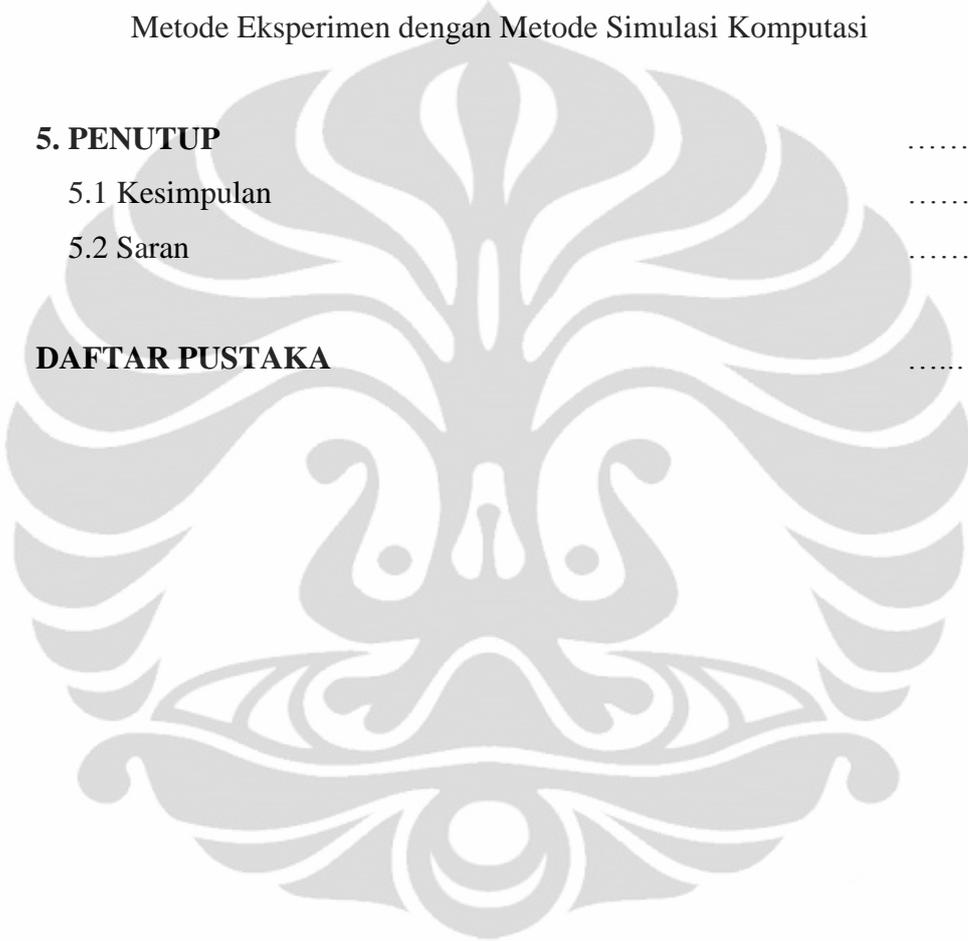
There have been many researches in demand to develop gene gun as an intradermal vaccine administration instrument. One of those researches is in the application of nozzle technology with its implication. Tests to investigate nozzle characteristics in terms of baffle holes angle and shooting distance variation to impact force have been carried out. Nozzles under test were standard nozzle without baffle holes and nozzle with baffle holes angle  $30^\circ$ ,  $90^\circ$ , and  $150^\circ$ . These four nozzles were tested at three shooting distances, which were 0 mm, 10 mm and 20 mm. Patterns that stated relationship between the baffle holes angle and shooting distance that generate the impact force have been found through experiments and statistical analysis. They indicated the existence of optimum shooting distance for each nozzles. In addition, the impact force trend is decreasing when the baffle holes angle is widened. It is also discovered that the lowest impact force was generated by nozzle with baffle holes angle  $150^\circ$  with shooting distance 0 mm. Computational simulations were conducted to investigate the velocity profile and some fluid flow parameter values inside and outside the nozzles. From these, it can be concluded that the nozzles used for the application of gene gun as intradermal vaccine administration instrument should be considered as supersonic nozzle.

Key words : baffle holes angle, gene gun, impact force, nozzle, shooting distance

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GRAFIK	xiii
<b>1. PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Metodologi	5
1.5 Sistematika Penulisan	6
<b>2. TINJAUAN PUSTAKA</b>	<b>7</b>
2.1 Konsep Dasar Aliran Fluida	7
2.2 Konsep Aliran Fluida Mampu-mampat	13
2.3 Aliran Fluida dalam Nosel	14
2.4 SolidWorks® Flow Simulation	15
2.5 Konsep dan Pengembangan Teknologi Gene Gun	19
<b>3. PERANCANGAN DAN METODE PENELITIAN</b>	<b>24</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian	24
3.2 Perancangan dan Pembuatan Alat Uji	25
3.3 Perancangan Instrumen Pengujian	26
3.4 Prosedur Pengujian dan Pengambilan Data	33
3.5 Pengujian Simulasi Komputasi	35

<b>4. HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	.....37
4.1 Analisa Pengujian Eksperimental	.....37
4.2 Analisa Kesalahan dan Statistik	.....48
4.3 Analisa Simulasi Komputasional	.....57
4.4 Perbandingan antara Besar Gaya Impak berdasarkan Metode Eksperimen dengan Metode Simulasi Komputasi	.....75
<b>5. PENUTUP</b>	.....77
5.1 Kesimpulan	.....77
5.2 Saran	.....78
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	.....79



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Ilustrasi tingkat penetrasi instrumen transdermal	.....4
Gambar 2.1 Diagram alir tahapan pengerjaan SolidWorks® Flow Simulation	.....16
Gambar 2.2 Kategori mesh pada SolidWorks® Flow Simulation	.....18
Gambar 2.3 <i>Gene gun</i> dengan ruang vakum	.....20
Gambar 2.4 Mikropartikel emas berukuran 1 µm	.....21
Gambar 2.5 BioRad® <i>gene gun</i>	.....21
Gambar 2.6 Inovasi pada nosel <i>gene gun</i>	.....23
Gambar 2.7 Detail inovasi nosel <i>gene gun</i>	.....23
Gambar 2.8 Ilustrasi kerja BioRad® Helios <i>gene gun</i>	.....23
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	.....24
Gambar 3.2 Nosel uji	.....26
Gambar 3.3 Nosel dengan adaptor	.....26
Gambar 3.4 Regulator tekanan	.....27
Gambar 3.5 Skema kerja katup 5/2	.....27
Gambar 3.6 Katup 5/2	.....28
Gambar 3.7 Skema kerja katup bukaan cepat	.....29
Gambar 3.8 Katup bukaan cepat	.....29
Gambar 3.9 Tabung akumulator	.....30
Gambar 3.10 Konstruksi <i>gene gun desk model</i>	.....31
Gambar 3.11 Neraca digital	.....32
Gambar 3.12 Skema pengujian	.....34
Gambar 3.13 Frame hasil ekstrak	.....35
Gambar 4.1 Kontrol volume pengujian	.....58
Gambar 4.2 <i>Basic mesh</i> simulasi	.....58
Gambar 4.3 Penentuan input tekanan	.....59
Gambar 4.4 Penentuan output tekanan	.....59
Gambar 4.5 Hasil simulasi komputasi nosel standar tanpa lubang <i>baffle</i>	.....62

Gambar 4.6 Hasil simulasi komputasi nosel standar pada jarak tembak 10 mm	.....63
Gambar 4.7 Hasil simulasi komputasi nosel standar pada jarak tembak 20 mm	.....63
Gambar 4.8 Hasil simulasi komputasi nosel dengan sudut lubang <i>baffle</i> 30°	.....66
Gambar 4.9 Hasil simulasi komputasi nosel dengan sudut lubang <i>baffle</i> 30° pada jarak tembak 10 mm	.....66
Gambar 4.10 Hasil simulasi komputasi nosel dengan sudut lubang <i>baffle</i> 30° pada jarak tembak 20 mm	.....67
Gambar 4.11 Hasil pengujian simulasi komputasi untuk nosel dengan sudut lubang <i>baffle</i> 90°	.....69
Gambar 4.12 Hasil pengujian simulasi komputasi untuk nosel dengan sudut lubang <i>baffle</i> 90° pada jarak tembak 10 mm	.....70
Gambar 4.13 Hasil pengujian simulasi komputasi untuk nosel dengan sudut lubang <i>baffle</i> 90° pada jarak tembak 20 mm	.....70
Gambar 4.14 Hasil pengujian simulasi komputasi untuk nosel dengan sudut lubang <i>baffle</i> 150°	.....72
Gambar 4.15 Hasil pengujian simulasi komputasi untuk nosel dengan sudut lubang <i>baffle</i> 150° pada jarak tembak 10 mm	.....73
Gambar 4.16 Hasil pengujian simulasi komputasi untuk nosel dengan sudut lubang <i>baffle</i> 150° pada jarak tembak 20 mm	.....73

## DAFTAR TABEL

Tabel 1. Pengolahan data pengujian	.....50
Tabel 2. Nilai massa impact rata-rata untuk tiap sampel uji	.....51
Tabel 3. Hasil perhitungan frekuensi pengamatan dan harapan	.....52
Tabel 4. Perhitungan rasio uji	.....52
Tabel 5. Perhitungan rasio uji	.....56
Tabel 6. Data aliran fluida dalam nosel standar	.....62
Tabel 7. Data aliran fluida dalam nosel dengan sudut lubang keluar samping 30°	.....65
Tabel 8. Data aliran fluida dalam nosel dengan sudut lubang keluar samping 90°	.....69
Tabel 9. Data aliran fluida dalam nosel dengan sudut lubang keluar samping 150°	.....72
Tabel 10. Nilai gaya impact berdasarkan pengujian simulasi komputasi	.....74
Tabel 11. Perbandingan besar nilai gaya impact berdasarkan metode eksperimen dengan simulasi komputasi	.....75

## DAFTAR GRAFIK

Grafik 4.1 Besar massa impak terhadap variasi sudut lubang keluar samping pada jarak tembak 0 mm	.....38
Grafik 4.2 Besar massa impak terhadap variasi sudut lubang keluar samping pada jarak tembak 10 mm	.....39
Grafik 4.3 Besar massa impak terhadap variasi sudut lubang keluar samping pada jarak tembak 20 mm	.....40
Grafik 4.4 Besar massa impak rata-rata terhadap variasi sudut lubang keluar samping	.....41
Grafik 4.5 Besar massa impak terhadap variasi jarak tembak pada nosel standar tanpa lubang keluar samping	.....43
Grafik 4.6 Besar massa impak terhadap variasi jarak tembak pada nosel dengan sudut lubang keluar samping 30°	.....44
Grafik 4.7 Besar massa impak terhadap variasi jarak tembak pada nosel dengan sudut lubang keluar samping 90°	.....45
Grafik 4.8 Besar massa impak terhadap variasi jarak tembak pada nosel dengan sudut lubang keluar samping 150°	.....46
Grafik 4.9 Besar massa impak rata-rata terhadap variasi jarak tembak	.....47

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1. 1. Latar Belakang**

Kesehatan merupakan entitas terpenting yang dimiliki dan harus dijaga oleh manusia di hidupnya. Kehidupan itu sendiri tidak dapat terlepas dari keberadaan kesehatan. Kata sehat sendiri, menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia, didefinisikan sebagai keadaan seluruh badan serta bagian-bagiannya bebas dari sakit. Sedangkan menurut UU Kesehatan no. 23 tahun 1992, sehat adalah keadaan sejahtera dari badan, jiwa, dan sosial yang memungkinkan setiap orang hidup produktif secara sosial dan ekonomis. Sejalan dengan definisi sehat menurut UU Kesehatan no. 23 tahun 1992, WHO mendefinisikan sehat sebagai keadaan sejahtera secara fisik, mental, dan sosial bukan hanya sekedar tidak adanya penyakit maupun cacat. Agar dapat membuat tubuhnya terus berada dalam kondisi sehat, manusia melakukan berbagai macam usaha yang bertujuan mempertahankan kesehatannya, salah satunya dengan melakukan vaksinasi (WHO, 2004).

Vaksinasi merupakan prinsip dasar dalam pencegahan penyakit menular dan berbahaya. Vaksinasi diperkenalkan pertama kali oleh Edward Jenner pada tahun 1796 untuk penyakit cacar. Vaksin sendiri, menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia, didefinisikan sebagai bibit penyakit yang sudah dilemahkan yang digunakan untuk vaksinasi. Meskipun pada hari ini sudah dapat ditemui berbagai macam vaksin untuk berbagai macam penggunaan, penyakit menular masih menjadi masalah utama global khususnya di negara-negara berkembang (Levine, MM. 2003)

Alasan pertama adalah fakta bahwa kebanyakan vaksin masih menggunakan instrumen jarum suntik sebagai sarana administrasinya. Di beberapa bagian negara berkembang, administrasi vaksin menggunakan jarum suntik berpotensi menimbulkan risiko yang cukup berbahaya. Tenaga kesehatan yang profesional diperlukan untuk menggunakan jarum

suntik sebagai sarana administrasi vaksin maupun obat dan orang-orang tersebut berisiko terluka karena tertusuk jarum suntik. Proses administrasi vaksin melalui jarum suntik juga dapat membahayakan sang pasien jika tidak dilakukan oleh orang yang profesional di bidangnya. Tidak menutup kemungkinan proses injeksi jarum suntik tidak dilakukan di titik yang sesuai sehingga dapat menimbulkan malpraktik. Lebih dari itu, sifat dari jarum suntik yang harus steril dan sekali pakai menyebabkan masalah lain yaitu pada pengelolaan limbah jarum suntik yang jelas berbahaya baik dari segi fisiknya yang tajam maupun dari medis yang tidak steril berpotensi mengandung bibit penyakit (Kis dkk, 2011).

Alasan kedua adalah fakta bahwa selama ini vaksin selalu disimpan dalam bentuk cair (larutan). Hal ini dilakukan karena memang selama ini vaksin selalu dimasukkan ke dalam tubuh melalui instrumen jarum suntik. Di sisi lain, vaksin dalam bentuk larutan ini menimbulkan masalah dalam metode penyimpanannya. Vaksin dalam bentuk cairan harus disimpan dalam kondisi udara tertentu. Temperatur dan kelembapan udara harus dijaga agar vaksin tidak rusak. Beberapa instrumen kotak penyimpanan sudah dibuat dengan tujuan membuat tempat penyimpan vaksin yang praktis dan dapat diandalkan. Namun tetap saja, dengan adanya kendala ini vaksin-vaksin yang ada hanya memiliki jangka waktu penggunaan yang cukup pendek. Selain itu proses distribusi vaksin juga menjadi sangat tergantung terhadap keberadaan kotak penyimpanannya yang khusus (Soliman & Abdallah, 2011).

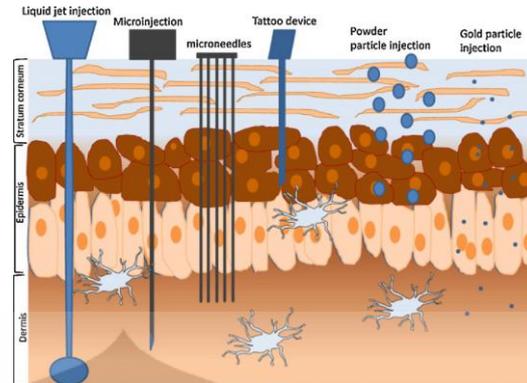
Perkembangan sistem administrasi vaksin (*drug delivery system*) idealnya memungkinkan proses administrasi yang lebih aman dengan tetap memperhatikan aspek ekonomi dan tanpa mengurangi keefektifan proses vaksinasi. Oleh karena itu, pengembangan teknologi injeksi tanpa jarum dilakukan dengan tujuan mengurangi risiko cedera pada saat penggunaan dan dapat menjadi sarana administrasi obat yang tidak menyakitkan bagi pasien (Mitragotri, 2005).

Jaringan kulit kemudian menjadi sasaran menarik sebagai sarana administrasi vaksin karena diperkirakan lebih efektif dibandingkan melalui

mulut (oral) ataupun pembuluh darah (intravaskuler). Sel-sel imun tubuh seperti sel Langerhans di epidermis dan sel-sel dendritik di lapisan dermis dapat dengan mudah menerima dan mengolah antigen dari luar tubuh. Sel-sel imun tersebut dapat berpindah melalui jalur limfe dan kemudian menghasilkan sistem imun kepada sel-sel tubuh lain berdasarkan antigen yang diterima. Lebih dari itu, tidak terdapatnya sensor saraf-saraf penerima dan pembuluh darah pada jaringan epidermis memberikan kemungkinan pemberian vaksin tanpa menimbulkan rasa sakit maupun pendarahan. Pendek kata, rute administrasi vaksin melalui kulit (intradermal) telah dinyatakan lebih efektif dengan memberikan respons imunitas tubuh yang lebih baik dibandingkan dengan pemberian vaksin melalui injeksi intramuskular dan memungkinkan penggunaan dosis antigen yang lebih sedikit (Auewarakul P. dkk, 2007)

Selain metode jarum suntik konvensional atau juga dikenal sebagai metode injeksi Mantoux, beberapa instrumen lain dengan teknologi yang berbeda-beda dikembangkan untuk dapat memasukkan vaksin melalui jaringan kulit, antara lain:

- a. mikro-injeksi
- b. *microneedle array*
- c. *liquid jet injector*
- d. *gene gun*
- e. *contour shock tube*
- f. *electroporation*
- g. *laser irradiation* (Mehier-Humbert & Gay, 2004).



Gambar 1.1 Ilustrasi tingkat penetrasi instrumen transdermal  
(Kis dkk, 2011)

Di antara pengembangan instrumen-instrumen tersebut, terdapat satu pengembangan pada instrumen *gene gun* yang difokuskan pada perancangan bagian nosel. Hal ini dilakukan dengan tujuan meningkatkan kemampuan penetrasi partikel dan mengurangi luas area sebaran partikel sehingga proses penembakan dapat dilakukan terhadap target yang lebih kecil dengan target jaringan yang lebih dalam. Adapun pengembangan dilakukan dengan mendesain nosel dengan diameter saluran yang lebih kecil dan bentuk kontur tertentu. Selain itu modifikasi juga dilakukan dengan membuat lubang keluaran samping (*baffle*) dengan sudut tertentu. Selain itu juga dilakukan penelitian untuk menentukan jarak tembakan yang dapat menghasilkan tembakan paling efektif (O'Brien dkk, 2001).

## 1. 2. Perumusan Masalah

Karya tulis ini memfokuskan diri pada mekanisme pneumatik dengan ujung keluaran berupa nosel yang diaplikasikan untuk teknologi *gene gun*. Mekanisme pneumatik tersebut menggunakan sumber tekanan udara dari kompresor dan menggunakan udara standar yang diasumsikan sebagai gas ideal sebagai fluida kerjanya. Tekanan masukan ditentukan sebesar 6 bar dan dikendalikan dengan instrumen *pressure gage*. Adapun keluaran yang akan diambil adalah besar massa impak dari proses penembakan udara bertekanan yang dilakukan. Keluaran tersebut kemudian akan diolah untuk mendapatkan nilai gaya impak. Variasi

dilakukan terhadap dua variabel, yaitu sudut lubang keluar samping nosel dan jarak tembak. Terdapat empat nosel yang digunakan, yaitu nosel tanpa lubang keluar samping sebagai standar acuan, nosel dengan sudut lubang keluar samping sebesar  $30^\circ$ , nosel dengan sudut lubang keluar samping sebesar  $90^\circ$ , dan dengan sudut lubang keluar samping sebesar  $150^\circ$ . Keempat nosel tersebut akan diuji di tiga jarak tembak yang berbeda, yaitu nol (tanpa jarak), 10 mm, dan 20 mm. Adapun jarak tembak diukur dari ujung permukaan nosel ke permukaan target.

### 1. 3. Tujuan Penelitian

1. Mengetahui pengaruh sudut keluaran samping nosel terhadap besar gaya impact yang ditimbulkan sebagai studi awal perancangan desain nosel untuk aplikasi *gene gun*.
2. Mengetahui pengaruh jarak tembak terhadap besar gaya impact yang ditimbulkan sebagai studi awal perancangan desain nosel dan penentuan metode penembakan yang efektif untuk aplikasi *gene gun*.

### 1. 4. Metodologi

Penelitian di dalam karya tulis ini dilakukan dengan metode sebagai berikut:

#### 1. Studi literatur

Referensi berupa berbagai macam rujukan yang berasal dari buku, artikel, internet, dan sumber-sumber lain digunakan sebagai data awal penelitian dan panduan saat kegiatan penelitian dilakukan.

#### 2. Kajian eksperimental

Proses pengambilan data dilakukan melalui metode eksperimen dengan tujuan mendapatkan hasil penelitian yang aktual dan representatif.

#### 3. Simulasi komputasi

Kajian secara simulasi komputasi dilakukan dengan menggunakan bantuan aplikasi *Flow Simulation* pada piranti lunak *SolidWorks 2012* dengan tujuan mendapatkan data sekunder yang tidak bisa didapat

melalui eksperimen dan secara tidak langsung terlibat dengan fokus penelitian.

### **1. 5. Sistematika Penulisan**

Isi dari karya tulis ini dibagi menjadi beberapa bab yang memiliki keterkaitan antara satu dengan yang lain. Berikut merupakan urutan dari isi karya tulis ini:

1. Bab 1, yang merupakan pendahuluan dari isi karya tulis ini sebagai pengantar untuk membangun pemahaman awal dari permasalahan yang dibahas.
2. Bab 2, yang berisikan dasar-dasar teori hasil studi literatur mengenai permasalahan yang akan dibahas di bab selanjutnya.
3. Bab 3, yang berisikan penjelasan mengenai metode dan prosedur penelitian yang digunakan secara rinci.
4. Bab 4, yang berisikan hasil dari kegiatan penelitian yang sudah dilakukan beserta pengolahan dan pembahasan terhadap hasil tersebut.
5. Bab 5, yang berisikan kesimpulan dari kegiatan penelitian yang dilakukan dan saran yang dapat digunakan untuk kelanjutan pembahasan masalah.

## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2. 1. Konsep Dasar Aliran Fluida

#### 2. 1. 1. Definisi Fluida

Fluida didefinisikan sebagai materi yang mengalami deformasi/perubahan bentuk terus-menerus saat diberi tegangan geser sekecil apapun. Pergerakan atau perubahan bentuk materi fluida yang terus-menerus di bawah pengaruh tegangan geser itu yang kemudian disebut dengan aliran fluida (Kumar, 2000).

#### 2. 1. 2. Parameter-parameter Sifat Fluida

Di dalam mempelajari perilaku fluida, terdapat beberapa parameter yang digunakan sebagai acuan, antara lain (Kumar, 2000 & Munson dkk, 2005):

a. Kerapatan/massa jenis

Kerapatan atau massa jenis sebuah fluida didefinisikan sebagai massa fluida per satuan volume yang dilambangkan dengan  $\rho$  (rho) dan memiliki satuan SI  $\text{kg/m}^3$ .

b. Viskositas

Viskositas atau kekentalan diartikan sebagai ukuran tahanan gesek dalam fluida yang menyebabkan fluida memiliki hambatan untuk bergerak. Viskositas muncul akibat adanya kohesi dan momentum molekuler. Viskositas biasa dinyatakan dalam satuan centipoise (cP).

c. Kemampu-mampatan

Faktor kemampu-mampatan suatu fluida ditentukan melalui besar modulus elastisitas borongan (*bulk modulus*). Dalam persamaan matematis, dapat ditulis  $E = \frac{dp}{d\rho/\rho}$  dengan satuan SI

$\text{N/m}^2$ . Semakin besar nilai modulus elastisitas borongan maka fluida relatif lebih tidak mampu-mampat.

d. Tekanan

Tekanan pada fluida diartikan sebagai gaya tekan yang normal terhadap permukaan dibagi luas area kontak gaya tekan. Satuan SI dari tekanan adalah Pascal (Pa).

e. Temperatur

Temperatur bersama besaran termodinamika lain seperti energi dalam ( $U$ ), entropi ( $s$ ), dan lainnya biasa digunakan untuk menganalisa kajian perpindahan panas pada aliran fluida atau pada aliran fluida yang mengalami perubahan temperatur seperti aliran gas ideal. Temperatur memiliki satuan SI Kelvin (K) walaupun dalam praktiknya satuan derajat Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) dan derajat Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ ) juga sering digunakan.

f. Kecepatan

Kecepatan menjadi salah satu kajian penting dalam aliran fluida karena memiliki banyak pengaruh terhadap parameter-parameter lain. Kecepatan aliran fluida biasa dinyatakan dalam satuan m/s.

Selain parameter yang telah disebutkan sebelumnya, masih terdapat parameter-parameter lain yang sering digunakan dalam aliran fluida seperti laju aliran massa (*mass flow rate*), laju aliran volume (*volumetric flow rate*), dan bilangan-bilangan tak berdimensi seperti bilangan Reynolds, bilangan Mach, bilangan Prandtl, dan lainnya.

### 2. 1. 3. Tipe Aliran fluida

Penentuan tipe aliran fluida sangat dipengaruhi oleh properti viskositas dan kemampu-mampatan. Fluida dengan tegangan geser yang berhubungan secara linear terhadap laju regangan geser digolongkan sebagai fluida Newtonian. Pada umumnya, zat cair dan gas yang ideal merupakan fluida

Newtonian sedangkan fluida yang memiliki tegangan geser tidak berhubungan secara linear terhadap laju regangan geser digolongkan sebagai fluida non-Newtonian. Saat viskositas pada suatu fluida dianggap tidak mempengaruhi kondisi fluida dan dianggap nol maka aliran fluida tersebut digolongkan sebagai aliran inviscid sedangkan kebalikannya disebut aliran viskos. Penentuan antara kedua tipe aliran ini biasanya menjadi penting saat dilakukan kajian perpindahan panas pada aliran fluida tersebut.

Selanjutnya, tipe aliran fluida ditentukan melalui kemampumampatannya. Faktor ini dipengaruhi oleh besar modulus borongan (*bulk modulus*) dari partikel fluida yang berkaitan. Nilai modulus yang besar menunjukkan bahwa fluida relatif tidak mampu-mampat, yang artinya dibutuhkan perubahan tekanan yang besar untuk menghasilkan perubahan volume yang kecil. Pada umumnya kebanyakan zat cair dikategorikan sebagai aliran tak mampu-mampat dan zat gas sebagai aliran mampu-mampat. Jadi jelas bahwa ketika menangani aliran gas, perhatian yang lebih besar perlu diberikan pada pengaruh kemampu-mampatan terhadap perilaku fluida.

Terakhir, satu parameter aliran fluida yang sangat menentukan tipe aliran fluida dan sering digunakan dalam pengamatan suatu aliran fluida adalah bilangan Reynolds. Bilangan tak berdimensi ini merupakan ukuran dari suatu rasio gaya inersia pada suatu elemen fluida terhadap gaya viskos elemen tersebut. Bilangan Reynolds dinyatakan melalui persamaan

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (1)$$

dengan:

$\rho$  = massa jenis fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

$v$  = kecepatan rata-rata aliran fluida ( $\text{m/s}$ )

$D$  = panjang karakteristik fluida ( $\text{m}$ )

$\mu$  = viskositas dinamik fluida ( $\text{kg/m.s}$ ) (Munson dkk, 2004).

Berdasarkan bilangan Reynolds, aliran fluida dibedakan menjadi tiga macam yaitu laminar, transisi, dan turbulen. Secara umum, pada kasus aliran fluida di dalam saluran dengan penampang bundar, jika besar bilangan Reynolds kurang dari 2100 maka aliran berbentuk laminar dan jika lebih dari 4000 maka aliran fluida berupa turbulen. Sedangkan jika berada di antara keduanya merupakan aliran transisi.

#### 2. 1. 4. Metode Pendekatan

Terdapat dua pendekatan yang dapat digunakan untuk menganalisa permasalahan menyangkut suatu aliran fluida, yaitu metode *Eulerian* dan metode *Lagrangian*. Dalam metode *Eulerian*, aliran fluida digambarkan melalui kondisi parameter-parameter pada suatu kontrol volume di ruang dan waktu tertentu. Parameter tersebut dapat berupa tekanan, kerapatan, kecepatan, temperatur, dan lainnya sehingga bisa didapat informasi mengenai hubungan antara titik yang tetap berada di dalam kontrol volume terhadap aliran fluida yang berada di dalam ruang kontrol volume di waktu tertentu.

Sedangkan dalam metode *Lagrangian*, aliran fluida dipelajari dengan mengamati perilaku dari suatu partikel fluida. Partikel fluida yang sudah ditentukan akan dipantau dan kemudian ditentukan sifat-sifatnya terhadap perubahan kedudukan dan waktu.

Penelitian dan analisa dalam mekanika fluida biasanya menggunakan metode Eulerian untuk menggambarkan kondisi suatu aliran fluida. Namun, tidak jarang digunakan metode Lagrangian yang memudahkan proses analisa. Sebagai contoh, beberapa perhitungan mekanika fluida secara numerik digunakan untuk menentukan gerakan masing-masing partikel fluida terhadap waktu dan posisi tertentu sehingga perhitungan tersebut menggambarkan gerakan partikel fluida dalam bentuk Lagrangian (Kumar, 2000 & Munson, 2005).

### 2. 1. 5. Dinamika Fluida

Ketika sebuah partikel fluida bergerak dari suatu tempat ke tempat yang lain, partikel tersebut biasanya mengalami suatu percepatan atau perlambatan. Menurut hukum kedua Newton tentang gerak, gaya netto yang bekerja pada partikel harus sama dengan massa dikalikan dengan percepatannya, sesuai dengan persamaan

$$F = m \cdot a \quad (2)$$

Dengan begitu maka dapat diasumsikan bahwa gerakan fluida hanya diatur oleh gaya tekanan dan gravitasi sehingga hukum kedua Newton diterapkan di sebuah partikel fluida dalam bentuk: (gaya tekan netto pada sebuah partikel) + (gaya gravitasi netto pada sebuah partikel) = (massa partikel) x (percepatan partikel) (Munson dkk, 2004).

Prinsip ini kemudian dapat diturunkan menjadi persamaan momentum linear suatu aliran fluida. Momentum adalah massa dikalikan dengan kecepatan maka momentum dari sebuah partikel kecil  $\rho \cdot dV$  adalah  $v \cdot \rho \cdot dV$ .

Jadi momentum dari seluruh sistem adalah

$$\frac{D}{Dt} \int v \cdot \rho \cdot dV = \Sigma F_{\text{sistem}} \quad (3)$$

Apabila sebuah volume atur berhimpit dengan sebuah sistem pada suatu saat, gaya-gaya yang bekerja pada sistem tersebut dan gaya-gaya yang bekerja pada kandungan dari volume atur yang berhimpit dalam sesaat menjadi identik, yang berarti

$$\Sigma F_{\text{sistem}} = \Sigma F_{\text{kandungan volume atur yang berhimpit}} \quad (4)$$

Lebih lanjut lagi, untuk sebuah sistem dan kandungan volume atur yang berhimpit, tetap, dan tidak berdeformasi didapat persamaan

$$\frac{D}{Dt} \int v \cdot \rho \cdot dV = \frac{d}{dt} \int v \cdot \rho \cdot dV + \int v \cdot \rho \cdot dV \cdot n \cdot dA \quad (5)$$

Persamaan (5) menunjukkan bahwa laju perubahan terhadap waktu dari momentum secara linear sama dengan laju

perubahan terhadap waktu dari momentum linear kandungan volume atur + laju aliran netto dari momentum linear melewati permukaan atur. Ketika partikel-partikel massa bergerak masuk atau keluar dari sebuah volume atur melewati permukaan atur, partikel-partikel tersebut membawa momentum linear masuk atau keluar. Jadi, aliran momentum kelihatannya tidak terlalu berbeda dengan aliran massa. Persamaan (5) biasa dikenal dengan persamaan momentum linear.

Gaya-gaya yang terlibat dalam persamaan momentum linear adalah gaya-gaya badan dan permukaan yang bekerja pada apa yang terkandung dalam volume atur. Satu-satunya gaya badan yang biasa dipertimbangkan pada aliran fluida adalah gaya akibat percepatan gravitasi. Gaya badan ini biasa dikenal sebagai gaya berat. Gaya-gaya permukaan pada dasarnya dikenakan pada kandungan volume atur oleh materi di luar volume atur yang bersentuhan dengan materi di dalam volume atur. Sebagai contoh, sebuah dinding yang bersentuhan dengan fluida dapat memberikan suatu gaya permukaan reaksi pada fluida di perbatasannya. Demikian pula halnya, fluida di luar volume atur dapat mendorong fluida di dalam volume atur pada antarmuka bersama, yang biasanya adalah bukaan pada permukaan atur yang dilalui oleh fluida yang mengalir. Sebuah benda yang terendam dapat menahan gerakan fluida dengan gaya-gaya permukaan.

### 2. 1. 5. 1. Fungsi Impuls

Melalui persamaan momentum fluida yang telah disebutkan pada subbab sebelumnya, dapat diturunkan sebuah fungsi persamaan yang dapat digunakan untuk menghitung besar gaya dorong dari aliran fluida dalam sebuah saluran. Fungsi persamaan yang dikenal dengan fungsi impuls tersebut dinyatakan dengan

$$F = (p_2 A_2 + \rho_2 A_2 c_2^2) - (p_1 A_1 + \rho_1 A_1 c_1^2) \quad (6)$$

Besar gaya dorong antara suatu bagian dari aliran fluida bisa didapat dari perubahan fungsi impuls antara dua bagian saluran tersebut. Dari persamaan (6) dapat diketahui bahwa gaya yang bekerja dalam fungsi impuls tersebut berasal dari gaya statis dan gaya dinamis aliran fluida. Gaya statis diwakili dengan notasi  $p.A$  yang sesuai dengan pernyataan bahwa tekanan pada suatu luasan permukaan merupakan gaya yang bekerja pada permukaan tersebut per satuan luas permukaan. Sedangkan notasi  $\rho.A.v^2$  menyatakan gaya dinamis yang muncul akibat adanya materi yang bergerak dengan kecepatan tertentu atau dikatakan juga sebagai besar perubahan momentum per satuan waktu.

## 2. 2. Konsep Aliran Fluida Mampu-Mampat

### 2. 2. 1. Persamaan Gas Ideal

Saat mempelajari suatu aliran fluida mampu-mampat, biasanya fluida kerja akan diasumsikan menjadi gas ideal. Persamaan dari sebuah gas ideal adalah

$$p = \rho.R.T \quad (7)$$

dengan  $p$  adalah tekanan,  $\rho$  adalah kerapatan,  $R$  adalah konstanta gas, dan  $T$  menyatakan temperatur.

Kondisi aliran mampu-mampat pada umumnya merupakan aliran isentropik dari gas sempurna. Untuk aliran isentropik dari gas sempurna, kerapatan dan tekanan dihubungkan dengan persamaan  $p/\rho^k = C$ , dengan  $k$  merupakan rasio kalor jenis dan  $C$  adalah sebuah konstanta.

Persamaan Bernoulli kemudian dapat digunakan untuk persamaan aliran fluida mampu-mampat dengan asumsi aliran bersifat isentropik dan tunak untuk gas sempurna melalui persamaan

$$\left(\frac{k}{k-1}\right) \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 = \left(\frac{k}{k-1}\right) \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 \quad (8)$$

### 2. 2. 2. Bilangan Mach dan Kecepatan Suara

Bilangan Mach merupakan suatu bilangan tak berdimensi dari kemampu-mampatan fluida. Bilangan Mach didefinisikan sebagai perbandingan antara nilai kecepatan aliran lokal ( $V$ ) terhadap kecepatan suara lokal ( $c$ ) yang dinyatakan melalui persamaan

$$Ma = \frac{V}{c} \quad (9)$$

Nilai kecepatan suara untuk gas ideal dinyatakan dengan persamaan

$$c = \sqrt{k \cdot R \cdot T} \quad (10)$$

dengan  $k$  merupakan rasio panas jenis,  $R$  merupakan konstanta gas ideal, dan  $T$  merupakan temperatur dalam Kelvin.

Bilangan Mach juga menjadi penentu apakah suatu aliran fluida mampu-mampat dikategorikan sebagai aliran subsonik, sonik, transonik, supersonik, maupun hipersonik. Pengkategorian aliran fluida ini menjadi penting karena tiap-tiap kategori memiliki perilaku yang berbeda jika diberi perlakuan yang sama.

### 2. 3. Aliran Fluida dalam Nosel

Ketika fluida mengalir secara tunak melalui sebuah laluan yang mempunyai luas penampang aliran yang berubah sepanjang jarak aksial, persamaan kekekalan massa (kontinuitas),

$$m \cdot dt = \rho \cdot A \cdot V = \text{konstan} \quad (11)$$

dapat digunakan untuk menghubungkan laju aliran pada berbagai bagian yang berbeda. Untuk aliran mampu-mampat, nilai kerapatan, luas penampang, dan kecepatan aliran dapat bervariasi dari satu bagian ke bagian lain.

Hukum kedua Newton dapat diterapkan pada aliran inviscid dan tunak dari sebuah partikel fluida, baik untuk aliran mampu-mampat maupun tak mampu-mampat dengan persamaan

$$dp + \frac{1}{2} \rho \cdot d(V^2) + \gamma \cdot dz = 0 \quad (12)$$

Kemudian, hubungan antara persamaan kontinuitas dengan definisi bilangan Mach menghasilkan persamaan

$$\frac{dV}{V} = - \frac{dA}{A} \cdot \frac{1}{(1-Ma^2)} \quad (13)$$

Persamaan (13) di atas kemudian menimbulkan pemahaman bahwa pengecilan luas penampang saluran akan mengakibatkan peningkatan kecepatan pada aliran subsonik. Begitu juga dengan peningkatan luas penampang saluran yang mengakibatkan penurunan kecepatan pada aliran subsonik. Lebih dari itu, persamaan (13) juga menjelaskan bahwa apabila alirannya bersifat supersonik ( $Ma > 1$ ) maka pembesaran luas penampang saluran akan mengakibatkan peningkatan kecepatan, yang berarti pengecilan luas penampang saluran akan mengakibatkan penurunan kecepatan aliran.

Lebih jauh lagi, melalui persamaan

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dA}{A} \cdot \frac{Ma^2}{1-Ma^2} \quad (14)$$

dapat disimpulkan bahwa untuk aliran subsonik ( $Ma < 1$ ), perubahan kerapatan dan luas penampang saluran berbanding lurus, sementara untuk aliran supersonik ( $Ma > 1$ ), perubahan kerapatan dan luas penampang saluran berbanding terbalik.

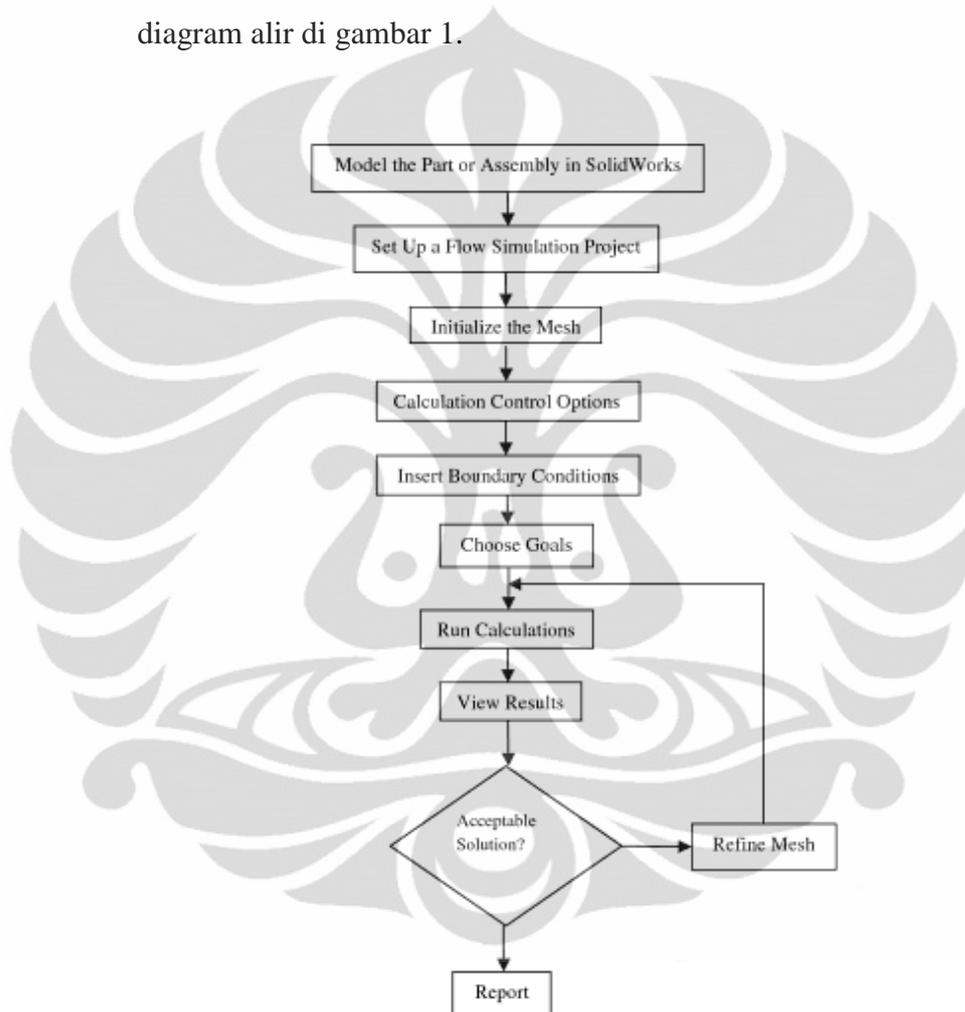
Berdasarkan persamaan kontinuitas yang menyatakan nilai  $\rho \cdot A \cdot V$  harus tetap konstan maka apabila luas penampang saluran membesar dan alirannya bersifat subsonik, kerapatan akan meningkat dan kecepatan akan berkurang. Namun, untuk aliran supersonik, saat luas penampang saluran membesar, kerapatan akan berkurang sedemikian rupa sehingga kecepatan akan meningkat.

#### 2. 4. SolidWorks® Flow Simulation

*SolidWorks®* merupakan sebuah program CAD (*Computer Aided Design*) yang dikembangkan oleh *Dassault System*. Selain berfungsi sebagai sarana penggambaran dan pemodelan mekanikal, *SolidWorks®* juga dibekali dengan berbaagai macam fitur yang dapat digunakan untuk membantu pengguna menganalisa desainnya. Salah satu fitur tambahan

yang dimiliki *SolidWorks*® adalah *Flow Simulation* yang memungkinkan pengguna untuk menganalisa desain yang meyeritakan aliran fluida melalui pendekatan ilmu CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

*Flow Simulation* menggunakan prinsip persamaan diferensial Navier-Stokes untuk menganalisa kondisi aliran fluida. Tahapan pengerjaan dalam menggunakan *Flow Simulation* ditunjukkan oleh diagram alir di gambar 1.



Gambar 2.1 Diagram alir tahapan pengerjaan *SolidWorks*® *Flow Simulation* (*SolidWorks Flow Simulation 2011 Technical Reference*)

Sebelum dilakukan analisa CFD menggunakan *Flow Simulation*, desain dimodelkan secara 3D terlebih dahulu. Pemodelan tidak harus dilakukan menggunakan program *SolidWorks*®. Program CAD lain seperti *Autodesk*® *Inventor* dan *CATIA* serta program lainnya dapat digunakan untuk memodelkan desain. Model yang dikerjakan dalam program-

program tersebut diimpor menjadi format pemodelan *SolidWorks*® sebelum dilakukan analisa CFD menggunakan *Flow Simulation*. Tingkat kemiripan model dengan benda nyata sangat berpengaruh terhadap hasil yang didapat sehingga jika dimungkinkan desain yang dimodelkan merupakan purwarupa dari benda akhir itu sendiri.

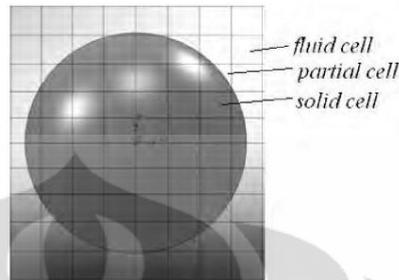
Setelah model siap, dilakukan persiapan terhadap proyek/analisa *Flow Simulation* yang akan dilakukan. Penentuan-penentuan dilakukan terhadap beberapa hal, antara lain:

- a. Tipe analisa, aliran internal atau eksternal.
- b. Fitur-fitur fisik model, seperti gravitasi, gerakan rotasi, dan radiasi.
- c. Fluida kerja, melingkupi gas, cairan, uap, dan cairan Non-Newtonian.
- d. Tipe aliran, laminar saja atau dengan turbulen.
- e. Kondisi termal dinding, antara adiabatik, konduksi, atau pemancar panas.
- f. Parameter termodinamik lingkungan, yaitu tekanan, temperatur, kerapatan udara, dan kecepatan di sumbu x, y, dan z.

Jika persiapan terhadap *Flow Simulation* yang akan digunakan sudah dilakukan, tahap selanjutnya adalah melakukan *meshing* pada model. *Mesh* pada *Flow Simulation* berbentuk persegi dan dibagi menjadi tiga kategori, yaitu *mesh* fluida, *mesh* solid, dan *mesh* parsial. *Mesh fluida* akan mengatur besar *mesh* yang berisikan fluida kerja, *mesh* solid akan mengatur besar *mesh* yang berisikan bagian model yang berbentuk solid sedangkan *mesh* parsial akan mengatur besar *mesh* yang berisi sebagian fluida dan sebagian solid.

Selain *meshing* secara menyeluruh, proses *meshing* juga dapat dilakukan secara lokal di bagian-bagian yang dianggap penting dalam proses analisa CFD. Penentuan besar *mesh* global dan lokal akan sangat menentukan tingkat ketelitian hasil analisa CFD karena semakin kecil ukuran *mesh* maka perhitungan yang dilakukan akan semakin teliti dan hasil yang didapat semakin konvergen. Hanya saja, perlu diingat bahwa semakin kecil ukuran *mesh* maka proses iterasi akan semakin banyak

sehingga akan memakan waktu banyak atau bahkan tidak dapat dilakukan karena kemampuan RAM komputer yang terbatas.



Gambar 2.2 Kategori *mesh* pada *SolidWorks® Flow Simulation*  
(*SolidWorks Flow Simulation 2011 Technical Reference*)

Setelah *meshing* selesai dilakukan, langkah selanjutnya adalah penentuan kondisi batas model. Tahap ini merupakan tahap paling penting dalam setiap analisa CFD karena penentuan terhadap parameter masukan dan keluaran sistem akan dilakukan. Dalam *SolidWorks® Flow Simulation*, terdapat tiga kategori kondisi batas, yaitu *flow openings*, *pressure openings*, dan *walls*. Masukan dan keluaran yang termasuk *flow openings* antara lain *mass flow*, *volume flow*, *velocity*, dan *Mach number*. Sedangkan masukan dan keluaran yang termasuk *pressure openings* meliputi *environmental pressure*, *total pressure*, dan *static pressure*. Terakhir, untuk *walls* dapat ditentukan antara *real wall* atau *ideal wall*.

Jika penentuan kondisi batas model sudah dipastikan sesuai dengan kondisi nyata atau dengan keperluan analisa CFD maka akan dilakukan pengaturan terhadap proses perhitungan yang akan dilakukan. Penentuan terhadap proses perhitungan dapat dilakukan terhadap parameter jumlah iterasi yang akan dilakukan, total waktu perhitungan, total waktu kondisi sebenarnya, dan penentuan beberapa parameter yang membutuhkan definisi dalam bentuk persamaan.

Setelah semua tahapan yang telah disebutkan sebelumnya sudah disesuaikan dengan tujuan analisa CFD, maka langkah perhitungan pun

dapat dilakukan. Hasil dari perhitungan dapat ditampilkan dalam beberapa metode visual, antara lain:

- a. *Cut plot*, merupakan tampilan analisa aliran dalam 2D maupun 3D dari profil model berupa area maupun garis-garis kontur berwarna.
- b. *Surface plot*, merupakan tampilan dari kondisi pada dinding/ permukaan model akibat aliran fluida
- c. *Flow trajectories*, merupakan pemodelan dari aliran fluida saat melewati model yang digambarkan dengan garis dengan panah
- d. *Particle studies*, merupakan pemodelan dari aliran partikel solid maupun cair yang dimasukkan ke dalam aliran fluida
- e. *XY plot*, merupakan grafik yang menyatakan hubungan antara parameter aliran seperti kecepatan atau tekanan terhadap waktu, jarak, dan titik acuan lain.
- f. *Point, surface, and volume parameters*, merupakan tampilan hasil analisa aliran berupa data-data angka dalam tabel terhadap suatu titik, area, ataupun suatu lingkup volume fluida.

## 2. 5. Konsep dan Pengembangan Teknologi *Gene Gun*

*Gene gun* pertama kali dikembangkan oleh John Sanford, Klein, dan Wolfe di Universitas Cornell sebagai mekanisme untuk memasukkan materi gen ke dalam sel tumbuhan (Sanford dkk, 1987). Pada awalnya, prosedur penggunaan *gene gun* dilakukan dengan meletakkan sampel berupa jaringan tumbuhan seperti daun atau satu organisme tumbuhan utuh ke dalam ruang tertutup (*closed chamber*) yang kemudian divakum dan ditembak dengan mikropartikel yang terbuat dari tungsten atau emas. Permukaan mikropartikel tersebut dilapisi dengan materi gen yang akan masuk ke dalam jaringan target. Perkembangan *gene gun* kemudian memungkinkan penembakan dilakukan tanpa memerlukan ruang vakum dan lebih portabel. Produk komersial *gene gun* seperti BioRad® Helios *gene gun* dan beberapa *gene gun* rekayasa mandiri lainnya telah berhasil menembakkan materi gen ke berbagai jaringan dan organisme yang sebelumnya belum pernah berhasil dilakukan oleh teknik administrasi lainnya. Penggunaan *gene gun* juga hanya memerlukan dua langkah

prosedur yang lebih sederhana, yaitu: pelapisan mikropartikel dengan DNA dan penembakan mikropartikel ke sampel target.



Gambar 2.3 *Gene gun* dengan ruang vakum (Sanford dkk, 1987)

*Gene gun* yang pertama kali dibuat memanfaatkan ledakan dari penyalaan suatu peledak untuk mengakselerasi mikropartikel berbahan tungsten ke sel epidermal jaringan tumbuhan (Sanford dkk, 1987). Kemudian, pengembangan *gene gun* memanfaatkan impuls dari aliran listrik sebagai pengakselerasi mikropartikel (McCabe dkk, 1988). Selanjutnya juga dikembangkan *gene gun* yang menggunakan udara bertekanan (Oard dkk, 1990) dan helium (Sanford dkk, 1991; Kikkert, 1993) sebagai sarana pengakselerasi partikel.

Secara umum, kinerja dari *gene gun* dapat ditentukan dari parameter luas area target, kedalaman penetrasi mikropartikel ke dalam jaringan target, dan tingkat kerusakan pada jaringan. Parameter-parameter tersebut ditentukan dengan kesesuaian antara besarmasukan tekanan udara, diameter dan profil nosel *gene gun*, serta jarak antara moncong *gene gun* ke jaringan target. Parameter-parameter tersebut juga dapat digunakan untuk membandingkan kinerja *gene gun* terhadap instrumen administrasi transdermal lainnya.

Satu parameter teknik penting yang biasa digunakan untuk perbandingan antara instrumen-instrumen administrasi transdermal adalah *particle impact parameter* (PIP). Parameter ini dipengaruhi oleh massa

jenis, ukuran, dan kecepatan mikropartikel yang dinyatakan melalui persamaan

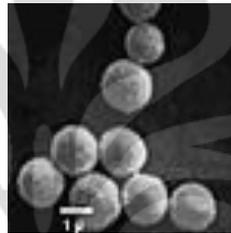
$$PIP = \rho \cdot v \cdot r \quad (15)$$

dengan:

$\rho$  = massa jenis mikropartikel ( $\text{kg/m}^3$ )

$v$  = kecepatan impak mikropartikel (m/s)

$r$  = jari-jari/radius mikropartikel ( $\mu\text{m}$ ) (Soliman, 2011).



Gambar 2.4 Mikropartikel emas berukuran  $1 \mu\text{m}$  (Kendall, 2005)



Gambar 2.5 BioRad® *gene gun* (O'Brien, 2001)

### 2. 5. 1. Pengembangan Nosel *Gene Gun*

Pengembangan nosel *gene gun* secara khusus dilakukan oleh John O'Brien, seorang peneliti dalam bidang biologi molekuler di Universitas Cambridge, Inggris. Berdasarkan pengalamannya, melakukan penembakan terhadap target berukuran kecil seperti sel tunggal atau kultur jaringan

menggunakan instrumen *gene gun* milik BioRad dengan nosel standar sama sekali tidak efektif. Selain memiliki luas tembak yang terlalu luas, kemampuan penetrasinya pun juga rendah sehingga diperlukan modifikasi terhadap bagian nosel *gene gun* tersebut (O'Brien, 2007).

Melalui paten dengan nomor US2004/0033589, John O'Brien mematenkan sebuah instrumen yang dinamakan dengan *Biolistic Device*. Pada dasarnya, instrumen ini merupakan produk *gene gun* Helios milik BioRad® yang kemudian dimodifikasi bagian noselnya. Adapun fitur yang menarik dan patut dijadikan perhatian pada inovasi desain nosel ini adalah keberadaan 20 lubang berdiameter 2 mm yang terdapat di dinding samping nosel. Berdasarkan paten tersebut, dikatakan bahwa lubang-lubang tersebut tersusun secara radial sebanyak empat buah sejumlah 5 baris bersilangan. Selain dari segi jumlah, hal menarik dari lubang-lubang tersebut adalah sudut lubang terhadap sumbu utama nosel sebesar  $30^\circ$ . Pembuatan lubang-lubang *baffle* ini dilakukan sebagai tempat keluarnya gas/udara yang mendorong mikropartikel sehingga tidak mengenai permukaan target. Dikatakan pula bahwa penentuan sudut sebesar  $30^\circ$  tersebut karena dianggap sebagai sudut paling optimal yang menghasilkan hasil penembakan paling efektif.

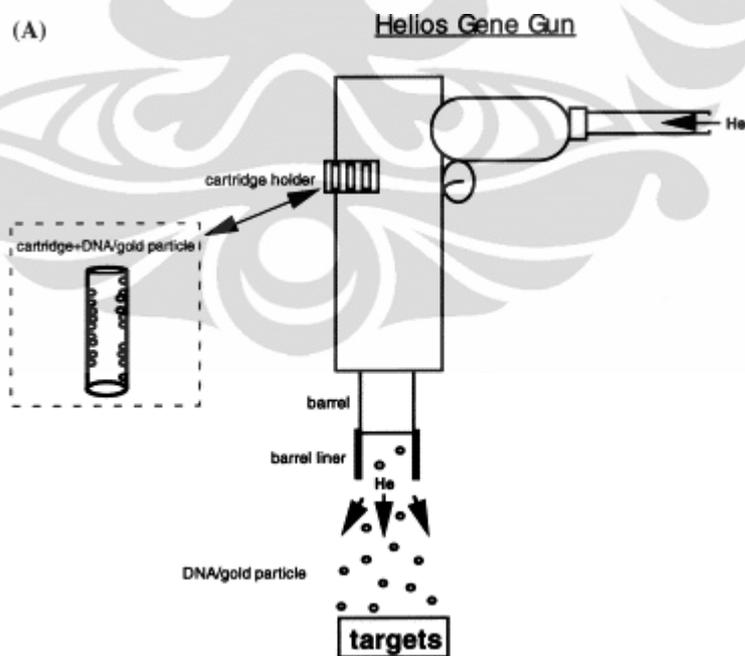
Tujuan utama dari pembuatan lubang-lubang tersebut adalah untuk mengurangi besar kerusakan pada lapisan luar target akibat gaya impak yang ditimbulkan oleh aliran udara yang mengenai permukaan target. Besar kerusakan pada jaringan luar ini menjadi penting demi tujuan akhir dari pengembangan teknologi *gene gun* yang akan digunakan pada manusia. Semakin besar kerusakan yang ditimbulkan maka kemungkinan timbulnya rasa sakit atau memar pada jaringan kulit manusia akan semakin besar. Hal ini bertentangan dengan latar belakang dari pengembangan teknologi *gene gun* yang bertujuan untuk membuat sebuah metode administrasi vaksin baru yang noninvasif dan tanpa rasa sakit.



Gambar 2.6 Inovasi pada nosel *gene gun* (O'Brien, 2001)



Gambar 2.7 Detail inovasi nosel *gene gun* (O'Brien, 2001)



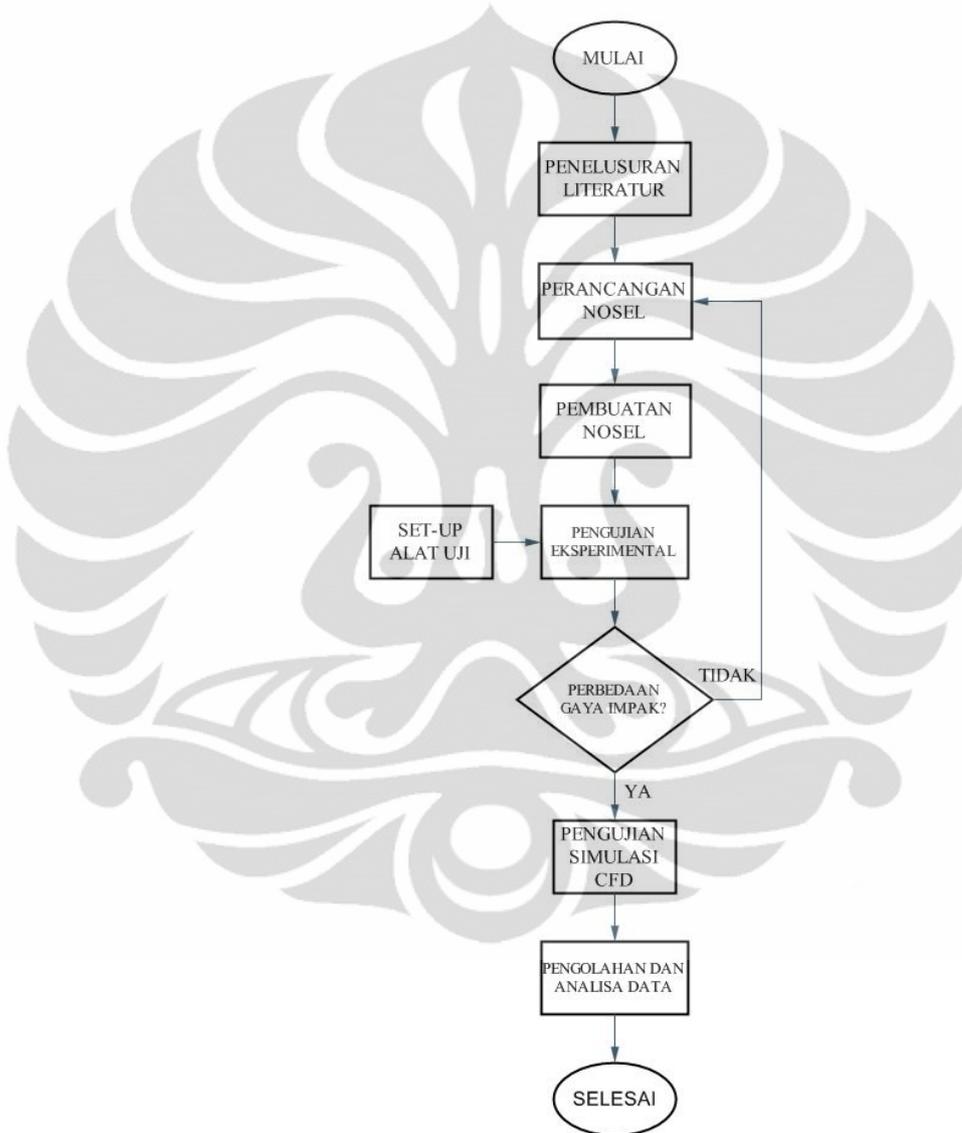
Gambar 2.8 Ilustrasi kerja BioRad® Helios *gene gun* (O'Brien, 2004)

## BAB 3

### RANCANGAN ALAT UJI DAN PROSEDUR PENELITIAN

#### 3.1. Diagram Alir Penelitian

Penelitian di dalam karya tulis ini dilakukan melalui beberapa tahap yang dijelaskan melalui diagram di bawah ini.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

### 3. 2. Perancangan dan Pembuatan Alat Uji

Alat uji yang akan digunakan merupakan nosel yang kemudian akan digunakan untuk kepentingan riset gene gun sehingga terdapat beberapa batasan dalam perancangan dan pengujiannya. Pada penelitian kali ini, akan diuji empat buah nosel berupa satu nosel standar tanpa lubang baffle dan tiga nosel dengan variasi pada sudut lubang baffle sebesar  $30^\circ$ ,  $90^\circ$ , dan  $150^\circ$  terhadap sumbu utama nosel. Angka tersebut digunakan karena sudut lubang *baffle* sebesar  $30^\circ$  diperkirakan menghasilkan gaya impak paling kecil dibandingkan dengan besar sudut yang lain (O'Brien, 2007). Kemudian nosel dengan sudut lubang baffle sebesar  $150^\circ$  digunakan sebagai variasi tambahan sedangkan sudut baffle sebesar  $90^\circ$  digunakan dengan alasan kemampuan produksi yang lebih mudah dibandingkan sudut lubang baffle lainnya sehingga dapat menjadi nilai tambah pada aspek tertentu.

Perancangan alat uji dilakukan dengan menggunakan program Autodesk Inventor 2011. Pada saat melakukan perancangan terhadap alat uji, hal yang menjadi perhatian utama adalah bahwa profil dan ukuran diameter saluran dalam nosel harus mampu berfungsi sebagai dudukan dari komponen tube yang akan digunakan saat pengoperasiannya kelak, walaupun pada saat pengujian tube tidak diturutsertakan. Selain itu faktor dimensi dan material juga menjadi pertimbangan agar nosel dapat diproduksi dan digunakan dengan mudah tanpa harus mengurangi kemampuannya. Adapun material yang dipilih adalah aluminium tipe 6061 dengan pertimbangan kekuatan material, massa jenis yang relatif ringan, kemudahan proses produksi, dan ketersediaan di pasaran.

Fungsi dasar yang harus menjadi pertimbangan dan dapat dipenuhi oleh desain nosel adalah memiliki tempat peletakan tube yang dapat menahan tube agar tidak ikut tertembak keluar. Untuk memenuhi pertimbangan tersebut maka saluran di dalam nosel memiliki diameter 3 mm sepanjang 10 mm yang kemudian mengecil menjadi 2 mm sepanjang 20 mm. Segmen dengan diameter 3 mm dan 10 mm berfungsi sebagai tempat diletakkannya tube. Segmen dengan diameter 2 mm kemudian

berfungsi untuk menahan tube agar tidak tertembak keluar. Adapun panjang segmen 2 mm ditentukan sebesar 20 mm hanya dengan pertimbangan kepentingan riset ini semata. Untuk selanjutnya, panjang segmen ini perlu ditentukan melalui penelitian lebih lanjut sehingga didapat panjang nosel optimal. Dengan begitu maka desain nosel pada penelitian kali ini memiliki panjang total 30 mm.



Gambar 3.2 Nosel uji

(Dari kiri ke kanan) Nosel standar tanpa lubang samping, nosel dengan lubang samping bersudut  $150^\circ$ , nosel dengan lubang samping bersudut  $90^\circ$ , nosel dengan lubang samping bersudut  $30^\circ$ , dan adaptor nosel.



Gambar 3.3 Nosel dalam kondisi terpasang dengan adaptor.

### 3.3. Perancangan Instrumen Pengujian

Pengujian dilakukan dengan menggunakan serangkaian instrumen yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi sudut lubang baffle dan jarak tembak terhadap gaya impact nosel. Adapun rangkaian instrumen tersebut secara garis besar merupakan produk gene gun model desk/stationery yang masih termasuk di dalam proyek riset gene gun sehingga terdapat beberapa batasan saat pengujian dilakukan. Rangkaian instrumen tersebut terdiri atas beberapa bagian yang memiliki fungsinya masing-masing, yaitu:

#### a. Regulator tekanan

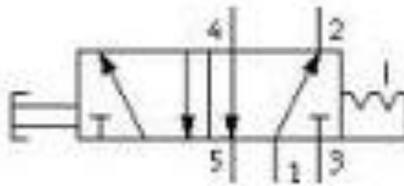
Instrumen ini berfungsi sebagai pengatur dan indikator besar tekanan yang masuk ke dalam sistem pneumatik gene gun. Terdapat dua indikator satuan yang tercantum pada instrumen tersebut, yaitu bar dan psi. Pada penelitian kali ini, satuan tekanan yang dijadikan acuan adalah bar dengan jangkauan nol sampai 16. Adapun penelitian dilakukan pada tekanan masuk sebesar 6 bar.



Gambar 3.4 Regulator tekanan

#### b. Katup 5/2

Instrumen ini berfungsi sebagai pengarah aliran. Angka 5/2 menandakan bahwa katup ini memiliki satu lubang masukan utama, dua lubang keluaran dan dua lubang masukan-keluaran. Berikut ini merupakan skema kerja katup 5/2:



Gambar 3.5 Skema kerja katup 5/2

Pada saat kondisi terbuka (aliran udara masuk ke dalam katup), lubang masukan utama (nomor 1) akan mengalirkan udara ke lubang masukan-keluaran nomor 4 dan lubang masukan-keluaran nomor 2 akan mengalirkan udara ke lubang keluaran nomor 3. Saat kondisi tertutup (aliran udara tidak masuk ke dalam katup), lubang masukan utama (nomor 1) akan mengalirkan udara ke lubang masukan-keluaran nomor 2 dan lubang masukan-keluaran nomor 4 akan mengalirkan udara ke lubang keluaran nomor 5.

Kondisi terbuka dan tertutupnya katup ditentukan oleh posisi piston pengatur. Adapun posisi dari piston pengatur dapat diubah baik secara elektrik melalui sistem solenoid maupun secara mekanis melalui tombol yang ada di badan katup.

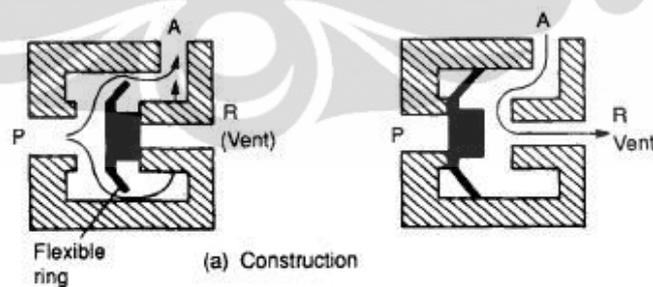
Pada mekanisme gene gun, katup ini digunakan untuk mengatur ada atau tidaknya aliran ke dalam komponen katup bukaan cepat. Komponen inilah yang kemudian dapat memberikan aliran secara mendadak ke dalam nosel.



Gambar 3.6 Katup 5/2

c. Katup bukaan cepat

Instrumen yang biasa dikenal dengan sebutan *quick exhaust valve* ini biasa digunakan pada mekanisme senapan angin yang memerlukan bukaan katup sesaat sehingga tercipta suatu impuls aliran udara. Pada gambar 3.6, lubang P menunjukkan sumber tekanan masuk ke katup bukaan cepat, lubang A menunjukkan saluran masuk dan keluar tabung akumulator, dan lubang R menunjukkan lubang keluar katup bukaan cepat. Komponen yang diberi warna hitam merupakan katup yang akan menentukan arah aliran. Saat tekanan diberikan ke dalam katup melalui lubang P, katup akan ditekan ke arah lubang R sehingga udara mengalir dari lubang P ke lubang A. Pada kondisi ini, terjadi tahap pengisian tekanan ke tabung akumulator. Jika tekanan dari lubang P dihilangkan, katup akan berbalik menutup lubang P sehingga udara mengalir dari lubang A ke lubang R. Secara cepat pula, katup akan kembali ke kondisi awal, yaitu menutup lubang R, karena adanya tekanan dari lubang P. Di antara kondisi inilah, terjadi tahap pengeluaran tekanan secara mendadak ke lubang keluar katup bukaan cepat.



Gambar 3.7 Skema kerja katup bukaan cepat



Gambar 3.8 Katup bukaan cepat

d. Tabung akumulator

Instrumen ini berfungsi sebagai tempat penyimpanan udara sementara. Saat aliran udara dibiarkan masuk ke dalam sistem, tabung akan terisi oleh udara pada tekanan sesuai dengan besar masukan tekanan. Kemudian, saat katup 5/2 diubah posisinya sehingga udara tidak masuk ke dalam sistem, katup bukaan cepat pun akan terbuka dan udara di dalam tabung akan keluar secara cepat menuju nosel. Adapun spesifikasi dari tabung akumulator yang digunakan adalah:

- Material : plastik
- Kapasitas : 250cc
- Tekanan kerja maksimum : 9 bar



Gambar 3.9 Tabung akumulator

e. Konstruksi gene gun desk model

Instrumen ini digunakan sebagai dukungan untuk komponen-komponen gene gun yang telah disebutkan sebelumnya. Rangka dibuat menggunakan aluminium dan diberi dinding dari akrilik. Set gene gun desk model ini merupakan bagian dari riset gene gun berupa alat yang dibuat sebagai purwarupa dari gene gun skala laboratorium yang akan dikembangkan kemudian.



Gambar 3.10 Konstruksi *gene gun desk model*

Selain instrumen-instrumen dari gene gun desk model yang telah disebutkan sebelumnya, terdapat instrumen-instrumen lain yang digunakan dalam penelitian, antara lain:

a. Kompresor

Kompresor yang digunakan adalah kompresor milik Departemen Teknik Mesin FTUI, yang terletak di lantai 1. Kompresor ini diubungkan pada saluran udara bertekanan ke seluruh bagian gedung Lab Departemen Teknik Mesin FTUI. Pada penelitian ini, kompresor dijadikan sumber udara bertekanan yang kemudian masuk melalui selang udara ke dalam regulator tekanan. Pada aplikasi sebenarnya, gene gun akan menggunakan sumber tekanan dari tabung helium. Hal ini dikarenakan sifat dari helium

yang inert sehingga tidak mudah bereaksi baik dengan materi gen maupun dengan target.

b. Neraca digital

Instrumen ini merupakan alat ukur dari keluaran yang menjadi inti penelitian ini. Idealnya, pengukuran gaya impact dilakukan menggunakan sensor piezoelektrik yang dapat mengubah respons tekanan sentuh menjadi tegangan listrik sehingga dapat diolah melalui DAQ (Data acquisition) dan menghasilkan data yang kontinu terhadap waktu dalam bentuk grafik. Namun, akibat keterbatasan instrumen maka pengukuran gaya impact dilakukan secara tidak langsung dengan mengukur massa impact menggunakan neraca digital. Data-data langsung penelitian berupa massa impact akan diolah sebelum akhirnya diubah menjadi besar gaya impact. Spesifikasi dari neraca digital yang digunakan adalah:

- Merk : AND FX-3000
- Range pengukuran : 0 – 3000 gram
- Tingkat ketelitian : 0,01 gram



Gambar 3.11 Neraca digital

c. Penggaris

Alat ukur ini digunakan untuk mengukur ketinggian/jarak antara mulut nosel dengan permukaan neraca sebagai jarak tembak. Penggaris yang digunakan memiliki skala terkecil sebesar 1 mm sehingga memiliki faktor ketelitian sebesar 0,5 mm.

d. Kamera digital

Instrumen ini digunakan untuk merekam perubahan bacaan pada neraca saat penembakan dilakukan. Karena penembakan dilakukan dalam waktu yang sangat cepat maka perubahan massa pun juga terjadi dengan sangat cepat sehingga tidak dapat dibaca oleh mata dan diperlukan alat bantu untuk melihatnya. Untuk itu digunakan kamera digital yang akan merekam perubahan bacaan tersebut. Selanjutnya, hasil rekaman akan dilihat frame per frame melalui komputer.

e. **Komputer/laptop**

Pada penelitian ini, selain digunakan untuk mengolah data-data angka dan melakukan simulasi komputasi, komputer juga digunakan untuk melihat hasil bacaan neraca melalui rekaman dari kamera digital.

### **3. 4. Prosedur Pengujian dan Pengambilan Data**

Pengujian secara eksperimental dilakukan di Lab Manufaktur lantai 1 Departemen Teknik Mesin FTUI. Lokasi ini dipilih karena letaknya yang dekat dengan sumber udara bertekanan (kompresor) dan kondisinya yang tertutup sehingga dapat mengurangi efek gangguan dari luar. Pengujian dilakukan pada tanggal 17 dan 18 April 2012 pukul 10.00 – 16.00 WIB. Kondisi lingkungan yang diukur pada saat pengujian yaitu temperatur, kecepatan udara, dan kelembapan. Adapun kondisi temperatur lingkungan atau ruang pengujian pada saat itu adalah sebesar 30oC. Kemudian kecepatan udara pada saat pengujian diketahui berkisar antara 0,1-0,2 m/s dan dianggap dapat diabaikan serta kelembapan sebesar 60%. Pengukuran terhadap kondisi lingkungan ini diambil tiap sebelum pengujian dilakukan yaitu sekitar pukul 09.45 dan setelah pengujian dilakukan yaitu sekitar pukul 16.15 WIB.

Berikut ini merupakan langkah-langkah yang dilakukan dalam tahap pengujian:

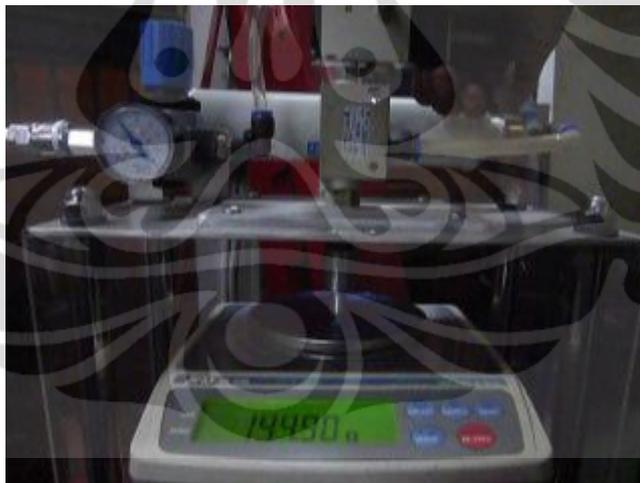
- a. Menyambungkan regulator tekanan dengan sumber tekanan menggunakan air hose.
- b. Menyetel regulator tekanan sebesar 6 bar sebagai tekanan masuk sistem.
- c. Memasang nosel yang dijadikan alat uji pada instrumen gene gun desk model.
- d. Meletakkan neraca digital pada jarak tertentu terhadap ujung nosel dengan menggunakan penggaris sebagai alat ukur.
- e. Menyambungkan neraca digital dengan sumber listrik dan menyalakannya.
- f. Memasang kamera pada posisi tertentu sehingga didapat pandangan yang jelas terhadap perubahan bacaan neraca.
- g. Menyalakan rekaman pada kamera.
- h. Menembakkan gene gun dengan menekan tombol pada katup 5/2 sebanyak 30 kali dengan lama bukaan satu detik dan jeda tiap penembakan selama 5 detik.



Gambar 3.12 Skema pengujian

Setelah pengambilan data dilakukan di laboratorium, pengolahan data dilakukan melalui komputer. Video hasil rekaman bacaan massa

impak di neraca digital akan diekstrak *frame per frame* menggunakan piranti lunak KMPlayer. Dari pengestrakan yang dilakukan, diketahui kamera memiliki *framerate* sebesar 30fps yang berarti dalam satu detik akan didapat frame sebanyak 30 buah. Kemudian, setelah pengamatan terhadap frame dilakukan, diketahui bahwa angka bacaan pada neraca berubah tiap tiga frame yang berarti data massa impact ditampilkan oleh neraca tiap sepersepuluh detik. Nilai massa impact yang diambil hanya yang terbesar saja karena yang menjadi fokus utama dari penelitian kali ini hanya massa impact puncak tiap penembakan saja. Nilai massa impact puncak ini kemudian akan dirata-rata untuk tiap variasinya sehingga akan didapat besar masa impact puncak rata-rata untuk tiap variasi. Selanjutnya, besar massa impact puncak rata-rata ini akan dikalikan dengan gaya gravitasi sehingga didapat besar rata-rata gaya impact puncak untuk tiap variasi. Nantinya, hubungan antara besar-rata-rata gaya impact puncak pada tiap variasi ini akan dijadikan pembahasan.



Gambar 3.13 Frame hasil ekstrak

### 3. 5. Pengujian Simulasi Komputasi

Simulasi secara komputasi dilakukan dengan tujuan mendapatkan data sekunder berupa beberapa nilai dari parameter aliran fluida yang tidak didapat pada tahap eksperimen. Setelah desain nosel selesai dirancang di program Autodesk Inventor 2011, pengujian simulasi CFD

(Computational Fluid Mechanics) dilakukan dengan menggunakan piranti Flow Simulation pada program SolidWorks® 2012.

Pertama, desain nosel digambar ulang pada program SolidWorks® 2012. Kemudian, ditentukan kondisi-kondisi pra-simulasi seperti fluida kerja, kondisi lingkungan, keadaan termodinamik sistem. dilakukan meshing 3D terhadap desain tersebut menggunakan piranti FlowSim. Meshing dilakukan untuk menentukan besar sel-sel elemen hingga yang akan dikalkulasi secara numerik oleh program. Besar meshing dasar ditentukan sebesar 2 mm terhadap desain sehingga menghasilkan grid sebesar 28 x 8 x 8 yang berarti terdapat 1792 mesh dasar. Selanjutnya, pada beberapa bagian nosel yang menjadi perhatian utama simulasi, diberikan meshing lokal sebesar 0,5 mm. Adapun bagian-bagian kritis tersebut terletak di sisi/lubang masuk aliran, lubang keluar utama, lubang keluar sisi nosel, dan di titik percabangan. Proses simulasi yang digunakan merupakan internal flow (aliran dalam) dan piranti FlowSim hanya dapat menganalisa internal flow jika aliran udara berada di dalam kondisi yang tertutup sempurna sehingga lubang-lubang yang terbuka harus ditutup dengan lid. Selanjutnya dilakukan penentuan permukaan yang menjadi masukan, keluaran, dan lingkungan sebagai penentu arah aliran fluida di dalam nosel. Adapun beberapa parameter tersebut antara lain,

- a. Inlet total pressure, merupakan tekanan total pada bagian masuk aliran dengan satuan bar.
- b. Outlet environment pressure, merupakan tekanan lingkungan pada bagian keluar aliran dengan satuan bar.
- c. Kondisi lingkungan (ambient) seperti temperatur yang ditentukan sebesar 30°C dan tekanan sebesar 1 atm.

Kemudian parameter keluaran yang akan dicari besar nilainya antara lain,

- a. *Total pressure* di tiap lubang keluar nosel dan titik percabangan dengan satuan bar.
- b. Kecepatan di tiap lubang keluar nosel dan titik percabangan dengan satuan m/s.
- c. Bilangan Mach di tiap lubang keluar nosel dan titik percabangan.

- d. Densitas atau massa jenis fluida di tiap lubang keluar nosel dan titik percabangan.

Pada pengujian simulasi kali ini, beberapa pengkondisian dilakukan pada tingkat kekasaran permukaan dinding dalam nosel yang dianggap tidak kasar sempurna dan pada kondisi termodinamik dinding nosel yang diasumsikan sebagai adiabatik.



## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1. Analisa Pengujian Eksperimental

Pengujian secara eksperimental dilakukan untuk mengetahui hubungan antara keluaran gaya impak dengan variasi sudut lubang keluar samping (*baffle*) dan jarak tembak pada nosel aliran udara bertekanan untuk aplikasi *gene gun*. Pengujian dilakukan terhadap satu nosel standar tanpa lubang keluaran samping dan nosel dengan tiga variasi sudut lubang keluar samping, yaitu 30°, 90°, dan 150°. Tiap variasi nosel diuji dengan tiga variasi jarak tembak terhadap permukaan sasaran, yaitu 0 mm (tanpa jarak), 10 mm, dan 20 mm. Dari kedua parameter tersebut didapat 12 set pengambilan data, yaitu:

- a. nosel standar tanpa lubang keluar samping pada jarak 0 mm
- b. nosel standar tanpa lubang keluar samping pada jarak 10 mm
- c. nosel standar tanpa lubang keluar samping pada jarak 20 mm
- d. nosel dengan sudut lubang keluar samping 30° pada jarak 0 mm
- e. nosel dengan sudut lubang keluar samping 30° pada jarak 10 mm
- f. nosel dengan sudut lubang keluar samping 30° pada jarak 20 mm
- g. nosel dengan sudut lubang keluar samping 90° pada jarak 0 mm
- h. nosel dengan sudut lubang keluar samping 90° pada jarak 10 mm
- i. nosel dengan sudut lubang keluar samping 90° pada jarak 20 mm
- j. nosel dengan sudut lubang keluar samping 150° pada jarak 0 mm
- k. nosel dengan sudut lubang keluar samping 150° pada jarak 10 mm
- l. nosel dengan sudut lubang keluar samping 150° pada jarak 20 mm

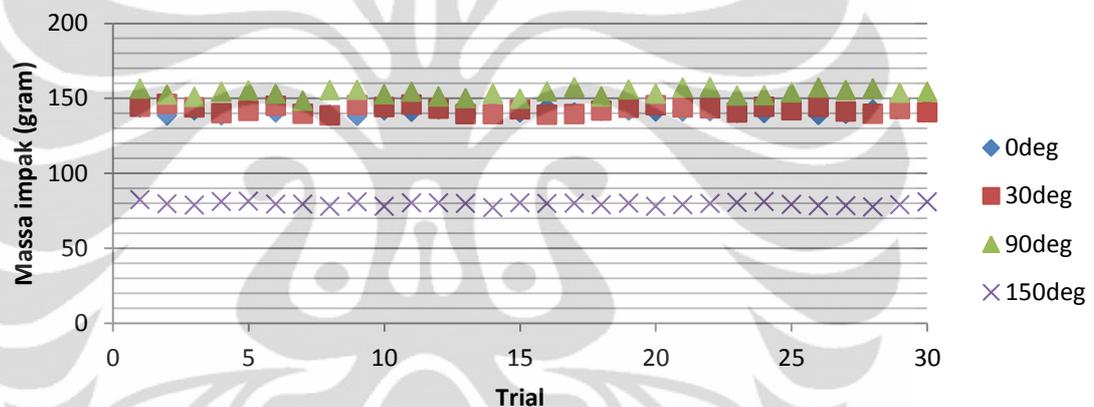
Setiap set pengambilan data dilakukan dengan melakukan 30 kali *trial* penembakan. Setiap penembakan dilakukan dengan membuka katup 5/2 selama satu detik. Adapun hasil keluaran bukan langsung berupa nilai gaya impak, melainkan massa impak. Hal ini dikarenakan alat ukur yang digunakan merupakan neraca digital. Hasil dari pengujian disajikan dalam grafik yang menyatakan besar massa impak pada tiap *trial* penembakan dari masing-masing variasi nosel terhadap jarak tembak tertentu.

Kemudian, grafik yang menyatakan besar massa impact pada tiap *trial* penembakan dari masing-masing variasi jarak tembak terhadap nosel tertentu juga disajikan sehingga dapat diketahui pengaruh variasi-variasi tersebut secara independen terhadap keluaran gaya impact.

#### 4. 1. 1. Analisa Perubahan Massa Impact terhadap Sudut Lubang Baffle

##### 4. 1. 1. 1. Besar Massa Impact terhadap Variasi Sudut Lubang Keluar Samping pada Jarak Tembak 0 mm

Hasil pengukuran massa impact pada variasi sudut lubang *baffle* di jarak tembak 0 mm ditunjukkan pada grafik 4.1.



Grafik 4.1 Besar massa impact terhadap variasi sudut lubang keluar samping pada jarak tembak 0 mm

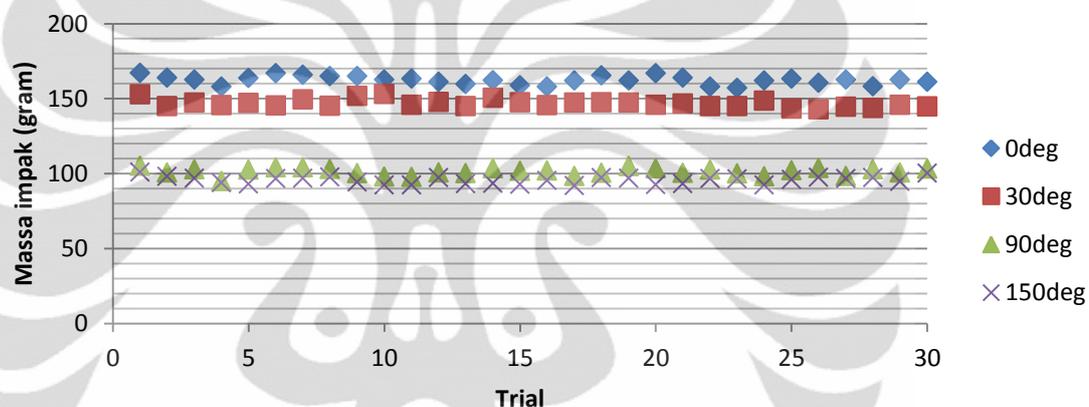
Pengambilan data pada tiap *trial* penembakan menunjukkan suatu kelinearan untuk tiap variasi nosel sehingga data untuk tiap variasi dianggap stabil. Hasil paling mencolok ditunjukkan oleh nosel dengan sudut lubang keluar samping sebesar  $150^\circ$ . Sedangkan hasil dari ketiga nosel yang lain relatif memiliki nilai yang tidak terlalu berbeda jauh.

Secara fisik, hal yang paling membedakan nosel dengan sudut lubang keluar samping  $150^\circ$  adalah kemampuannya untuk mengarahkan aliran ke arah berkebalikan terhadap arah aliran menuju permukaan target. Aliran udara yang mengalir melalui

lubang samping bersudut  $150^\circ$  tidak akan mengenai permukaan target sehingga massa udara yang mengenai permukaan target, dalam hal ini permukaan plat neraca, akan berkurang dan massa impact pun akan lebih rendah dibandingkan dengan nosel yang lain.

#### 4. 1. 1. 2. Besar Massa Impact terhadap Variasi Sudut Lubang Keluar Samping pada Jarak Tembak 10 mm

Hasil pengukuran massa impact pada variasi sudut lubang *baffle* di jarak tembak 10 mm ditunjukkan pada grafik 4.2.



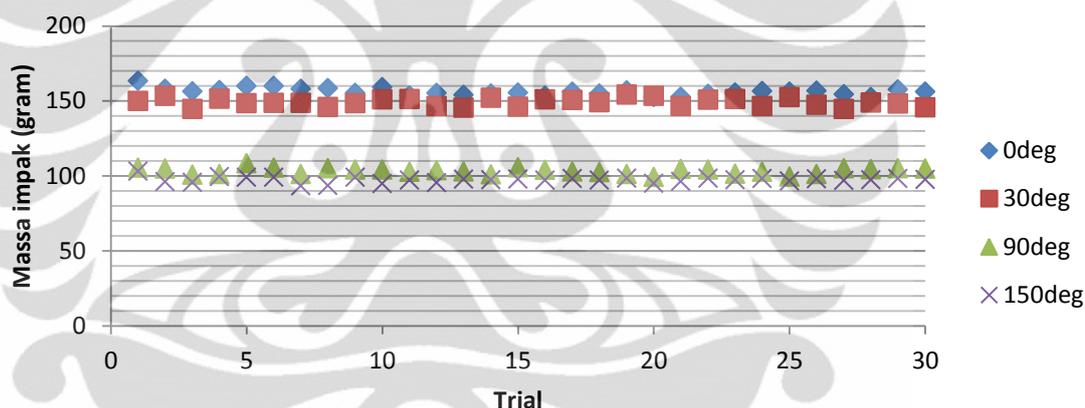
Grafik 4.2 Besar massa impact terhadap variasi sudut lubang keluar samping pada jarak tembak 10 mm

Pengambilan data pada tiap *trial* penembakan menunjukkan suatu kelinearan untuk tiap variasi nosel sehingga data untuk tiap variasi dianggap stabil walaupun cenderung lebih berfluktuasi dibandingkan dengan hasil pada grafik 4.1. Perubahan hasil paling mencolok ditunjukkan oleh nosel dengan sudut lubang keluar samping sebesar  $90^\circ$ . Sebelumnya, nosel dengan sudut lubang keluar samping sebesar  $90^\circ$  menunjukkan hasil yang tidak berbeda jauh dengan nosel bersudut lubang samping sebesar  $30^\circ$  dan nosel standar tanpa lubang samping. Kali ini, massa impact dari nosel dengan sudut lubang samping  $90^\circ$  memiliki nilai yang berdekatan dengan massa impact yang

dihasilkan oleh nosel dengan sudut lubang samping  $150^\circ$ . Lebih dari itu, terjadi pergeseran massa impact yang cukup besar pada nosel dengan sudut lubang keluar samping  $150^\circ$ . Pada kasus nosel dengan sudut lubang keluar samping  $90^\circ$ , hal ini dapat dijelaskan dengan fenomena bahwa aliran sudah mulai mengalami penurunan gaya impact setelah sebelumnya memiliki gaya impact yang dianggap sebagai gaya impact puncak di titik  $0^\circ$ .

#### 4. 1. 1. 3. Besar Massa Impact terhadap Variasi Sudut Lubang Keluar Samping pada Jarak Tembak 20 mm

Hasil pengukuran massa impact pada variasi sudut lubang *baffle* di jarak tembak 20 mm ditunjukkan pada grafik 4.3.



Grafik 4.3. Besar massa impact terhadap variasi sudut lubang keluar samping pada jarak tembak 20 mm

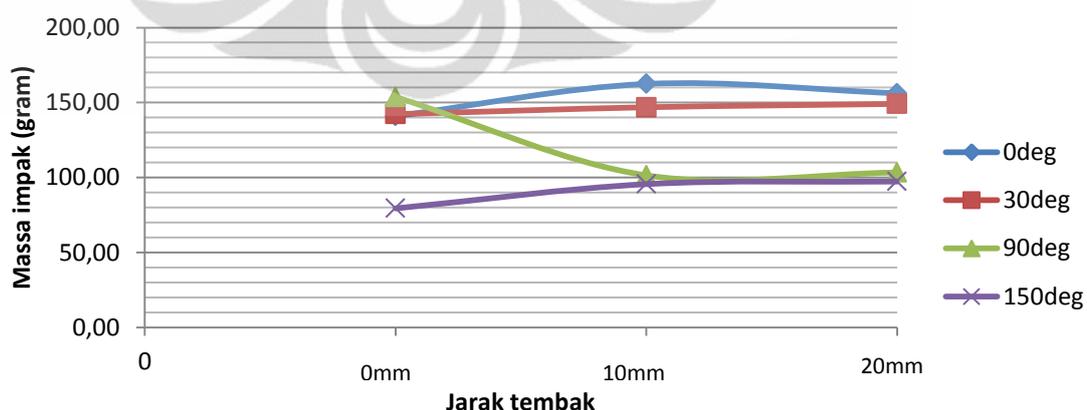
Pengambilan data pada tiap *trial* penembakan menunjukkan suatu kelinearan untuk tiap variasi nosel sehingga data untuk tiap variasi dianggap stabil. Pada grafik 4.3 pola nilai yang dihasilkan dapat dikatakan hampir sama dengan grafik 4.2. Massa impact yang dihasilkan tetap dihasilkan paling besar oleh nosel standar tanpa lubang keluar samping diikuti oleh nosel dengan sudut lubang keluar samping  $30^\circ$ , nosel dengan sudut

lubang keluar samping  $90^\circ$ , dan nosel dengan sudut lubang keluar samping  $150^\circ$ .

Hal yang membedakan antara grafik 4.2 dengan grafik 4.3 adalah pada jarak tembak yang digunakan, yaitu 10 mm dan 20 mm. Namun dari hasil pengujian, didapat pola massa impact yang tidak berbeda jauh untuk semua variasi nosel di antara kedua variasi jarak tembak tersebut. Hal ini mengindikasikan bahwa pada rentang jarak tembak tersebut, tidak terjadi perubahan yang signifikan terhadap parameter-parameter aliran sehingga perubahan massa impact kurang begitu terlihat. Selain itu, juga terdapat kemungkinan bahwa terjadi perubahan nilai pada parameter aliran yang berhubungan terbalik secara proporsional (*trade-off*) sehingga massa impact yang dihasilkan pun tidak berfluktuasi.

#### 4. 1. 1. 4. Besar Massa Impact Rata-rata terhadap Variasi Sudut Lubang Samping

Hasil dari eksperimen terhadap perubahan massa impact akibat variasi sudut lubang samping (*baffle*) pada jarak tembak tertentu dirangkum dalam grafik 4.4 di bawah ini.



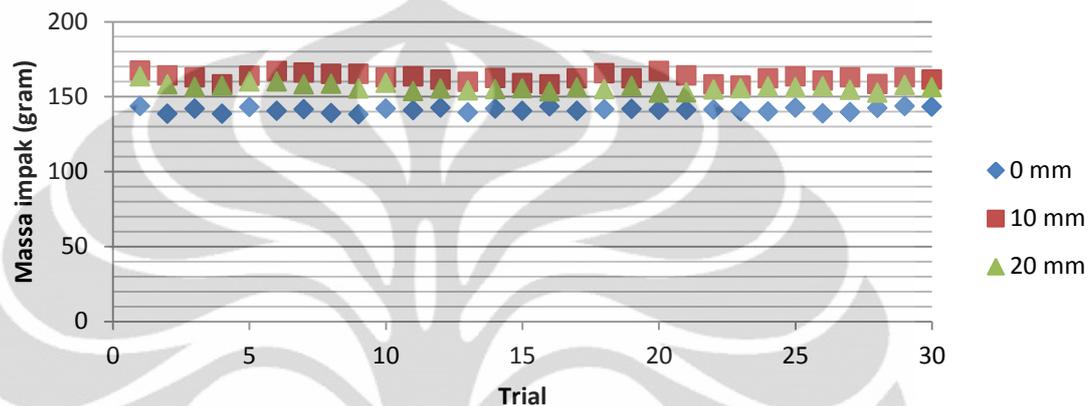
Grafik 4.4 Besar massa impact rata-rata terhadap variasi sudut lubang keluar samping

Besar massa impak rata-rata dari hasil pengujian yang disajikan dalam grafik 4.1, grafik 4.2, dan grafik 4.3, ditunjukkan dalam grafik 4.4. Dari grafik 4.4 dapat dilihat bahwa pola massa impak untuk nosel standar, nosel dengan sudut lubang keluar samping  $30^\circ$ , dan nosel dengan sudut lubang keluar samping  $150^\circ$  menunjukkan kesamaan bentuk. Pola paling mencolok ditunjukkan oleh nosel dengan sudut lubang keluar samping  $90^\circ$ . Adapun titik yang membuat pola nosel dengan sudut lubang keluar samping  $90^\circ$  berbeda adalah pada jarak penembakan 0 mm. Tidak seperti nosel-nosel lain yang cenderung memiliki nilai massa impak paling rendah pada jarak tembak 0 mm dan kemudian naik seiring dengan pertambahan jarak tembak, pada nosel dengan sudut lubang keluar samping  $90^\circ$ , besar massa impak terbesar didapat pada jarak tembak 0 mm dan kemudian menurun seiring pertambahan jarak tembak. Hal ini menjadi anomali yang harus diamati secara khusus agar dapat diketahui penyebabnya.

#### 4. 1. 2. Analisa Perubahan Massa Impak terhadap Jarak Tembak

##### 4. 1. 2. 1. Besar Massa Impak terhadap Variasi Jarak Tembak pada Nosel Standar tanpa Lubang Samping

Hasil pengukuran massa impak terhadap variasi jarak tembak pada nosel standar ditunjukkan dalam grafik 4.5



Grafik 4.5 Besar massa impak terhadap variasi jarak tembak pada nosel standar tanpa lubang keluar samping

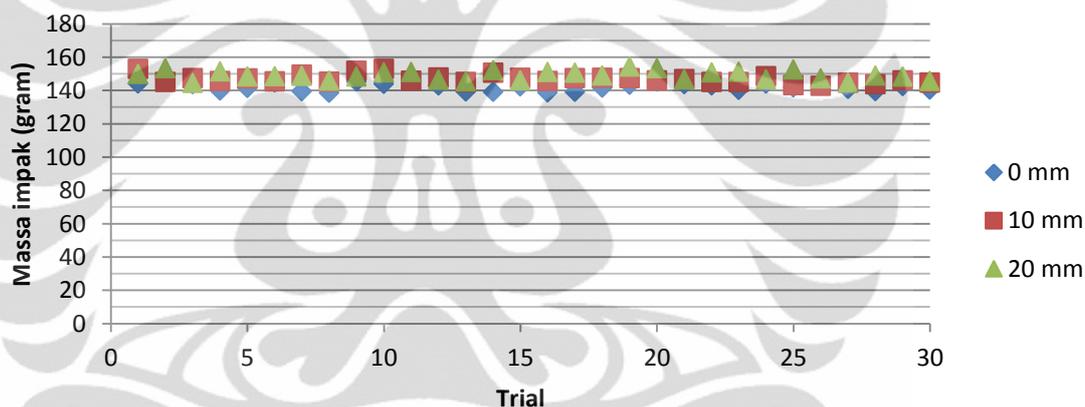
Pengambilan data pada tiap *trial* penembakan menunjukkan suatu kelinearan untuk tiap variasi jarak tembak sehingga data untuk tiap variasi dianggap stabil. Pada grafik 4.5 ini akan dilihat pengaruh jarak tembak terhadap massa impak pada nosel standar tanpa lubang keluar samping.

Dari grafik 4.5 dapat dilihat bahwa massa impak dihasilkan paling tinggi pada jarak tembak 10 mm yang diikuti kemudian oleh massa impak pada jarak tembak 20 mm dan massa impak pada jarak tembak 0 mm. Hal ini dapat terjadi karena pada jarak 10 mm aliran baru mengalami perkembangan penuh sehingga memiliki nilai kecepatan optimal. Pada jarak tembak 0 mm, aliran masih mengalami perkembangan atau ekspansi di dalam saluran nosel sehingga massa impak yang ditimbulkan belum maksimal. Hal ini juga dapat disebabkan oleh tidak adanya celah untuk fluida keluar secara baik sehingga

terjadi pola aliran yang kemudian membuat udara tidak dapat berkembang dengan baik. Sedangkan pada jarak tembak 20 mm, aliran sudah mengalami pengurangan kecepatan akibat kerugian dan gaya *drag* dari udara sekitar sehingga massa impact yang dihasilkan sudah tidak optimal lagi.

#### 4. 1. 2. 2 Besar Massa Impact terhadap Variasi Jarak Tembak pada Nosel dengan Sudut Lubang Keluar Samping 30°

Hasil pengukuran massa impact terhadap variasi jarak tembak pada nosel dengan sudut lubang keluar samping 30° ditunjukkan dalam grafik 4.6



Grafik 4.6 Besar massa impact terhadap variasi jarak tembak pada nosel dengan sudut lubang keluar samping 30°

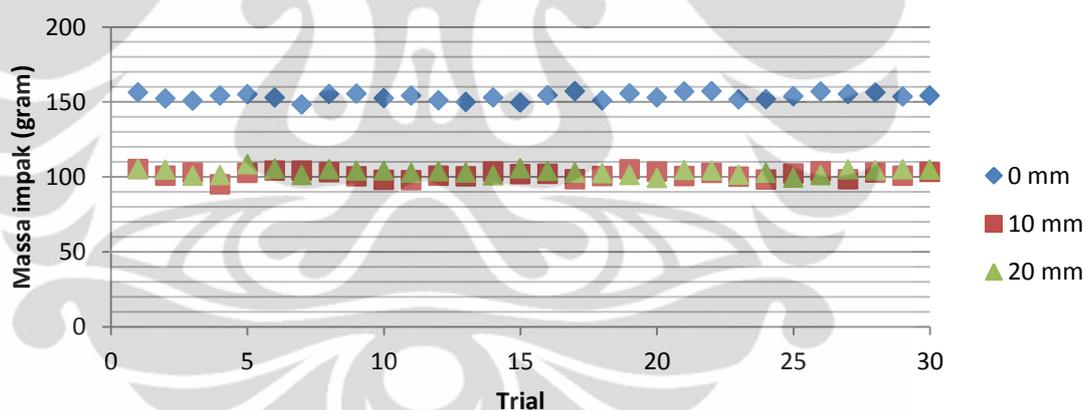
Pengambilan data pada tiap *trial* penembakan menunjukkan suatu kelinearan untuk tiap variasi jarak tembak sehingga data untuk tiap variasi dianggap stabil. Pada grafik 4.6 ini akan dilihat pengaruh jarak tembak terhadap massa impact pada nosel dengan sudut lubang keluar samping 30°.

Dari grafik 4.6 dapat dilihat bahwa massa impact untuk ketiga variasi jarak tembak menghasilkan nilai massa impact yang relatif sama. Hal ini menjadi menarik karena dengan

begitu, jarak tembak 0 mm sampai dengan 20 mm belum memberikan perubahan massa impak yang cukup signifikan pada nosel dengan sudut lubang samping 30°. Hal ini dapat disebabkan oleh pembelokan aliran oleh lubang keluar dengan sudut 30° membuat aliran fluida yang melalui lubang keluar utama menjadi stabil dan aliran udara yang berbelok melewati lubang keluar samping 30° juga membuat massa impak menjadi stabil di jarak-jarak tembak tersebut.

#### 4. 1. 2. 3 Besar Massa Impak terhadap Variasi Jarak Tembak pada Nosel dengan Sudut Lubang Samping 90°

Hasil pengukuran massa impak terhadap variasi jarak tembak pada nosel dengan sudut lubang keluar samping 90° ditunjukkan dalam grafik 4.7



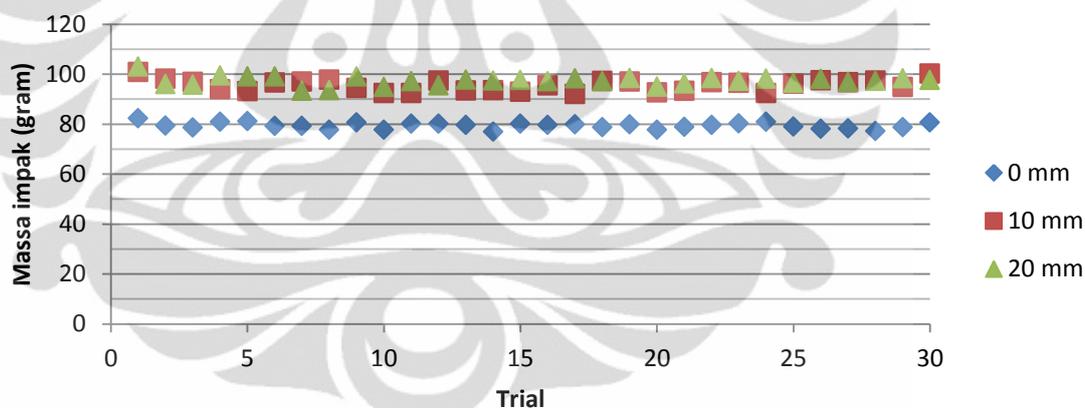
Grafik 4.7 Besar massa impak terhadap variasi jarak tembak pada nosel dengan sudut lubang keluar samping 90°

Pengambilan data pada tiap *trial* penembakan menunjukkan suatu data yang berfluktuasi walaupun tidak begitu besar sehingga data untuk tiap variasi jarak tembak dianggap stabil. Pada grafik 4.6 ini akan dilihat pengaruh jarak tembak terhadap massa impak pada nosel dengan sudut lubang keluar samping 90°.

Dari grafik 4.7 dapat dilihat bahwa massa impak pada jarak tembak 0 mm menghasilkan nilai yang cukup jauh berbeda dengan massa impak pada jarak tembak 10 mm dan 20 mm. Hal ini dapat disebabkan oleh keberadaan lubang samping pada sudut  $90^\circ$  yang kemudian memperbaiki pola aliran nosel standar sehingga aliran mencapai titik massa impak puncaknya pada jarak 0 mm dan massa impak puncak pada jarak tembak 10 mm dan 20 mm pun akan berkurang karena adanya kerugian dari *drag* aliran.

#### 4. 1. 2. 4 Besar Massa Impak terhadap Variasi Jarak Tembak pada Nosel dengan Sudut Lubang Samping $150^\circ$

Hasil pengukuran massa impak terhadap variasi jarak tembak pada nosel dengan sudut lubang keluar samping  $150^\circ$  ditunjukkan dalam grafik 4.8



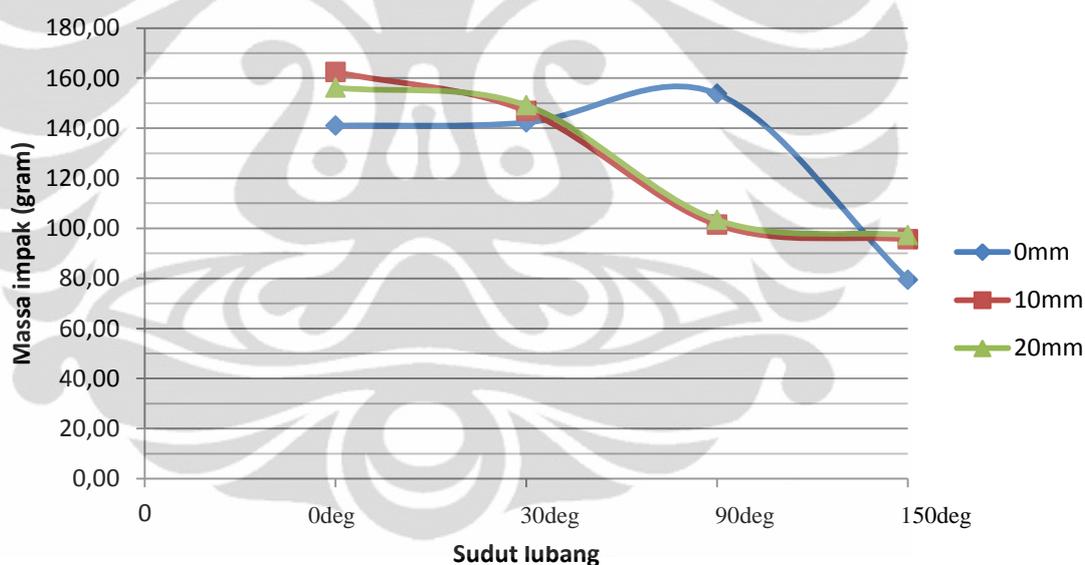
Grafik 4.8 Besar massa impak terhadap variasi jarak tembak pada nosel dengan sudut lubang keluar samping  $150^\circ$

Pola massa impak puncak pada nosel dengan sudut lubang keluar samping  $150^\circ$  mirip dengan Pola massa impak puncak pada nosel standar tanpa lubang keluar samping. Hal ini menandakan bahwa tidak adanya celah untuk udara keluar saat nosel diberikan jarak tembak 0 mm membuat aliran udara di dalam nosel menjadi tidak optimal sehingga dimungkinkan

kebanyakan aliran udara malah berbelok ke arah lubang samping, berbalik arah menjauhi permukaan target. Hal ini juga didukung dengan fakta bahwa nilai massa impak puncak yang dihasilkan oleh nosel dengan sudut lubang keluar samping  $150^\circ$  pada tiap variasi jarak tembak memiliki nilai paling kecil dibandingkan dengan massa impak puncak yang dihasilkan oleh variasi nosel yang lain.

#### 4. 1. 2. 5 Besar Massa Impak Rata-rata pada Variasi Jarak Tembak

Hasil dari eksperimen terhadap perubahan massa impak akibat variasi jarak tembak pada sudut lubang keluar samping nosel tertentu dirangkum dalam grafik 4.9 di bawah ini.



Grafik 4.9 Besar massa impak rata-rata terhadap variasi jarak tembak

Besar massa impak rata-rata dari hasil pengujian yang disajikan dalam grafik 4.5, grafik 4.6, grafik 4.7, dan grafik 4.8, ditunjukkan dalam grafik 4.9. Dari grafik 4.9 dapat dilihat bahwa pola massa impak puncak untuk jarak tembak 10 mm dan 20 mm menunjukkan kesamaan bentuk. Kecenderungan dari kedua pola tersebut adalah semakin besar sudut lubang keluar

samping nosel maka semakin rendah pula massa impact yang dihasilkan. Hal ini sesuai dengan prinsip bahwa lubang keluar dengan sudut yang semakin besar akan mengarahkan aliran udara semakin menjauhi permukaan target, dalam kasus ini merupakan permukaan plat neraca, sehingga massa impact yang dihasilkan pun semakin rendah.

Pola paling mencolok dihasilkan oleh massa impact puncak untuk jarak tembak 0 mm. Keanehan terjadi pada titik jarak tembak 0 mm terhadap nosel dengan sudut lubang keluar samping sebesar  $90^\circ$ . Hal ini sebenarnya mengindikasikan bahwa pembuatan lubang keluar samping sebesar  $90^\circ$  dapat memperbaiki kecenderungan rendahnya massa impact pada jarak tembak 0 mm. Hal tersebut kemudian dapat digunakan untuk aplikasi lain yang membutuhkan nilai massa impact tinggi. Besar sudut lubang samping sebesar  $90^\circ$  juga sebenarnya menjadi lubang keluar samping dengan sudut yang dianggap paling netral terhadap arah aliran karena tegak lurus terhadap arah aliran. Untuk mengetahui secara detail alasan di balik fenomena ini, diperlukan investigasi lebih lanjut terhadap interaksi aliran fluida pada nosel dengan sudut lubang keluar samping  $90^\circ$ .

#### **4. 2. Analisa Kesalahan dan Statistik**

Dalam pengumpulan data, terdapat dua jenis kesalahan eksperimen, yaitu kesalahan sistematis dan kesalahan acak. Kesalahan sistematis ditimbulkan oleh sebab yang teridentifikasi dan pada prinsipnya dapat dihilangkan. Kesalahan sistematik ada empat jenis, yaitu :

- a. Instrumental
- b. Pengamatan
- c. Lingkungan
- d. Teoritis

Kesalahan acak merupakan perubahan negatif-positif yang mengakibatkan setengah dari pengukuran akan terlalu tinggi atau terlalu rendah. Sumber kesalahan acak tidak selalu dapat diidentifikasi. Sumber kesalahan acak yang mungkin adalah

a. Pengamatan

b. Lingkungan

Kesalahan acak berbeda dengan kesalahan sistematik dan kesalahan ini dapat dikuantisasi dengan analisa statistik, sehingga efek kesalahan acak pada suatu eksperimen dapat ditentukan.

Pada pengujian kali ini, kesalahan pertama dapat terjadi akibat alat uji yang kurang ideal. Nosel yang digunakan diproduksi dengan tingkat kepresisian manufaktur yang tidak begitu tinggi sehingga ketidaksempurnaan bentuk geometri serta tingkat kekasaran permukaan dinding dalam nosel menjadi faktor yang harus sangat dipertimbangkan.

Selanjutnya, kesalahan juga dapat terjadi akibat instrumen pneumatik dan pengukuran yang terlibat. Suplai tekanan yang tidak dapat dipastikan stabil, kebocoran-kebocoran pada sambungan, dan rugi-rugi tekanan sepanjang jalur udara menjadi faktor penyebab kesalahan yang tidak dapat dianggap enteng. Instrumen pengukuran yang digunakan juga memiliki batas ketelitian tertentu sehingga dapat berperan dalam besar kesalahan. Getaran-getaran yang timbul akibat pelepasan aliran fluida bertekanan tinggi secara mendadak juga dipastikan dapat mempengaruhi besaran yang diukur oleh neraca. Belum lagi faktor dari lingkungan seperti temperatur, kecepatan udara, kelembaban udara, gaya gravitasi, dan sebagainya yang dipastikan berubah-ubah dan tidak ditinjau terus-menerus sehingga dapat mempengaruhi kesalahan pengujian. Instrumen pengukuran yang digunakan pun juga bukanlah instrumen yang secara langsung mengukur besaran yang menjadi fokus penelitian sehingga diperlukan faktor konversi yang dapat berpengaruh pula terhadap tingkat kesalahan hasil pengujian.

#### 4. 2. 1. Penentuan Nilai Rata-rata dan Standar Deviasi

Besar massa impak pada tiap variasi sudut lubang keluar samping dan jarak tembak dicari rata-rata dan standar deviasinya. Hal ini dimaksudkan agar didapat hasil pengukuran massa impak rata-rata disertai besar *error*-nya. Massa impak rata-rata dari tiap variasi pengujian kemudian akan dikalikan dengan asumsi gaya gravitasi sebesar  $9,81 \text{ m/s}^2$  sehingga didapat besar gaya impak untuk tiap variasi pengujian.

Dari tabel 1, dapat dilihat besaran rata-rata, standar deviasi, hasil akhir pengukuran, dan hasil akhir gaya impak untuk tiap variasi pengujian. Besar gaya impak paling kecil dihasilkan oleh nosel dengan sudut lubang keluar samping  $150^\circ$  dan jarak tembak 0 mm dengan nilai 0,78 N dan gaya impak paling besar dihasilkan oleh nosel standar dan jarak tembak 10 mm dengan nilai 1,59 N.

Tabel 1. Pengolahan data pengujian

	Rata-rata	Standar deviasi	Ketidakpastian nilai rata-rata	Hasil akhir pengukuran massa impak (gr)	Hasil perhitungan gaya impak (N)
0deg-0mm	141,01	1,61	0,29	141,01 ± 0,29	1,38 ± 0,0000029
0deg-10mm	162,42	2,87	0,52	162,42 ± 0,52	1,59 ± 0,0000051
0deg-20mm	156,19	2,45	0,45	156,19 ± 0,45	1,53 ± 0,0000044
30deg-0mm	142,25	2,31	0,42	142,25 ± 0,42	1,40 ± 0,0000041
30deg-10mm	146,85	2,60	0,48	146,85 ± 0,48	1,44 ± 0,0000047
30deg-20mm	149,10	2,75	0,50	149,10 ± 0,50	1,46 ± 0,0000049
90deg-0mm	153,68	2,43	0,44	153,68 ± 0,44	1,51 ± 0,0000043
90deg-10mm	101,41	2,44	0,45	101,41 ± 0,45	0,99 ± 0,0000044
90deg-20mm	103,32	2,08	0,38	103,32 ± 0,38	1,01 ± 0,0000037
150deg-0mm	79,38	1,28	0,23	79,38 ± 0,23	0,78 ± 0,0000023
150deg-10mm	95,57	2,41	0,44	95,57 ± 0,44	0,94 ± 0,0000043
150deg-20mm	97,30	1,90	0,35	97,30 ± 0,35	0,95 ± 0,0000034

#### 4. 2. 2. Uji Tabel Kontingensi

Uji tabel kontingensi atau disebut juga uji independensi bertujuan untuk mengetahui apakah data terklarifikasikan silang (*cross-classified*) secara independen (tidak saling terikat) atau tidak (Harinaldi, 2005).

Pada penelitian ini, uji tabel kontingensi dilakukan untuk mengetahui apakah besar massa impact rata-rata yang berubah-ubah dalam hasil memiliki keterkaitan dengan variasi sudut lubang keluar samping dan jarak tembak nosel.

Tabel 2. Nilai massa impact rata-rata untuk tiap sampel uji

	0 mm	10 mm	20 mm	Total baris
0°	141,01	162,42	156,19	459,62
30°	142,25	146,85	149,1	438,2
90°	153,68	101,41	103,32	358,41
150°	79,38	95,57	97,3	272,25
Total kolom	516,32	506,25	505,91	Total=1528,48

Uji tabel kontingensi dilakukan dengan langkah sebagai berikut:

a. Hipotesis

$H_0$  = Populasi nilai rata-rata massa impact di tiap sudut nosel sama untuk setiap jarak tembak

$H_1$  = Populasi nilai rata-rata massa impact di tiap sudut nosel tidak sama untuk setiap jarak tembak

b.  $\alpha = 0,05$  (tingkat kepentingan 0,05 atau tingkat kepercayaan 95%)

c. Tabel kontingensi di atas memiliki 4 baris ( $r=4$ ) dan 3 kolom ( $c=3$ ) maka  $df = v = (r-1) \cdot (c-1) = (4-1) \cdot (3-1) = 6$

d. Batas daerah kritis uji

Dari tabel chi-kuadrat untuk  $\alpha = 0,05$ ,  $df = 6$  diperoleh 12,592

e. Aturan keputusan

Tolak  $H_0$  dan terima  $H_1$  jika  $RU > 12,592$ . Jika tidak, terima  $H_0$

## f. Perhitungan frekuensi pengamatan dan harapan

Tabel 3. Hasil perhitungan frekuensi pengamatan dan harapan

	0 mm		10 mm		20 mm	
	O	E	O	E	O	E
0°	141,01	155,259472	162,42	152,231383	156,19	152,129144
30°	142,25	148,023804	146,85	145,136835	149,1	145,039361
90°	153,68	121,07077	101,41	118,709478	103,32	118,629752
150°	79,38	91,9659531	95,57	90,1723035	97,3	90,1117434
Total kolom	516,32	516,32	506,25	506,25	505,91	505,91

## g. Rasio uji

Tabel 4. Perhitungan rasio uji

Sudut lubang	Jarak tembak	O	E	O - E	(O - E) <sup>2</sup>	(O - E) <sup>2</sup> / E
0°	0 mm	141,01	155,2594724	-14,24947242	203,0474642	1,307794372
0°	10 mm	162,42	152,2313835	10,18861653	103,8079069	0,681908714
0°	20 mm	156,19	152,1291441	4,060855883	16,4905505	0,108398365
30°	0 mm	142,25	148,023804	-5,773804041	33,3368131	0,225212514
30°	10 mm	146,85	145,1368353	1,713164713	2,934933333	0,020221836
30°	20 mm	149,1	145,0393607	4,060639328	16,48879175	0,113684945
90°	0 mm	153,68	121,0707704	32,60922956	1063,361853	8,782977499
90°	10 mm	101,41	118,7094777	-17,29947772	299,2719293	2,52104495
90°	20 mm	103,32	118,6297518	-15,30975184	234,3885016	1,975798633
150°	0 mm	79,38	91,9659531	-12,5859531	158,4062155	1,722444124
150°	10 mm	95,57	90,17230353	5,39769647	29,13512718	0,323105056
150°	20 mm	97,3	90,11174337	7,188256634	51,67103344	0,573410651
		1528,48	1528,48			18,35600166

#### h. Pengambilan keputusan

Karena  $RU = 18,356$  yang berarti  $RU > 12,592$  maka diambil kesimpulan bahwa nilai rata-rata massa impak di tiap sudut lubang nosel tidak sama untuk setiap jarak tembak.

Keputusan di atas menandakan bahwa besar nilai massa impak pada tiap sudut lubang keluar samping nosel bergantung pada jarak tembak. Hal tersebut sejalan dengan grafik yang menggambarkan hasil eksperimen. Dengan begitu maka dapat dipastikan bahwa baik secara pemaparan hasil eksperimen dan pengolahan statistik diketahui bahwa parameter sudut lubang keluar samping nosel dan jarak tembak benar mempengaruhi besar gaya impak nosel.

#### 4. 2. 2. Uji t-Pasangan untuk Populasi saling Dependen

Pengujian statistik melalui uji t-pasangan dilakukan untuk melakukan konfirmasi atas hubungan rata-rata antar hasil eksperimen untuk tiap variasi penelitian. Adapun asumsi dari yang digunakan pada penggunaan uji t-pasangan ini adalah bahwa hubungan antara data atau populasi yang diuji adalah saling tergantung. Yang dimaksud populasi saling tergantung dapat dicontohkan dari hubungan antara hasil data untuk nosel standar tanpa lubang keluar samping pada jarak 0 mm dengan hasil data nosel dengan sudut lubang keluar samping  $30^\circ$  pada jarak 0 mm. Kedua data dari dua variasi tersebut dianggap saling tergantung karena dilakukan pada jarak tembak yang sama namun dengan nosel yang berbeda sehingga terdapat satu variabel yang bernilai sama.

Pada halaman 36, sudah disebutkan 12 variasi yang menjadi lingkup penelitian. Hasil penelitian secara eksperimen dari kedua belas variasi tersebut disajikan dalam grafik 1 sampai dengan grafik 9. Dalam beberapa grafik, tepatnya di grafik 1, 2, 3,

5, 6, 7, 8, terdapat garis-garis data yang saling berhimpit sehingga menimbulkan kesan bahwa tidak ada perbedaan hasil atau rata-rata di antara garis-garis tersebut. Hal tersebut harus dipastikan karena menentukan hasil akhir dari penelitian ini.

Secara statistik, penghitungan rata-rata dari tiap variasi sebenarnya sudah dilakukan dengan mempertimbangkan nilai standar deviasi, ketidakpastian rata-rata, sampai kemudian didapat angka ketidakpastian hasil akhir. Hasil dari proses ini dapat dilihat pada tabel 1. Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa nilai rata-rata dari tiap variasi yang terdapat di dalam penelitian memiliki nilai yang berbeda satu sama lain. Namun untuk memberikan bukti lebih atas hal ini maka dilakukan uji t-pasangan untuk beberapa pasangan data, yaitu:

- a. nosel standar tanpa lubang keluar samping pada jarak 0 mm dengan nosel dengan sudut lubang keluar samping  $30^\circ$  pada jarak 0 mm
- b. nosel dengan sudut lubang keluar samping  $90^\circ$  pada jarak 10 mm dengan nosel dengan sudut lubang keluar samping  $150^\circ$  pada jarak 10 mm
- c. nosel dengan sudut lubang keluar samping  $90^\circ$  pada jarak 20 mm dengan nosel dengan sudut lubang keluar samping  $150^\circ$  pada jarak 20 mm
- d. nosel dengan sudut lubang keluar samping  $30^\circ$  pada jarak 0 mm dengan nosel dengan sudut lubang keluar samping  $30^\circ$  pada jarak 10 mm
- e. nosel dengan sudut lubang keluar samping  $30^\circ$  pada jarak 10 mm dengan nosel dengan sudut lubang keluar samping  $30^\circ$  pada jarak 20 mm
- f. nosel dengan sudut lubang keluar samping  $90^\circ$  pada jarak 10 mm dengan nosel dengan sudut lubang keluar samping  $90^\circ$  pada jarak 20 mm

- g. nosel dengan sudut lubang keluar samping  $150^\circ$  pada jarak 10 mm dengan nosel dengan sudut lubang keluar samping  $150^\circ$  pada jarak 20 mm

Uji t-pasangan dilakukan dengan langkah sebagai berikut:

- a. Pernyataan hipotesis

Dalam uji-t-pasangan ini hipotesis nolnya ( $H_0$ ) adalah perbedaan rata-rata dari kedua populasi adalah nol atau tidak ada perbedaan nilai rata-rata antara kedua populasi sedangkan hipotesis alternatifnya ( $H_1$ ) adalah terdapat perbedaan nilai rata-rata antara kedua populasi yang diuji

- b. Pemilihan tingkat kepentingan ( $\alpha$ )

Nilai  $\alpha$  ditentukan sebesar 0,05

- c. Penentuan distribusi pengujian

Pada uji t-pasangan, distribusi pengujian yang digunakan adalah distribusi t

- d. Penentuan daerah kritis

Penentuan daerah kritis dilakukan dengan mencari batas kritis uji dua ujung sehingga  $\alpha = 0,05/2 = 0,025$  dan nilai derajat kebebasan sebesar  $v = n-1 = 30-1 = 29$  dengan n merupakan banyaknya data tiap sampel.

Dari tabel t untuk  $\alpha = 0,025$  dan  $v = 29$  didapat batas kritis sebesar 2,045.

- e. Pernyataan aturan keputusan

Batas kritis berupa uji dua ujung dan bernilai 2,045 sehingga pernyataan aturan keputusan adalah tolak hipotesis nol ( $H_0$ ) dan terima hipotesis alternatif ( $H_1$ ) jika  $RU_t < -2,045$  atau  $RU_t > 2,045$ . Jika tidak, terima  $H_0$ .

Pengujian t-pasangan ini dilakukan sebanyak tujuh kali sesuai dengan banyaknya pasangan data yang akan diuji. Hanya saja, semua pasangan tersebut memiliki jumlah sampel yang sama yaitu 30 buah sehingga memiliki nilai derajat kebebasan yang

sama. Besar nilai  $\alpha$  untuk tiap pengujian juga sama sehingga penentuan daerah kritis dan pernyataan aturan keputusan sama untuk setiap pengujian pada penelitian kali ini.

f. Perhitungan rasio uji

Rumus yang digunakan untuk menghitung rasio uji adalah:

$$RU_t = \frac{d - \mu}{s_d / \sqrt{n}}$$

$$s_d = \sqrt{\frac{(d-d)^2}{n-1}}$$

dengan:

$d$  merupakan besar perbedaan nilai pasangan data

$\mu$  bernilai 0 dengan asumsi hipotesis nol adalah kedua kelompok data memiliki nilai rata-rata sama besar

$n$  merupakan banyaknya sampel atau data yang diambil

$d$  merupakan rata-rata dari nilai  $d$  untuk pasangan data.

Perhitungan rasio uji dilakukan terhadap masing-masing pasangan data yang telah disebutkan sebelumnya sebanyak 7 buah pasangan data.

Hasil dari perhitungan rasio uji untuk ketujuh pasangan tersebut dapat dilihat pada tabel 5 berikut ini. Adapun proses pengerjaan secara rinci akan dijelaskan pada lampiran.

Tabel 5. Perhitungan rasio uji

No.	Pasangan data	Besar rasio uji
a.	nosel tanpa lubang samping – 0 mm vs. nosel lubang 30° – 0 mm	-2,26003019
b.	nosel lubang 90° – 10 mm vs. nosel lubang 150° – 10 mm	13,67134474
c.	nosel lubang 90° – 20 mm vs. nosel lubang 150° – 20 mm	13,84013483
d.	nosel lubang 30° – 0 mm vs. nosel lubang 30° – 10 mm	-8,062203269

e.	nosel lubang 30° – 10 mm vs. nosel lubang 30° – 20 mm	-3,378886132
f.	nosel lubang 90° – 10 mm vs. nosel lubang 90° – 20 mm	-3,274612419
g.	nosel lubang 150° – 10 mm vs. nosel lubang 150° – 20 mm	-3,243643648

g. Pengambilan keputusan

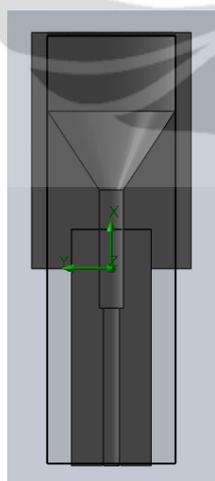
Proses pengambilan keputusan dilakukan dengan melihat ketentuan bahwa hipotesis nol ( $H_0$ ) ditolak dan hipotesis alternatif ( $H_1$ ) diterima jika nilai rasio uji berada pada kisaran  $RU_t < -2,045$  atau  $RU_t > 2,045$ . Jika tidak demikian, pernyataan hipotesis nol dapat diterima.

Dari tabel 5 dapat dilihat bahwa besar nilai rasio uji untuk tiap pasangan data memenuhi syarat  $RU_t < -2,045$  atau  $RU_t > 2,045$  sehingga ketentuan hipotesis nol ( $H_0$ ) ditolak dan hipotesis alternatif ( $H_1$ ) diterima dapat diambil sebagai keputusan. Hal ini menandakan bahwa secara statistik sudah terbukti bahwa rata-rata antar kedua kelompok data memiliki besar nilai yang signifikan berbeda.

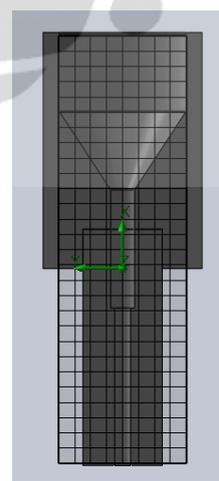
#### 4. 3. Analisa Simulasi Komputasional

Pengujian secara simulasi komputasi dilakukan dengan tujuan mendapatkan data-data sekunder yang dapat digunakan untuk membantu mempelajari fenomena yang terjadi pada pengujian eksperimental. Idealnya, data sekunder juga diambil melalui pengujian eksperimental. Hanya saja, kendala seperti dimensi alat uji yang relatif kecil dan kondisi kerja yang melibatkan tekanan serta kecepatan tinggi mengakibatkan keterbatasan instrumen pengukur yang dapat digunakan. Hal ini membuat pengambilan data sekunder melalui pengujian eksperimental sulit dipenuhi. Oleh karena itu, diputuskan penggunaan pengujian secara simulasi komputasi.

Pengujian dilakukan terhadap aliran fluida di dalam nosel. Kontrol volume yang dikaji merupakan komponen adaptor nosel dengan nosel yang memiliki variasi di sudut lubang keluar sampingnya. Parameter masukan yang digunakan pada pengujian simulasi komputasi berupa tekanan total masuk sebesar 6 bar. Penentuan besar tekanan total tersebut berdasarkan tekanan yang digunakan dalam pengujian eksperimental. Pada kenyataannya, tekanan masuk instrumen pengujian hanya diukur pada regulator tekanan sedangkan tekanan pada titik masuk nosel yang sebenarnya tidak diketahui pasti. Dengan menggunakan asumsi bahwa tidak ada rugi tekanan akibat gesekan dan kebocoran antarsambungan antara regulator tekanan sampai tabung akumulator dan antara tabung akumulator sampai saluran masuk nosel serta asumsi sistem dan lingkungan yang berada dalam kondisi adiabatik, diputuskan bahwa besar tekanan yang digunakan dalam simulasi komputasi sama dengan pada regulator tekanan yaitu 6 bar. Pada bagian keluar nosel, besar tekanan ditentukan sebesar 1,01325 bar yang sesuai dengan besar tekanan atmosfer standar (STP) atau 1 atm. Hal ini didasarkan pada kondisi pengujian sebenarnya yang mengkondisikan aliran keluar nosel langsung ke udara lingkungan langsung.

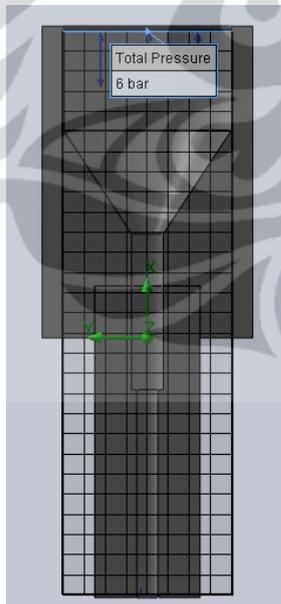


Gambar 4.1 Kontrol volume pengujian

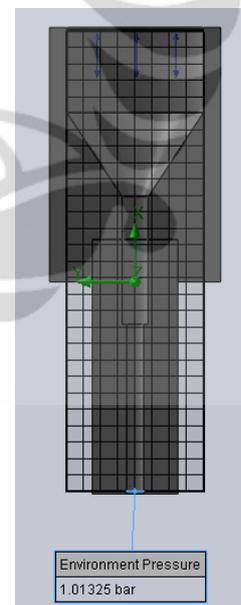


Gambar 4.2 *Basic mesh* simulasi

Besaran parameter yang diambil pada pengujian melalui simulasi komputasi adalah tekanan total, kerapatan, kecepatan aliran, dan bilangan Mach. Parameter-parameter tersebut diambil di beberapa titik yang dianggap dapat menggambarkan perbedaan karakteristik aliran di tiap variasi nosel. Titik-titik tersebut ditentukan terletak di sumbu utama nosel dan di lokasi yang diperkirakan akan menyebabkan perubahan parameter-parameter yang bersangkutan seperti pada perubahan luas penampang aliran dan saluran masuk serta keluar aliran fluida dalam nosel. Titik pertama diambil pada permukaan yang menjadi masukan aliran fluida. Kemudian, titik kedua dan ketiga diambil pada bagian pengecilan luas penampang aliran fluida. Permukaan yang menjadi keluaran utama aliran fluida dijadikan titik keempat pengambilan data. Khusus untuk nosel dengan lubang keluaran samping, terdapat dua titik pengambilan data tambahan, yaitu titik kelima pada titik percabangan aliran dan titik keenam pada permukaan yang menjadi lubang keluaran samping fluida.



Gambar 4.3 Penentuan input tekanan



Gambar 4.4 Penentuan output tekanan

#### 4. 3. 1. Nosel Standar tanpa Lubang Keluar Samping

Pada penelitian kali ini, hasil yang didapat dari pengujian simulasi komputasi menggunakan teknik CFD pada aplikasi *Flow Simulation SolidWorks 2012* berupa profil kecepatan dari aliran di dalam nosel dan besar dari parameter tekanan total, kecepatan aliran, kerapatan, dan bilangan Mach pada beberapa titik yang dianggap penting untuk dikaji.

Untuk nosel standar tanpa lubang, pengambilan data besar parameter dilakukan di empat titik. Titik pertama berada di sisi masuk nosel sebagai data masuk aliran masuk nosel. Titik kedua berada di saluran yang mengalami penyempitan (*throat*) pada komponen adaptor nosel. Titik ini menjadi penting karena pada lokasi ini *tube* akan diletakkan dan diasumsikan menjadi titik awal aliran fluida akan mengalami kontak dengan partikel. Kemudian titik ketiga terletak pada penyempitan saluran (*throat*) pada bagian nosel utama. Penyempitan ini dirancang sebagai penahan agar *tube* tidak ikut tertembak keluar saat penembakan dilakukan dan menjadi penting karena merupakan penyempitan luas penampang yang dapat mempengaruhi aliran. Titik terakhir atau titik keempat terletak di ujung lubang keluar utama nosel yang menjadi penting karena merupakan titik aliran yang menentukan kondisi aliran sesaat sebelum keluar dari nosel ke lingkungan luar.

Hasil pada nosel standar tanpa lubang keluar samping menunjukkan bahwa aliran udara bertekanan yang melewati nosel termasuk aliran supersonik karena besar nilai kecepatan pada satu dari empat titik, tepatnya titik 4, yang diambil menunjukkan angka yang lebih besar dari kecepatan suara dan didukung dengan bilangan Mach sebesar 1,18. Hal ini harus menjadi perhatian karena perilaku yang ditunjukkan oleh aliran supersonik dapat berlainan atau bertentangan sama sekali dengan aliran fluida subsonik yang biasa dibahas pada permasalahan pada aliran fluida.

Kecepatan supersonik tersebut dicapai pada titik yang terletak di mulut keluar utama nosel. Dari gambar 27 yang menunjukkan profil kecepatan hasil CFD dapat dilihat bahwa penyempitan luas area di

beberapa segmen nosel menyebabkan perubahan kecepatan yang seiring dengan perubahan tekanan, kerapatan, dan bilangan Mach. Hal tersebut sesuai dengan prinsip kontinuitas aliran fluida melewati nosel yang menyatakan bahwa laju massa akan bernilai tetap di tiap posisi dengan fungsi kerapatan, luas penampang aliran, dan kecepatan. Konfirmasi atas data-data yang didapat melalui simulasi sudah dilakukan dengan menggunakan persamaan kontinuitas dan didapat keputusan bahwa hasil dari simulasi CFD dapat diandalkan. Adapun besar perubahan parameter tekanan, kerapatan, kecepatan, dan bilangan Mach dapat dilihat pada tabel 5.

Khusus pada segmen nosel dengan luas penampang terkecil, yaitu pada bagian ujung nosel, pengurangan kecepatan aliran akibat gesekan dengan dinding nosel sangat jelas terlihat. Semakin cepat aliran, semakin besar pula daerah separasi antara aliran yang berkembang penuh di tengah penampang nosel dengan aliran nosel di dinding nosel.

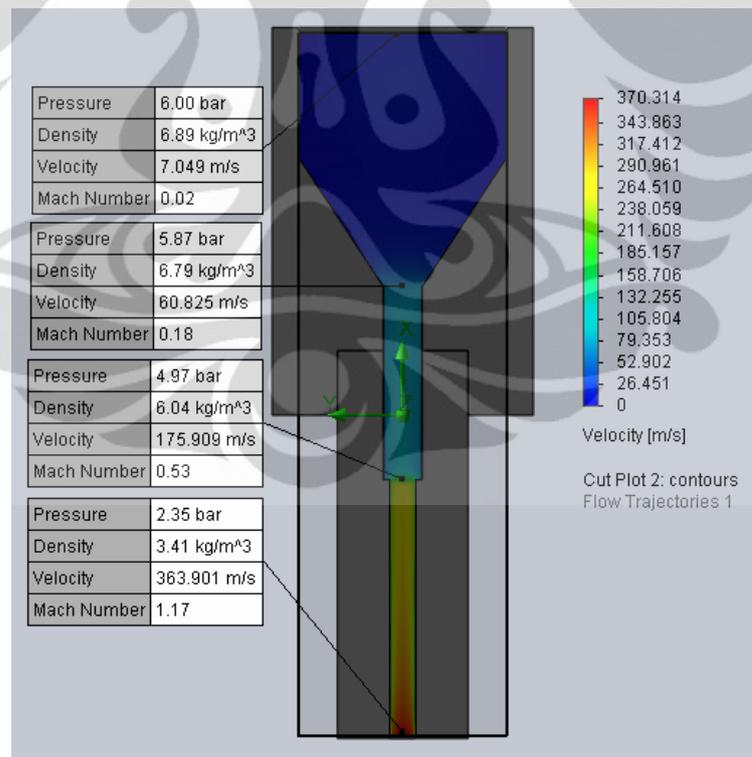
Kemudian, dari tabel 5 dan gambar 27, secara khusus dapat dilihat data besar tekanan pada titik 4 yang menunjukkan angka 2,3 bar. Hal ini dapat dijadikan perhatian khusus karena menunjukkan bahwa aliran masih memiliki potensi untuk dikembangkan kecepatannya sebelum tekanan turun mencapai besar yang sama dengan tekanan lingkungan. Hal tersebut dapat dilakukan dengan memperpanjang nosel sehingga aliran memiliki kesempatan untuk berkembang penuh.

Besar kecepatan aliran yang mencapai kecepatan supersonik saat keluar dari nosel juga harus diperhatikan secara khusus akibat efek *shockwave* (gelombang kejut). Saat aliran fluida mengalami percepatan dan berubah kecepatannya dari subsonik menjadi supersonik, akan terjadi fenomena *shockwave* yang mengakibatkan aliran akan berekspansi secara mendadak dan terjadi penurunan tekanan secara drastis akibat efek kompresibilitas fluida yang melebihi ambang batas bilangan Mach-nya. Fenomena *shockwave* ini dapat berakibat negatif karena menimbulkan getaran dan perubahan karakteristik aliran yang dapat mempengaruhi kinerja nosel. Namun, fenomena ini tidak dapat dihindarkan jika aliran

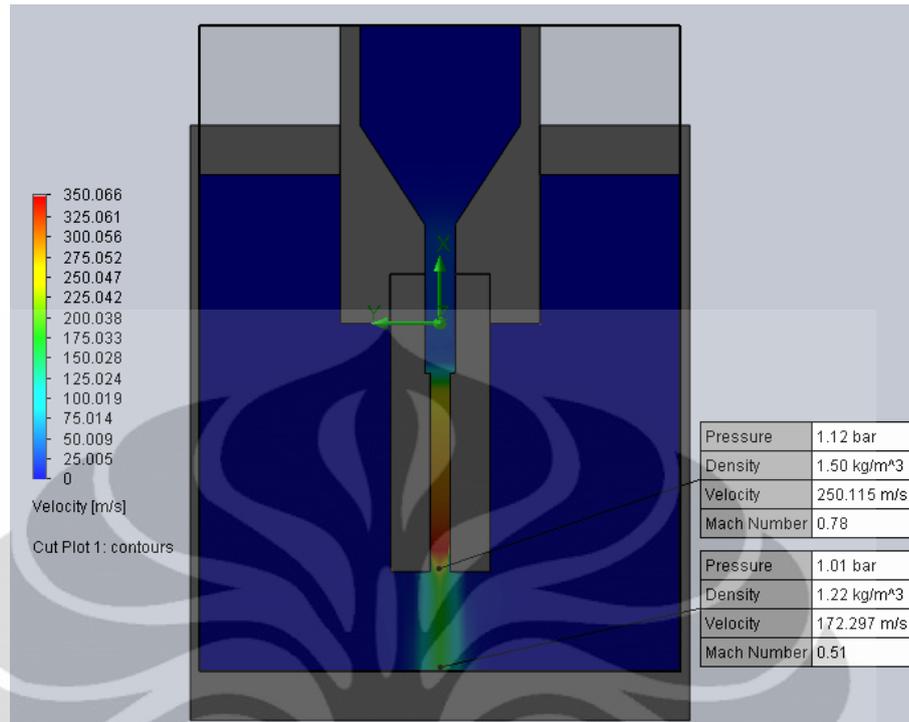
melibatkan kecepatan supersonik sehingga cara yang paling baik untuk dapat meminimalkan dampak akibat *shockwave* dan meningkatkan kemampuan berkembang aliran adalah dengan merancang ulang nosel dengan dengan desain nosel *convergent-divergent* (C-D) yang memang didesain untuk menangani aliran fluida yang bersifat subsonik dan supersonik.

Tabel 6. Data aliran fluida dalam nosel standar

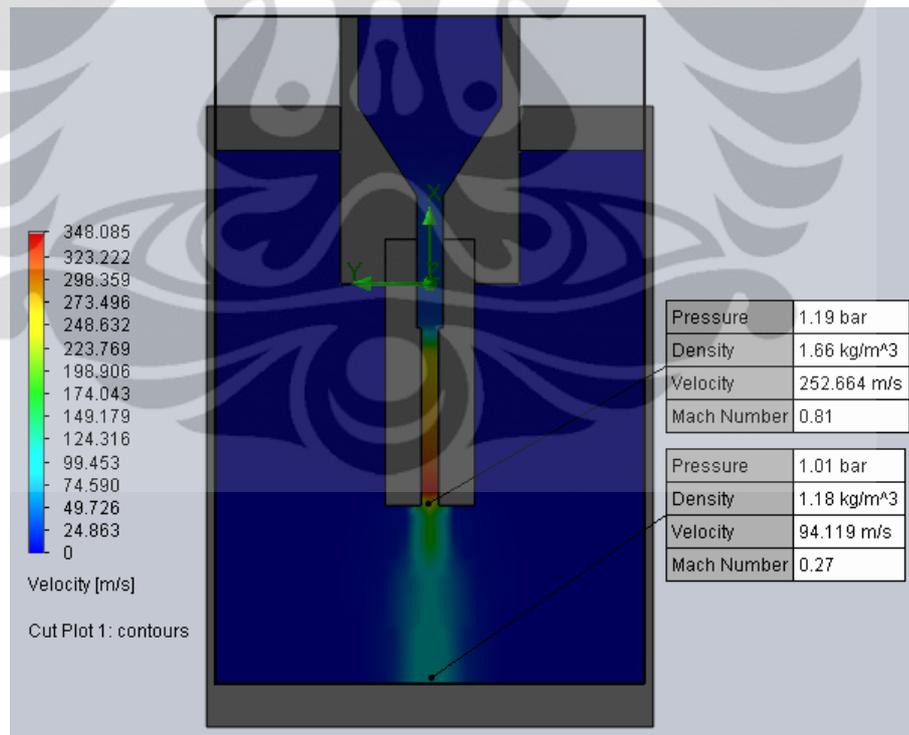
Parameter	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4
Tekanan (bar)	6	5,87	4,97	2,35
Kerapatan (kg/m <sup>3</sup> )	6,89	6,79	6,04	3,41
Kecepatan (m/s)	7,049	60,825	175,909	363,901
Bilangan Mach	0,02	0,18	0,53	1,17



Gambar 4.5 Hasil simulasi komputasi nosel standar tanpa lubang *baffle*



Gambar 4.6 Hasil simulasi komputasi nosel standar pada jarak tembak 10 mm



Gambar 4.7 Hasil simulasi komputasi nosel standar pada jarak tembak 20 mm

#### 4. 3. 2.        **Nosel dengan Sudut Lubang Keluar Samping 30°**

Sama halnya dengan nosel standar tanpa lubang, hasil simulasi CFD untuk nosel dengan sudut lubang keluar samping 30° juga ditunjukkan melalui profil kecepatan aliran dan besar parameter tekanan, kerapatan, kecepatan, dan bilangan Mach di beberapa titik yang dapat dilihat di tabel 6 dan gambar 28. Hanya saja, pada nosel dengan sudut lubang keluar samping 30° dan selanjutnya, banyaknya titik yang diambil besar parameternya menjadi 6 titik. Titik 1 sampai 4 memiliki posisi yang sama dengan nosel standar tanpa lubang. Sedangkan dua titik tambahan, yaitu titik 5 dan titik 6 digunakan untuk secara khusus mempelajari pengaruh sudut lubang keluar samping terhadap profil aliran udara di dalam nosel.

Titik 5 terletak pada titik percabangan antara lubang keluar utama nosel dengan keempat lubang keluar samping. Kemudian titik 6 terletak pada titik yang berada di ujung lubang keluar samping nosel. Dengan asumsi bahwa aliran akan bersifat axi-simetris maka titik 6 dianggap mewakili kondisi di tiap lubang keluar samping.

Pada pengujian secara eksperimental, nosel dengan sudut lubang keluar samping 30° menghasilkan gaya impak yang cukup beragam di tiap variasi ketinggian. Hal tersebut dapat dijelaskan melalui fenomena yang dapat dilihat melalui hasil simulasi. Dari hasil simulasi, dapat dilihat bahwa besar kecepatan aliran yang melalui lubang samping memiliki besar yang ternyata lebih tinggi dibandingkan dengan kecepatan aliran yang keluar melalui lubang keluar utama. Hal ini menjadi unik karena lazimnya, aliran cenderung mengalir secara dominan melalui lubang keluar utama nosel yang lurus dibandingkan ke arah lubang keluar samping.

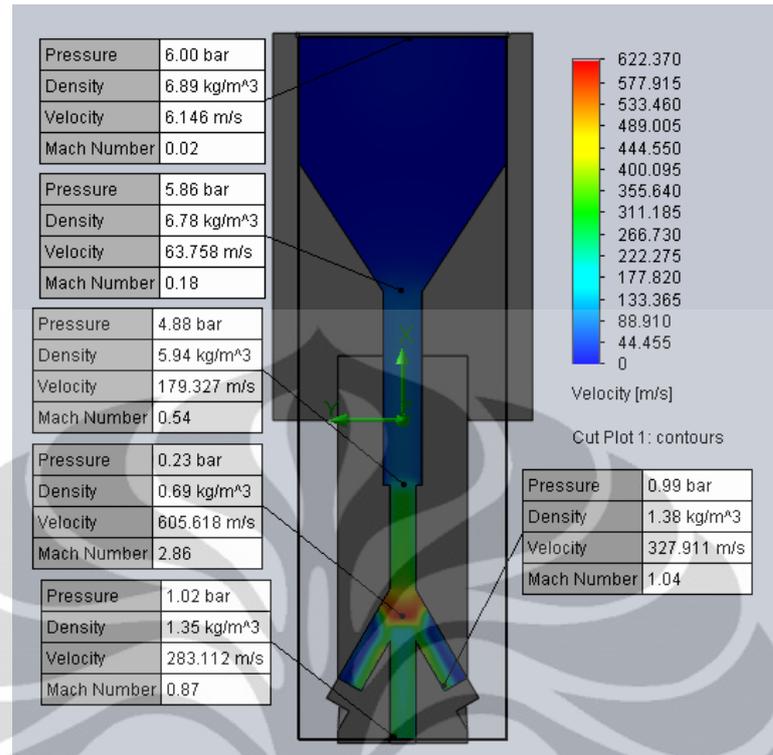
Fenomena ini dapat terjadi akibat aliran udara di dalam nosel yang bersifat supersonik sehingga aliran cenderung akan melakukan ekspansi ke luar. Gambar 28 dan secara khusus data

pada titik 5 memberikan penjelasan bahwa aliran mencapai kecepatan supersonik sehingga menimbulkan fenomena *shockwave*. *Shockwave* kemudian memberikan karakter yang bersifat ekspansif pada aliran udara.

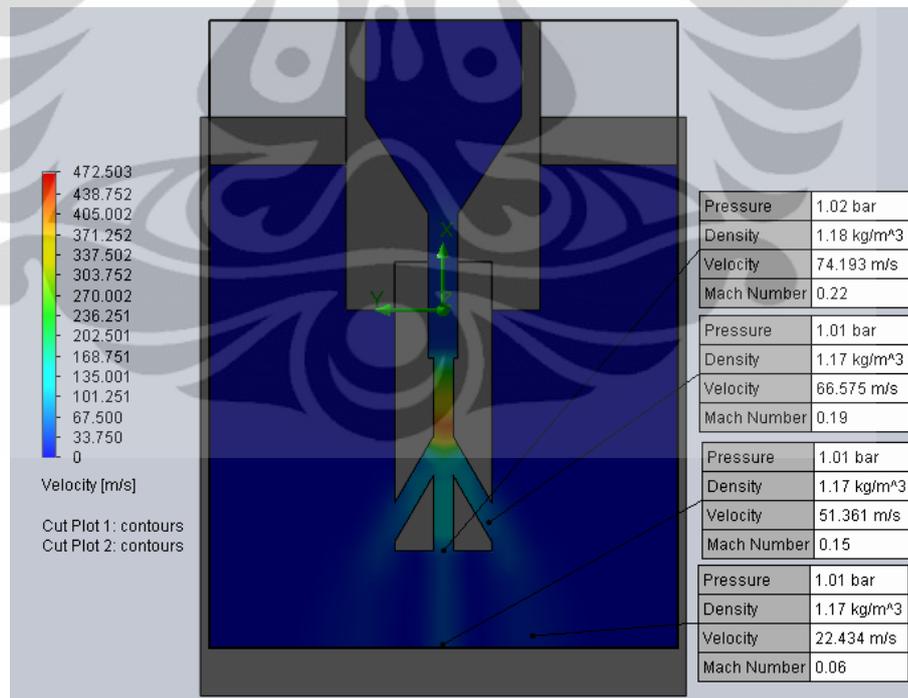
Dibandingkan dengan nosel standar tanpa lubang, kecepatan maksimal yang dicapai pada nosel dengan sudut lubang samping  $30^\circ$  bernilai jauh lebih besar. Hal ini disebabkan oleh keberadaan lubang samping yang menciptakan suatu ruang yang bersifat membesar sehingga membuat nosel memiliki karakter seperti nosel *convergent-divergent* (*C-D nozzle*) untuk aliran supersonik.

Tabel 7. Data aliran fluida dalam nosel dengan sudut lubang baffle  $30^\circ$

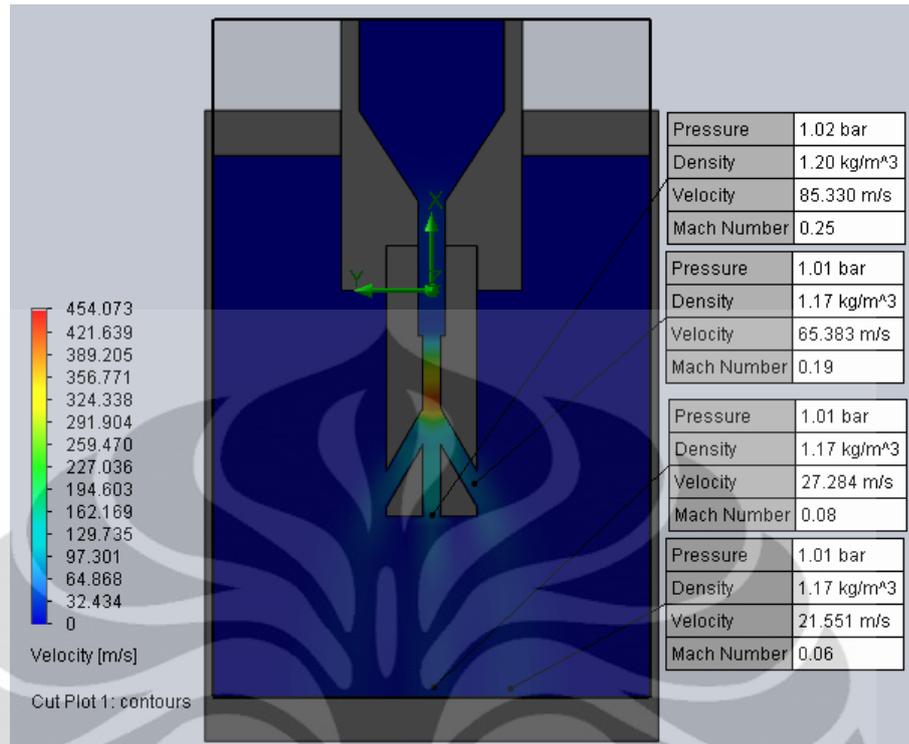
Parameter	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	Titik 6
Tekanan (bar)	6	5,86	4,88	1,02	0,23	0,99
Kerapatan ( $\text{kg/m}^3$ )	6,89	6,78	5,94	1,35	0,69	1,38
Kecepatan (m/s)	6,146	63,758	179,327	283,112	605,618	327,911
Bilangan Mach	0,02	0,18	0,54	0,87	2,83	1,04



Gambar 4.8 Hasil simulasi komputasi nosel dengan sudut lubang *baffle* 30°



Gambar 4.9 Hasil simulasi komputasi nosel dengan sudut lubang *baffle* 30° pada jarak tembak 10 mm



Gambar 4.10 Hasil simulasi komputasi nosel dengan sudut lubang *baffle* 30° pada jarak tembak 20 mm

#### 4. 3. 3. Nosel dengan Sudut Lubang Keluar Samping 90°

Hasil simulasi CFD untuk nosel dengan sudut lubang keluar samping 90° menunjukkan pola yang tidak jauh berbeda dengan hasil simulasi CFD untuk nosel dengan sudut lubang keluar samping 30°. Hanya saja, kali ini besar kecepatan aliran di lubang keluar utama nosel lebih besar dibandingkan dengan aliran udara di lubang keluar samping nosel. Hal tersebut disebabkan oleh lubang dengan sudut 90° memiliki sudut yang tegak lurus terhadap arah aliran dan kecenderungan aliran untuk mengalir searah sumbu utama lebih besar. Walaupun begitu, efek dari keberadaan lubang samping yang memberikan kesempatan untuk aliran berkembang secara penuh menimbulkan fenomena *shockwave* yang membuat aliran berekspansi ke sisi samping.

Dari gambar 29, secara detail dapat dilihat bahwa pada area sekitar percabangan antara lubang keluar utama dengan lubang keluar samping, terjadi pembentukan aliran yang mengikuti suatu bentuk *shockwave*. Perubahan parameter aliran yang drastis pada area tersebut juga menandakan bahwa *shockwave* berkembang secara penuh di area tersebut.

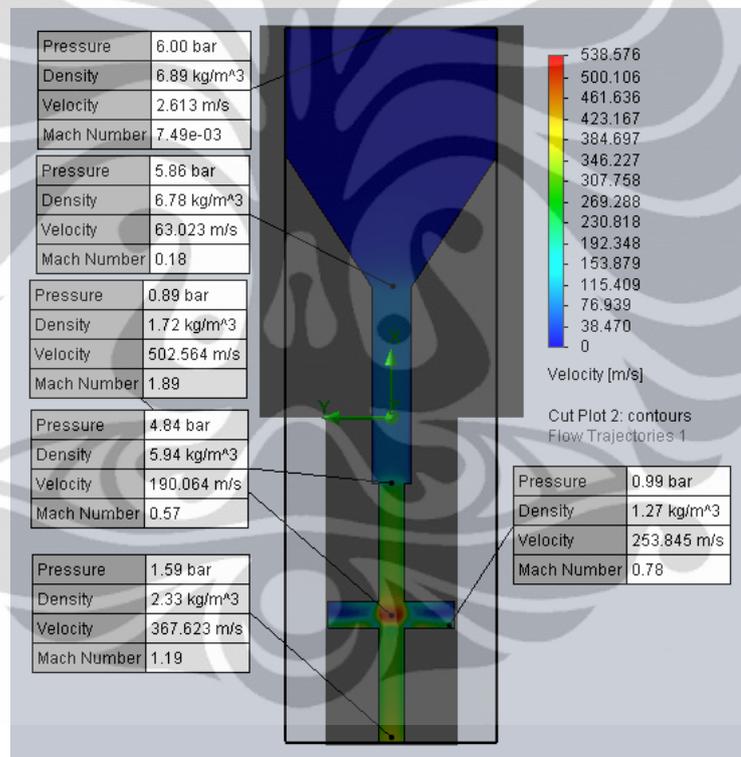
Di dalam lubang keluar samping, aliran tidak berkembang secara simetris. Aliran yang terdapat di lubang keluar samping cenderung merupakan aliran yang sebenarnya akan mengalir ke arah lubang keluar utama, hanya saja kemudian terjadi pembelokan ke arah lubang keluar samping.

Berhubungan dengan gaya impak, nosel dengan sudut lubang keluar samping 90° mengarahkan aliran ke samping sehingga tidak mengenai permukaan neraca. Hal tersebut mengindikasikan bahwa besar gaya impak yang didapat pada nosel dengan sudut lubang keluar samping 90° berasal dari aliran yang keluar dari lubang keluar utama saja, tidak seperti nosel dengan sudut lubang keluar samping 30° yang masih memungkinkan aliran

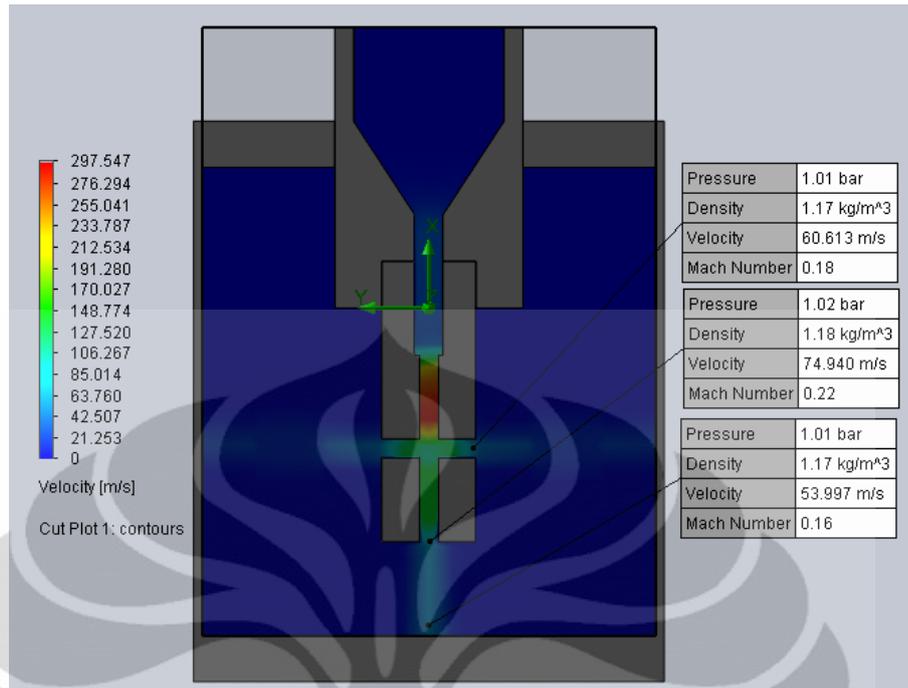
dari lubang keluar samping untuk mengenai permukaan target (permukaan neraca) dan menimbulkan gaya impact.

Tabel 8. Data aliran fluida dalam nosel dengan sudut lubang baffle 90°

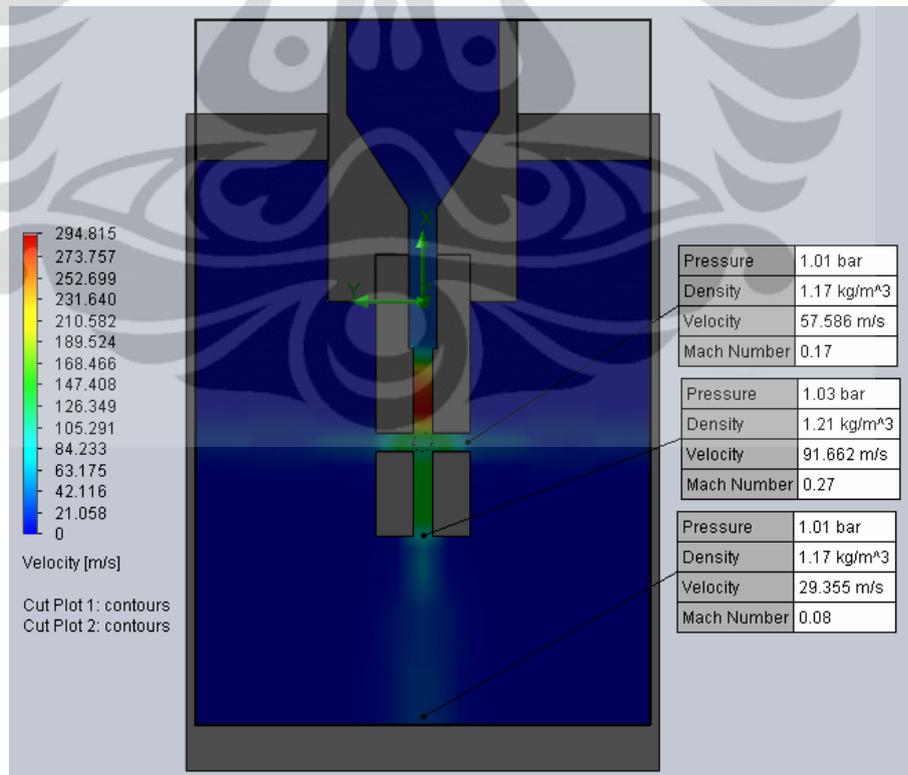
Parameter	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	Titik 6
Tekanan (bar)	6	5,86	4,84	1,59	0,89	0,99
Kerapatan (kg/m <sup>3</sup> )	6,89	6,78	5,94	2,33	1,72	1,27
Kecepatan (m/s)	2,613	63,023	190,064	367,623	502,564	253,845
Bilangan Mach	0	0,18	0,57	1,19	1,89	0,78



Gambar 4.11 Hasil pengujian simulasi komputasi untuk nosel dengan sudut lubang *baffle* 90°



Gambar 4.12 Hasil pengujian simulasi komputasi untuk nosel dengan sudut lubang *baffle* 90° pada jarak tembak 10 mm



Gambar 4.13 Hasil pengujian simulasi komputasi untuk nosel dengan sudut lubang *baffle* 90° pada jarak tembak 20 mm

#### 4. 3. 4.        **Nosel dengan Sudut Lubang Keluar Samping 150°**

Nosel dengan sudut lubang keluar samping 150° memiliki karakter yang berbeda dibandingkan dengan ketiga nosel yang lain. Lubang dengan sudut 150° mengarah berlawanan terhadap arah aliran utama dan berlawanan dengan gravitasi sehingga aliran udara yang melewati lubang samping tersebut akan bersifat minimal.

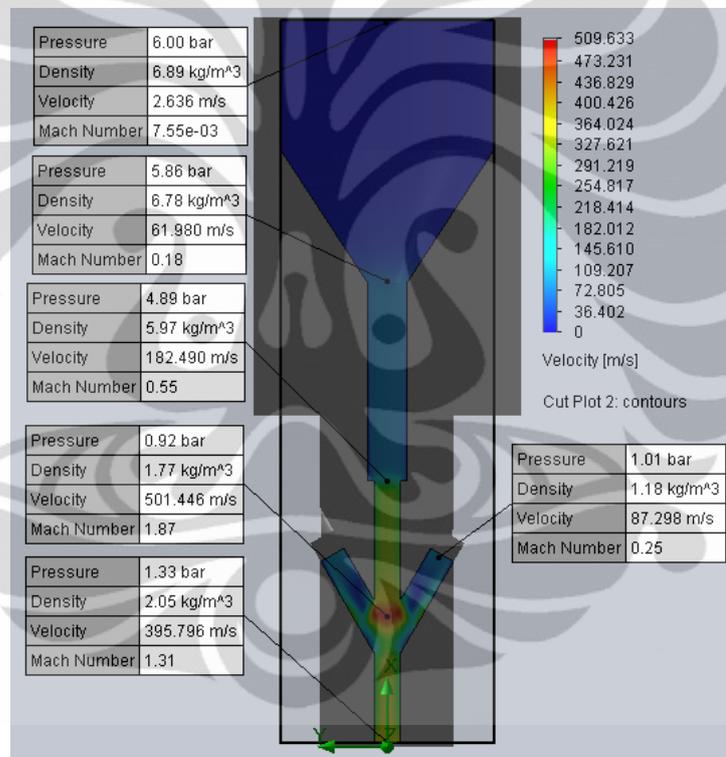
Berdasarkan hasil simulasi CFD yang dapat dilihat pada tabel 4 dan gambar 30, dapat dilihat bahwa aliran udara yang melalui titik 6 yang terletak pada ujung lubang keluar samping memiliki nilai yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan lubang keluar utama nosel. Dibandingkan dengan nosel berlubang samping yang lain pun, nosel dengan sudut lubang samping 150° memiliki kecepatan aliran melalui lubang samping yang paling kecil. Namun hal tersebut bukan berarti tidak menimbulkan efek apapun. Sudut yang berlawanan arah dengan arah aliran utama fluida memberikan nosel ini kemampuan untuk meminimalkan gaya impak dengan memberikan nosel kemampuan untuk memberikan gaya reaksi terhadap gaya impak. Hal ini kemudian ditunjukkan melalui hasil pengujian eksperimen yang menyatakan bahwa nosel dengan sudut lubang keluar samping sebesar 150° menghasilkan nilai gaya impak paling rendah tanpa harus mengurangi kecepatan aliran keluar nosel.

Fenomena akibat aliran supersonik juga terlihat pada bagian percabangan. Gambar 30 menunjukkan keberadaan gelombang kejut (*shockwave*) yang sangat jelas. Aliran udara yang melewati lubang keluar samping pun juga terlihat lebih simetris dibandingkan dengan kedua nosel dengan lubang keluar samping yang lain karena aliran yang keluar melalui lubang samping 150° bukanlah bersifat pembelokan dari aliran yang akan keluar melalui lubang keluar utama melainkan lebih bersifat murni karena

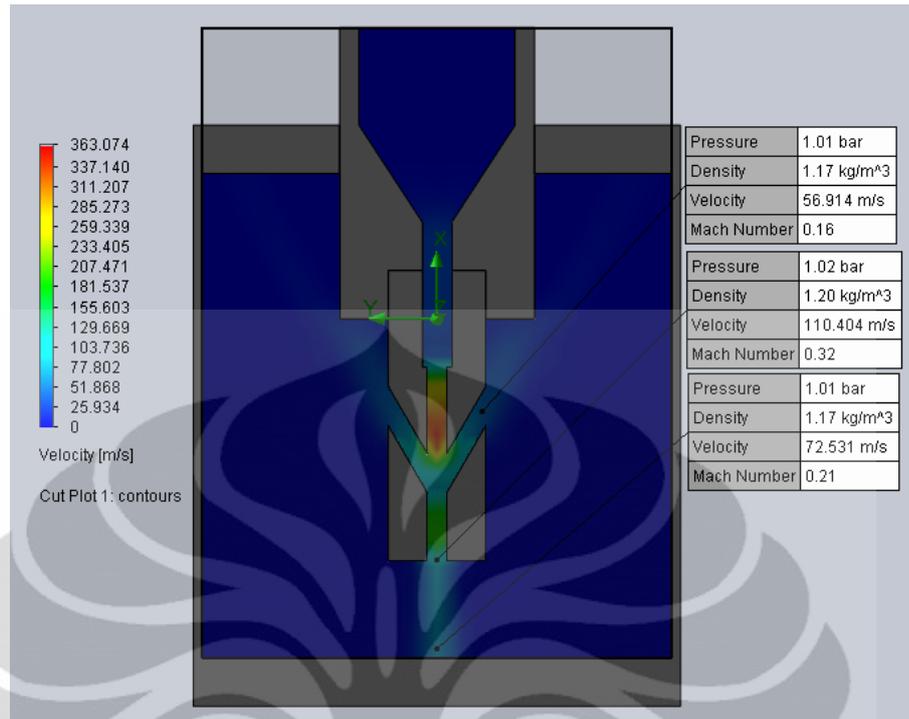
ekspansi dari efek *shockwave* dan kecenderungan fluida udara untuk mengalir ke segala arah.

Tabel 9. Data aliran fluida dalam nosel dengan sudut lubang baffle 150°

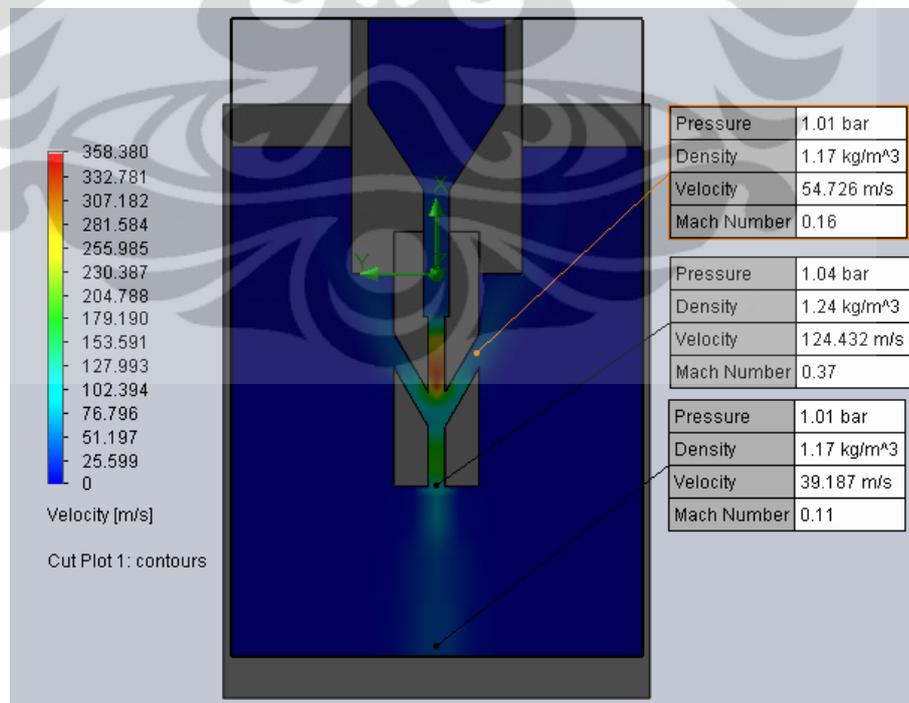
Parameter	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	Titik 6
Tekanan (bar)	6	5,86	4,89	1,33	0,92	1,01
Kerapatan (kg/m <sup>3</sup> )	6,89	6,78	5,97	2,05	1,77	1,18
Kecepatan (m/s)	2,638	61,98	182,49	395,796	501,446	87,298
Bilangan Mach	0	0,18	0,55	1,31	1,87	0,25



Gambar 4.14 Hasil pengujian simulasi komputasi untuk nosel dengan sudut lubang *baffle* 150°



Gambar 4.15 Hasil pengujian simulasi komputasi untuk nosel dengan sudut lubang *baffle* 150° pada jarak tembak 10 mm



Gambar 4.16 Hasil pengujian simulasi komputasi untuk nosel dengan sudut lubang *baffle* 150° pada jarak tembak 20 mm

### 4.3.5 Penentuan Gaya Impak berdasarkan Metode Simulasi Komputasi

Selain profil kecepatan dari aliran fluida yang terjadi di dalam dan di lingkungan saat nosel ditembakkan, pengujian secara simulasi komputasi juga memberikan perkiraan atas nilai dari beberapa parameter aliran yang berkaitan dengan penghitungan gaya impak. Berdasarkan persamaan (6), diketahui bahwa parameter aliran yang diperlukan untuk menghitung gaya impak fluida adalah  $p$  (tekanan total),  $A$  (luas area penampang aliran),  $\rho$  (densitas fluida), dan  $c$  (kecepatan aliran fluida). Berikut ini akan diberikan hasil langsung dari besar nilai gaya impak untuk tiap variasi nosel dan jarak tembak berdasarkan pengujian simulasi komputasi. Proses penghitungan secara detail akan dijelaskan di bagian lampiran.

Tabel 10. Nilai gaya impak berdasarkan pengujian simulasi komputasi

Variasi nosel	Besar gaya impak (N)
Standar – 0 mm	1,46
Standar – 10 mm	2,06
Standar – 20 mm	2,47
30° – 0 mm	1,47
30° – 10 mm	1,98
30° – 20 mm	2,02
90° – 0 mm	1,80
90° – 10 mm	1,3
90° – 20 mm	1,21
150° – 0 mm	1,22
150° – 10 mm	1,43
150° – 20 mm	1,53

#### 4.4. Perbandingan antara Besar Gaya Impak berdasarkan Metode Eksperimen dengan Metode Simulasi Komputasi

Kedua pendekatan yang digunakan dalam penelitian kali ini, yaitu pendekatan secara eksperimen dan simulasi komputasi, mampu memberikan besar nilai gaya impak untuk tiap variasi pengujian. Sampai karya tulis ini dibuat, belum ada publikasi yang dapat digunakan sebagai standar akan tingkat kesalahan dari hasil pengujian kali ini. Oleh karena itu, untuk mengetahui kisaran tingkat kesalahan yang terdapat di dalam pengujian kali ini, akan dilakukan konfirmasi dengan membandingkan besar nilai gaya impak antara metode eksperimen dengan metode simulasi komputasi.

Tabel 11. Perbandingan besar nilai gaya impak berdasarkan metode eksperimen dengan simulasi komputasi

Variasi nosel	Eksperimen (N)	Simulasi komputasi (N)	Besar error (%)
Standar – 0 mm	1,38	1,46	5,5
Standar – 10 mm	1,59	2,06	22,8
Standar – 20 mm	1,53	2,47	38
30° – 0 mm	1,40	1,47	4,7
30° – 10 mm	1,44	1,98	27,3
30° – 20 mm	1,46	2,02	27,8
90° – 0 mm	1,51	1,80	16,7
90° – 10 mm	0,99	1,3	23,8
90° – 20 mm	1,01	1,21	16,5
150° – 0 mm	0,78	1,22	36
150° – 10 mm	0,94	1,43	34,2
150° – 20 mm	0,95	1,53	37,9

Dari tabel 10, dapat dilihat besar error yang didapat dari perbandingan antara besar nilai gaya impak yang didapat langsung dari pengujian secara eksperimen dengan besar nilai gaya impak yang didapat dari parameter-parameter hasil pengujian simulasi komputasi. Besar error berkisar antara 4,7 % sampai dengan 38 %. Hal tersebut mengindikasikan bahwa hasil berupa besar nilai gaya impak yang didapat melalui eksperimen dengan simulasi komputasi belum dapat dianggap memiliki keterhubungan yang erat. Kesimpulan tersebut dapat diambil mengingat banyaknya asumsi-asumsi ideal yang digunakan pada pengujian secara simulasi komputasi. Kontrol volume yang terlibat di dalam simulasi komputasi hanyalah pada bagian adaptor nosel beserta noselnya saja, tidak mencakup komponen-komponen pneumatik lain yang jelas-jelas memberikan rugi tekanan dan kecepatan. Selain itu, fluida kerja berupa udara yang digunakan pada pengujian simulasi komputasi merupakan fluida ideal yang tentu tidak bisa didapat secara sempurna pada pengujian secara eksperimental. Proses pengerjaan adaptor nosel dan nosel-nosel yang terlibat di dalam pengujian tentu tidak dapat dianggap ideal dan sama persis dengan desain nosel yang diuji secara simulasi komputasi. Toleransi-toleransi yang ada kemudian mengubah beberapa dimensi yang ada dan tingkat kekasaran permukaan juga menjadi faktor penting yang menyebabkan adanya perbedaan hasil gaya impak antar kedua metode.

## BAB 5 PENUTUP

### 5. 1. Kesimpulan

Penelitian karakterisasi terhadap nosel melalui variasi sudut lubang *baffle* dan jarak tembak terhadap gaya impact untuk aplikasi *gene gun* telah dilakukan melalui pengujian eksperimen dan simulasi komputasi. Pengujian dilakukan terhadap nosel yang merupakan purwarupa nosel *gene gun* menggunakan *gene gun desk model* sebagai instrumen uji.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi sudut lubang keluar samping dan jarak tembak pada nosel memberikan besar gaya impact yang juga bervariasi. Melalui grafik hasil eksperimen dan metode statistik, dipastikan bahwa variabel-variabel ini memiliki pola yang memberikan informasi atas hubungan yang ada di antara variabel-variabel tersebut. Pola hubungan antara variasi sudut lubang keluar samping dengan gaya impact menunjukkan adanya suatu jarak tembak optimal untuk setiap sudut lubang keluar samping yang digunakan yang dapat digunakan untuk menghasilkan gaya impact dengan besar maksimum. Sedangkan pola hubungan antara variasi jarak tembak dengan gaya impact menunjukkan kecenderungan bahwa semakin besar sudut lubang keluar samping, maka semakin rendah nilai gaya impact yang dihasilkan. Walaupun begitu kepastian hubungan antara variabel-variabel tersebut untuk segala macam kondisi belum dapat ditentukan secara lebih jauh karena hubungan antara kedua parameter ini dipengaruhi oleh banyak faktor seperti kecepatan aliran yang kemudian akan menentukan apakah aliran bersifat subsonik atau supersonik. Adapun hasil gaya impact paling rendah dengan besar 0,78 N dihasilkan oleh kombinasi variasi nosel dengan sudut lubang keluar samping 150° dengan jarak tembak 0 mm.

Untuk membantu mempelajari pengaruh sudut lubang keluar samping dan jarak tembak, dilakukan pengujian secara simulasi menggunakan teknik CFD. Hasil dari simulasi memberikan studi awal yang dapat digunakan untuk mempelajari fenomena-fenomena yang mempengaruhi hasil pengujian eksperimental. Hasil simulasi menunjukkan bahwa aliran supersonik memberikan pengaruh yang cukup besar terhadap karakter aliran di dalam nosel.

## 5. 2. Saran

Beberapa hal yang dapat dilakukan sebagai studi lebih lanjut terhadap penelitian ini antara lain:

- a. Pengujian menggunakan sudut lubang keluar samping dan jarak tembak yang lebih bervariasi agar didapat hasil gaya impak yang lebih optimal sesuai dengan penggunaannya.
- b. Menggunakan instrumen pengukur gaya sentuh seperti piezoelektrik/ piezosensor sehingga didapat hasil gaya impak yang kontinu dan lebih representatif
- c. Mengukur data-data sekunder dalam penelitian ini menggunakan pengujian secara eksperimental sehingga didapat data yang lebih aktual. Salah satunya dengan menggunakan metode *high-speed camera* untuk menentukan kecepatan aliran pada lubang keluar utama nosel.
- d. Agar dapat lebih sesuai dengan kenyataan saat penggunaan nantinya, sumber tekanan sistem diganti menggunakan tabung helium bertekanan dan penembakan dilakukan dengan melibatkan mikropartikel yang dianggap representatif.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, John D. *Fundamentals of Aerodynamics*. 2001. Singapore: McGraw-Hill
- Anderson, John D. *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications*. 1995. Singapore: McGraw-Hill.
- Auewarakul P. dkk. *Antibody Responses after Dose-sparing Intradermal Influenza Vaccination*. 2007.
- Harinaldi. *Prinsip-prinsip Statistik untuk Teknik dan Sains*. 2005. Jakarta: Erlangga.
- Kamus Besar Bahasa Indonesia
- Kendall, Mark. *Engineering of Needle-free Physical Methods to Target Epidermal Cells for DNA Vaccination*. 2005.
- Kis, Elsa E. dkk. *Devices for Intradermal Vaccination*. 2011
- Kumar, K. L. *Engineering Fluid Mechanics*. 1976. New Delhi: Eurasia Publishing House.
- Levine, MM. *Can Needle-free Administration of Vaccines become the Norm in Global Immunization?*. 2003
- Liu, Yi. *Physical-Mathematical Modelling of Fluid and Particle Transportation for DNA Vaccination*. 2006
- Liu, Yi. *Utilization of the Venturi Effect to Introduce Micro-particles for Epidermal Vaccination*. 2006
- Liu, Yi dkk. *Swirling Effects on Performance of the Micro-particle Acceleration and Penetration: Parametric Studies*. 2007
- Mattson, John E. *An Introduction to Solidworks® Flow Simulation 2011*. 2011. New York: SDC.
- Medical Research Council. *Gene guns: How one researcher improved his shot*. 17 Januari 2007
- Mehier-Humbert, Sophie dan Richard H. Guy. *Physical Methods for Gene Transfer: Improving the Kinetic of Gene Delivery into Cells*. 2004.
- Mitchell, Thomas J. dkk. *A Ballistic Study of Micro-particle Penetration to the Oral Mucosa*. 2002

- Mitragotri, S. *Immunization without Needles*. 2005.
- Munson, Bruce R. dkk. *Mekanika Fluida, Edisi Keempat Jilid 1*. 2005. Jakarta: Erlangga.
- Munson, Bruce R. dkk. *Mekanika Fluida, Edisi Keempat Jilid 2*. 2005. Jakarta: Erlangga.
- Nakayama, Yasuki. *Introduction to Fluid Mechanics*. New York: John Wiley and Sons.
- O'Brien, John A. dkk. *Modifications to the Hand-held Gene Gun: Improvement for in-vitro Biolistic Transfection of Organotypic Neuronal Tissue*. 2001
- SolidWorks Flow Simulation 2011. Technical Reference
- Soliman, S.W. dan S. Abdallah. *CFD Investigation of Powdered Vaccine and Gas Dynamics in Biolistic Gun*. 2011
- Soliman, S.W. dkk. *Numerical Simulation of Microparticles Penetration and Gas Dynamic in an Axi-Symmetric Supersonic Nozzle for Genetic Vaccination*. 2011
- United States Patent*. US 6668699. Ronnie David Russell. *Porous Nozzle Projectile Barrel*. 30 Desember 2003.
- United States Patent Application Publication*. US 2004/0033589. John Anthony O'Brien. *Biolistic Device*. 19 Februari 2004.
- Versteeg, H. K. dan W. Malalasekera. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. 1995. England: Longman.
- WHO. *Safety of Injections: Global Facts and Figures*. Geneva. 2004.
- Yahya, S.M. *Fundamentals of Compressible Flow*. 1982. New York: John Wiley and Sons.

## LAMPIRAN

A. Tabel hasil data penelitian

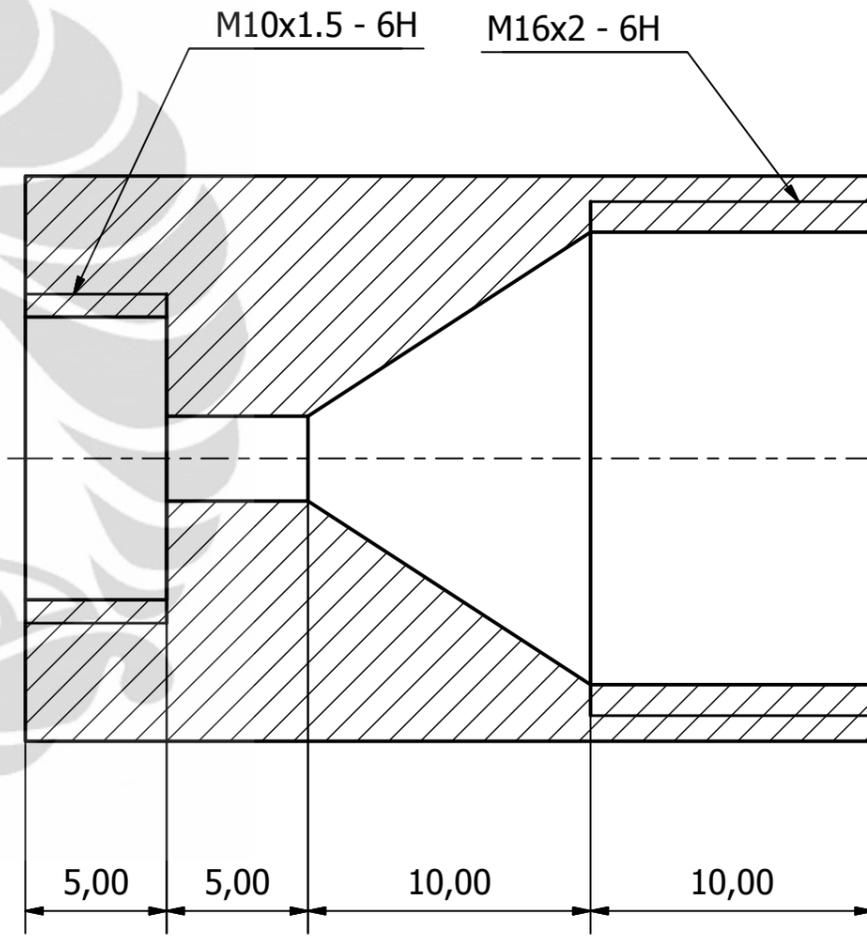
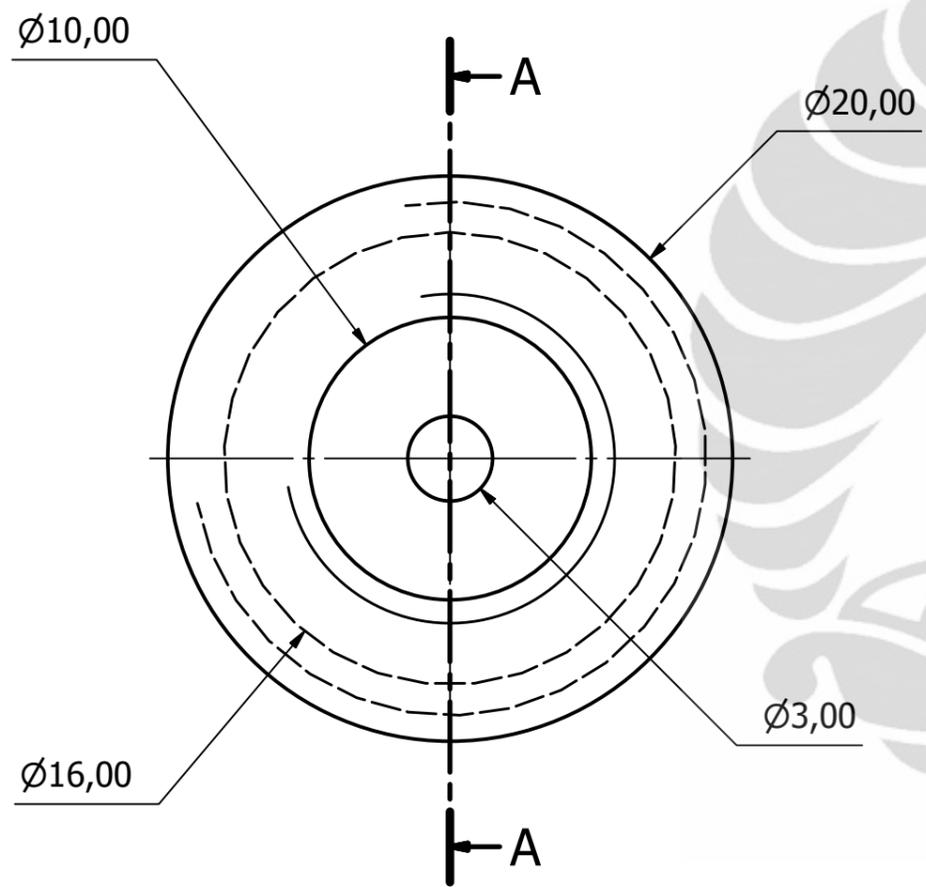
B. Gambar kerja alat uji



## A. Tabel Hasil Data Penelitian

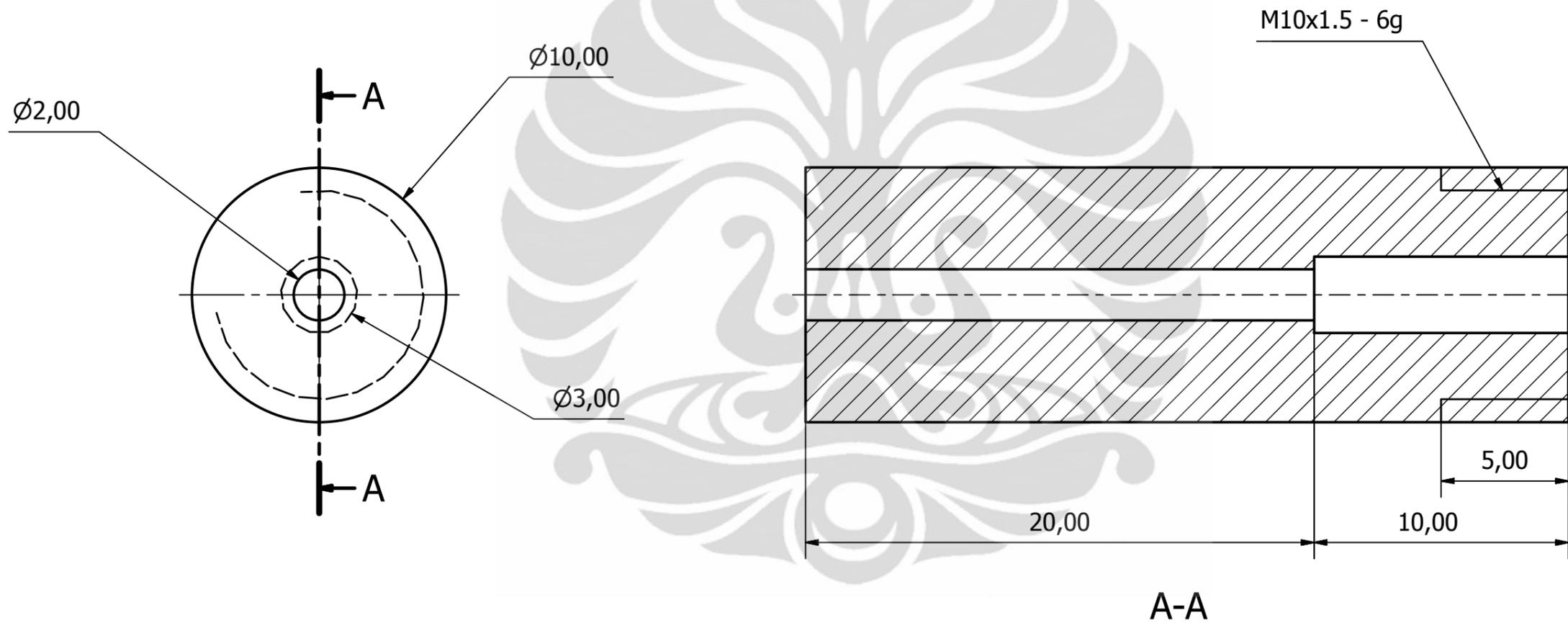
Trial	Massa impak (gram)					
	0°-0mm	0°-10mm	0°-20mm	30°-0mm	30°-10mm	30°-20mm
1	143,51	167,24	163,31	144,25	152,91	149,92
2	138,43	164,09	157,95	146,2	145,16	153,45
3	141,88	162,76	156,27	143,7	147,39	144,59
4	138,56	158,04	157,2	140	145,75	151,35
5	142,94	163,85	160,04	141,53	147,17	148,46
6	140,37	166,96	159,89	144,92	145,56	148,66
7	141,4	166	158	139,56	149,45	148,69
8	138,87	165,08	158,53	138,54	145,22	145,9
9	138,1	165,05	155,23	145,26	151,87	148,4
10	141,77	162,76	159,17	143,93	153,05	150,92
11	140,7	163,46	153,55	145,68	145,91	151,13
12	142,57	161,15	155,23	142,94	147,75	146,51
13	139,38	159,72	153,99	139,34	145,06	145,56
14	141,96	162,41	154,94	139,25	150,6	152,17
15	140,39	158,84	155,48	142,51	147,63	146,08
16	143,39	158,04	153,39	138,87	145,63	150,97
17	140,27	162,17	156,23	139,26	147,39	150,69
18	141,47	165,54	154,8	141,6	147,61	149,04
19	141,72	162,08	157,04	143,47	147,45	154,31
20	140,93	167,1	152,55	145,34	146	153,3
21	140,95	163,94	152,74	143,85	146,78	146,65
22	141,16	158,15	154,61	143,05	145,04	150,82
23	140,06	157,18	155,49	140,42	145,16	151,2
24	140,01	162,13	156,47	144,12	148,65	146,6
25	142,47	163,33	156,12	141,9	143,25	152,56
26	138,75	160,61	156,81	144,25	142,89	147,32
27	139,47	162,69	154,47	140,91	144,69	144,66
28	142,26	158,31	152,49	139,6	143,72	148,95
29	143,5	162,66	157,52	142,68	146	148,31
30	143,15	161,29	156,2	140,51	144,79	145,72

Trial	Massa impak (gram)					
	90°-0mm	90°-10mm	90°-20mm	150°-0mm	150°-10mm	150°-20mm
1	156,37	105,19	105,48	82,33	100,87	103,03
2	152,2	100,78	104,85	79,43	98,13	96
3	150,89	102,86	100,86	78,63	96,92	95,7
4	154,19	95,03	101,17	80,91	93,97	99,4
5	155,06	102,61	108,41	81,1	93,14	99,09
6	153,04	104,09	105,5	79,29	96,64	99,08
7	148,26	104,26	101,29	79,25	96,94	93,25
8	155,37	103,07	105,02	77,69	97,78	93,49
9	155,39	100,3	104,24	80,68	94,47	99
10	152,53	97,91	104,1	77,67	92,39	94,83
11	154,32	97,81	102,63	80,19	92,36	97,17
12	151,04	100,66	103,75	80,16	97,35	95,43
13	150,04	100,4	102,88	79,64	93,36	97,76
14	152,99	103,45	101,02	76,9	93,51	97,33
15	149,55	101,85	105,67	80,09	92,88	97,69
16	154,46	101,95	103,93	79,58	95,42	97,09
17	157,2	98,52	102,99	79,87	92,05	98,23
18	151,07	100,54	102,48	78,77	97,31	97,16
19	155,7	105,11	101,2	79,94	96,95	98,4
20	152,86	103,44	99,36	77,67	92,65	94,99
21	157,02	100,56	104,62	78,82	93,33	96,24
22	157,25	102,69	104,14	79,64	96,7	98,46
23	151,61	100,04	101,41	80,28	96,48	97,32
24	151,95	98,12	102,74	80,93	92,45	98,19
25	153,77	102,27	99,46	78,93	96,16	96,47
26	156,96	103,68	101,1	78,14	97,53	98,02
27	155,22	98,43	105,03	78,28	96,79	96,89
28	156,33	102,83	104,39	77,24	97,37	97,28
29	153,54	100,67	105,02	78,76	94,88	98,31
30	154,31	103,27	104,78	80,7	100,26	97,61

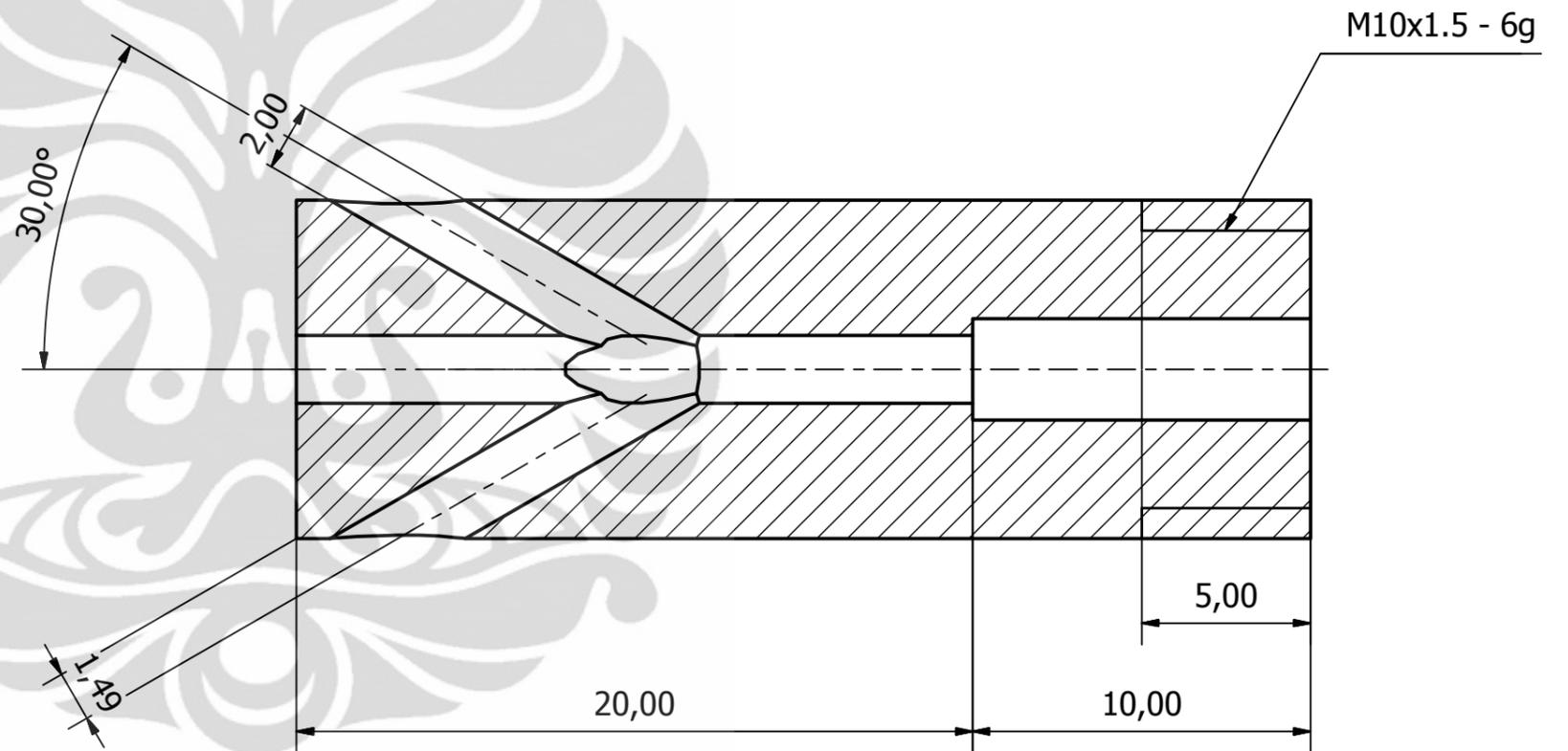
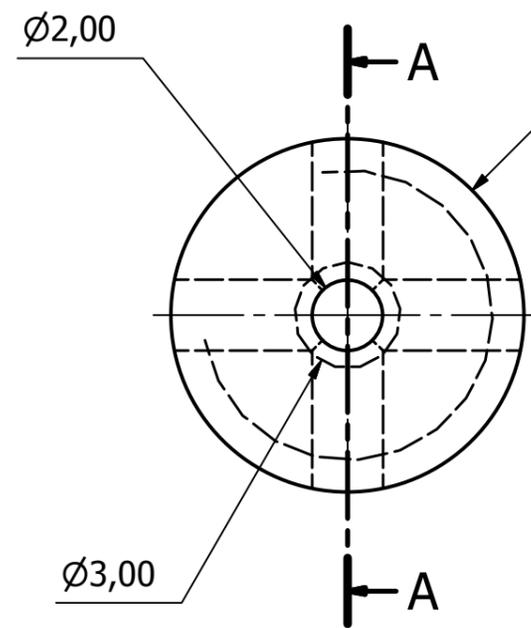


A-A

	SKALA : 4 : 1	NAMA : M. SATRIO UTOMO	PERINGATAN
	SATUAN : mm	NPM : 0806330283	
	TANGGAL : 22/5/2012	DIPERIKSA : DR. IR. DANARDONO A.S	
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN UNIVERSITAS INDONESIA		<b>NOZZLE ADAPTOR</b>	<b>1/5   A3</b>

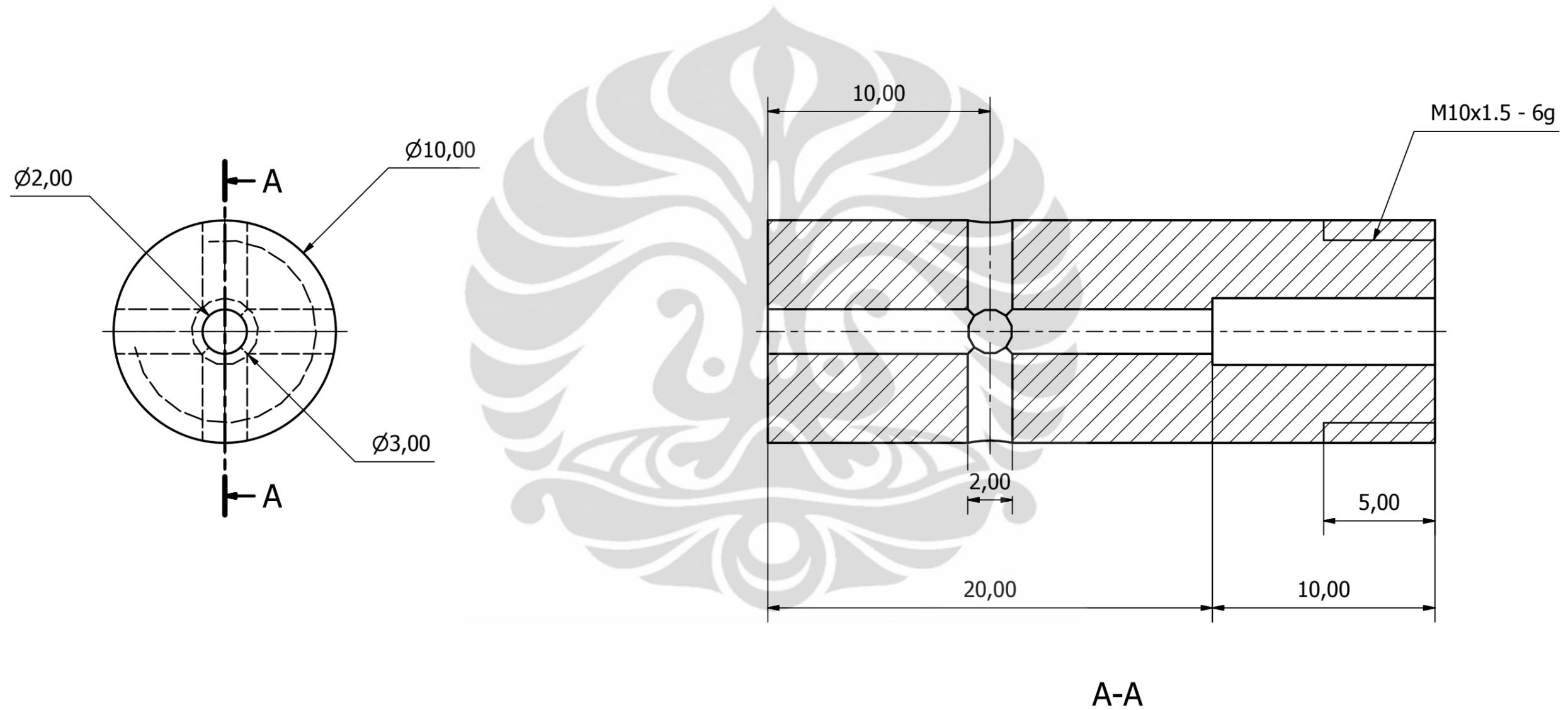


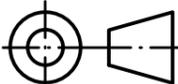
	SKALA : 5 : 1	NAMA : M. SATRIO UTOMO	PERINGATAN
	SATUAN : mm	NPM : 0806330283	
	TANGGAL : 22/5/2012	DIPERIKSA : DR. IR. DANARDONO A.S	
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN UNIVERSITAS INDONESIA		<b>NOZZLE 0DEG</b>	<b>2/5   A3</b>

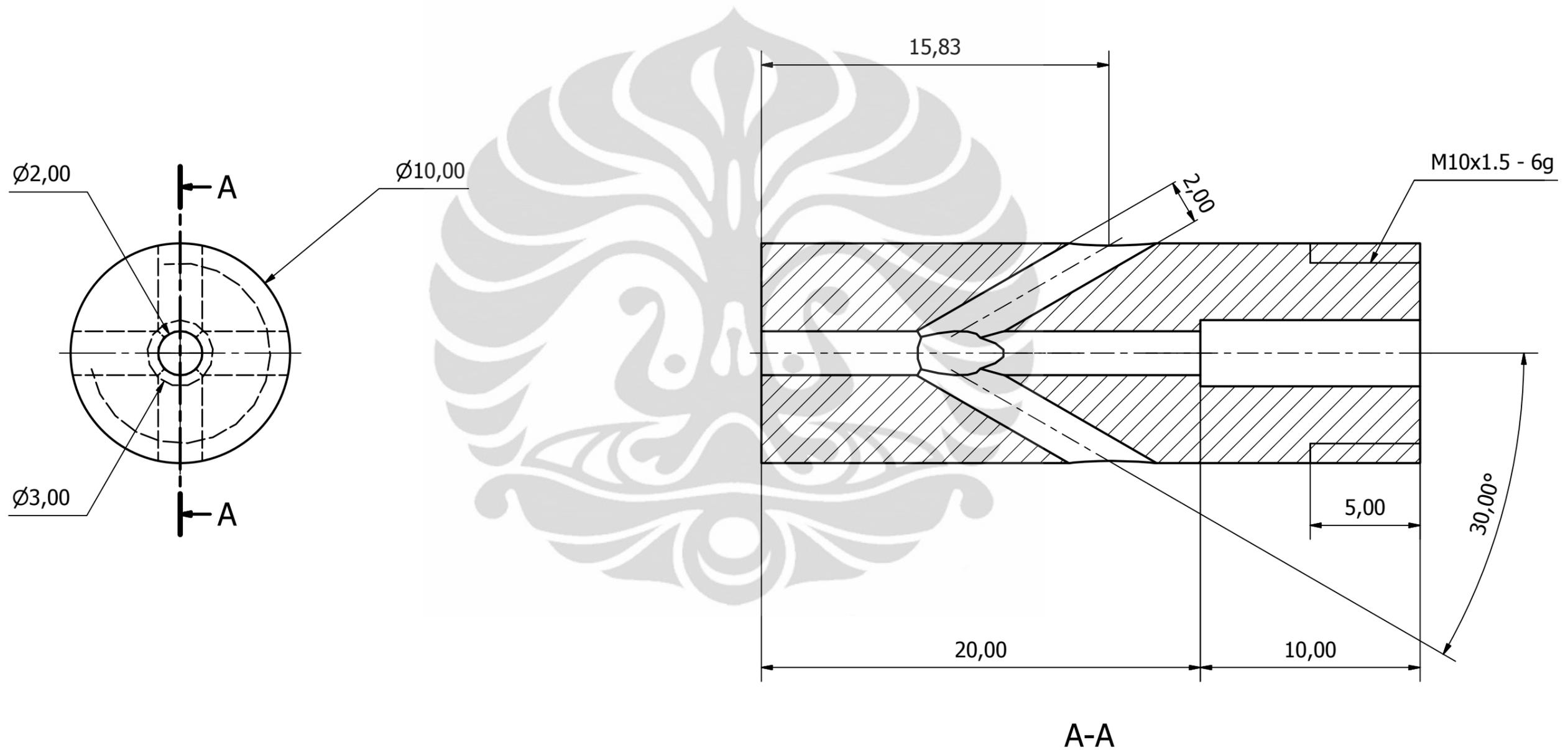


A-A

	SKALA : 5 : 1	NAMA : M. SATRIO UTOMO	PERINGATAN
	SATUAN : mm	NPM : 0806330283	
	TANGGAL : 22/5/2012	DIPERIKSA : DR. IR. DANARDONO A.S	
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN UNIVERSITAS INDONESIA	<b>NOZZLE 30DEG</b>		<b>3/5   A4</b>



	SKALA : 5 : 1	NAMA : M. SATRIO UTOMO	PERINGATAN
	SATUAN : mm	NPM : 0806330283	
	TANGGAL : 22/5/2012	DIPERIKSA : DR. IR. DANARDONO A.S	
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN UNIVERSITAS INDONESIA	<b>NOZZLE 90DEG</b>		<b>4/5   A4</b>



	SKALA : 5 : 1	NAMA : M. SATRIO UTOMO	PERINGATAN
	SATUAN : mm	NPM : 0806330283	
	TANGGAL : 22/5/2012	DIPERIKSA : DR. IR. DANARDONO A.S	
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN UNIVERSITAS INDONESIA	<b>NOZZLE 150DEG</b>		<b>5/5   A4</b>