



**ANALISA ALIRAN UAP PADA *SOOTBLOWER*
DENGAN VARIASI METODE PENEMPATAN
NOZZLE, JENIS *NOZZLE* DAN JARAK ANTAR
NOZZLE MENGGUNAKAN *SOFTWARE SOLIDWORK*
2016**

Skripsi

**Diajukan sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar
Sarjana Program Studi Teknik Mesin**

Oleh

Hafiz Reza Pratama

NIM.5212414062

**TEKNIK MESIN
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
2020**

HALAMAN PERSETUJUAN PEMBIMBING

JUDUL

**ANALISA ALIRAN UAP PADA *SOOTBLOWER* DENGAN
VARIASI METODE PENEMPATAN *NOZZLE*, JENIS
NOZZLE, DAN JARAK ANTAR *NOZZLE* MENGGUNAKAN
*SOFTWARE SOLIDWORK 2016***

Hafiz Reza Pratama
5212414062

Skripsi ini diajukan sebagai salah satu
persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik
Program Studi Teknik Mesin

Menyetujui untuk diajukan sidang panitia ujian skripsi

Pembimbing

Nama

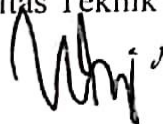
Tanda tangan

Tanggal


Dony Hidayat Al-Janan S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197706222006041001

Semarang, 8 November 2019

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Mesin SI
Fakultas Teknik Unnes



Samsudin Anis S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197601012003121002

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul Analisa Aliran Uap Pada *Sootblower* Dengan Variasi Metode Penempatan *Nozzle*, Jenis *Nozzle* dan Jarak Antar *Nozzle* Menggunakan *Software Solidwork 2016* telah dipertahan di depan Panitia Ujian Skripsi Fakultas Teknik UNNES pada tanggal:

Oleh

Nama : Hafiz Reza Pratama
NIM : 5212414062
Program Studi : Teknik Mesin S1

Panitia:

Ketua

Panitia Sekretaris



Rusiyanto, S.Pd., M.T.
NIP. 19740321199031002




Samsudin Anis, S.T., M.T., Ph.D.
NIP, 197601012003121002

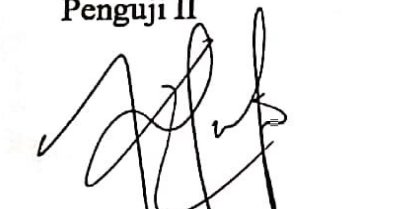
Penguji I

Penguji II

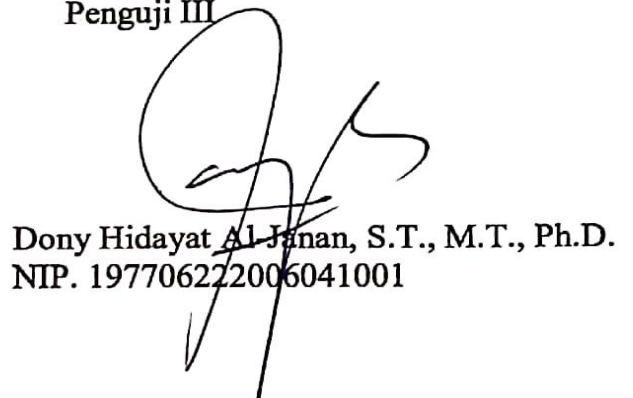
Penguji III



Widya Aryadi, S.T., M.Eng.
NIP. 197209101999031001



Kriswanto, S.pd, M.T.
NIP. 198609032015041001



Dony Hidayat Al-Janan, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197706222006041001

Mengetahui,



UNNES
Dr. Nur Qudus, M.T., IPM
NIP. 196911301994031001

PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Skripsi ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (sarjana, magister dan/atau doctor), baik di Universitas Negeri Semarang maupun di perguruan tinggi lain
2. Karya tulis ini adalah murni gagasan, rumusan dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan dari pihak lain kecuali arahan pembimbing dan masukan tim penguji
3. Karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain kecuali tertulis secara jelas dengan dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya ini, serta sanksi lainnya sesuai norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Semarang, 8 November 2019

Penulis,



Hafiz Reza Pratama
NIM. 5212414062

MOTTO

1. Jadilah orang yang bermartabat, jujur, dan penuh kebenaran (Umar bin Khattab)

ABSTRAK

Pratama, H. R. 2019. Analisa Aliran Uap Pada *Sootblower* Dengan Variasi Metode Penempatan *Nozzle*, Jenis *Nozzle*, dan Jarak Antar *Nozzle* Menggunakan Software Solidwork 2016.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa kecepatan alir uap dari variasi jenis *nozzle*, metode penempatan *nozzle*, jarak antar *nozzle* pada *sootblower* serta memahami fenomena aliran uap yang terjadi ketika *sootblower* beroperasi, dan menganalisa distribusi kecepatan uap antara baris *nozzle* atas dan bawah pada jarak 500 mm dari *outlet nozzle*.

Penelitian ini menggunakan metode simulasi, menggunakan *software solidwork* 2016 dengan kondisi ruangan simulasi sesuai dengan kondisi di lapangan yaitu pada ruangan *superheater* pada HRSG yang memiliki temperatur sebesar 465,5° C dan tekanan 1 bar. Sedangkan pada *sootblower* memiliki *inlet* temperatur 300° C dan laju aliran uap sebesar 1 kg/s. Jenis *nozzle* yang digunakan adalah tipe *full cone nozzle* dan *flat fan nozzle* yang berdasarkan rancangan dari salah satu perusahaan pembuat *nozzle* yaitu BETE.

Hasil simulasi yang didapatkan menunjukkan bahwa bentuk *nozzle* tipe *flat fan nozzle* memiliki semprotan yang lebih cepat dibandingkan dengan *full cone nozzle*. Dengan menggunakan sudut semprotan 120° pada *nozzle* dan variasi jarak antar *nozzle* yaitu 400, 500, dan 600 mm mengakibatkan pancaran uap antara baris *nozzle* mengalami pertemuan sebelum menyentuh pipa-pipa pemanas yang berada pada jarak 500 mm dari *outlet nozzle*. Pada setiap penyemprotan, bagian bawah ruangan lebih mendapatkan kecepatan semprotan uap yang lebih tinggi dibandingkan bagian atas ruangan.

Kata kunci: Analisa, Sootblower, Nozzle, Kecepatan.

PRAKATA

Segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul Analisa Aliran Uap Pada *Sootblower* Dengan Variasi Metode Penempatan *Nozzle*, Jenis *Nozzle*, dan Jarak Antar *Nozzle* Menggunakan *Software Solidwork* 2016 . Proposal skripsi ini disusun sebagai salah satu persyaratan meraih gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang.

Penyelesaian karya tulis ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, oleh karena itu pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih serta penghargaan kepada:

1. Prof. Dr. Fathur Rokhman, M.Hum, Rektor Universitas Negeri Semarang.
2. Dr. Nur Qudus, M.T, Dekan Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.
3. Rusiyanto, S.PD, M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang.
4. Samsudin Anis S.T., M.T.,Ph.D. selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin S1 Universitas Negeri Semarang.
5. Dony Hidayat Al-Janan S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang penuh perhatian serta memberikan bimbingan, memberikan motivasi hidup, memberikan ketenangan batin, dan memberi kemudahan menunjukkan sumber-sumber yang relevan dengan penulisan skripsi.
6. Widya Aryadi, S.T., M.Eng. dan Kriswanto, S.pd, M.T. selaku dosen penguji skripsi.
7. Keluarga yang selalu mendoakan serta memberikan dukungan maupun motivasi.
8. Teman-teman Program Studi Teknik Mesin angkatan 2014 yang telah memberikan semangat dan saran dalam pembuatan skripsi ini.
9. Semua pihak yang telah memberi bantuan untuk pembuatan skripsi ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa penulisan skripsi masih ini memiliki banyak kekurangan yang disebabkan keterbatasan kemampuan dan pengetahuan penulis. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran agar skripsi ini dapat disusun lebih baik.

Semarang, 8 November 2019

Penulis

DAFTAR ISI

SAMPUL.....	i
HALAMAN PERSETUJUAN PEMBIMBING	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN	iv
MOTTO	v
ABSTRAK	vi
PRAKATA	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR GRAFIK	xiv
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR SINGKATAN TEKNIS DAN LAMBANG	xvii
BAB I	
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Identifikasi Masalah	4
1.3 Pembatasan Masalah	4
1.4 Rumusan Masalah	5
1.5 Tujuan Penelitian	5
1.6 Manfaat Penelitian	6
BAB II	
KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI	7
2.1 Kajian Pustaka	7
2.2 Landasan Teori	8
2.2.1 <i>Sootblower</i>	8
2.2.2 HRSG	13
2.2.3 Fluida	14
2.2.4 Laju Aliran Massa	16

2.2.5 <i>Nozzle</i>	17
2.2.6 Uap Air	20
2.2.7 <i>Mach Number</i>	21
2.2.8 <i>Solidworks</i>	22
2.2.9 <i>Computational fluid dynamics</i>	23
BAB III	
METODE PENELITIAN	24
3.1 Waktu dan tempat penelitian	24
3.1.1 Waktu penelitian	24
3.1.2 Tempat penelitian	24
3.2 Desain Penelitian	24
3.3 Alat dan bahan penelitian	26
3.4 Parameter penelitian	29
3.5 Teknik pengumpulan data	29
3.6 Teknik analisis data	31
BAB IV	
HASIL DAB PEMBAHASAN	32
4.1 Hasil simulasi	32
4.1.1 <i>Flat Fan Nozzle</i>	32
4.1.2 <i>Full Cone Nozzle</i>	34
4.2 Pembahasan	37
4.2.1 Analisa variasi jenis dan metode penempatan <i>nozzle</i> terhadap kecepatan uap.....	37
4.2.2 Turbulensi pada aliran fluida didalam pipa <i>lancetube</i>	43
4.2.3 Analisa distribusi aliran kecepatan uap antara baris <i>nozzle</i> atas dan bawah pada jarak 500 mm dari outlet <i>nozzle</i>	46
4.2.4 Analisa kecepatan alir uap dari varisasi jarak antar <i>nozzle</i>	52
4.2.5 Analisis karakteristik uap di dalam dan di luar pipa lancetube ketika beroperasi	54
BAB V	
KESIMPULAN DAN SARAN	60

5.1 Kesimpulan	60
5.2 Saran	60
DAFTAR PUSTAKA	62
LAMPIRAN	65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kotoran pada permukaan pipa <i>heat exchanger</i>	9
Gambar 2.2 Skema pembersihan <i>sootblower motorised rotary</i> pada pipa <i>heat exchanger</i>	10
Gambar 2.3 Komponen <i>Motorised rotary sootblower</i>	11
Gambar 2.4 Proses penyemprotan uap melalui <i>nozzle</i>	13
Gambar 2.5 Diagram alir HRSG dengan 2 tekanan kerja	14
Gambar 2.6 HI-PIP <i>nozzle</i> dan <i>Fuly-Expanded nozzle</i>	18
Gambar 2.7 Grafik perbandingan <i>fully expanded-nozzle</i> dengan <i>under expanded-nozzle</i>	19
Gambar 2.8 <i>Schematic of sootblower jet</i>	20
Gambar 2.9 konvergen-divergen <i>nozzle</i> dan bagian <i>mach number</i>	22
Gambar 3.1 Diagram Alur Penelitian	25
Gambar 3.2 Laptop	26
Gambar 3.3 <i>Full cone nozzle</i>	27
Gambar 3.4 <i>Flat fan nozzle</i>	27
Gambar 3.4 Pipa <i>lancetube</i>	28
Gambar 3.5 Skema penomoran <i>nozzle</i> di dalam <i>lancetube</i>	28
Gambar 3.6 Laptop	38
Gambar 4.1 <i>Velocity</i> dengan <i>HI-PIP nozzle</i> (jarak antar <i>nozzle</i> 400 mm)	32
Gambar 4.2 <i>Velocity</i> dengan <i>HI-PIP nozzle</i> (jarak antar <i>nozzle</i> 500 mm)	33
Gambar 4.3 <i>Velocity</i> dengan <i>HI-PIP nozzle</i> (jarak antar <i>nozzle</i> 600 mm)	33
Gambar 4.4 <i>Velocity</i> dengan <i>fully expanded nozzle</i> (jarak antar <i>nozzle</i> 400 mm)	33
Gambar 4.5 <i>Velocity</i> dengan <i>fully expanded nozzle</i> (jarak antar <i>nozzle</i> 500 mm)	34
Gambar 4.6 <i>Velocity</i> dengan <i>Fully expanded Nozzle</i> (jarak antar <i>nozzle</i> 600 mm)	34
Gambar 4.7 <i>Velocity</i> dengan <i>HI-PIP nozzle</i> (jarak antar <i>nozzle</i> 400 mm)	35
Gambar 4.8 <i>Velocity</i> dengan <i>HI-PIP nozzle</i> (jarak antar <i>nozzle</i> 500 mm)	35
Gambar 4.9 <i>Velocity</i> dengan <i>HI-PIP nozzle</i> (jarak antar <i>nozzle</i> 600 mm)	35

Gambar 4.10 <i>Velocity</i> dengan <i>Fully expanded nozzle</i> (jarak antar nozzle 400 mm)	
.....	36
Gambar 4.11 <i>Velocity</i> dengan <i>Fully expanded nozzle</i> (jarak antar nozzle 500 mm)	
.....	36
Gambar 4.12 <i>Velocity</i> dengan <i>Fully expanded nozzle</i> (jarak antar nozzle 600 mm)	
.....	36

Daftar Grafik

Grafik 4.1 <i>Velocity</i> uap pada <i>inlet nozzle</i> menggunakan metode <i>fully expanded nozzle</i> (jarak antar nozzle 600 mm)	37
Grafik 4.2 Tekanan uap pada <i>inlet</i> dan <i>outlet nozzle</i> menggunakan metode <i>fully expanded nozzle</i> (jarak antar nozzle 600 mm).....	37
Grafik 4.3 <i>Velocity</i> uap pada <i>inlet nozzle</i> menggunakan metode <i>HI-PIP nozzle</i> (jarak antar nozzle 600 mm)	38
Grafik 4.4 Tekanan uap pada <i>inlet</i> dan <i>outlet nozzle</i> menggunakan metode <i>HI-PIP nozzle</i> (jarak antar nozzle 300 mm)	38
Grafik 4.5 <i>Flat fan nozzle</i> menggunakan <i>fully expanded nozzle</i> (jarak antar nozzle 600 mm)	41
Grafik 4.6 <i>Flat fan nozzle</i> menggunakan <i>HI-PIP nozzle</i> (jarak antar nozzle 600 mm)	42
Grafik 4.7 <i>Full cone nozzle</i> menggunakan <i>fully expanded nozzle</i> (jarak antar nozzle 600 mm)	42
Grafik 4.8 <i>Full cone nozzle</i> menggunakan <i>HI-PIP nozzle</i> (jarak antar nozzle 600 mm)	42
Grafik 4.9 <i>Flat fan nozzle</i> (Jarak antar nozzle 200 mm)	47
Grafik 4.10 <i>Full cone nozzle</i> (Jarak antar nozzle 200 mm)	47
Grafik 4.11 <i>Flat fan nozzle</i> (Jarak antar nozzle 500 mm)	47
Grafik 4.12 <i>Full cone nozzle</i> (Jarak antar nozzle 500 mm)	48
Grafik 4.13 <i>Flat fan nozzle</i> (Jarak antar nozzle 600 mm)	48
Grafik 4.14 <i>Full cone nozzle</i> (Jarak antar nozzle 600 mm)	48
Grafik 4.15 <i>Flat fan nozzle</i> (Jarak antar nozzle 400 mm)	49
Grafik 4.16 <i>Full cone nozzle</i> (Jarak antar nozzle 400 mm)	49
Grafik 4.17 <i>Flat fan nozzle</i> (Jarak antar nozzle 500 mm)	49
Grafik 4.18 <i>Full cone nozzle</i> (Jarak antar nozzle 500 mm)	50
Grafik 4.19 <i>Flat fan nozzle</i> (Jarak antar nozzle 600 mm)	50
Grafik 4.20 <i>Full cone nozzle</i> (Jarak antar nozzle 600 mm).....	50

Grafik 4.21 Hubungan antara densitas, *mass fraction of steam*, dan tekanan (pada *outlet flat fan nozzle (fully expanded)* dan jarak antar *nozzle* 600 mm)59

Daftar Tabel

Tabel 2.1 Spesifikasi <i>Motorised rotary sootblower</i>	11
Tabel 3.1 Data hasil simulasi pada inlet dan <i>outlet nozzle</i> (HI-PIP nozzle)	30
Tabel 3.2 Data hasil simulasi pada <i>inlet</i> dan <i>outlet nozzle</i> (<i>fully expanded nozzle</i>)	31
Tabel 4.1 Klasifikasi aliran fluida didalam <i>lancetube sootblower</i> dengan jarak antar nozzle 600 mm	40
Tabel 4.2 Klasifikasi aliran fluida pada outlet <i>nozzle</i> dengan jarak antar <i>nozzle</i> 600 mm	41
Tabel 4.3 Jarak antar <i>nozzle</i> 600 mm dengan <i>flat fan nozzle</i> (HI-PIP nozzle)	55
Tabel 4.4 Jarak antar <i>nozzle</i> 600 mm dengan <i>full cone nozzle</i> (HI-PIP nozzle)	56
Tabel 4.5 Jarak antar <i>nozzle</i> 600 mm dengan <i>flat fan nozzle</i> (<i>fully expanded nozzle</i>)	57
Tabel 4.6 Jarak antar <i>nozzle</i> 600 mm dengan <i>full cone nozzle</i> (<i>fully expanded nozzle</i>)	58

DAFTAR SINGKATAN TEKNIS DAN LAMBANG

Singkatan	Keterangan	Halaman pertama digunakan
PLTU	Pembangkit Listrik Tenaga Uap	1
HRSG	<i>Heat Recovery Steam Generator</i>	2
PLTG	Pembangkit Listrik Tenaga Gas	2
PLTGU	Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap	2
HI-PIP	<i>High Performance Peak Impact Pressure</i>	18
CFD	<i>Computational Fluid Dynamic</i>	23
AISI	<i>The American Iron and Steel Institute</i>	27

Lambang	Keterangan	Satuan	Halaman pertama digunakan
Re	Reynold number	-	16
ρ	Massa jenis fluida	kg/m ³	16
d	Diameter	m ²	16
μ	Viskositas	mPa.s	16
Pa	<i>Pascal</i>	-	16
p	Tekanan	Bar	16
A	Luas penampang	m ²	16
F	Gaya	Newton	16
dL	Jarak yang dilalui fluida	M	17

Δt	Perubahan waktu	S	17
v	<i>Velocity</i>	m/s	17
V	Volume	m ³	17
Q	Laju aliran volume	m ³ /s	17
\dot{m}	Laju aliran massa	kg/s	17
ρ_1	Tekanan awal	Bar	20
ρ_2	Tekanan akhir	Bar	20
v^1	Kecepatan awal	m/s	20
v^2	Kecepatan akhir	m/s	20
z1	Jarak awal	M	20
z2	Jarak akhir	M	20
G	Grafitasi	m/s ²	20
Ma	<i>Mach number</i>	-	22
T	Temperatur	°C	29

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) memiliki salah satu komponen utama yang sangat penting dalam sistem pembangkitan, yaitu *boiler*. *Boiler* berfungsi sebagai penghasil uap bertekanan yang nantinya akan menggerakkan sudu-sudu turbin uap sehingga akan menghasilkan listrik pada *Generator*. Namun pada *boiler* memiliki salah satu masalah yang mempengaruhi tingkat efisiensinya, masalah tersebut yaitu terdapatnya endapan pada permukaan tabung didalam *boiler* yang secara drastis dapat mengurangi efisiensi *transfer* panas yang ada. Endapan ini harus dihilangkan untuk menjaga efisiensi termal yang tinggi dan agar tidak mengganggu saat *boiler* sedang beroperasi, untuk itu maka endapan yang ada pada permukaan pipa akan dihilangkan dengan *sootblower* yang menyemburkan uap bertekanan (Jameel, et al., 1997:135)

Purnama, (2017:187), "*Sootblower* merupakan peralatan penunjang pada *boiler* yang berfungsi untuk membersihkan abu jelaga dan juga kerak yang menempel pada permukaan pipa-pipa *wall tube* (dinding dapur), *superheater*, *reheater*, *economizer*, dan *air heater* (Pemanas udara)". Proses perpindahan panas akan menjadi tidak efektif jika terdapat abu atau jelaga dan juga kerak yang terdapat pada pipa-pipa air yang berfungsi untuk mengubah air menjadi uap (pada *heat recovery area*). Misal pembakaran pada *boiler* menghasilkan panas sebesar 550° C, namun dikarenakan terdapatnya kerak atau abu atau jelaga yang cukup tebal pada pipa-pipa *heat recovery area* maka pertukaran panas yang seharusnya memiliki

suhu sekitar 550°C akan berkurang dan jika ingin mencapai pertukaran panas yang diinginkan maka akan membutuhkan waktu tambahan untuk memanaskan pipa-pipa tersebut dan artinya akan membutuhkan pembakaran tambahan yang akan memakan bahan bakar lebih lagi sehingga tentu akan mengurangi efisiensi dari *boiler*. Pendekatan yang biasanya dilakukan untuk mengendalikan akumulasi deposit yang ada pada *boiler* adalah dengan menggunakan *sootblower* yang dapat menghasilkan uap berkecepatan supersonik untuk menjatuhkan deposit dari tabung (*heat exchanger*), *sootblower* biasanya dioperasikan secara terus menerus (dalam satu siklus) untuk memastikan operasi yang andal dari *sootblower* yang mengakibatkan penggunaan uap yang berasal dari *boiler* sebesar (3% sampai 12%) (Pophali, et al., 2013:69)

Sootblower juga dapat digunakan untuk membersihkan jelaga yang terdapat pada HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*) yang terdapat pada PLTGU (Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap). HRSG mempunyai prinsip yang sama seperti *boiler*, namun pada HRSG tidak menggunakan pembakaran langsung untuk media pemanas pipa-pipa pemanasnya melainkan memanfaatkan panas dari sisa pembakaran dari PLTG (Pembangkit Listrik Tenaga Gas) dengan sistem terbuka yang dialirkan menuju HRSG kemudian uap panas yang dihasilkan akan dialirkan langsung menuju turbin uap pada PLTU. Sama seperti *boiler*, didalam HRSG juga terdapat ruangan-ruangan pemanas yang dibedakan berdasarkan tingkat temperatur dan uap yang dihasilkan.

Salah satu hal yang mempengaruhi dari maksimal atau tidaknya pembersihan yang dilakukan oleh *sootblower* ialah dari meratanya semprotan dan juga uap yang

dihasilkan pada saat *sootblower* beroperasi. Hal ini bergantung pada *nozzle* yang digunakan oleh *sootblower*, karena *nozzle* lah yang akan membentuk pola semprotan uap setelah uap di semprotkan. Untuk itu perlu memperhatikan pemilihan jenis *nozzle* yang akan digunakan serta peletakan *nozzle* pada pipa *lancetube*. Meskipun penggunaan uap sebagai media untuk membersihkan *boiler* tidak sepenuhnya digunakan pada *sootblower*, namun uap adalah media yang hampir digunakan oleh semua jenis *sootblower* untuk pembangkit listrik tenaga uap dengan bahan bakar batubara (Isreb, 1195:1043). Terjadi reaksi pada sesaat setelah *nozzle* menembakkan uap akan menimbulkan gelombang kejut (*shock wave*) yang mengakibatkan menghilangnya sebagian besar energi (Jameel, et al., 1997:142) yang ada di dalam *nozzle* yang menyebabkan hanya sebagian kecil energi awal yang dikirimkan untuk membersihkan jelaga pada pipa-pipa pemanas. Sedangkan parameter utama dari bersih atau tidaknya semprotan yang dilakukan oleh *sootblower* yaitu kecepatan uap (*velocity*) yang mampu bertahan dari mulai uap disemprotkan oleh *nozzle* hingga saat uap sampai pada pipa-pipa pemanas (Wojnar, 2013:478).

Ada beberapa jenis *sootblower* yang umum digunakan pada *boiler*, masing masing *sootblower* memiliki kelebihan dan kekurangannya masing masing. Namun pada penelitian ini yang akan di bahas adalah *sootblower* jenis *motorized rotary*, adapun kelebihan dari *sootblower* jenis ini adalah *lancetube* yang tetap berada didalam sistem *boiler* baik saat *boiler* sedang beroperasi ataupun saat *boiler* sedang berhenti beroperasi. *Sootblower* jenis ini juga memiliki kelebihan yaitu pada pipa penembak uap yang nantinya akan bergerak berputar 360° sepanjang waktu operasi

yang ditentukan yang bertujuan agar meratanya pembersihan pipa-pipa didalam *boiler*.

1.2. Identifikasi masalah

1. Perlu dilakukannya beberapa variasi pada *sootblower* tipe *motorized rotary* untuk mendapatkan hasil semprotan yang terbaik
2. Perlu dilakukannya simulasi aliran uap yang terjadi pada *sootblower* sebelum *sootblower* di operasikan di lapangan.
3. Tidak diketahui karakteristik uap yang di semprotkan oleh *nozzle* pada *sootblower*.
4. Munculnya gelombang kejut (*shock wave*) pada *nozzle* yang mempengaruhi penyampaian uap dari *sootblower* menuju pipa pemanas.

1.3. Pembatasan Masalah

Untuk lebih memfokuskan penelitian maka penulis perlu memberikan batasan masalah, batasan masalahnya antara lain sebagai berikut:

1. Analisa aliran yang akan dilakukan pada *lancetube sootblower* jenis *motorized rotary sootblower*.
2. Desain dan analisa aliran menggunakan *software Solidworks 2016*.
3. Model *nozzle* yang digunakan adalah *convergent nozzle*.
4. Kondisi ketinggian ruangan, tekanan dan temperature sesuai dengan kondisi dari Superheater pada HRSG dengan ketinggian ruangan adalah 1111 mm dengan temperatur sebesar 465,85 °C dan tekanan ruangan sebesar 1 Bar.

5. Jenis *nozzle* yang digunakan adalah tipe *full cone nozzle* dan *flat fan nozzle* yang berdasarkan rancangan dari salah satu perusahaan pembuat *nozzle* yaitu BETE.
6. Fluida yang digunakan untuk penelitian ini adalah uap bertemperatur 300° C dengan laju aliran massa sebesar 1 kg/s
7. Melakukan analisa melalui perbandingan pada dua jenis *nozzle* menggunakan metode *Fully expanded nozzle* dengan *HI-PIP nozzle (Under Expanded)* dengan melakukan variasi jarak antar *nozzle* sebesar 400, 500, dan 600 mm.

1.4. Rumusan Masalah

1. Bagaimana analisis kecepatan alir uap dari variasi jenis *nozzle* dan metode penempatan *nozzle* pada *sootblower* serta fenomena aliran uap apa yang terjadi ketika *sootblower* beroperasi ?
2. Apakah terdapat turbulensi aliran pada saat uap mengalir sepanjang pipa *lancetube* ?
3. Bagaimana analisis distribusi kecepatan uap antara baris *nozzle* atas dan bawah pada jarak 500 mm dari *outlet nozzle* ?
4. Bagaimana analisis kecepatan alir uap dari variasi jarak antar *nozzle* pada pipa *lancetube* ?
5. Bagaimana analisis karakteristik uap didalam dan diluar pipa *lancetube* pada saat *sootblower* beroperasi ?

1.5 Tujuan Penelitian

Penelitian bertujuan untuk menghasilkan :

1. Menganalisa kecepatan alir uap dari variasi jenis *nozzle* dan metode penempatan *nozzle* pada *sootblower* serta memahami fenomena aliran uap yang terjadi ketika *sootblower* beroperasi
2. Mengetahui aliran turbulen dan efek yang ditimbulkan
3. Menganalisa distribusi kecepatan uap antara baris *nozzle* atas dan bawah pada jarak 500 mm dari *outlet nozzle*
4. Menganalisa kecepatan alir uap dari variasi jarak antar *nozzle* pada pipa *lancetube*
5. Menganalisa karakteristik uap didalam dan diluar pipa *lancetube* ketika beroperasi

1.6 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberi manfaat, yaitu :

1. Dapat digunakan untuk referensi pada PLTU sebagai acuan dasar pembuatan *sootblower*.
2. Dapat menjadi wawasan bagi perindustrian tentang pentingnya *sootblower* pada *boiler*.
3. Menambah khasanah pengetahuan tentang fenomena aliran pada *nozzle* dan pertemuan aliran yang terjadi antar *nozzle* pada saat uap disemprotkan.
4. Hasil penelitian dapat digunakan untuk referensi penelitian sejenis atau yang lebih luas mengenai *sootblower* tipe *motorised rotary*.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Kajian Pustaka

Efisiensi dan efektivitas *sootblower* tergantung pada banyak faktor yang berkaitan dengan *sootblower* itu sendiri. Ini termasuk parameter uap seperti aliran massa, tekanan, suhu, kondisi uap, ukuran dan bahkan bentuk *nozzle* seperti jarak lubang antar *nozzle* dan jarak antara *nozzle* dengan endapan. Bentuk *lance tube* dan ketebalan endapan juga mempengaruhi efisiensi dari pembersihan endapan yang akan dilakukan. Menurut Jameel, et al., (1994:135) menyatakan bahwa, "belum ada perkiraan yang efektif untuk jarak pembersihan yang baik antara *sootblower* dengan endapan yang ada pada *boiler*".

Seringkali terjadi penimbunan endapan pada permukaan *heat exchanger* selama proses operasi (*boiler* ataupun HRSG), karena endapan yang menumpuk menyebabkan meningkatnya pengotoran maka efisiensi pada *heat exchanger* berkurang sehingga penting untuk mengetahui kondisi *heat exchanger* saat sedang beroperasi (Ogbonnaya dan Oyaji, 2017:1). Ada beberapa jenis mekanisme pengotoran yang dapat terjadi baik secara individu maupun secara bersamaan. Yang paling umum seperti yang dijelaskan oleh (Epstein, 1999 dalam Ogbonnaya, et al., 2017:1) adalah scaling atau presipitasi, partikulat atau sedimentasi, korosi, pengotoran secara kimiawi, pembekuan, dan pengotoran secara biologis.

Nozzle adalah alat yang digunakan untuk menentukan arah dan karakteristik aliran fluida saat keluar atau memasuki ruang tertutup pada sebuah pipa. *Nozzle* merupakan alat dimana energi dari cairan bertekanan tinggi diubah menjadi energi

kinetic dalam proses ekspansi (Vahaji, et al., 2015). Fungsi *nozzle* secara umum adalah untuk meningkatkan kecepatan aliran fluida yang diikuti dengan penurunan tekanan (Satrya, 2015 dalam Dyaksa, 2016:1). Geometri dari konvergen *nozzle* adalah berupa penyempitan ruang saja (pada *nozzle*) yang berbeda dengan konvergen-divergen *nozzle* dimana terjadi penyempitan dan pelebaran ruangan di dalam *nozzle*. *Nozzle* model konvergen akan menghasilkan kecepatan yang tinggi dan *mach number* yang tinggi sedangkan *nozzle* model konvergen-divergen akan menghasilkan kecepatan yang lebih rendah dari konvergen *nozzle* namun memiliki tekanan yang lebih tinggi (Zhu, et al., 2014 dalam Dyaksa, 2016:4)

Wojnar, (2013: 480) mengatakan bahwa kecepatan suatu partikel dipengaruhi atau tergantung pada gravitasi dan dipengaruhi oleh arah aliran (ke atas atau ke bawah) yang mengakibatkan terjadinya penambahan ataupun pengurangan kecepatan partikel yang akan menentukan nilai pengikisan (dalam hal ini pengikisan *fly ash*). Kecepatan (*velocity*) adalah hal yang paling utama yang mempengaruhi pengikisan (erosi). Dengan kecepatan uap 23,1 m/s *sootblower* dapat membersihkan *fly ash* pada pipa-pipa pemanas sebesar 0,3815 g/30 menit (Wojnar, 2013:481).

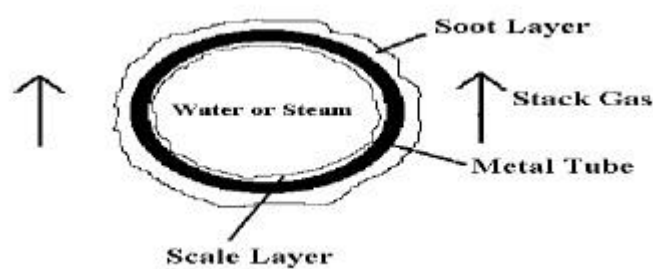
2.2 Landasan Teori

2.2.1 Sootblower

Secara umum, *sootblower* memiliki fungsi untuk membersihkan jelaga atau sisa pembakaran batu bara yang menempel pada *wall tube*, pipa *superheater*, pipa *reheater*, pipa *economizer*, serta *air heater*. Dengan bersihnya komponen tersebut

dari abu, debu, dan jelaga, maka perpindahan panas dari udara pada fluida kerja akan lebih optimum. Sehingga efisiensi perpindahan panas akan terjaga stabil.

Menurut Gowshikan, dkk (2014:18) untuk menjaga tingkat efisiensi *boiler* yang tinggi maka permukaan *heat exchanger* harus dibersihkan secara berkala dengan mengarahkan media pembersih seperti udara, uap, air, atau campurannya menuju tempat berkumpulnya kotoran. Untuk menghindari atau menghilangkan efek negatif dari jelaga maupun penumpukan kerak yang terjadi, maka permukaan pipa *heat exchanger* pada dasarnya harus bebas dari endapan setiap saat. Untuk menjaga tingkat kebersihan ini membutuhkan pembersihan secara terus menerus, namun hal ini dapat menyebabkan terjadinya keausan pada permukaan pipa *heat exchanger* bahkan dapat menyebabkan rusaknya permukaan pipa *heat exchanger* jika mereka terlalu dibersihkan. Oleh karena itu penting agar pembersihan tidak dilakukan secara berlebihan.

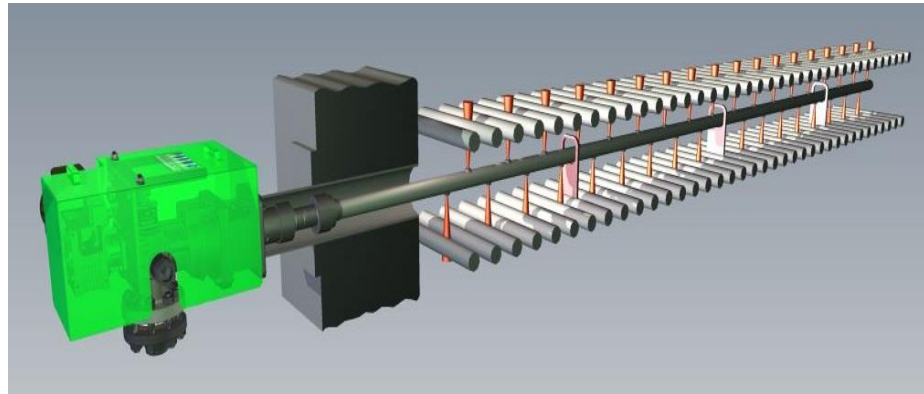


Gambar 2.1 Kotoran yang ada di dalam dan di luar permukaan pipa *heat exchanger* (Sumber: Vijay dan Kartikheyian, 2019:1711)

2.2.1.1 Sootblower Tipe Motorised Rotary

Motorised rotary sootblower dirancang untuk membersihkan permukaan pipa-pipa pada *boiler* dengan kondisi pipa *lancetube* tetap berada didalam ruang *heat exchanger* baik saat *boiler* ataupun HRSG sedang beroperasi maupun saat

sedang tidak beroperasi. Untuk itu diperlukan bahan yang sesuai pada *lance tube* dan *nozzle* agar nantinya tidak mengalami kegagalan pada saat terkena panas dan pengikisan yang disebabkan oleh abu batubara yang ada didalam *boiler*. Uap jenuh serta udara yang terkompresi, dapat digunakan sebagai media tiupan.



Gambar 2.2 Skema pembersihan *sootblower mortised rotary* pada pipa *heat exchanger* (Sumber: *parmodesarrollos, S.L.*)

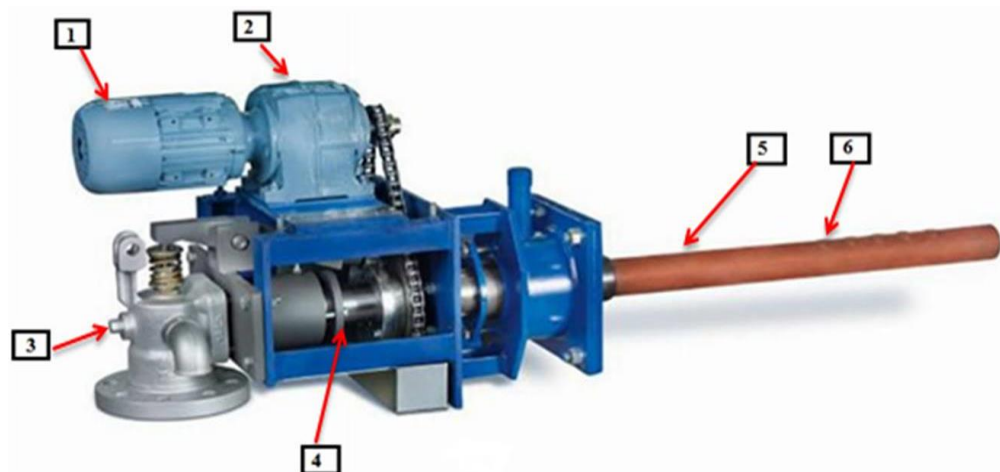
Beberapa keuntungan menggunakan *Motorised rotary sootblower* yaitu dapat dikonfigurasi untuk menghasilkan sudut tiup antara 30 hingga 360°, mencegah *fouling* dan penyumbatan di *economizer, evaporator, dan superheater* sehingga dapat meningkatkan efisiensi pada *boiler*.

Tabel 2.1. Spesifikasi *Motorised rotary sootblower*
(Sumber: www.trustwellindia.com)

<i>TYPE OF SOOT RETRACTABLE</i>	<i>ROTARY MOTORISE SOOTBLOWER</i>
<i>Location</i>	<i>Boiler Bank / Economiser</i>
<i>Type</i>	<i>Motorised</i>
<i>Gas Temperature °C</i>	<i>< 750</i>
<i>Length of lance Element mm</i>	<i>Normally 6000 in one piece construction</i>
<i>Effective Cleaning Radius mm</i>	<i>1800</i>
<i>Blowing Angle °</i>	<i>Adjustable up to 360</i>

Blowing medium	<i>Steam</i>
Pressure Kgf / cm² (Recommended)	<i>21 max</i>
Blowing Time Min	<i>3</i>
Rotary Speed RPM	<i>3</i>
Size of Steam Inlet Connection	<i>40 NB</i>
Motor Rating (HP)	<i>0.25</i>

2.2.1.2 Komponen Utama Sootblower Tipe Motorised Rotary



Gambar 2.3 Komponen *Motorised rotary sootblower* (Sumber: cbpg.com)

1. Motor Elektrik

Berfungsi untuk menggerakkan *gear* yang terhubung dengan *lance tube pipe sootblower* agar *lance tube* berputar saat proses *blowing*.

2. *Gear box*

Gear box ini berfungsi sebagai transmisi daya putaran dari motor elektrik ke *lance tube*. Didalam *gear box* terdapat *gear*, *pinion*, *bearings*, dan *cover gearbox*.

3. *Poppet Valve*

Poppet valve mempunyai dua fungsi utama yaitu:

- a. Membuka dan menutup pasokan uap ke *sootblower*
- b. Untuk menyesuaikan tekanan dari hembusan uap

Terdapat banyak jenis desain yang berbeda dari *poppet valve*, namun tetap saja dasar dari mekanismenya untuk membuka katup adalah sama.

4. *Feed Tube*

Feed tube mempunyai fungsi utama untuk mengirim atau menyalurkan uap menuju *lance tube*. Hal yang perlu diperhatikan pada saat instalasi *feed tube* ini adalah saat proses uap melewati *feed tube* menuju *lance tube* maka uap tersebut akan menekan celah antara *feed tube* dengan *lance tube* yang dapat menyebabkan *missalignment* yang akan menyebabkan *feed tube* menjadi bengkok

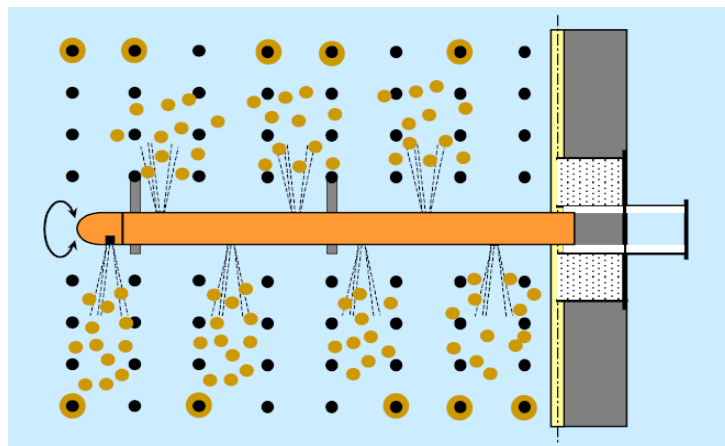
5. *Lance Tube*

Lance tube merupakan salah satu komponen paling penting pada *sootblower*, *lance tube* memiliki peran yang sangat vital yaitu sebagai penampang uap yang nantinya akan ditembakkan melalui *nozzle*. Hal yang perlu diperhatikan pada saat merancang *lance tube* yaitu *sootblower* harus mampu untuk menopang berat dari *lance tube* dan *lance tube* harus memiliki ketahanan panas yang tinggi karena akan diletakkan di dalam *boiler* dengan temperatur yang tinggi. Untuk *lance tube* yang akan ditempatkan didalam *boiler* baik saat *sootblower* bekerja ataupun sedang dalam keadaan sedang

off, hal itu tidak menjadi masalah dikarenakan uap yang ada di dalam *sootblower* juga dapat bertindak sebagai media pendingin

6. *Nozzle*

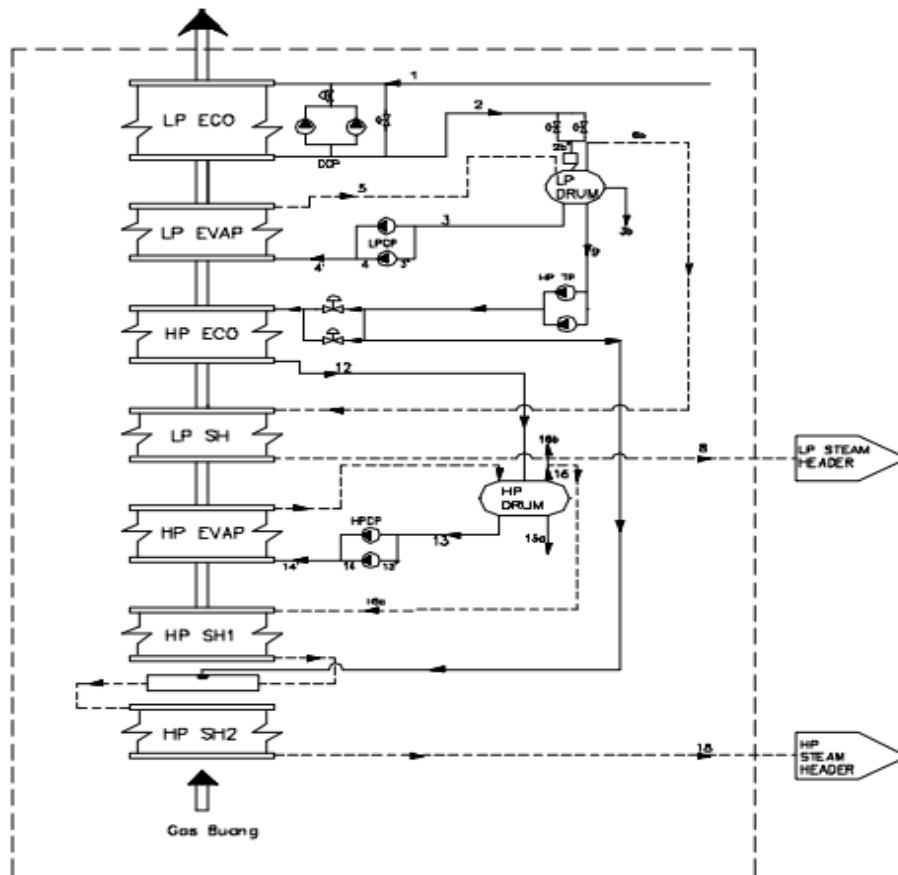
Nozzle mempunyai fungsi utama untuk mengubah uap bertekanan tinggi didalam *lancetube* menjadi uap berkecepatan yang sangat tinggi saat disemprotkan. Prinsip kerja dari *nozzle* sepenuhnya memperluas media tiupan dari tekanan didalam *lance tube* menuju luar sistem. Untuk lebih jelasnya dapat melihat Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Proses penyemprotan uap melalui *nozzle* (Sumber: cbpg.com)

2.2.2 *Heat Recovery Steam Generator (HRSG)*

HRSG ialah suatu alat yang digunakan untuk menghasilkan uap dengan memanfaatkan gas buang dari PLTG yang digunakan untuk memanaskan uap agar dapat digunakan untuk menggerakkan turbin uap. Hal ini dimaksudkan untuk mengoptimalkan pemanfaatan energi dengan cara meningkatkan efisiensi. HRSG menerapkan model siklus kombinasi yaitu menggabungkan siklus PLTG dengan siklus PLTU.



Gambar 2.5 Diagram alir HRSG dengan 2 tekanan kerja (Sumber: Yohanna dan Priambodo, 2012:8)

2.2.3 Fluida

Fluida adalah suatu zat yang dapat mengalir, secara umum fluida dibagi menjadi dua jenis yaitu fluida cair dan fluida gas. Perbedaannya yaitu jika fluida cair adalah suatu zat yang tidak mempertahankan bentuk yang tetap melainkan mengikuti bentuk wadahnya sedangkan fluida gas merupakan zat yang tidak mempunyai bentuk tetap, tetapi akan berkembang mengisi seluruh wadah yang ditempatinya.

(Al-Shemmeri, 2012:14) dalam bukunya yang berjudul *Engineering Fluid Mechanics* mengatakan bahwa fluida adalah sebuah zat yang jika diberikan sebuah

gaya maka akan mengalami perubahan bentuk. Contohnya seperti jika suatu fluida gas dimampatkan dengan tekanan yang cukup besar maka akan mengalami perubahan bentuk menjadi zat cair. Aliran fluida didalam pipa pada kenyataannya mengalami penurunan tekanan seiring dengan panjang pipa yang dilalui fluida tersebut. Menurut teori dalam mekanika fluida, hal ini disebabkan karena fluida yang mengalir memiliki viskositas. Viskositas ini menyebabkan timbulnya gaya geser yang sifatnya menghambat. Untuk melawan gaya geser tersebut diperlukan energi sehingga mengakibatkan adanya energi yang hilang pada aliran fluida. Energi yang hilang ini mengakibatkan penurunan tekanan aliran fluida atau disebut juga kerugian tekanan (*head losses*).

Aliran fluida terbagi atas beberapa kategori, dibagi berdasarkan sifat-sifat yang paling dominan dari aliran tersebut atau berdasarkan jenis dari fluida yang terkait. Berdasarkan pergerakannya aliran fluida terdiri dari :

1. Aliran laminar

Aliran laminar adalah aliran fluida yang bergerak dengan kondisi lapisan-lapisan yang membentuk garis-garis alir dan tidak berpotongan satu sama lain. Alirannya relatif mempunyai kecepatan rendah dan fluidanya bergerak sejajar.

2. Aliran turbulen

Aliran turbulen adalah aliran fluida yang partikel-partikelnya bergerak secara acak dan tidak stabil dengan kecepatan berfluktuasi yang saling berinteraksi. Akibat dari hal tersebut garis antara partikel fluidanya saling berpotongan.

Adapun cara yang digunakan untuk membedakan antara aliran laminar dan turbulen, adalah dengan menggunakan bilangan Reynold (*Reynold number*). Jika $Re < 2300$ maka aliran di kategorikan *laminar flow*, namun jika $Re > 4000$ maka aliran di kategorikan sebagai *turbulent flow*. Untuk mencari *Reynold number*, digunakan persamaan dibawah ini:

$$Re = \frac{\rho \times v \times d}{\mu / \rho} \dots\dots\dots(2.1)$$

2.2.3.1 Fluid Pressure

Fluid pressure atau tekanan yang terjadi pada fluida adalah suatu gaya yang diberikan oleh fluida baik itu fluida cair maupun gas per satuan luas penampang atau wadah yang sedang ditempati oleh fluida tersebut. Al-Shemmeri, (2012:20) tekanan fluida mengalir dengan intensitas yang sama ke semua arah dan stabil kesemua permukaan. Pada permukaan bidang yang berbentuk horizontal, instensitas tekanan dalam suatu fluida adalah sama.

Dalam sistem SI, satuan tekanan untuk fluida adalah Newton/m atau pascal dimana $1 \text{ N/m} = 1 \text{ Pa}$.

Untuk mencari besaran sebuah tekanan dapat menggunakan rumus sebagai berikut

$$(Al-Shemmeri, 2012:20) : P = \frac{F}{A} \dots\dots\dots(2.2)$$

Terdapat beberapa satuan tekanan lain yang biasa digunakan dan berikut konversi dari satuan atau unit tekanan yang biasa digunakan (Al-Shemmeri, 2012:20) :

2.2.4 Laju Aliran Massa

Laju aliran massa adalah banyaknya jumlah fluida (kg) yang dapat dipindahkan tiap satuan detik (s). Jika aliran fluida dalam suatu penampang stabil

dan tidak terdapat penumpukan atau penimbunan fluida didalam penampang tersebut, maka laju aliran fluida pada saat masuk harus sama dengan laju aliran fluida saat keluar untuk konversi *massa*. Dan saat fluida bergerak sepanjang suatu jarak (dL) dalam suatu waktu (Δt), akan diketahui laju aliran volumennya (V , m^3/s) yang didapatkan dari persamaan (Al-Shemmeri, 2012:50) : $v = (A \cdot dL) / \Delta t$ (2.3)

Tetapi karena $dL / \Delta t$ adalah kecepatan fluida (v , m/s) maka dapat ditulis persamaan seperti berikut (Al-Shemmeri, 2012:50) : $Q = v \cdot A$ (2.4)

Kemudian Laju aliran massa didapatkan dari hasil perkalian massa jenis fluida dengan laju aliran volume seperti persamaan dibawah ini (Al-Shemmeri, 2012:50):

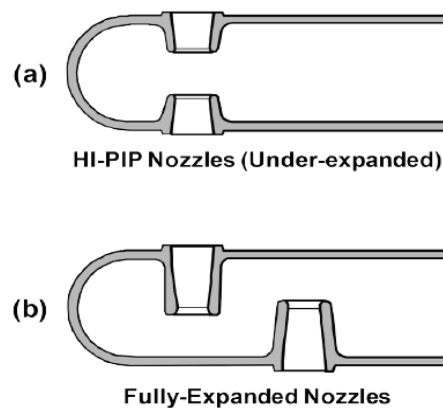
$$\dot{m} = \rho \cdot Q = \rho \cdot V \cdot A \text{(2.5)}$$

2.2.5 Nozzle

Nozzle merupakan sebuah alat atau perangkat yang dirancang untuk mengontrol arah atau karakteristik dari aliran fluida, terutama untuk meningkatkan kecepatan pada saat keluar atau pada saat memasuki sebuah ruang tertutup atau pipa. Sebuah *nozzle* sering berbentuk pipa atau tabung dari berbagai variasi luas penampang dan dapat digunakan untuk mengarahkan atau memodifikasi aliran fluida (cairan atau gas). *Nozzle* dan *diffuser* adalah sebuah alat yang digunakan untuk mengubah energi pada fluida yang dimaksudkan untuk mempercepat aliran fluida. Biasanya digunakan dalam mesin turbo dan jenis mesin lainnya, sedangkan dalam turbin uap *nozzle* digunakan untuk menghasilkan uap berkecepatan tinggi. Saat uap mengalir melalui *nozzle*, uap mengalami penurunan dari tekanan tinggi

menjadi tekanan rendah namun kecepatan uap dan volume spesifik uap mengalami peningkatan dengan baik (Kundu dan Lee, 2018:353).

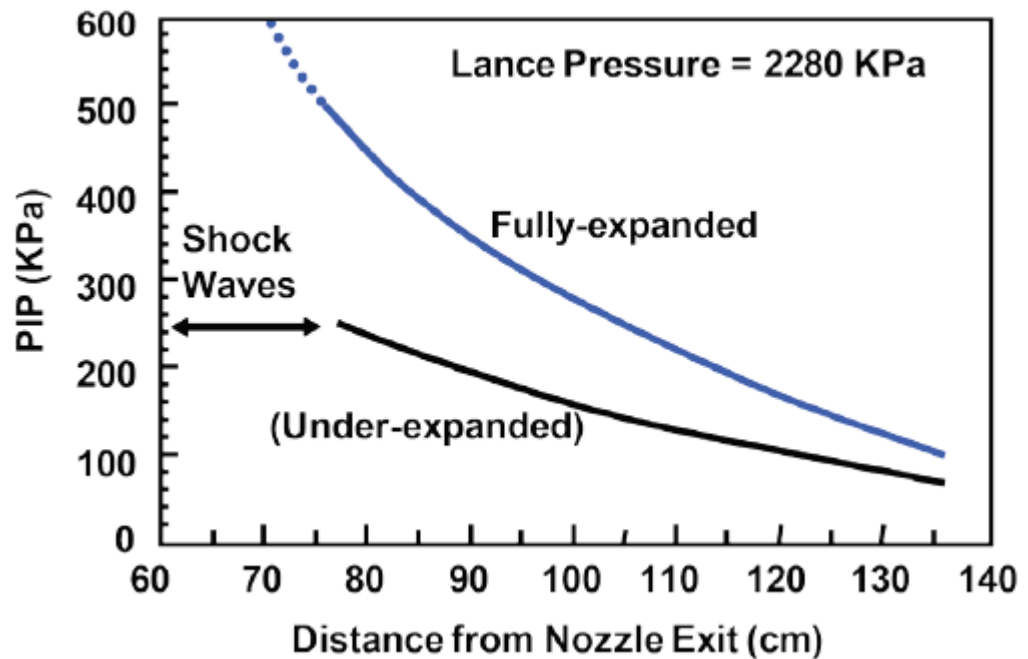
Nozzle sering digunakan untuk mengontrol laju aliran, kecepatan, arah, massa, bentuk, dan tekanan dari aliran yang muncul. Kecepatan fluida pada *nozzle* meningkat sesuai energi tekanannya, karena secara *thermodinamika nozzle* mempunyai sifat untuk menaikkan kecepatan aliran fluida secara drastis dengan mengorbankan tekanannya. Terdapat dua cara atau metode penempatan *nozzle* di dalam pipa *lancetube*, yaitu dengan cara HI-PIP (*high performance peak impact pressure*) *nozzle* (*under-Expanded*) dan juga *Fully-expanded nozzle*. Perbedaan dari keduanya dapat dilihat pada gambar di bawah in:



Gambar 2.6 HI-PIP *nozzle* dan *Fuly-Expanded nozzle* (Sumber: Tran dan Tandra, 2015:54)

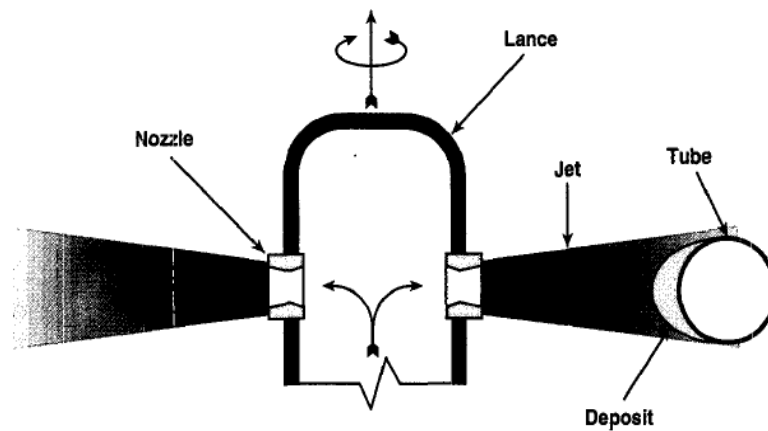
HI-PIP *nozzle* memiliki jarak yang berdekatan antara *nozzle* yang satu dengan yang lainnya, hal ini menyebabkan sebagian kecil dari energi yang tersedia di dalam pipa *lancetube* berkurang dan hanya sebagian kecil dari energi awal dikirim ke permukaan perpindahan panas untuk pembersihan. Hal ini dapat dilihat pada grafik

yang menggambarkan perbedaan antara HI-PIP *nozzle* dengan *Fully-Expanded nozzle* dibawah ini:



Gambar 2.7 Grafik perbandingan *fully expanded-nozzle* dengan *under expanded-nozzle* (Sumber: Tran dan Tandra, 2015:55)

Nozzle berdasarkan jenisnya dibagi menjadi 2 yaitu *nozzle* jenis *convergent*, dan *nozzle* jenis *divergent*. Adapun yang membedakan dari dua jenis *nozzle* tersebut yaitu terdapat dari desain aliran yang ada didalam *nozzle*, jika jenis *nozzle* konvergen mempersempit dari diameter lebar untuk diameter yang lebih kecil dalam arah aliran maka *nozzle* jenis divergen meluas dari diameter yang lebih kecil ke yang lebih besar. Sebuah *nozzle* de laval memiliki bagian *convergent* diikuti dengan bagian *divergent* dan sering disebut sebagai *nozzle* jenis *convergent-divergent*. Jika tekanan yang ada pada *nozzel* cukup tinggi, maka aliran akan mencapai kecepatan *sonic* pada titik tersempitnya yaitu pada tenggorokan *nozzle*.



Gambar 2.8 *Schematic of sootblower jet* (Sumber : Jameel, et al., 1994:136)

Pada gambar 2.8 menunjukkan aliran fluida yang masuk dan keluar dari *nozzle* menuju ke pipa pipa pada *heat exchanger*. Untuk aliran massa dan tekanan yang masuk dan keluar dari *nozzle*, maka berlaku persamaan Bernoulli seperti dibawah ini (Al-Shemmeri, 2012:54):

$$\frac{\rho_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{\rho_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \dots\dots\dots(2.6)$$

Atau menjadi :

$$\rho_1 - \rho_2 = \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} [1 - (v_1/v_2)^2] \dots\dots\dots(2.7)$$

2.2.6 Uap air

Uap air merupakan salah satu jenis fluida yang merupakan fase gas dari air, yang didapatkan bila mengalami pemanasan sampai temperatur didih dibawah tekanan tertentu. Uap air tidak berwarna, bahkan tidak terlihat bila dalam keadaan murni kering. Uap dibedakan atau diklasifikasikan menjadi tiga jenis menurut keadaanya yaitu:

1. Uap jenuh

Uap jenuh adalah kondisi uap di mana jumlah uap di udara sudah maksimal, dan tidak dapat lagi menampung uap. Pada kondisi jenuh, uap akan banyak mengembun, atau berubah fase menjadi cair

2. Uap kering

Uap kering merupakan keadaan dimana uap jenuh dipanaskan lagi dengan temperature yang tinggi, uap kering hampir tidak bisa didapatkan kecuali dengan menggunakan pemanas tambahan seperti *superheater* pada *boiler* maupun HRSG. Uap dikatakan benar benar kering jika memiliki kadar uap 100 %. Untuk mengetahui uap benar-benar kering atau tidak yaitu menggunakan *mass fraction of steam*, sebagai contoh jika *mass fraction of steam* berada diangka 95% atau 0,95 berarti didalam kandungan uap tersebut masih terdapat 5% air. Kekeringan uap sangat penting karena memiliki efek langsung pada jumlah total energi yang dapat ditransfer yang terkandung dalam uap.

3. Uap basah

Uap basah adalah campuran dari uap dan air, dimana pada uap tersebut terdapat lebih dari 5% kandungan air sehingga dapat dikatakan uap itu adalah uap basah. Uap basah memiliki energi panas yang lebih sedikit dibandingkan dengan uap kering.

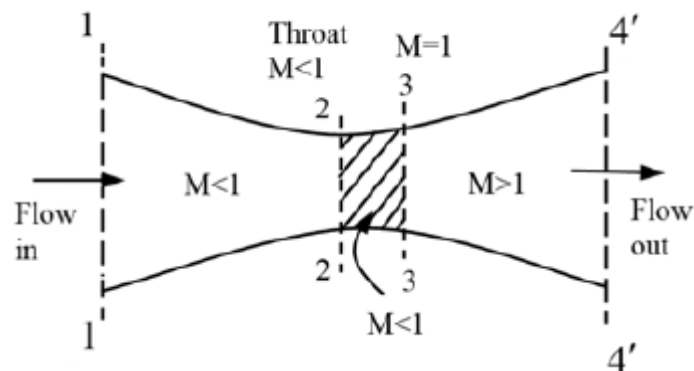
2.2.7 Mach Number

Bilangan *Mach* atau *Mach Number* adalah parameter utama dalam analisis *compressible flow*, dengan berbagai efek yang berbeda tergantung dari besarnya dari *Mach number* itu sendiri. Seorang ahli aerodinamik (*Aerodynamicists*)

membuat perbedaan antara rentang dari *mach number*, dan klasifikasi yang umum digunakan (White, 1991:610) yaitu seperti penjelasan dibawah ini :

- $Ma < 0.3$: *Incompressible flow*, efek densitas ditiadakan
- $0.3 < Ma < 0.8$: *Subsonic flow*
- $0.8 < Ma < 1.2$: *Transonic flow*, awal munculnya *shock wave*, membagi aliran menjadi *subsonic* dan *supersonic*
- $1.2 < Ma < 3.0$: *Supersonic flow*, timbulnya *shock wave* namun tidak ada daerah *subsonic*.
- $3.0 < Ma$: *Hypersonic flow*, terdapat *shock wave* dan aliran lain berubah sangat kuat.

Nilai-nilai yang tercantum diatas merupakan panduan secara garis besar. Kelima kategori dari aliran sesuai untuk *external high-speed aerodynamics*.



Gambar 2.9 Konvergen-divergen *nozzle* dan *mach number* dibagian yang berbeda (Sumber: Kundu, et al., 2018:355)

2.2.8 Solidworks

Dalam merancang sebuah benda, alangkah baiknya sebelum benda tersebut dibuat nyata, diprediksi terlebih dahulu kualitas atau performa dari benda tersebut.

Solidworks digunakan untuk mempreiksi kualitas atau performa dari benda yang telah dirancang sebelum dibuat secara nyata, maka dilakukanlah *analysis*. Desain *sootblower* yang telah tersedia akan dilakukan simulasi aliran uap sepanjang *sootblower* mulai dari *inlet* pipa *lancetube* hingga memasuki tiap tiap *nozzle* sampai uap disemprotkan oleh *nozzle* dan kemudian di analisa hasilnya menggunakan *Solidwork flow simulation 2016*.

SolidWorks Simulation membantu seorang *designer* dan *engineers* untuk selalu berinovasi, menguji dan mengembangkan produk baru dengan wawasan yang luas.

2.2.9 Computational fluid dynamic (CFD)

Computational fluid Dynamics (CFD) adalah penggunaan matematika terapan, fisika, dan perangkat lunak komputasi untuk memvisualisasikan bagaimana gas atau cairan mengalir, serta bagaimana gas atau cairan mempengaruhi suatu objek saat mengalir melewati objek tersebut. Dinamika fluida komputasi didasarkan pada persamaan *Navier-Stokes*. Persamaan-persamaan ini menggambarkan bagaimana kecepatan, tekanan, suhu, dan kepadatan fluida bergerak dengan saling berhubungan. Untuk melakukan pemodelan pada CFD, maka diperlukan informasi tentang ukuran, tujuan pemodelan, material bahan, dan variabel-variabel data awal untuk diinputkan sehingga hasil dari simulasi yang akan di lakukan sesuai dengan yang diharapkan.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

3.1.1 Waktu Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan pada bulan Januari sampai September tahun 2019.

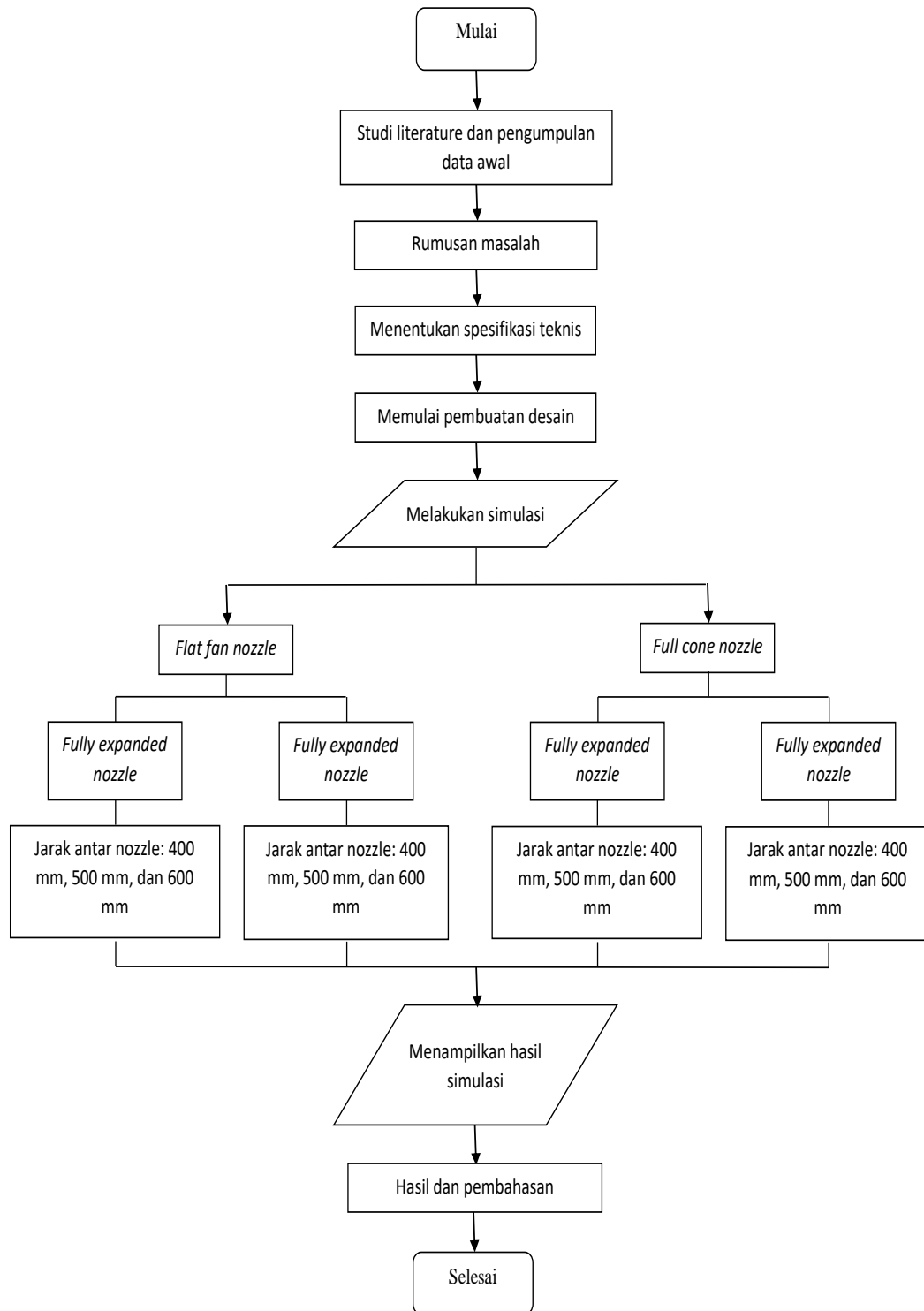
3.1.2 Tempat Penelitian

Ruang teknik mesin E5 301 menggunakan komputer dan laptop yang ada di ruangan untuk melakukan desain dan simulasi aliran.

3.2 Desain Penelitian

Metode penelitian adalah suatu cabang ilmu pengetahuan yang membicarakan atau mempersoalkan mengenai cara-cara melaksanakan penelitian (yaitu meliputi kegiatan-kegiatan mencari, mencatat, merumuskan, menganalisis sampai menyusun laporannya) (Priyono, 2016:2). Metode yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah metode simulasi. Penelitian simulasi merupakan bentuk penelitian yang bertujuan untuk mencari gambaran melalui sebuah sistem berskala kecil atau sederhana (model) dimana di dalam model tersebut akan dilakukan manipulasi atau kontrol untuk melihat pengaruhnya. Penelitian ini mirip dengan penelitian eksperimental, perbedaannya adalah di dalam penelitian ini membutuhkan lingkungan yang benar-benar serupa dengan keadaan atau sistem yang asli. Alur penelitian dimulai dari persiapan, tahap perancangan, pengambilan data dan di akhiri dengan penyusunan laporan skripsi. Desain penelitian yang

digunakan dalam penelitian ini adalah seperti diuraikan pada Gambar 3.1 di bawah ini.



Gambar 3.1 Diagram Alur Penelitian

Dengan pelaksanaan sesuai dengan desain penelitian yang telah dibuat maka akan mempermudah dalam pengambilan data serta menghindari adanya kesalahan-kesalahan.

3.3 Alat dan Bahan Penelitian

1. Alat

Alat yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah:

- a. Laptop, digunakan untuk mendesain *nozzle* dan pipa *lancetube*. Juga kemudian digunakan untuk melakukan simulasi aliran uap menggunakan *software solidworks 2016*..



Gambar 3.2 Laptop

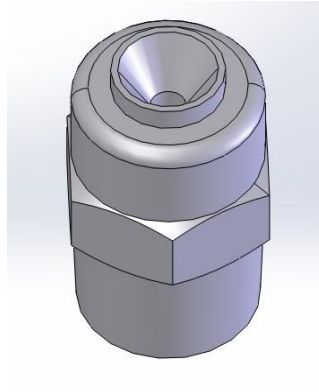
Spesifikasi laptop yang digunakan:

Merk	: Acer ryzen 3
Memory	: 8 Gb DDR4 2400 Mhz
Penyimpanan	: 1 Terabyte
OS	: Linux
Graphics	: Radeon Vega 3 Grapichs

2. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah berupa desain *nozzle* dan pipa lancetube seperti dibawah ini:

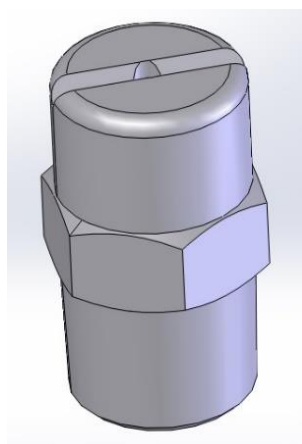
a. *Nozzle*



Gambar 3.3 *Full cone nozzle*

Spesifikasi *full cone nozzle* (www.bete.com):

Bahan	: S 303	Diameter leher <i>nozzle</i>	: 3,18 mm
Tinggi	: 31,75 mm	Ketebalan	: 7,48 mm
Diameter <i>inlet</i>	: 9,54 mm	Sudut semprotan	: 120°
Diameter <i>outlet</i>	: 10,16 mm		

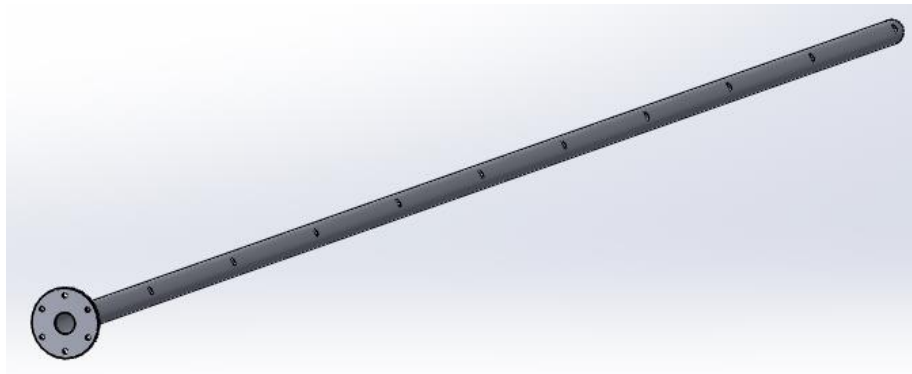


Gambar 3.4 *Flat fan nozzle*

Spesifikasi *flat fan nozzle* (www.bete.com):

Bahan	: S 303	Diameter leher <i>nozzle</i>	: 2,76 mm
Tinggi	: 31,75 mm	Ketebalan	: 4,28 mm
Diameter <i>inlet</i>	: 12,7 mm	Sudut semprotan	: 120°
Diameter <i>outlet</i>	: 2,76 mm		

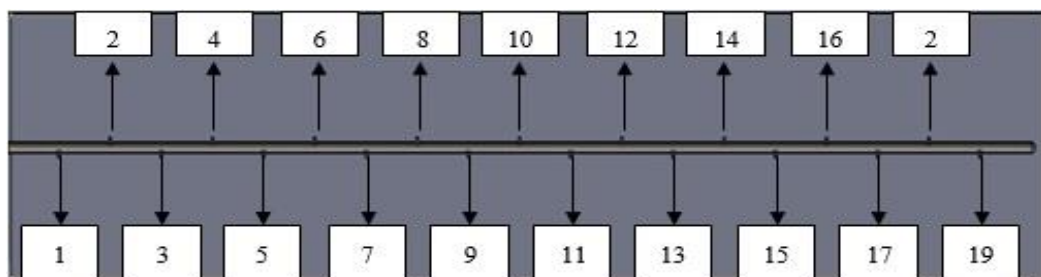
b. Pipa *Lancetube*



Gambar 3.5 Pipa *lancetube*

Spesifikasi pipa *lancetube*:

Bahan	: AISI 4130 <i>Steel</i>
Panjang pipa	: 6000 mm
Diameter <i>inlet</i>	: 40,86 mm
Ketebalan pipa	: 7,4 mm
Jarak antar lubang <i>nozzle</i>	: 400 mm, 500 mm, dan 600 mm
Metode penempatan <i>nozzle</i>	: HI-PIP <i>nozzle</i> dan <i>fully expanded</i>



Gambar 3.6 Skema penomoran *nozzle* di dalam *lancetube*

3.4 Parameter Penelitian

Menurut Gulo, (2010:42), suatu konsep disebut variabel jika terdapat variasi pada objek yang akan diteliti. Menurut Priyono, (2016:58), terdapat dua variabel dalam penelitian kuantitatif, yaitu:

a. Variabel bebas (*independent*)

Variabel bebas adalah variabel yang terjadi mendahului variabel terikatnya. Keberadaan variabel ini sebagai penjabar terjadinya fokus atau topik penelitian. Variabel bebas pada penelitian ini adalah jenis *nozzle*, metode penempatan *nozzle*, jarak antar *nozzle* (400 mm, 500 mm, dan 600), dan. Adapun spesifikasi ruangan yang digunakan pada penelitian ini adalah tinggi ruangan sebesar 1111 mm, temperatur sebesar 465,85 °C, dan tekanan ruangan sebesar 1 bar. Sedangkan kondisi uap yang digunakan memiliki temperatur (T) sebesar 300 °C dan laju aliran massa pada inlet *lancetube* sebesar 1 kg/s.

b. Variabel terikat (*dependent*)

Variabel terikat adalah variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas. Keberadaan variabel ini sebagai variabel yang dijelaskan dalam topik penelitian. Variabel terikat pada penelitian ini adalah perubahan *velocity* dan *mass fraction of steam* pada *sootblower* ketika sedang beroperasi.

3.5 Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data hasil simulasi disajikan dalam bentuk gambar, grafik, dan juga tabel. Berdasarkan parameter yang diteliti, berikut beberapa sajian data yang diperlukan pada simulasi ini.

a. HI-PIP *nozzle* (*under expanded*)

b. Fully expanded nozzle

Tabel 3.2 Data hasil simulasi pada *inlet* dan *outlet nozzle (fully expanded nozzle)*

Nomor nozzle	Jarak antar nozzle									
	Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
	<i>Inlet</i>	<i>Outlet</i>	<i>Inlet</i>	<i>Outlet</i>	<i>inlet</i>	<i>Outlet</i>	<i>Inlet</i>	<i>Outlet</i>	<i>inlet</i>	<i>Outlet</i>
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										

3.6 Teknik Analisis Data

Analisis data yang digunakan adalah teknik analisis data statistik deskriptif. Teknik ini merupakan penerapan metode statistik untuk menganalisa data kuantitatif secara deskriptif, gambar, maupun grafik. Hasil yang didapatkan dalam penelitian ini adalah kecepatan aliran uap (*velocity*), tekanan uap, temperatur, densitas, dan *mass fraction of steam*.

Tahap terakhir dalam proses analisis data adalah pembahasan, pembahasan merupakan pengungkapan masalah dari berbagai penyelesaian masalah yang telah ditetapkan sebelumnya. Pembahasan berisi pemberian jawaban terhadap masalah yang mengarah kepada kesimpulan terhadap hipotesa yang disajikan.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

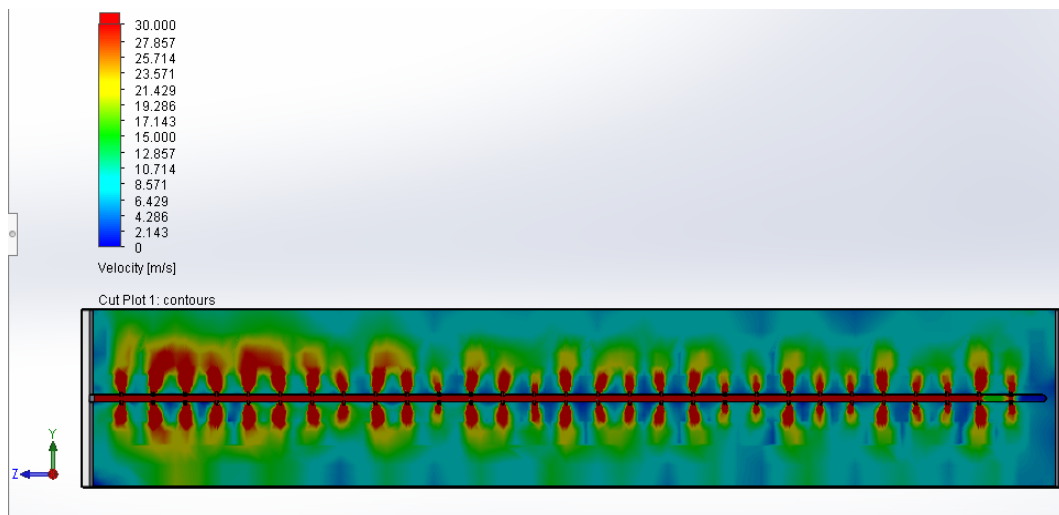
4.1 Hasil Simulasi

Dengan memberikan perlakuan yang sama pada *sootblower* dengan tiga jenis *nozzle* yang berbeda dan memberikan laju aliran massa pada inlet pipa *lancetube* sebesar 1 kg/s didapatkan data hasil simulasi yang akan ditampilkan dengan kontur gambar, grafik, dan tabel.

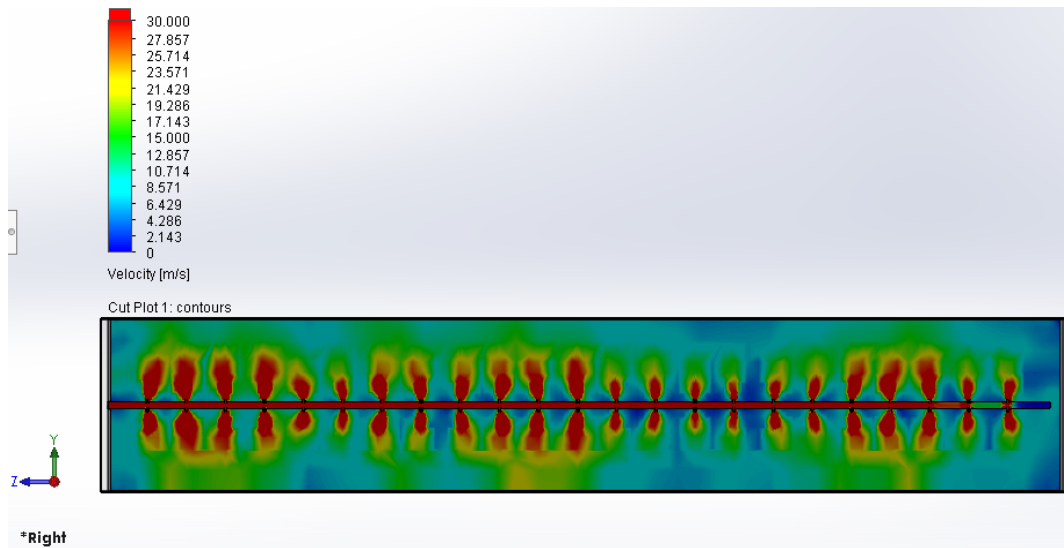
4.1.1 Flat fan nozzle

Berikut adalah data yang berupa kontur-kontur warna yang menampilkan hasil simulasi berupa kecepatan (*velocity*) aliran uap pada *sootblower* dengan variasi jarak 400 mm, 500 mm, dan 600 mm pada *nozzle* jenis *flat fan nozzle*.

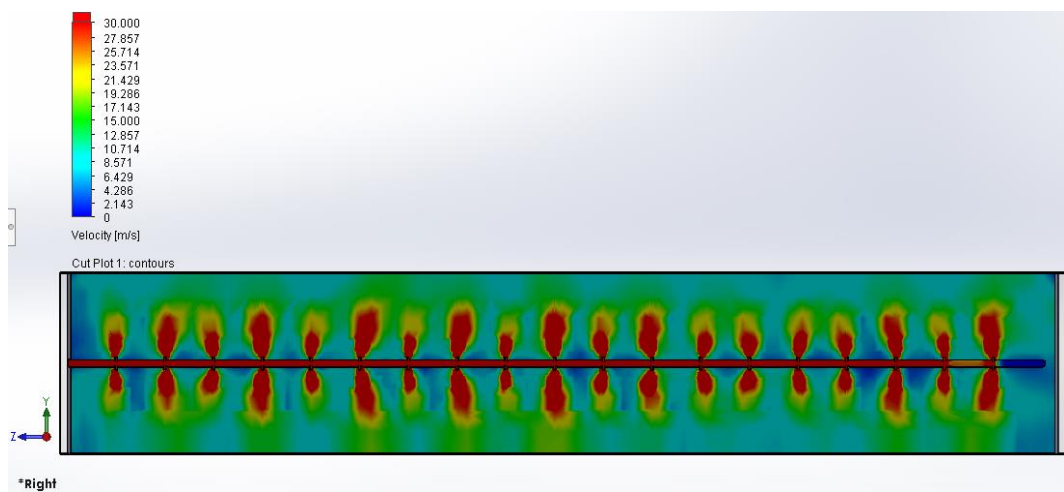
1. HI-PIP nozzle (Under Expanded nozzle)



Gambar 4.1 Velocity dengan HI-PIP nozzle (jarak antar nozzle 400 mm)

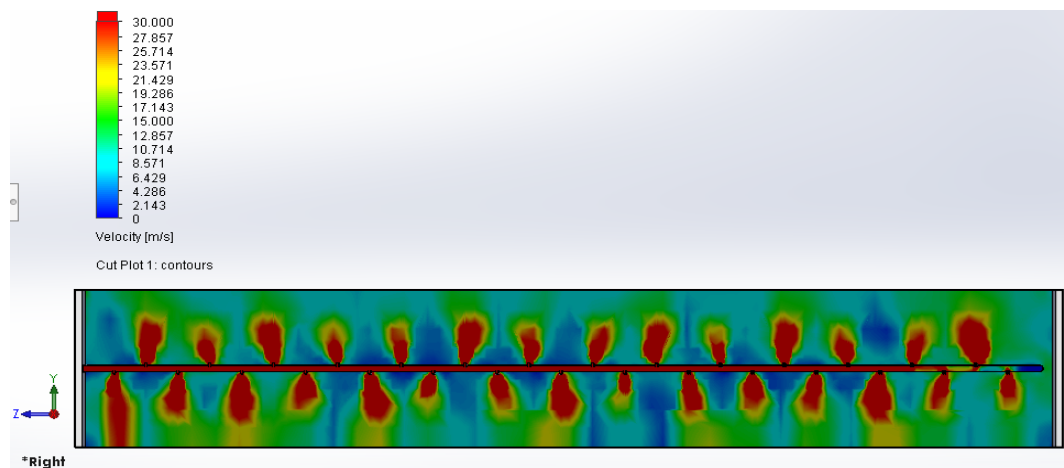


Gambar 4.2 Velocity dengan HI-PIP nozzle (jarak antar nozzle 500 mm)

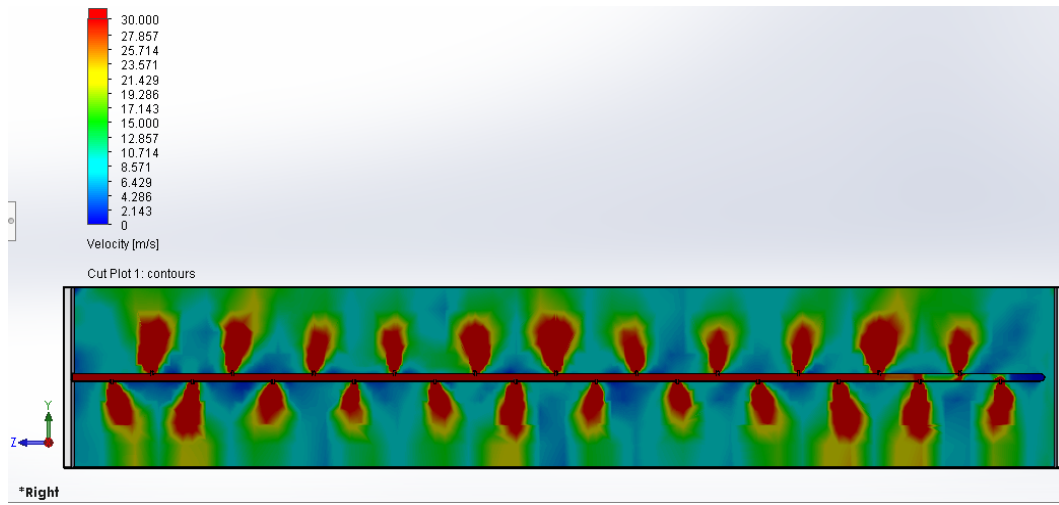


Gambar 4.3 Velocity dengan HI-PIP nozzle (jarak antar nozzle 600 mm)

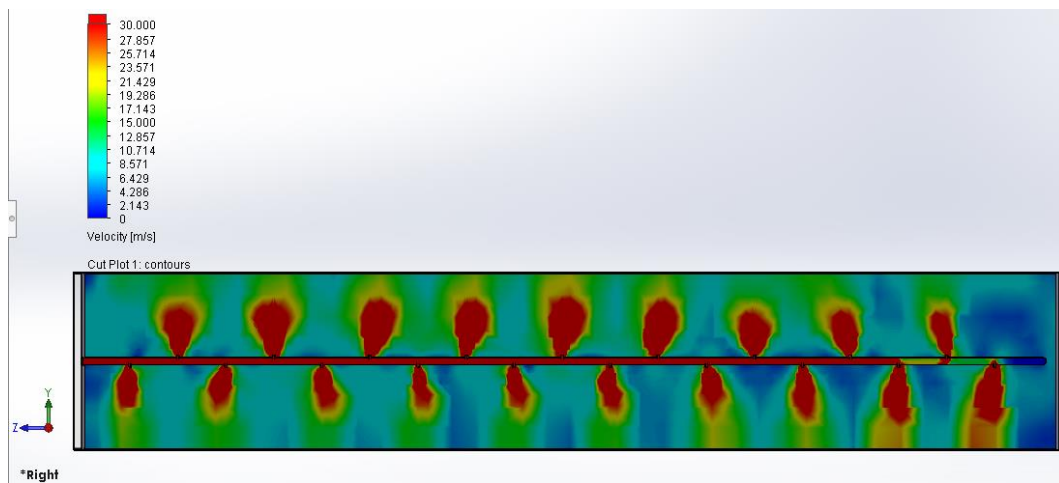
2. Fully expanded Nozzle



Gambar 4.4 Velocity dengan Fully expanded Nozzle (jarak antar nozzle 400 mm)



Gambar 4.5 Velocity dengan Fully expanded Nozzle (jarak antar nozzle 500 mm)

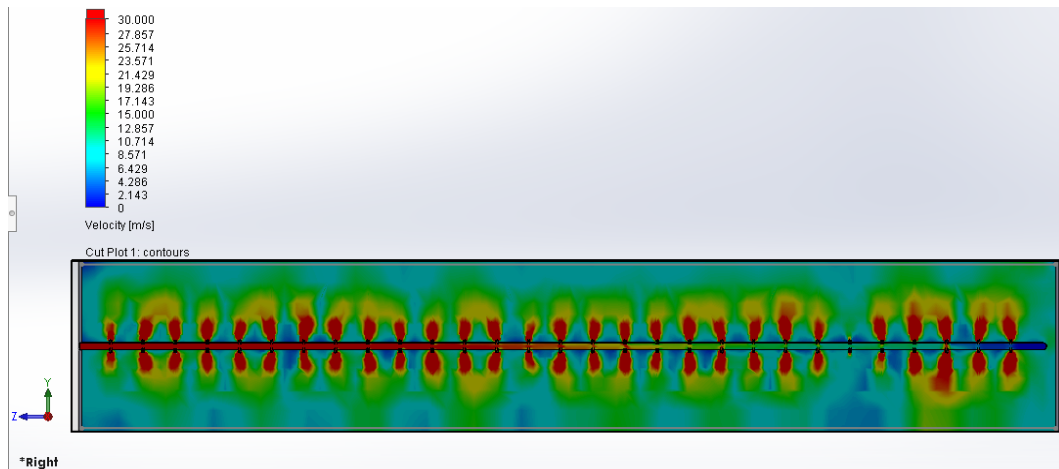


Gambar 4.6 Velocity dengan Fully expanded Nozzle (jarak antar nozzle 600 mm)

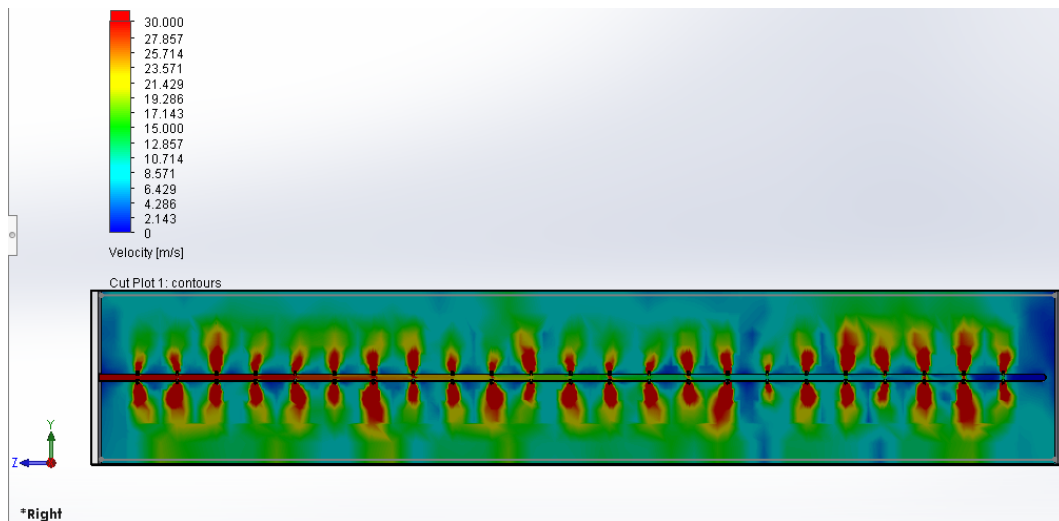
4.1.2 Full cone nozzle

Berikut adalah data yang berupa kontur-kontur warna yang menampilkan hasil simulasi berupa kecepatan aliran uap (*velocity*) pada *sootblower* dengan variasi jarak 400 mm, 500 mm, dan 600 mm pada *nozzle* jenis *full cone nozzle*.

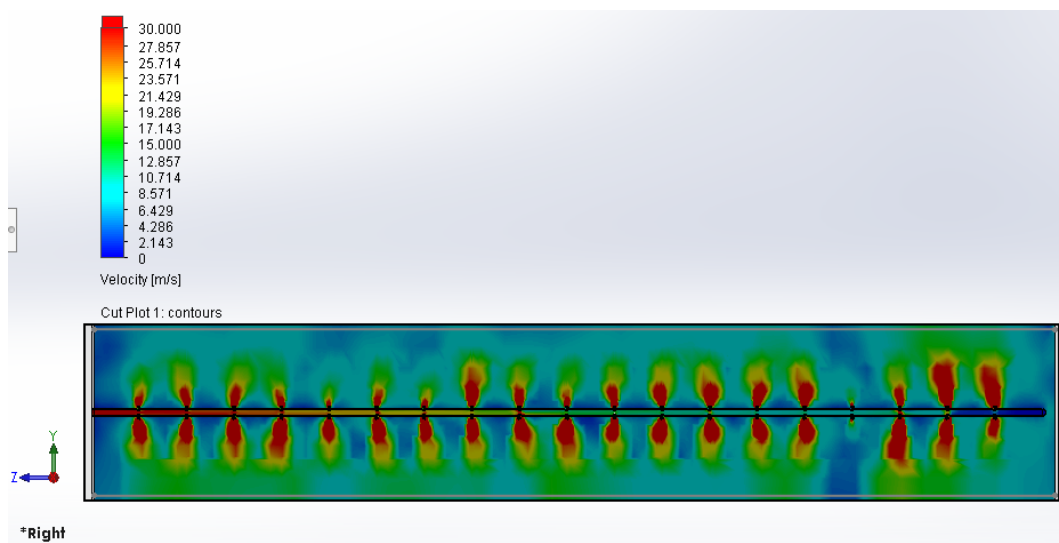
1. HI-PIP nozzle (Under Expanded)



Gambar 4.7 Velocity dengan HI-PIP nozzle (jarak antar nozzle 400 mm)

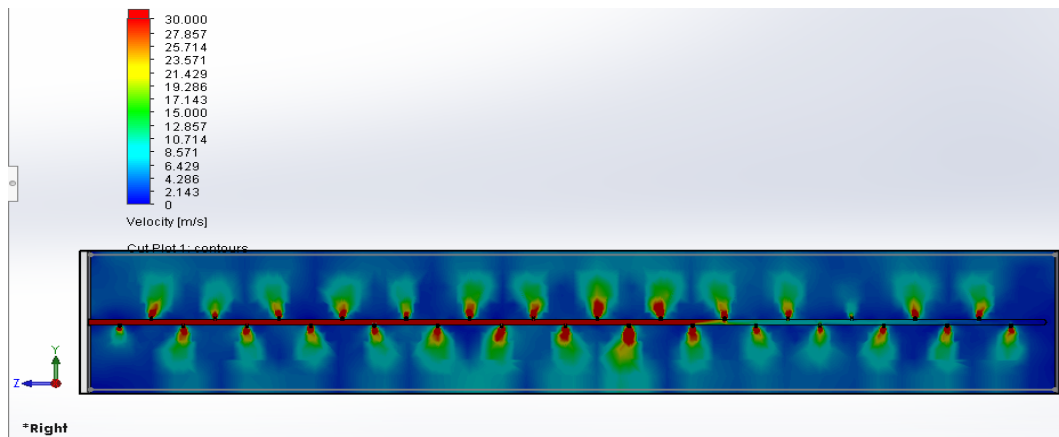


Gambar 4.8 Velocity dengan HI-PIP nozzle (jarak antar nozzle 500 mm)

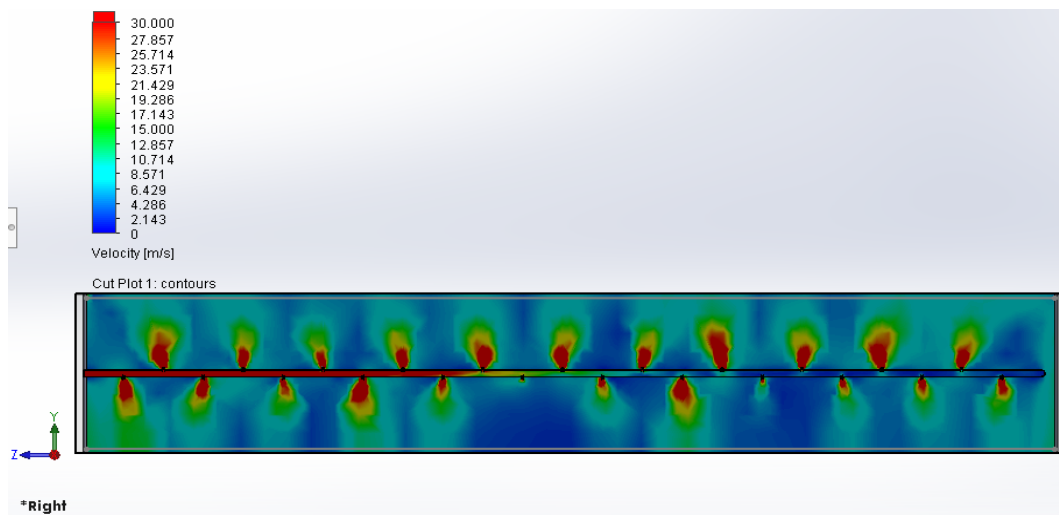


Gambar 4.9 Velocity dengan HI-PIP nozzle (jarak antar nozzle 600 mm)

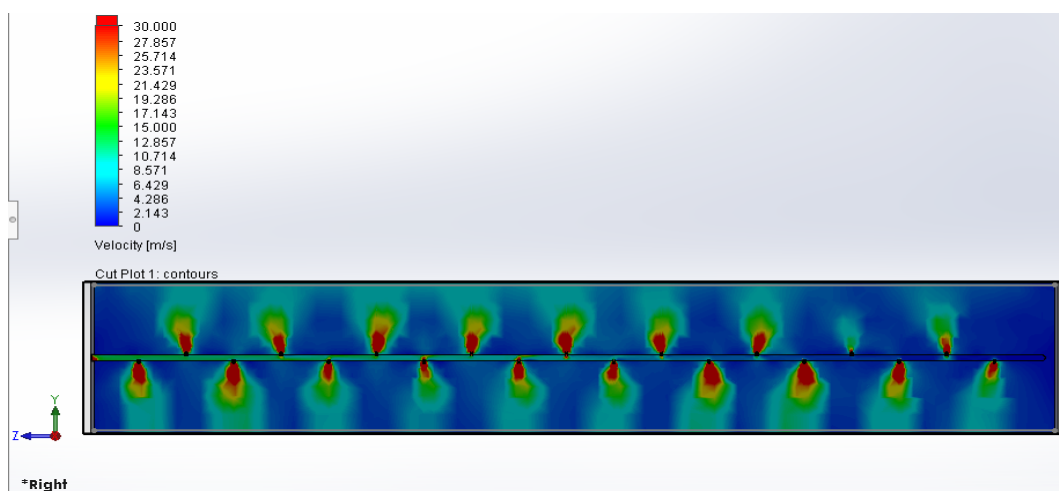
2. Fully expanded nozzle



Gambar 4.10 Velocity dengan *Fully expanded nozzle* (jarak antar nozzle 400 mm)



Gambar 4.11 Velocity dengan *Fully expanded nozzle* (jarak antar nozzle 500 mm)

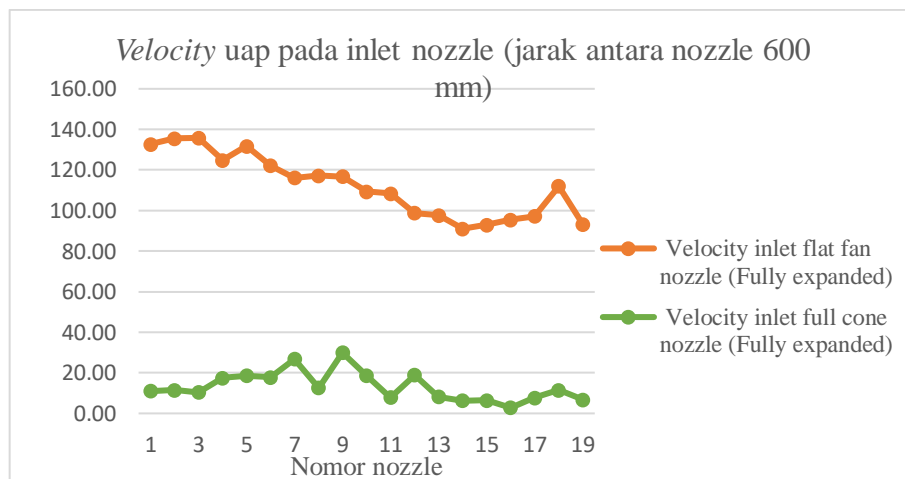


Gambar 4.12 Velocity dengan *Fully expanded nozzle* (jarak antar nozzle 600 mm)

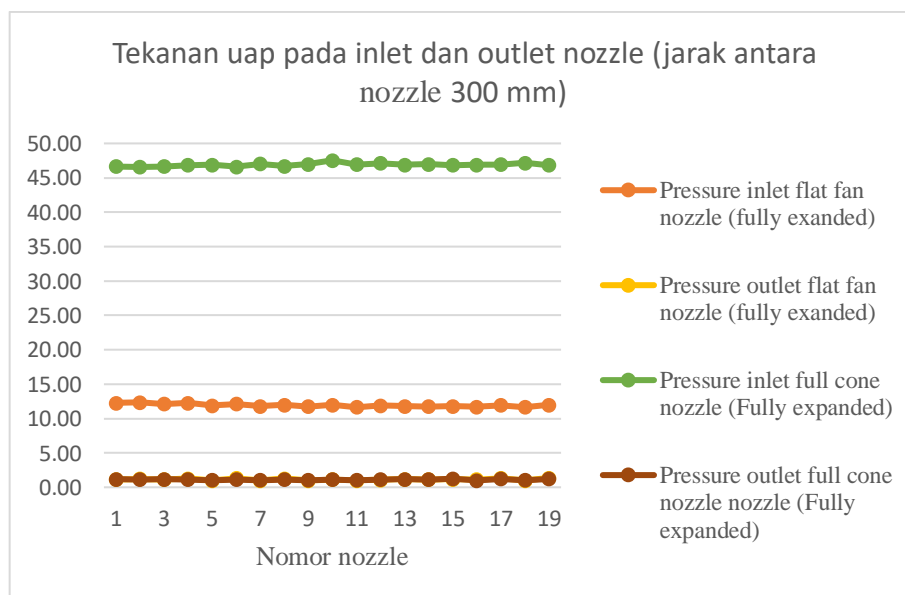
4.2 Pembahasan

4.2.1 Analisa variasi jenis dan metode penempatan *nozzle* terhadap kecepatan uap

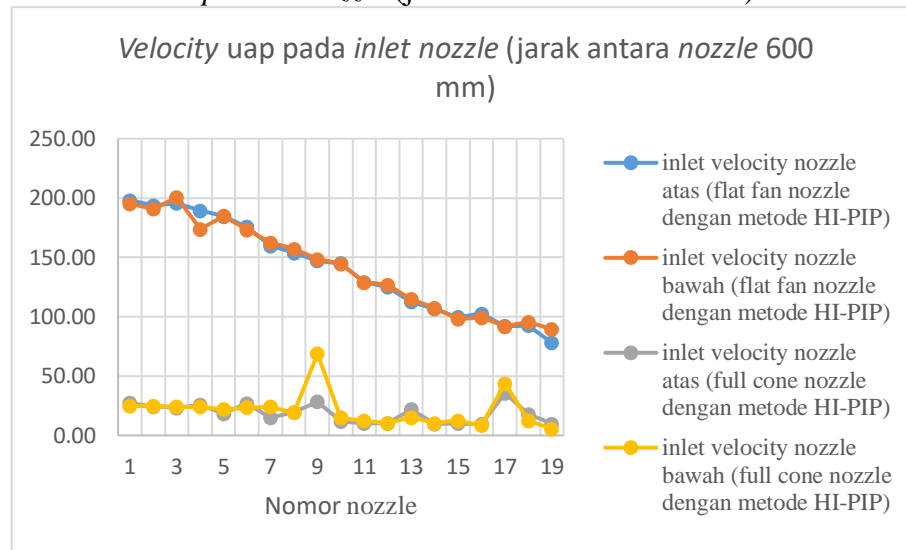
Pada grafik dibawah ini akan di tampilkan perbandingan dari metode penempatan *nozzle* (*fully expanded* dan HI-PIP) dengan menggunakan *nozzle* tipe *flat fan nozzle* dan *full cone nozzle* dengan jarak antar *nozzle* 600 mm terhadap *velocity* yang ada di dalam pipa.



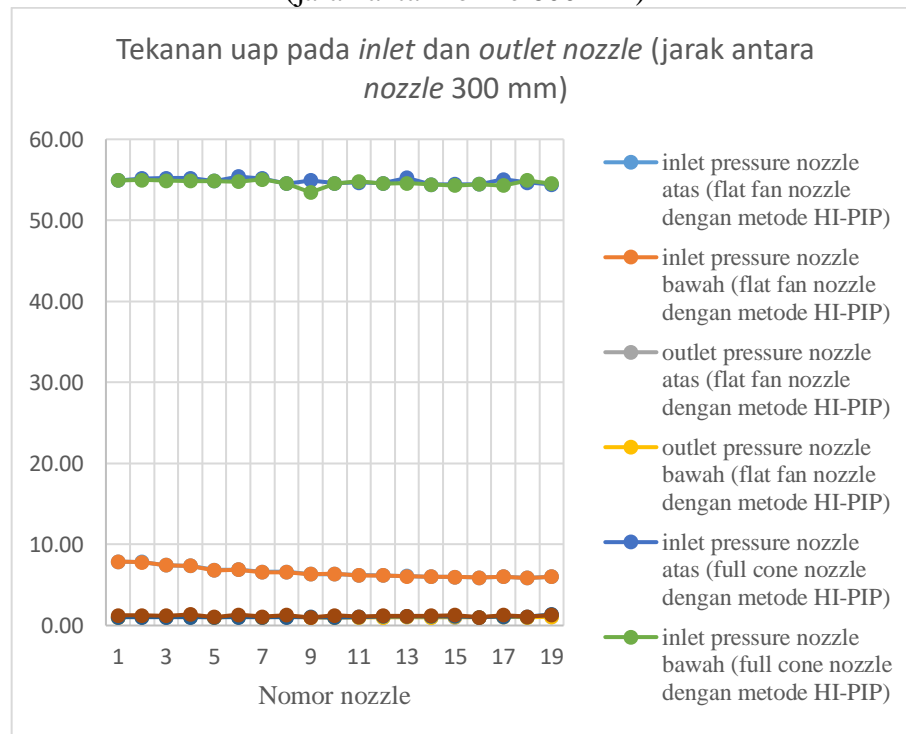
Grafik 4.1 *Velocity* uap pada *inlet nozzle* menggunakan metode *fully expanded nozzle* (jarak antar *nozzle* 600 mm)



Grafik 4.2 Tekanan uap pada *inlet* dan *outlet nozzle* menggunakan metode *fully expanded nozzle* (jarak antar nozzle 600 mm)



Grafik 4.3 Velocity uap pada inlet *nozzle* menggunakan metode HI-PIP *nozzle* (jarak antar nozzle 600 mm)



Grafik 4.4 Tekanan uap pada *inlet* dan *outlet nozzle* menggunakan metode HI-PIP *nozzle* (jarak antar nozzle 300 mm)

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa kecepatan uap didalam pipa dengan menggunakan *flat fan nozzle* lebih besar dibandingkan dengan menggunakan *full*

cone nozzle, hal ini disebabkan karena *oulet* pada *full cone nozzle* memiliki diameter yang lebih besar dibandingkan dengan *flat fan nozzle* sehingga kecepatan uap menjadi tinggi seiring dengan rendahnya tekanan uap didalam pipa pada *flat fan nozzle* dan pada *full cone nozzle* kecepatan uap didalam pipa menjadi rendah seiring dengan tingginya tekanan yang ada. Didalam pipa *lancetube* dengan menggunakan metode penempatan HI-PIP *nozzle* terdapat kesamaan kecepatan maupun tekanan uap di *nozzle* atas maupun di *nozzle* bagian bawah dengan menggunakan jenis *nozzle* manapun, namun terdapat perbedaan dari metode *fully expanded nozzle* dengan HI-PIP *nozzle* yaitu pada kecepatan didalam pipa dengan menggunakan metode HI-PIP *nozzle* uap didalam pipa cenderung memiliki kecepatan yang lebih besar dibandingkan dengan menggunakan metode *fully expanded nozzle* namun saat uap telah di semprotkan oleh *nozzle*, dengan menggunakan metode HI-PIP *nozzle* memiliki kecepatan semprotan uap yang lebih rendah dibandingkan dengan metode *fully expanded nozzle*.

Kecepatan aliran uap yang keluar dari *nozzle* berbanding terbalik dengan luas proyeksi yang dihasilkan oleh semprotan *nozzle*. Semakin besar luas proyeksi yang dihasilkan maka kecepatan uapnya akan semakin kecil, namun semakin kecil luas proyeksi yang dihasilkan maka kecepatan uap yang disemprotkan akan semakin tinggi.

Untuk mengkonversi kecepatan uap (*velocity*) yang ada pada *sootblower* menjadi kecepatan suara (*mach number*) maka digunakan perhitungan dibawah ini:

$$1 \text{ Ma} = 343 \text{ m/s}$$

$$0,3 \text{ Ma} = 0,3 \times 343 = 102,9 \text{ m/s}$$

$$0,8 \text{ Ma} = 0,8 \times 343 = 273,4 \text{ m/s}$$

$$1,2 \text{ Ma} = 1,2 \times 343 = 411,6 \text{ m/s}$$

$$3 \text{ Ma} = 3 \times 343 = 1029 \text{ m/s}$$

Maka klasifikasi kondisi uap menurut White, (1991:610) apabila dikonversikan menjadi *velocity* (m/s) menjadi sebagai berikut:

$v < 102,9 \text{ m/s}$: *Incompressible flow*, efek densitas ditiadakan

$102,9 \text{ m/s} < v < 273,4 \text{ m/s}$: *Subsonic flow*

$273,4 \text{ m/s} < v < 411,6 \text{ m/s}$: *Transonic flow*, awal munculnya *shock wave*, membagi aliran menjadi *subsonic* dan *supersonic*

$411,6 \text{ m/s} < v < 1029 \text{ m/s}$: *Supersonic flow*, timbulnya *shock wave* namun tidak ada daerah *subsonic*.

$1029 \text{ m/s} < v$: *Hypersonic flow*, terdapat *shock wave* dan aliran lain berubah sangat kuat.

Tabel 4.1 Klasifikasi aliran fluida didalam lancetube *sootblower* dengan jarak antar nozzle 600 mm

Klasifikasi aliran fluida di dalam pipa			
Metode penempatan nozzle	Jenis nozzle	Klasifikasi kecepatan fluida (m/s)	Kondisi fluida
<i>Fully expanded nozzle</i>	<i>Flat fan nozzle</i>	$102,9 \text{ m/s} < v < 273,4 \text{ m/s}$	<i>Subsonic flow</i>
	<i>Full cone nozzle</i>	$v < 102,9 \text{ m/s}$	<i>Incompressible flow</i> , efek densitas ditiadakan
<i>HI-PIP nozzle (under expanded)</i>	<i>Flat fan nozzle</i>	$411,6 \text{ m/s} < v < 1029 \text{ m/s}$	<i>Supersonic flow</i> , timbulnya <i>shock wave</i> namun tidak ada daerah <i>subsonic</i> .
		$v < 102,9 \text{ m/s}$	

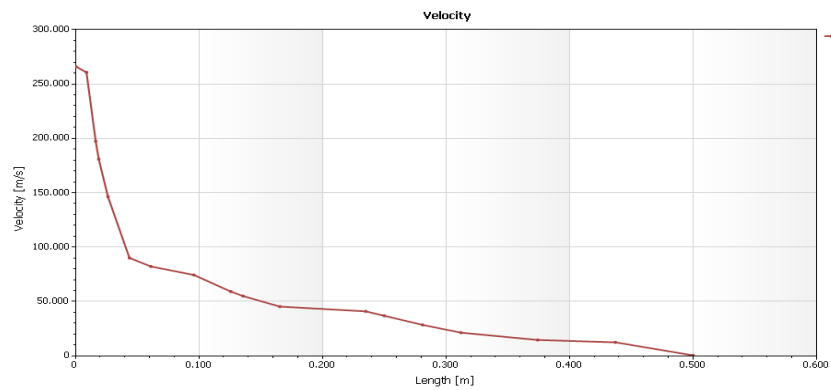
	<i>Full cone nozzle</i>		<i>Incompressible flow, efek densitas ditiadakan</i>
--	-------------------------	--	--

Tabel 4.2 Klasifikasi aliran fluida pada *outlet nozzle* dengan jarak antar *nozzle* 600 mm

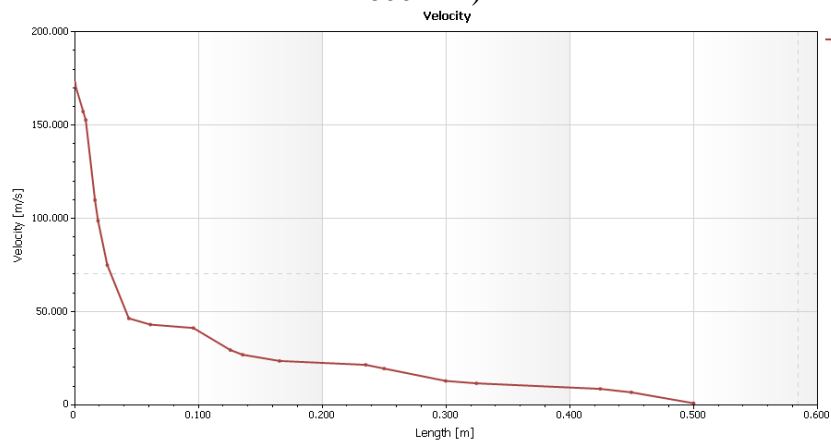
Metode penempatan <i>nozzle</i>	Jenis <i>nozzle</i>	Klasifikasi kecepatan fluida (m/s)	Kondisi fluida
<i>Fully expanded nozzle</i>	<i>Flat fan nozzle</i>	$411,6 \text{ m/s} < v < 1029 \text{ m/s}$	<i>Supersonic flow, timbulnya shock wave namun tidak ada daerah subsonic.</i>
	<i>Full cone nozzle</i>	$102,9 \text{ m/s} < v < 273,4 \text{ m/s}$	<i>Subsonic flow</i>
<i>HI-PIP nozzle (under expanded)</i>	<i>Flat fan nozzle</i>	$273,4 \text{ m/s} < v < 411,6 \text{ m/s}$	<i>Transonic flow, awal munculnya shock wave,</i>
	<i>Full cone nozzle</i>	$102,9 \text{ m/s} < v < 273,4 \text{ m/s}$	<i>Subsonic flow</i>

Dari klasifikasi diatas dapat dilihat bahwa shock whave hampir tidak terjadi pada saat uap disemprotkan oleh nozzle dikarenakan kecepatan uap tidak sampai pada kecepatan 1,2 Mach, dimana pada kecepatan ini *shock wave* akan muncul dan menyebabkan nozzle akan kehilangan banyak energi pada saat menyemprotkan uap sehingga uap yang disemprotkan oleh nozzle menjadi tidak maksimal. Hal ini juga dapat dilihat pada grafik kecepatan uap dibawah ini pada saat uap disemprotkan oleh nozzle hingga berada pada jarak 500 mm dari nozzle.

a. *Flat fan nozzle*

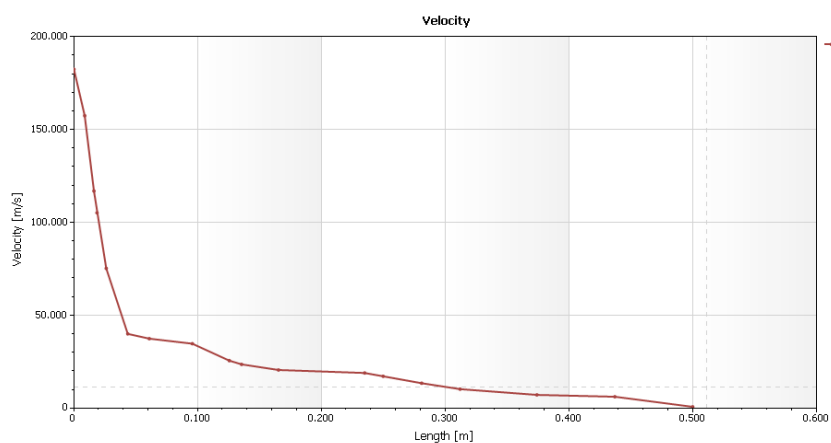


Grafik 4.5 Flat fan nozzle menggunakan fully expanded nozzle (jarak antar nozzle 600 mm)

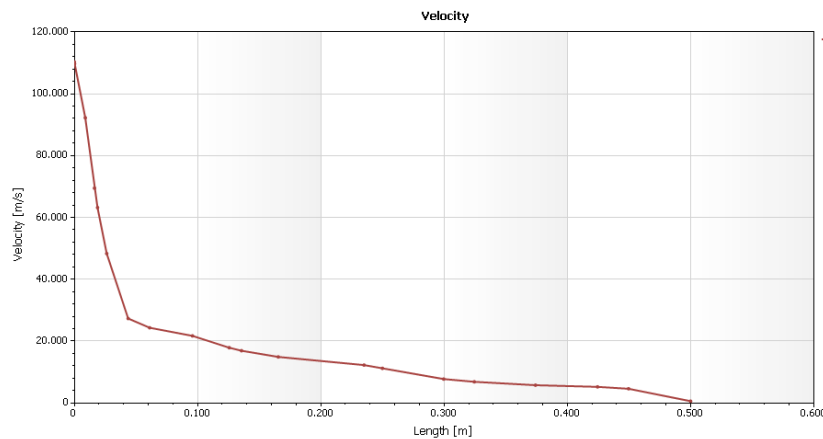


Grafik 4.6 Flat fan nozzle menggunakan HI-PIP nozzle (jarak antar nozzle 600 mm)

b. Full cone nozzle



Grafik 4.7 Full cone nozzle menggunakan fully expanded nozzle (jarak antar nozzle 600 mm)



Grafik 4.8 *Full cone nozzle* menggunakan HI-PIP *nozzle* (jarak antar *nozzle* 600 mm)

Salah satu ciri dari terjadinya *shock wave* adalah terjadinya grafik yang fluktuatif pada saat awal uap disemprotkan oleh *nozzle*, namun pada grafik diatas dapat dilihat bahwa saat uap keluar dari *nozzle* hingga pada jarak 500 mm dari *nozzle* kecepatan uap terus menurun seiring dengan bertambah jauhnya semprotan yang di hasilkan oleh *nozzle* yang mengindikasikan tidak terjadinya *shock wave* pada outlet *nozzle*.

4.2.2 Turbulensi pada aliran fluida didalam pipa *lancetube*

Di dalam pipa lancetube pada grafik 4.1 sampai 4. terlihat bahwa grafik kecepatan fluida sangat fluktuatif atau tidak beraturan, hal ini terjadi dikarenakan terdapat turbulensi aliran fluida sepanjang pipa. Untuk memastikan aliran yang terdapat didalam pipa *lancetube* merupakan aliran turbulen maka dilakukan perhitungan bilangan reynold, jika bilangan reynold lebih dari 4000 ($Re > 4000$) maka aliran tersebut dipastikan adalah *turbulent flow* namun jika bilangan reynold nya lebih rendah dari 2200 ($Re < 2200$) maka aliran tersebut adalah *laminar flow*.

1. *Flat fan nozzle* dengan metode *fully expanded*

- a. Jarak antar *nozzle* 400 mm

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{\rho \times v \times d}{\mu / \rho} \\ &= \frac{3,93 \times 222,9 \times 0,04}{\frac{0,02017}{3,93}} = 7006 \end{aligned}$$

- b. Jarak antar *nozzle* 500 mm

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{\rho \times v \times d}{\mu / \rho} \\ &= \frac{4,49 \times 195,245 \times 0,04}{\frac{0,0201}{4,49}} = 7969,54 \end{aligned}$$

- c. Jarak antar *nozzle* 600 mm

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{\rho \times v \times d}{\mu / \rho} \\ &= \frac{5,34 \times 147,19 \times 0,04}{\frac{0,0201}{5,34}} = 8497,23 \end{aligned}$$

2. Flat fan *nozzle* dengan metode HI-PIP *nozzle*

- a. Jarak antar *nozzle* 400 mm

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{\rho \times v \times d}{\mu / \rho} \\ &= \frac{3,13 \times 251,355 \times 0,04}{\frac{0,02011}{3,13}} = 4917,13 \end{aligned}$$

- b. Jarak antar *nozzle* 500 mm

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{\rho \times v \times d}{\mu / \rho} \\ &= \frac{3,19 \times 282,619 \times 0,04}{\frac{0,02019}{3,19}} = 5564,06 \end{aligned}$$

- c. Jarak antar *nozzle* 600 mm

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{\rho \times v \times d}{\mu / \rho} \\ &= \frac{3,55 \times 247,276 \times 0,04}{0,02018 / 3,55} = 6279,212 \end{aligned}$$

3. Full cone *nozzle* menggunakan *fully expanded nozzle*

a. Jarak antar *nozzle* 400 mm

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{\rho \times v \times d}{\mu / \rho} \\ &= \frac{1,7 \times 1288,101 \times 0,04}{0,0202 / 1,7} = 7422,95 \end{aligned}$$

b. Jarak antar *nozzle* 500 mm

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{\rho \times v \times d}{\mu / \rho} \\ &= \frac{63,04 \times 542,048 \times 0,04}{0,0183 / 63,04} = 471320,082 \end{aligned}$$

c. Jarak antar *nozzle* 600 mm

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{\rho \times v \times d}{\mu / \rho} \\ &= \frac{20,58 \times 42,851 \times 0,04}{0,0198 / 20,58} = 36744,73 \end{aligned}$$

4. Full cone *nozzle* dengan metode HI-PIP

a. Jarak antar *nozzle* 400 mm

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{\rho \times v \times d}{\mu / \rho} \\ &= \frac{15,42 \times 51,817 \times 0,04}{0,0198 / 15,42} = 26.633,58 \end{aligned}$$

b. Jarak antar *nozzle* 500 mm

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{\rho \times v \times d}{\mu / \rho} \\ &= \frac{21,32 \times 39,993 \times 0,04}{0,0198 / 21,32} = 37.895,58 \end{aligned}$$

c. Jarak antar *nozzle* 600 mm

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{\rho \times v \times d}{\mu / \rho} \\ &= \frac{25,18 \times 34,143 \times 0,04}{0,0197 / 25,18} = 49126,89 \end{aligned}$$

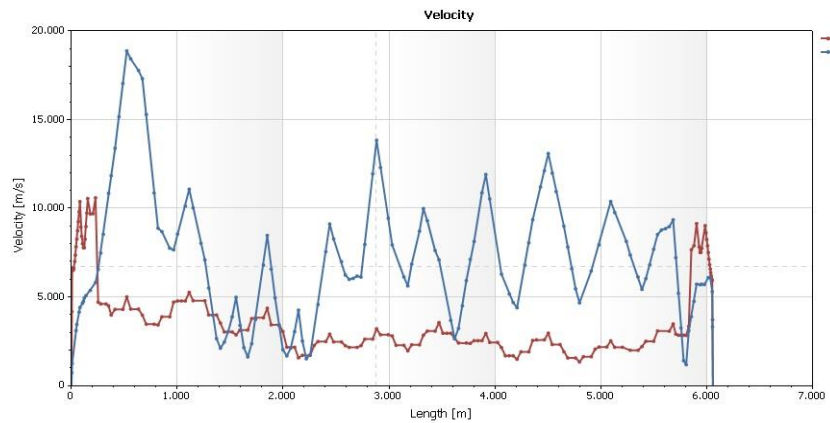
Dari hasil perhitungan diatas dapat diketahui bahwa semua aliran yang terdapat pada *sootblower* adalah *turbulent flow* dikarenakan hasil perhitungan bilangan reynold menunjukkan angka diatas 4000. Hal ini juga yang menyebabkan acaknya (fluktuatif) grafik yang menunjukkan *velocity* uap di sepanjang pipa *lancetube*.

4.3.3 Analisa distribusi aliran kecepatan uap antara baris *nozzle* atas dan bawah pada jarak 500 mm dari outlet *nozzle*

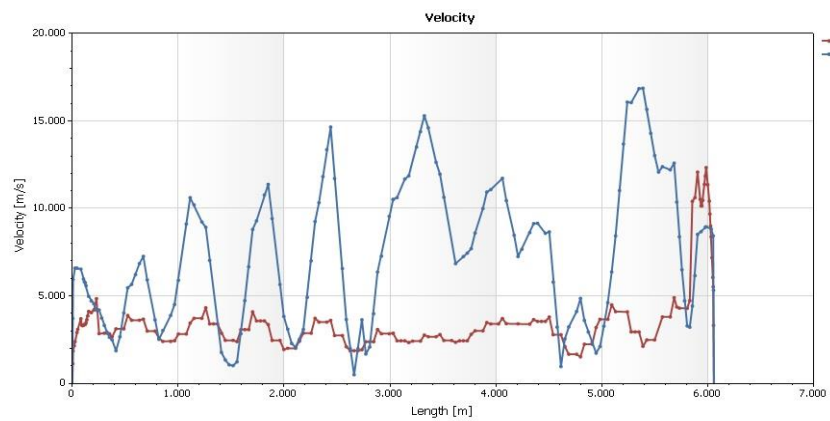
Karena *velocity* merupakan faktor paling utama yang menentukan tingkat kebersihan semprotan yang ada maka pada ketinggian 500 mm dari *nozzle* sepanjang 6000 mm akan diperlihatkan grafik perbandingan kecepatan uap di bagian atas pipa *lancetube* dan dibagian bawah pipa *lancetube* dengan garis merah merupakan kondisi kecepatan uap di bagian atas pipa yaitu tepatnya bagian atas ruangan pemanas dan garis biru merupakan kondisi kecepatan uap di bagian bawah ruangan pipa-pipa pemanas. Dari simulasi aliran uap yang telah dilakukan pada *sootblower* dengan menggunakan dua variasi jenis *nozzle* dan dua metode penempatan *nozzle* dengan variasi jarak antar *nozzle* adalah 400 mm, 500 mm, dan

600 mm maka didapatkan perbandingan grafik hasil penyemprotan uap oleh *nozzle* pada ketinggian 500 mm sebagai berikut:

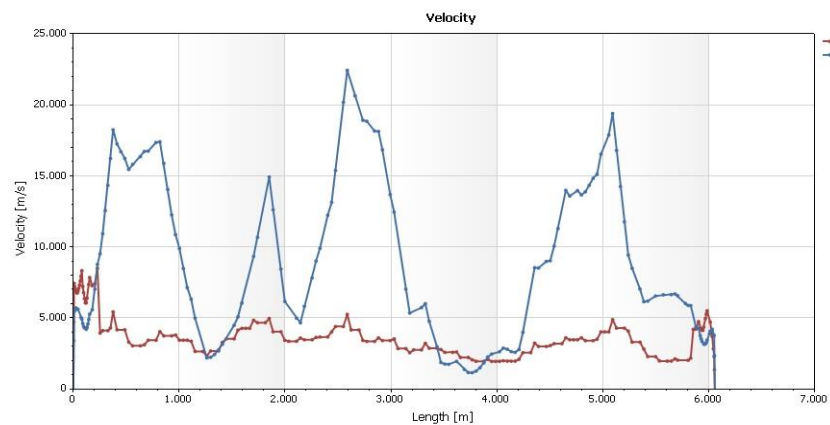
1. *HI-PIP nozzle (Under expanded)*



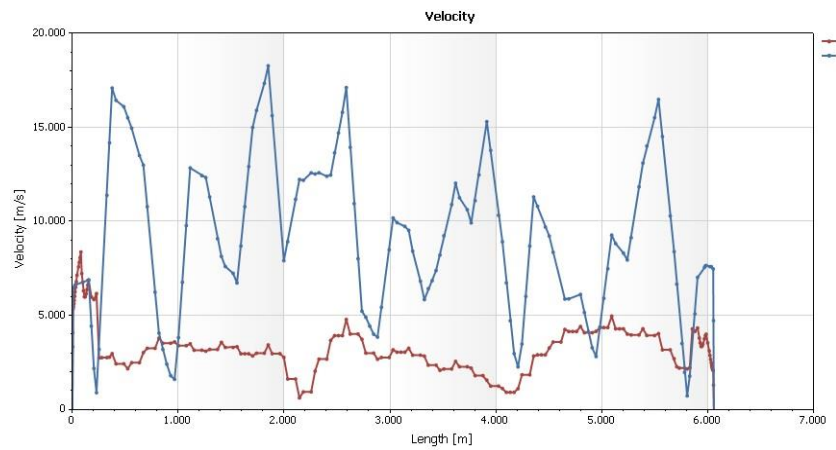
Grafik 4.9 *Flat fan nozzle* (Jarak antar *nozzle* 200 mm)



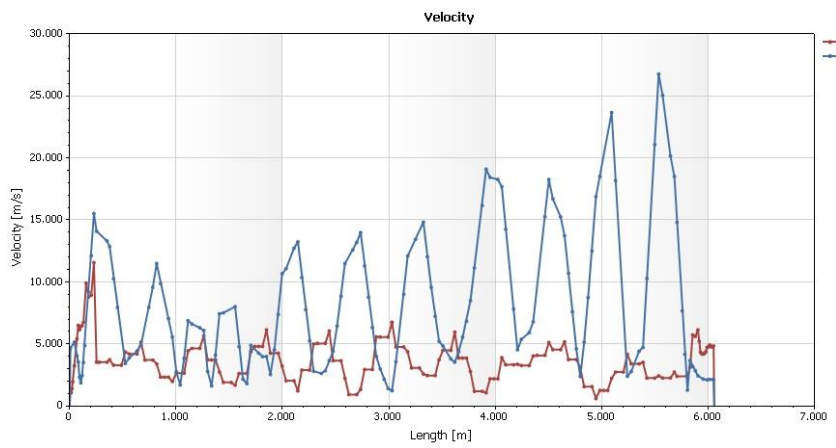
Grafik 4.10 *Full cone nozzle* (Jarak antar *nozzle* 200 mm)



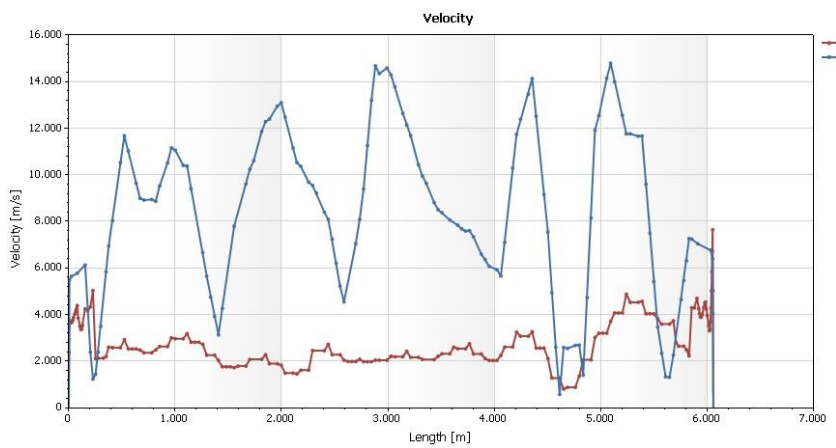
Grafik 4.11 *Flat fan nozzle* (Jarak antar *nozzle* 500 mm)



Grafik 4.12 *Full cone nozzle* (Jarak antar nozzle 500 mm)

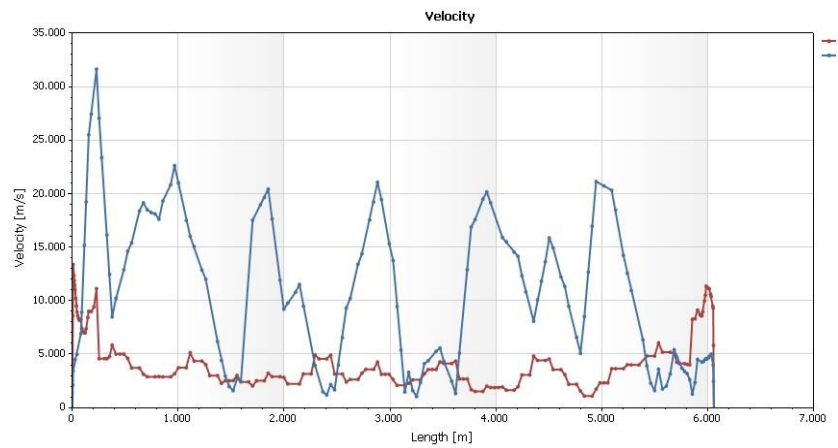


Grafik 4.13 *Flat fan nozzle* (Jarak antar nozzle 600 mm)

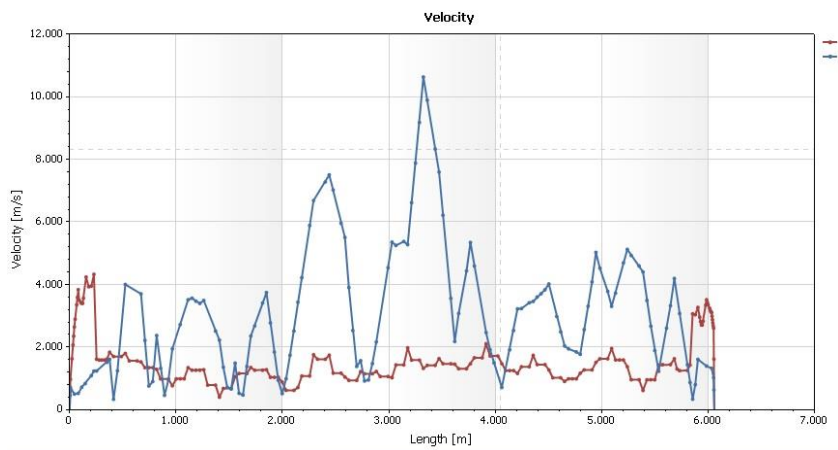


Grafik 4.14 *Full cone nozzle* (Jarak antar nozzle 600 mm)

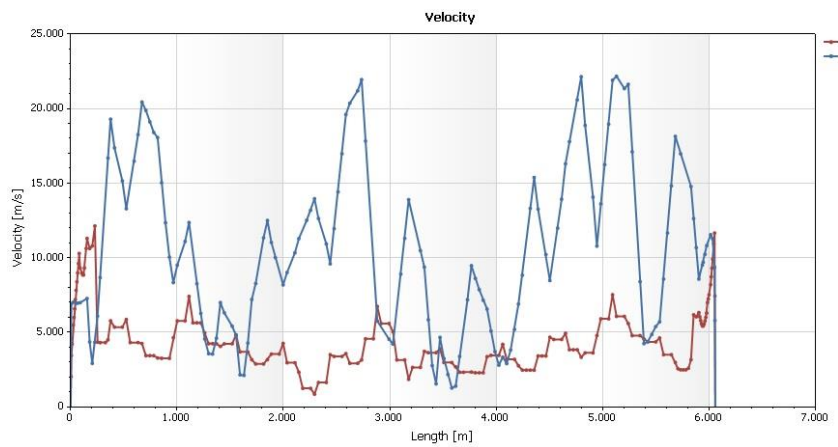
2. *Fully expanded nozzle*



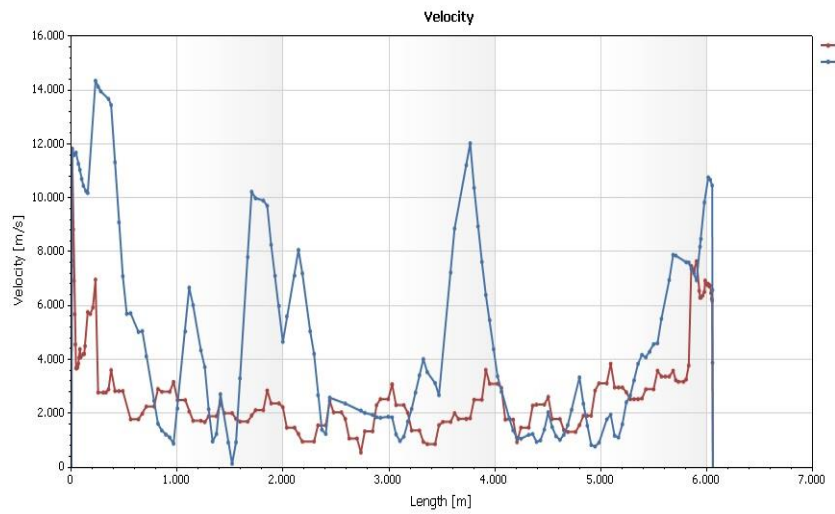
Grafik 4.15 *Flat fan nozzle* (Jarak antar nozzle 400 mm)



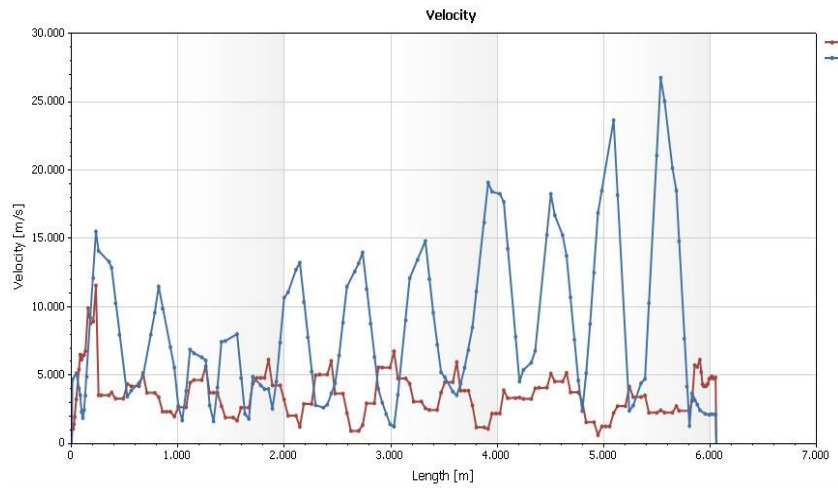
Grafik 4.16 *Full cone nozzle* (Jarak antar nozzle 400 mm)



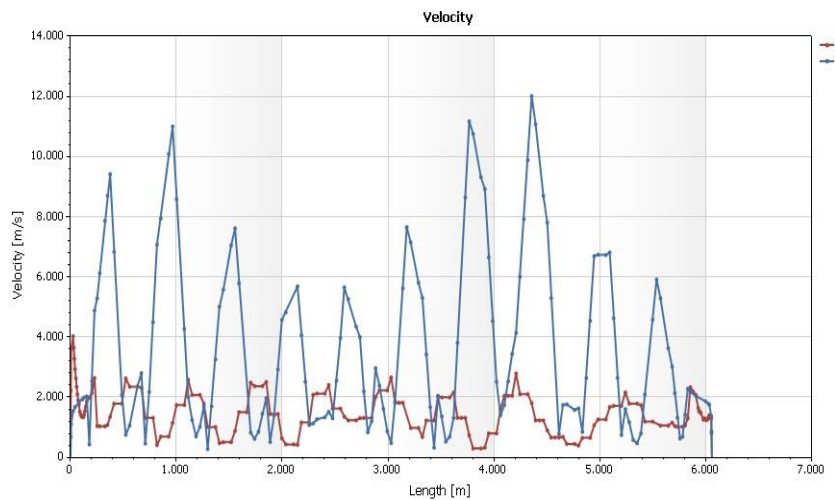
Grafik 4.17 *Flat fan nozzle* (Jarak antar nozzle 500 mm)



Grafik 4.18 *Full cone nozzle* (Jarak antar nozzle 500 mm)



Grafik 4.19 *Flat fan nozzle* (Jarak antar nozzle 600 mm)



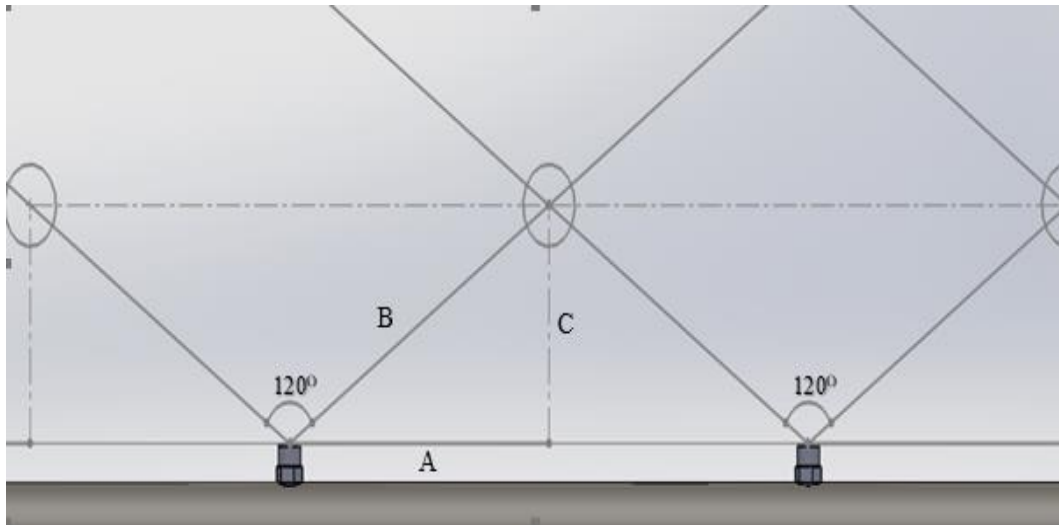
Grafik 4.20 *Full cone nozzle* (Jarak antar nozzle 600 mm)

Pada jarak 500 mm setelah uap disemprotkan terdapat pipa-pipa pemanas pada *heat exchanger* yang menjadi target dari pembersihan uap yang disemprotkan oleh *sootblower*. Faktor utama yang mempengaruhi tingkat kebersihan yaitu meratanya uap yang ditembakkan oleh *nozzle* pada ketinggian yang diinginkan dan parameter utama yang menentukannya adalah kecepatan (*velocity*) uap. Dari hasil simulasi yang telah dilakukan dapat dilihat pada grafik 4.1 sampai 4.12 yang menjelaskan bahwa dari beberapa variasi yang dilakukan memiliki perbedaan kecepatan dan perbedaan area semprotan uap dimana tidak ada satupun dari *nozzle* yang memiliki semprotan dengan kecepatan uap yang konstan pada ketinggian 500 mm sepanjang jarak 6000 mm pada ruang pemanas. Dapat dilihat bahwa *sootblower* memiliki kecepatan semprotan yang lebih besar saat semprotan mengarah kebawah dan cenderung memiliki kecepatan semprotan yang lebih rendah saat uap sedang disemprotkan ke arah atas pada ruang *heat exchanger*, hal ini dapat terjadi disebabkan oleh arah gravitasi yang mengarah kebawah yang menyebabkan semprotan uap akan cenderung memiliki kecepatan yang lebih tinggi saat mengarah kebawah. Gravitasi sangat berpengaruh pada kecepatan aliran dikarenakan terjadinya tumbukan antara dua aliran pada saat uap disemprotkan antar baris *nozzle* sehingga menyebabkan terjadinya penurunan kecepatan aliran uap. Dengan menurunnya kecepatan aliran maka gravitasi memiliki pengaruh yang besar, sehingga saat uap disemprotkan keatas dan terjadi tumbukan pancaran uap mengalami penurunan kecepatan yang besar sedangkan saat uap disemprotkan kebawah dan mengalami tumbukan pancaran maka kecepatan uap meningkat dengan bantuan gaya gravitasi.

Dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa *nozzle* jenis *flat fan nozzle* dapat lebih memaksimalkan semprotan uap yang ada pada *sootblower* dibandingkan dengan menggunakan *full cone nozzle* dan dengan metode penempatan *fully expanded nozzle* uap yang dihasilkan dapat memiliki kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan HI-PIP *nozzle* dikarenakan pengaruh dari banyaknya jumlah *nozzle* yang terdapat didalam pipa *lance tube*.

4.3.4 Analisa kecepatan alir uap dari variasi jarak antar nozzle

Dengan sudut semprotan yang di miliki oleh *nozzle* sebesar 120° serta variasi jarak antar *nozzle* yang digunakan adalah 400, 500, dan 600 mm. *Nozzle* menghasilkan semprotan yang berbentuk kerucut seperti gambar dibawah ini. Dari hasil semprotan uap yang berbentuk kerucut, terlihat pada gambar hasil simulasi bahwa uap kurang maksimal saat disemprotkan oleh *nozzle* dikarenakan semprotan dari *nozzle* yang satu dengan yang lainnya saling bertabrakan sehingga menyebabkan semprotan tidak mencapai ketinggian yang diinginkan. Untuk mengetahui titik tabrakan dari semprotan antara *nozzle* dengan *nozzle* lainnya maka digunakan perhitungan seperti dibawah ini:



Gambar 4.13 Titik tabrakan antara dua semprotan *nozzle*

1. Jarak antar *nozzle* 400 mm

Diketahui:

- $\sin A = 60^\circ$
- $\sin B = 90^\circ$
- $\sin C = 30^\circ$
- $A = 200 \text{ mm}$

Ditanya : Titik pertemuan antara dua pancaran berada pada ?

Jawaban :

$$\triangleright \frac{C}{\sin 30} = \frac{200}{\sin 60}$$

$$0,866 C = 0,5 \times 200$$

$$C = 115,473 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \triangleright B &= \sqrt{A^2 + C^2} \\ &= \sqrt{200^2 + 115,473^2} \\ &= \sqrt{53333,32} \end{aligned}$$

$$B = 230,94 \text{ mm}$$

2. Jarak antar *nozzle* 500 mm

Diketahui:

$$- \sin A = 60^\circ$$

$$- \sin B = 90^\circ$$

$$- \sin C = 30^\circ$$

$$- A = 250 \text{ mm}$$

Ditanya : Titik pertemuan antara dua pancaran berada pada ?

Jawaban :

$$\blacktriangleright \frac{C}{\sin 30} = \frac{200}{\sin 60}$$

$$0,866 C = 0,5 \times 250$$

$$C = 144,34 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \blacktriangleright B &= \sqrt{A^2 + C^2} \\ &= \sqrt{250^2 + 144,34^2} \\ &= \sqrt{83334,03} \end{aligned}$$

$$B = 288,67 \text{ mm}$$

3. Jarak antar *nozzle* 600 mm

Diketahui:

$$- \sin A = 60^\circ$$

$$- \sin B = 90^\circ$$

$$- \sin C = 30^\circ$$

$$- A = 300 \text{ mm}$$

Ditanya : Titik pertemuan antara dua pancaran berada pada ?

Jawaban :

$$\triangleright \frac{C}{\sin 30} = \frac{300}{\sin 60}$$

$$0,866 C = 0,5 \times 300$$

$$C = 173,21 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \triangleright B &= \sqrt{A^2 + C^2} \\ &= \sqrt{250^2 + 173,21^2} \\ &= \sqrt{120001,76} \end{aligned}$$

$$B = 346,4127 \text{ mm}$$

4.3.5 Analisis karakteristik uap di dalam dan diluar pipa *lancetube* ketika beroperasi

1. Kondisi uap

Berikut ini akan ditampilkan kondisi uap saat *sootblower* sedang beroperasi dengan jarak antar *nozzle* yang digunakan sebesar 600 mm melalui tabel berikut:

Tabel 4.3 Jarak antar *nozzle* 600 mm dengan *flat fan nozzle* (HI-PIP *nozzle*)

Nomor nozzle	Jarak antar <i>nozzle</i> 600 mm										
	Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam		
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	Outlet	Inlet	Outlet	
1	Atas	3,05	0,44	198,15	161,07	296,77	361,36	7,88	1,02	0,9999	0,4790
	Bawah	3,05	0,44	195,35	165,51	297,20	360,20	7,89	1,02	0,9999	0,4944
2	Atas	3,04	0,47	193,59	202,14	296,31	354,21	7,83	1,07	0,9999	0,5001
	Bawah	3,02	0,47	190,84	201,15	296,42	354,92	7,79	1,07	0,9999	0,4981
3	Atas	2,88	0,44	195,49	172,13	297,66	356,45	7,46	1,02	0,9999	0,5103
	Bawah	2,88	0,45	200,47	176,51	297,01	358,35	7,44	1,03	0,9999	0,4924
4	Atas	2,85	0,47	189,54	233,18	297,13	344,12	7,37	1,09	0,9999	0,5347
	Bawah	2,84	0,47	173,68	220,59	298,53	345,01	7,36	1,08	0,9999	0,5483

Nomor nozzle		Jarak antar nozzle 600 mm									
		Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
		Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	Outlet	Inlet	Outlet
5	Atas	2,64	0,42	184,51	176,74	296,30	343,85	6,85	0,99	0,9999	0,5477
	Bawah	2,63	0,43	184,94	174,36	296,35	346,64	6,83	1,00	0,9999	0,5306
6	Atas	2,65	0,47	175,63	223,59	298,07	347,54	6,88	1,08	0,9999	0,5324
	Bawah	2,65	0,47	173,17	231,49	298,12	345,38	6,88	1,07	0,9999	0,5342
7	Atas	2,53	0,43	159,66	172,10	298,97	343,00	6,60	1,00	0,9999	0,5536
	Bawah	2,52	0,42	162,47	180,58	299,06	340,38	6,58	1,00	0,9999	0,5670
8	Atas	2,53	0,46	153,87	224,30	300,69	342,97	6,60	1,07	0,9999	0,5525
	Bawah	2,53	0,47	156,96	220,09	300,24	340,97	6,59	1,08	0,9999	0,5635
9	Atas	2,42	0,42	147,15	174,92	300,57	340,21	6,35	1,00	0,9999	0,5727
	Bawah	2,42	0,42	148,46	174,01	300,43	340,78	6,33	1,00	0,9999	0,5676
10	Atas	2,43	0,45	144,98	245,02	301,62	346,56	6,36	1,00	0,9999	0,4876
	Bawah	2,43	0,45	144,54	250,59	301,54	346,01	6,37	1,00	0,9999	0,4913
11	Atas	2,36	0,43	129,01	193,13	303,03	340,99	6,21	1,00	0,9999	0,5664
	Bawah	2,36	0,42	129,03	194,48	302,94	340,23	6,20	1,00	0,9999	0,5710
12	Atas	2,35	0,45	124,86	212,27	304,22	360,80	6,19	1,01	0,9999	0,4458
	Bawah	2,35	0,45	126,78	213,60	304,23	360,04	6,18	1,01	0,9999	0,4487
13	Atas	2,31	0,45	112,66	160,72	305,06	368,20	6,09	1,03	0,9999	0,4681
	Bawah	2,31	0,45	114,79	164,89	305,00	371,06	6,08	1,03	0,9999	0,4548
14	Atas	2,28	0,44	106,71	158,16	307,20	365,17	6,03	1,02	0,9999	0,4896
	Bawah	2,27	0,44	107,43	165,73	307,01	367,14	6,01	1,02	0,9999	0,4789
15	Atas	2,27	0,44	99,53	168,97	307,56	363,62	6,00	1,02	0,9999	0,4947
	Bawah	2,26	0,44	97,88	171,73	307,39	360,07	5,99	1,03	0,9999	0,5127
16	Atas	2,22	0,44	102,46	150,23	308,51	369,20	5,91	1,02	0,9999	0,4672
	Bawah	2,22	0,44	99,30	151,42	308,49	365,91	5,91	1,02	0,9999	0,4919
17	Atas	2,27	0,46	91,99	215,81	309,21	352,70	6,02	1,07	0,9999	0,5274
	Bawah	2,27	0,46	91,74	223,63	309,22	351,15	6,01	1,07	0,9999	0,5354
18	Atas	2,20	0,42	92,62	185,20	310,87	347,73	5,88	1,00	0,9999	0,5507
	Bawah	2,19	0,42	95,53	193,24	311,00	345,07	5,86	1,00	0,9999	0,5629
19	Atas	2,25	0,46	78,17	226,68	319,31	357,83	6,03	1,08	0,9808	0,5162
	Bawah	2,24	0,47	89,42	227,45	316,72	356,13	6,01	1,09	0,9919	0,5270

Tabel 4.4 Jarak antar nozzle 600 mm dengan full cone nozzle (HI-PIP nozzle)

Nomor nozzle		Jarak antar nozzle 600 mm									
		Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
		Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	outlet	inlet	Outlet	Inlet	Outlet
1	Atas	25,1	0,49	27,26	117,58	299,77	387,63	54,9	1,00	0,9999	0,1640
	Bawah	25,1	0,60	24,59	209,92	299,86	310,92	54,9	1,24	0,9999	0,4857
2	Atas	25,3	0,49	24,33	123,91	300,06	387,47	55,2	1,00	0,9999	0,1639
	Bawah	25,2	0,60	24,98	205,64	299,80	310,11	55,0	1,25	0,9999	0,4981
3	Atas	25,3	0,48	23,35	144,61	299,87	384,63	55,2	0,99	0,9999	0,1750
	Bawah	25,1	0,59	24,23	236,79	299,53	306,99	54,9	1,22	0,9999	0,4787
4	Atas	25,3	0,48	25,61	133,27	299,82	381,24	55,2	0,99	0,9999	0,1860
	Bawah	25,1	0,66	24,14	140,28	299,35	301,49	54,9	1,36	0,9999	0,5480
5	Atas	25,1	0,48	18,43	68,56	299,88	389,55	54,9	1,01	0,9999	0,1648
	Bawah	25,1	0,51	21,95	158,28	299,91	333,60	54,9	1,05	0,9999	0,3582

Nomor nozzle		Jarak antar nozzle 600 mm									
		Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
		Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	outlet	inlet	Outlet	Inlet	Outlet
6	Atas	25,4	0,49	27,02	119,37	300,32	380,37	55,4	1,00	0,9999	0,1820
	Bawah	25,1	0,63	23,56	213,25	299,65	313,71	54,8	1,31	0,1820	0,4891
7	Atas	25,3	0,49	14,89	82,29	300,01	360,51	55,2	1,01	0,9999	0,2279
	Bawah	25,2	0,53	24,08	210,99	300,00	292,73	55,1	1,08	0,9999	0,4761
8	Atas	25,0	0,50	19,62	181,31	298,86	332,14	54,5	0,99	0,9999	0,2587
	Bawah	25,0	0,63	19,31	200,12	299,16	286,41	54,6	1,29	0,9999	0,5536
9	Atas	25,2	0,50	28,51	134,70	299,40	320,98	54,9	1,05	0,9999	0,3821
	Bawah	24,6	0,51	68,81	54,06	293,22	314,23	53,5	0,99	0,9999	0,3496
10	Atas	25,0	0,48	11,97	88,16	298,64	251,55	54,6	0,98	0,9999	0,2807
	Bawah	25,0	0,61	15,02	218,05	299,03	288,94	54,6	1,26	0,9999	0,5646
11	Atas	24,9	0,49	9,96	138,03	300,33	329,32	54,6	1,05	0,9999	0,4215
	Bawah	25,1	0,50	12,31	188,42	299,87	304,43	54,8	1,07	0,9999	0,5225
12	Atas	24,1	0,51	10,31	171,24	311,10	342,59	54,6	1,13	0,9999	0,4921
	Bawah	24,1	0,55	10,32	196,35	310,16	330,05	54,5	1,21	0,9999	0,5247
13	Atas	22,0	0,49	21,92	182,08	350,89	369,86	55,2	1,12	0,9999	0,4605
	Bawah	21,8	0,51	15,24	200,59	349,67	360,07	54,6	1,18	0,9999	0,5001
14	Atas	18,2	0,46	9,90	203,14	440,81	418,44	54,4	1,14	0,9999	0,4634
	Bawah	18,8	0,48	10,23	218,57	422,69	400,92	54,4	1,19	0,9999	0,4959
15	Atas	15,2	0,42	10,10	218,69	553,05	484,71	54,5	1,13	0,9999	0,4424
	Bawah	15,6	0,46	12,50	142,81	533,33	477,12	54,3	1,27	0,9999	0,4819
16	Atas	12,4	0,42	9,52	36,65	711,64	506,90	54,5	1,00	0,9999	0,1047
	Bawah	12,9	0,44	8,41	26,65	680,72	490,25	54,5	1,00	0,9998	0,0733
17	Atas	10,5	0,37	35,67	155,25	891,68	623,45	55,1	1,07	0,9999	0,2976
	Bawah	10,3	0,38	43,89	350,12	899,12	654,08	54,3	1,29	0,9909	0,4962
18	Atas	12,8	0,37	17,92	349,48	788,79	587,65	54,7	1,09	0,9912	0,3450
	Bawah	12,5	0,34	12,64	303,81	825,21	642,45	54,9	1,07	0,7409	0,3266
19	Atas	25,5	0,69	9,91	193,04	327,18	352,74	54,4	1,35	0,7722	0,2372
	Bawah	25,5	0,61	5,44	99,25	327,86	382,84	54,5	1,27	0,5000	0,1975

Tabel 4.5 Jarak antar nozzle 600 mm dengan flat fan nozzle (fully expanded nozzle)

Nomor nozzle		Jarak antar nozzle 600									
		Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
		Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	Outlet	inlet	outlet	inlet	Outlet
1	4,83	0,49	132,78	226,06	293,69	338,89	12,26	1,11	0,9999	0,5248	
2	4,89	0,54	135,54	249,83	293,32	335,69	12,36	1,22	0,9999	0,5227	
3	4,77	0,50	135,81	230,64	293,70	339,89	12,11	1,13	0,9999	0,5109	
4	4,84	0,57	124,79	291,47	294,47	323,02	12,26	1,28	0,9999	0,5514	
5	4,68	0,44	131,68	293,02	292,81	296,08	11,90	1,00	0,9999	0,7029	
6	4,78	0,58	122,20	290,11	295,03	318,66	12,14	1,30	0,9999	0,5648	
7	4,62	0,44	116,14	274,43	293,77	304,49	11,80	1,00	0,9999	0,6433	
8	4,71	0,58	117,26	299,94	295,90	316,33	12,00	1,29	0,9999	0,5618	
9	4,59	0,44	116,82	289,51	294,30	298,41	11,74	1,00	0,9999	0,6721	
10	4,70	0,52	109,32	343,79	296,20	304,71	11,97	1,11	0,9999	0,5523	
11	4,56	0,44	108,35	309,30	295,84	290,66	11,67	1,01	0,9999	0,7312	
12	4,65	0,50	98,77	316,50	297,38	308,32	11,89	1,09	0,9999	0,5688	
13	4,60	0,51	97,67	232,09	297,46	327,29	11,77	1,16	0,9999	0,5713	
14	4,58	0,51	91,05	235,44	298,68	338,80	11,75	1,15	0,9999	0,5209	

Nomor nozzle	Jarak antar nozzle 600									
	Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	Outlet	inlet	outlet	inlet	Outlet
15	4,59	0,51	92,96	245,57	299,06	337,81	11,77	1,16	0,9999	0,5218
16	4,54	0,51	95,44	218,73	300,27	348,56	11,68	1,14	0,9999	0,4894
17	4,62	0,58	97,26	297,46	302,54	324,00	11,92	1,31	0,9999	0,5605
18	4,45	0,43	112,04	310,46	307,39	306,34	11,64	1,01	0,9954	0,6856
19	4,63	0,6	93,25	298,89	320,90	335,83	11,96	1,35	0,9082	0,5021

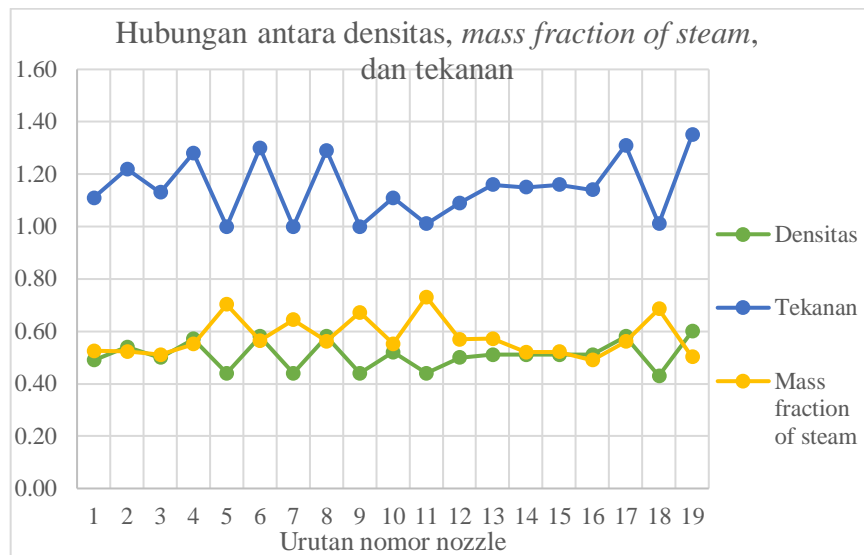
Tabel 4.6 Jarak antar nozzle 600 mm dengan *full cone nozzle (fully expanded nozzle)*

Nomor nozzle	Jarak antar nozzle 600									
	Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	outlet	inlet	Outlet
1	21,01	0,56	11,11	191,65	293,45	286,89	46,65	1,19	0,9999	0,5884
2	20,93	0,66	11,55	161,16	294,09	342,57	46,57	1,12	0,9999	0,4348
3	20,51	0,55	10,48	216,93	301,65	296,77	46,65	1,17	0,9999	0,5654
4	20,15	0,52	17,52	170,75	309,84	321,83	46,85	1,13	0,9999	0,5137
5	19,69	0,48	18,68	134,50	318,73	327,32	46,88	1,05	0,9999	0,4805
6	18,94	0,52	17,83	195,07	331,67	334,85	46,60	1,13	0,9988	0,4827
7	18,20	0,46	26,87	127,21	356,51	361,02	47,01	1,04	0,9722	0,3927
8	17,01	0,49	12,64	205,95	405,71	375,24	46,71	1,15	0,8589	0,4679
9	16,16	0,45	29,92	166,98	474,80	420,84	47,00	1,05	0,6770	0,3103
10	18,53	0,51	18,57	132,60	422,48	409,18	47,55	1,14	0,5521	0,2846
11	21,51	0,51	7,96	140,43	334,92	371,52	46,94	1,06	0,5026	0,2317
12	22,04	0,54	18,90	152,61	325,09	348,43	47,14	1,11	0,4999	0,2793
13	21,98	0,58	8,22	186,62	323,83	323,26	46,91	1,18	0,5000	0,3508
14	22,07	0,55	6,32	163,30	322,88	322,40	46,99	1,12	0,4989	0,3588
15	22,05	0,62	6,39	113,31	322,44	325,83	46,84	1,25	0,4936	0,3437
16	22,01	0,47	2,78	32,31	322,96	387,72	46,89	1,00	0,4987	0,1807
17	22,08	0,60	7,72	194,52	322,19	319,55	46,93	1,21	0,4980	0,3574
18	22,16	0,50	11,47	122,28	322,82	349,83	47,17	1,04	0,4979	0,2873
19	22,03	0,59	6,82	119,68	323,30	364,85	46,84	1,21	0,4900	0,2448

2. Karakteristik uap dan hal yang mempengaruhinya

Karakteristik uap yang ada pada *sootblower* dapat ditentukan melalui *mass fraction of steam* yang ada pada tabel yang telah dijabarkan diatas. Dari data yang didapatkan, diketahui bahwa karakteristik uap yang ada sepanjang pipa *lancetube* adalah uap kering (*dry steam*) yang di ketahui dari angka *mass fraction of steam* sebesar 0,9999 (kandungan uap diatas 95%) dan saat uap telah di semprotkan angka *mass fraction of steam* nya menurun hingga rata-rata 0,5 sehingga uap telah menjadi

uap basah dikarenakan kandungan air nya sudah diatas 5 %. Penurunan angka *mass fraction of steam* dipengaruhi oleh densitas dan tekanan uap yang dapat dilihat pada grafik dibawah ini:



Grafik 4.19 Hubungan antara densitas, *mass fraction of steam*, dan tekanan (pada outlet flat fan nozzle (fully expanded) dan jarak antar nozzle 600 mm)

Grafik diatas menunjukkan bahwa densitas berbanding lurus dengan tekanan yang ada namun berbanding terbalik dengan *mass fraction of steam*. Jika uap mengalami kenaikan densitas dan tekanan yang ada maka *mass fraction of steam* akan mengalami penurunan yang menyebabkan uap menjadi semakin basah, namun jika densitas dan tekanan pada uap mengalami penurunan maka *mass fraction of steam* akan mengalami kenaikan yang menyebabkan uap menjadi semakin kering.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Nozzle tipe *flat fan nozzle* menghasilkan kecepatan semprotan yang lebih tinggi dibandingkan dengan *full cone nozzle*, dan tidak terdapat *shock wave* pada saat proses penyemprotan berlangsung.
2. Sepanjang pipa *lancetube* aliran uap mengalami turbulensi sehingga menyebabkan kecepatan uap didalam pipa menjadi sangat fluktuatif.
3. Pada setiap penyemprotan, bagian bawah ruangan lebih mendapatkan kecepatan semprotan uap yang lebih tinggi dibandingkan bagian atas ruangan.
4. Sudut semprotan yang dihasilkan oleh *nozzle* sebesar 120° mengakibatkan pancaran uap antara baris *nozzle* mengalami pertemuan sebelum menyentuh pipa-pipa pemanas yang berada pada jarak 500 mm dari *outlet nozzle*, yang berarti tidak efisien jika menggunakan sudut semprotan 120° .
5. Karakteristik uap saat didalam pipa *lancetube* adalah uap kering namun setelah disemprotkan oleh *nozzle* uap berubah menjadi basah, hal ini dipengaruhi oleh densitas dan tekanan uap yang ada.

5.2 Saran

1. Perlu melakukan pengujian (simulasi) dengan menggunakan *nozzle* bertipe konvergen-divergen (*nozzle de laval*) untuk dijadikan perbandingan dengan penelitian ini guna mengetahui jenis *nozzle* yang mana yang paling efektif untuk di gunakan pada *sootblower tipe motorized rotary*.

2. Sudut semprotan yang digunakan oleh *nozzle* sebaiknya memiliki sudut semprotan yang kecil agar jarak antar *nozzle* tidak terlalu jauh dan tidak menyebabkan tumbukan pancaran antar *nozzle* karena menggunakan sudut semprotan yang besar namun menggunakan jarak antar *nozzle* yang kecil.
3. Perlu dilakukan penelitian tentang kondisi *nozzle* yang digunakan pada *sootblower* ketika beroperasi apakah *nozzle* sanggup menahan kecepatan uap yang terkadang sampai pada kecepatan suara yang dapat menimbulkan munculnya *shock wave*.
4. Diperlukan perancangan *nozzle* yang dapat meningkatkan kecepatan namun juga disaat yang bersamaan tidak kehilangan tekanannya agar pancaran uap dapat mencapai ketinggian yang maksimal.
5. Perlu diadakannya penelitian di lapangan langsung dengan mengacu pada penelitian ini guna mengetahui apakah hasil simulasi yang dilakukan sesuai dengan yang ada dilapangan

DAFTAR PUSTAKA

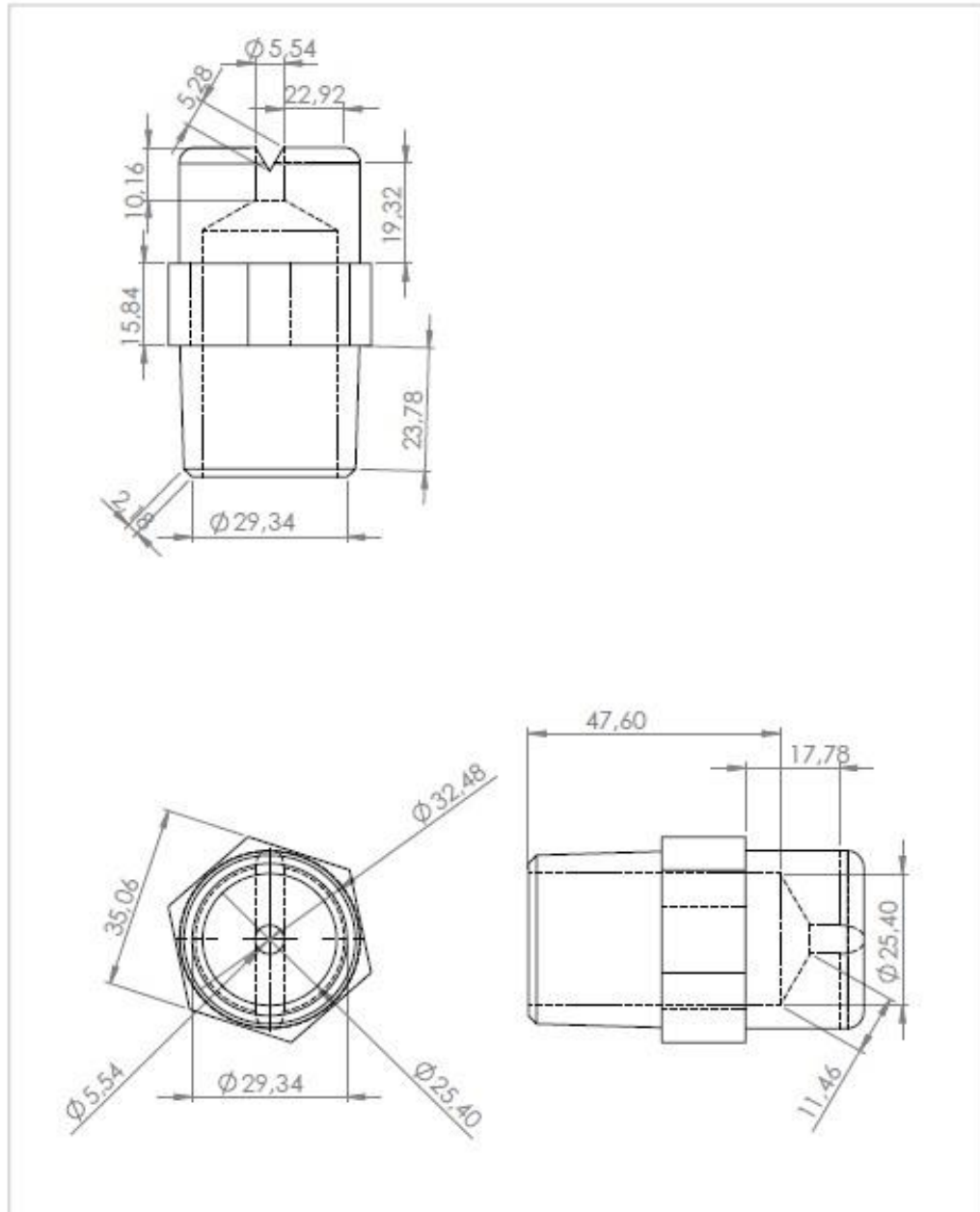
- Al-shemmeri, T. 2012. *Engineering Fluid Mechanics*. T. Al-Shemmeri & Ventus Publishing ApS
- Clyde bergemann. "Rotating element sootblower". <https://www.cbpg.com/en-gb/products-solutions/boiler-efficiency/load-boiler-cleaning-systems/economiser/rotating-element-sootblower>. 25 November 2019 (04:39)
- Dyaksa, G. A. 2016. Pengaruh Convergent Dan Convergent-Divergent Nozzle Terhadap Entrainment Ratio dan Expansion Ratio Pada Steam Ejector. *Skripsi*. Program S1 Teknik Mesin Universitas Sanata Darma. Yogyakarta
- Gowshikan, M., S. G. Kumar, dan H. Surjith. 2014. Root Cause Identification And Elimination Of Problems In Soot Blowers Of Chemical Recovery Boilers. *SSRG International Journal of Mechanical Engineering (SSRG-IJME)* 1(5): 18-24
- Gulo, W. 2010. *Metodologi Penelitian*. Jakarta: Grasindo.
- Hidayah, T. 2017. *Apa Sih Kelebihan Solidworks*. <https://taufiqdrafting13.blogspot.co.id/2017/11/apa-sih-kelebihan-solidworks.html>. 14 Mei 2018 (14:19)
- Hidayatullah, N. A., dan H. N. Ningrum. 2016. Optimalisasi Daya Pembangkit Listrik Tenaga Angin Turbin Angin Sumbu Horizontal dengan Menggunakan Metode Maximum Power Point Tracker. *Journal of Electrical Electronic Control and Automotive Engineering (JEECAE)* 1(1): 7-12.
- Isreb, M. 1995. Integrated Life Synthesis For Boiler Sootblower In Fossil Power Plants. *Elsevier Science Ltd* 63(6): 1043-1051
- Jameel, M. I., D. E. Cormack, H. Tran, dan T. E. Moskal. 2016. Sootblower optimization Part 1: Fundamental hydrodynamics of a sootblower nozzle and jet. *Researchget* 77(5): 134-142
- Kundu, B., dan K. S. Lee. 2018. Existence of Subsonic Flow in Divergent Section Adjacent to Throat of a Convergent-Divergent Nozzle for Actual Flow. *Journal of Applied Fluid Mechanics* 11(2): 353-359

- Madejski, P., dan D. Taler. 2013. Analysis Of Temperature And Stress Distribution Of Superheater Tubes After Atttemperation Or Sootblower Activation. *Energy Conversion And Management* (71): 131-137.
- Ogbonnaya, S. K., dan O. O. Ajayi. 2017. Fouling phenomenon and its effect on heat exchanger: A review. *Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT)* 9(31): 1-13
- Pattanayak, L., S. P. K. Ayyagari, dan J. N. Sahu. 2015. Optimization Of Sootblowing Frequency To Improve Boiler Performance And Reduce Combustion Pollution. *Springer*: 1-10
- Priyono. 2016. *Metode Penelitian Kuantitatif*. Sidoarjo: Zifatama.
- Pophali, A., B. Emami, M. Bussmann, H. Tran. 2011. Studies On Sootblower Jet Dynamics And Ash Deposit Removal In Industrial Boilers. *Fuel processing technology* 105: 69-76
- Purnama, N. C. 2017. Analisis Kegagalan Sootblower Terhadap Perpindahan Panas Di Pipa Boiler. *Jurnal Teknik Mesin* 6(3): 1-4
- Ramadhan, A. 2013. *Solidworks, Mengenal program CAD yang user friendly*. <https://www.afrizalr.com/2013/06/solidworks-mengenal-program-cad-yang.html>. Afrizalr@Gmail.com. 14 Mei 2018 (14:47).
- Tran, H, dan D. S. Tranda. 2015. Recovery boiler sootblowers: History and technological advances. *Tappi Journal* 14(1): 51-60
- Trust well engineers. "Soot blowers". <https://www.trustwellindia.com/sb.html>. 25 November 2019 (04:36)
- Vahaji, S., A. Akbarzadeh, A. Date, C. P. Sherman, dan J. Tu. 2015. Study on the Efficiency of a Convergent-Divergent Two-Phase Nozzle as a Motive Force for Power Generation from Low Temperature Geothermal Resources. *Proceedings World Geothermal Congress* 85: 1-14
- Vijay, K, dan B. Kartikheyana. 2019. Soot Blower Operation To Improve The Boiler Heat Peak Up. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* 6(5): 1711-1719
- White, F. M. 2011. *Fluid Mechanics*. 7th ed. United State: McGraw-Hill.
- Wojnar, W. 2013. Erosion Of Heat Exchangers Due To Sootblowing. *Engineer failure analysis* 33: 473-489

Yohana, E, dan A. Priambodo. 2012. Analisa Efisiensi Low Pressure HRSG (Heat Recovery Steam Generator) Pada PLTGU PT. Indonesia Power UBP Semarang. ROTASI 14(1): 7-9

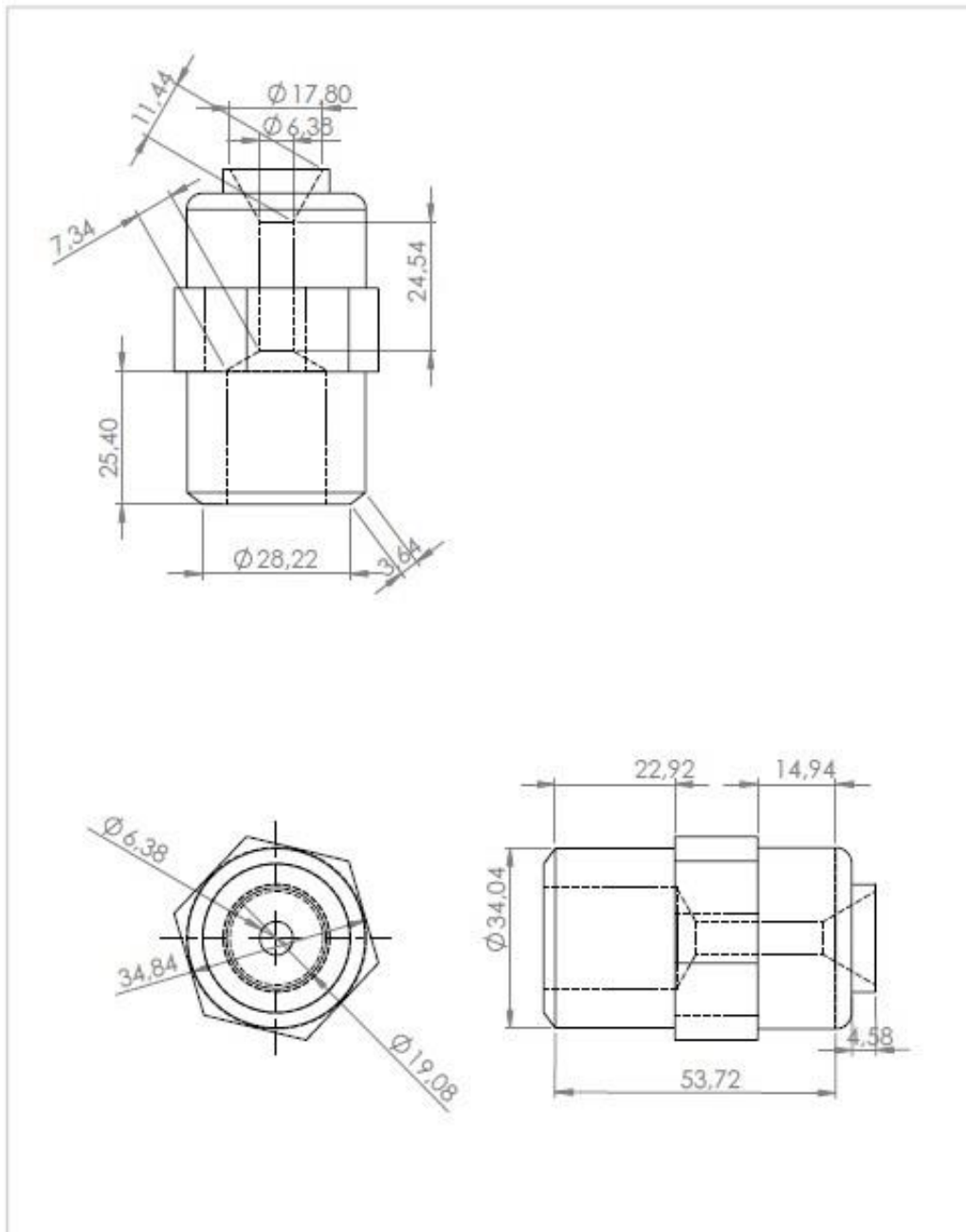
Lampiran 1. Proses desain

a. Desain flat fan nozzle



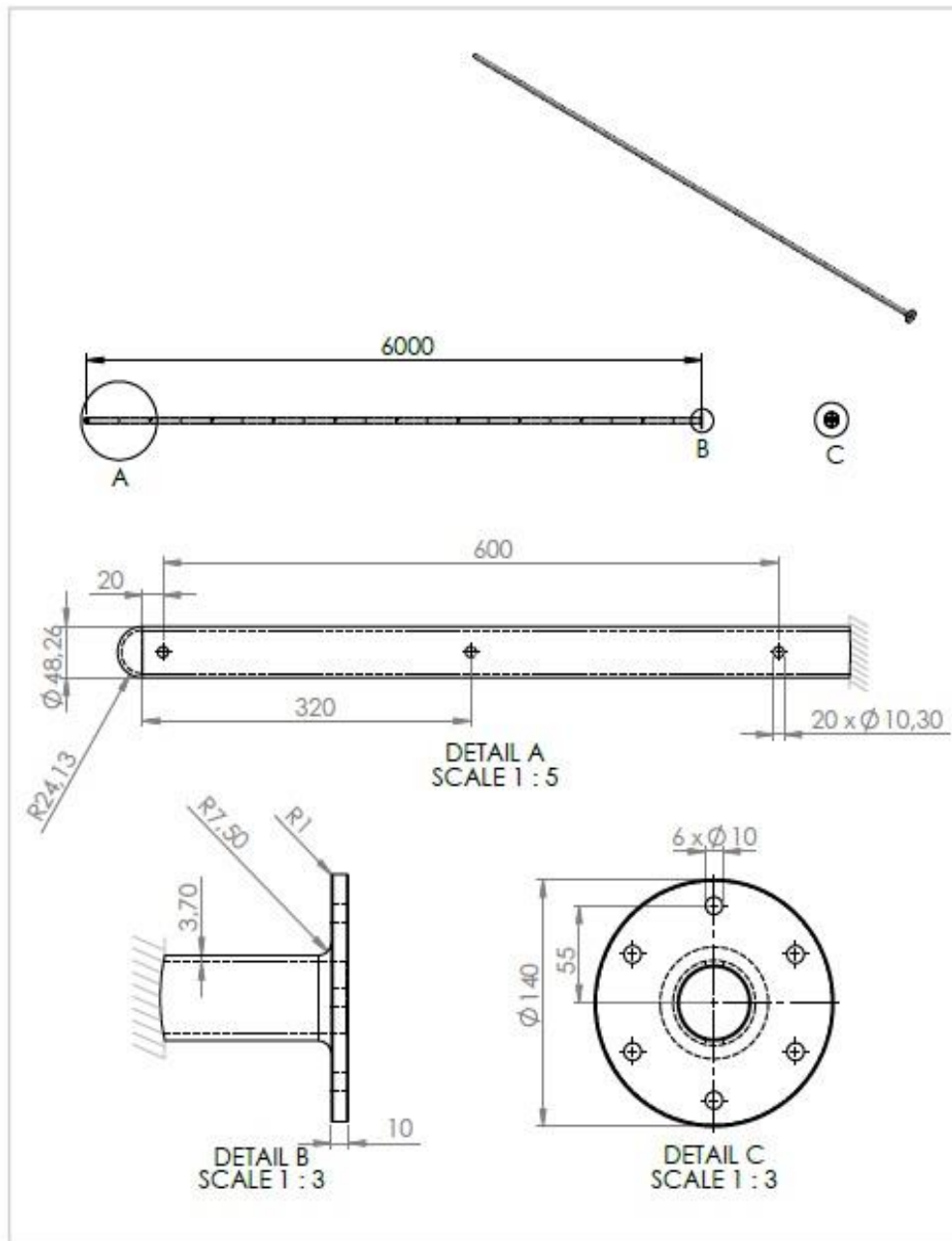
02	01	Flat fan nozzle	S303		
NO	JUMLAH	NAMA	BAHAN	NORMALISASI	KETERANGAN
	Kekasaran	Toleransi Ukuran			Toleransi bentuk dan posisi
	Skala	:	Digambar : Hafiz Reza Pratama		Peringatan
	Satuan Ukuran	:	NIM : 5212414062		
	Tanggal	:	Dilihat : Dony Hidayat Al-Janani		
Teknik Mesin UNNES			Sootblower component		No.02
					A4

b. Desain *full cone nozzle*



02	01	Full cone nozzle	S303		
NO	JUMLAH	NAMA	BAHAN	NORMALISASI	KETERANGAN
	Kekasaran	Toleransi Ukuran			Toleransi bentuk dan posisi
	Skala :	Digambar : Hafiz Reza Pratama		Peringatan	
	Satuan Ukuran :	NIM : 5212414062			
	Tanggal :	Dilihat : Dony Hidayat Al-Janani			
Teknik Mesin UNNES			Sootblower Component		No.02
					A4

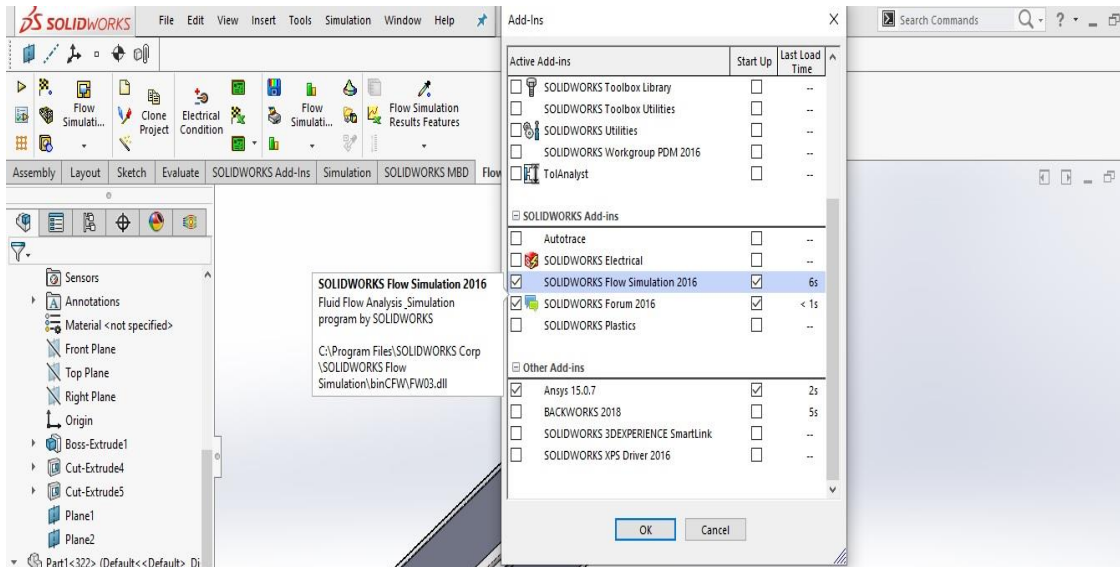
c. Desain pipa *lancetube*



02	01	Lance Tube 3.7	ASTMA213 T92			
NO	JUMLAH	NAMA	BAHAN	NORMALISASI	KETERANGAN	
	Kekasaran	Toleransi Ukuran			Toleransi bentuk dan posisi	
	Skala	: 1: 50	Digambar	: Hafiz Reza Pratama	Peringatan	
	Satuan Ukuran	: mm	NIM	: 5212414062		
	Tanggal	: 28-11-19	Dilihat	: Dony Hidayat Al-Janan		
Teknik Mesin UNNES			Sootblower		No.01	A4

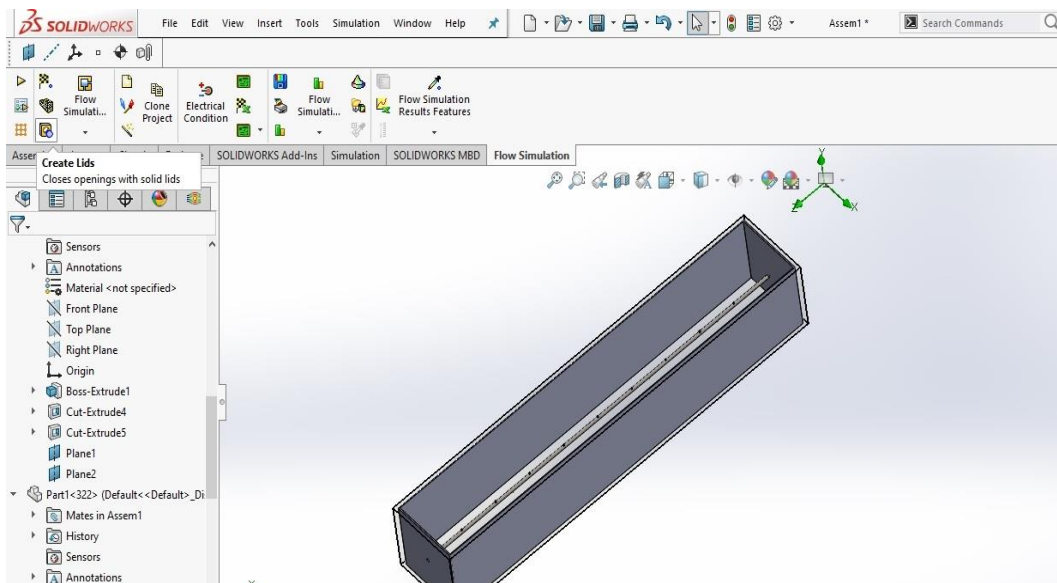
Lampiran 2. Proses simulasi

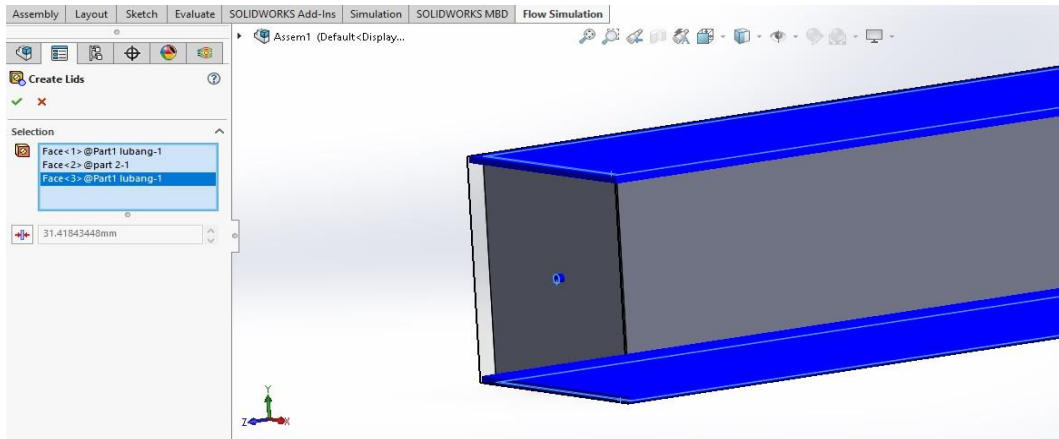
a. Insert solidwork flow simulation



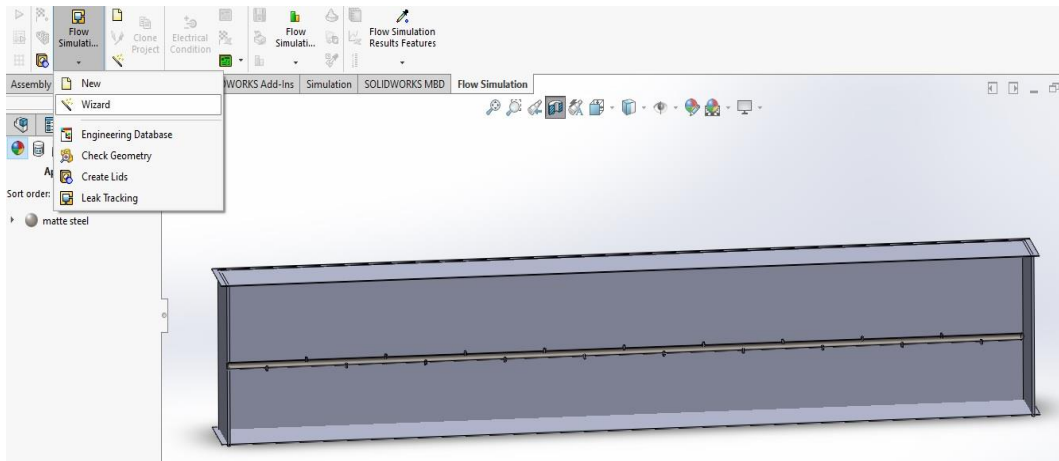
b. Memberi Lids pada desain keseluruhan.

Hal ini dimaksudkan untuk menutupi semua lubang yang ada dan sebagai pembatas desain agar hasil simulasi menjadi seperti yang diinginkan

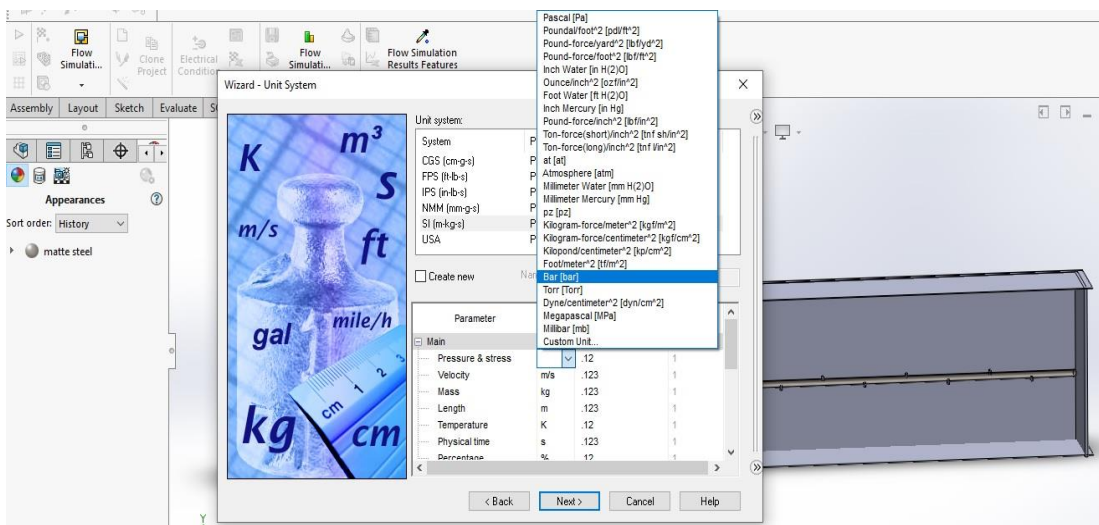




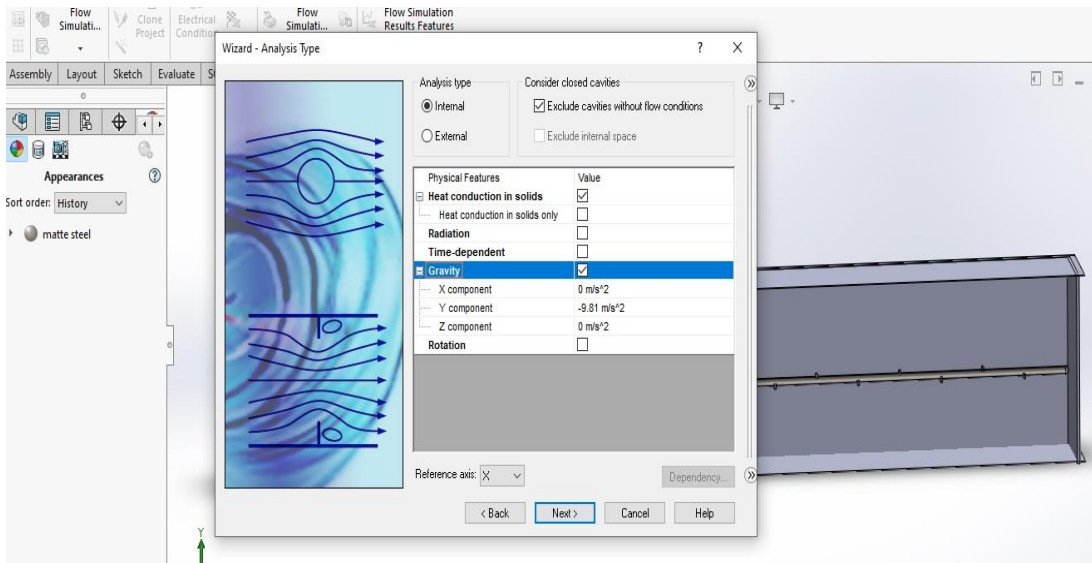
c. Insert wizard



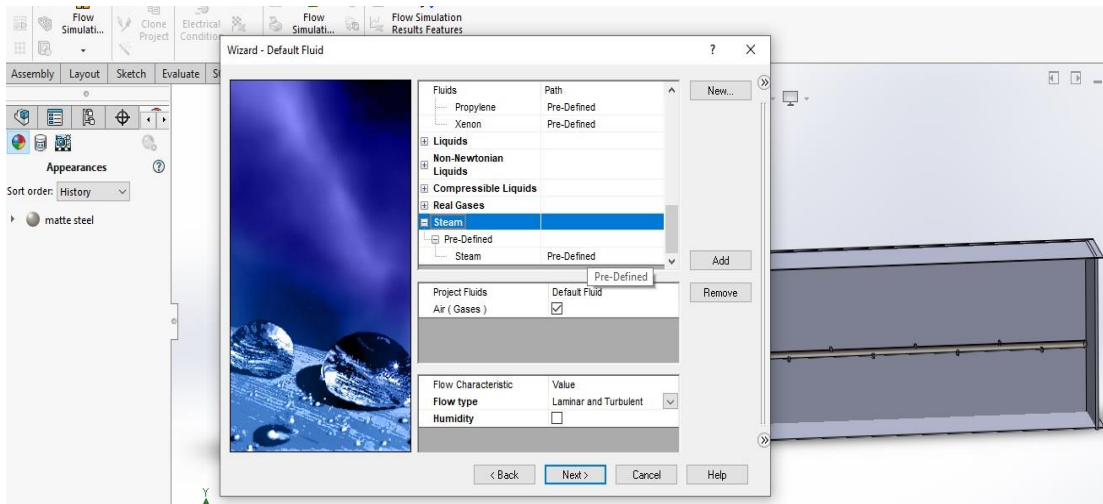
d. Memilih satuan unit



e. Memilih tipe analisis



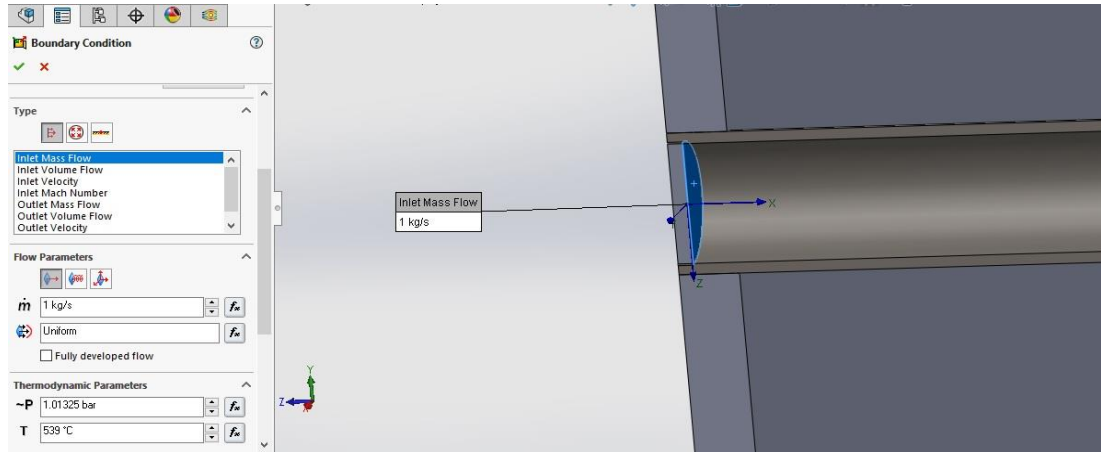
f. Memilih fluida yang akan digunakan



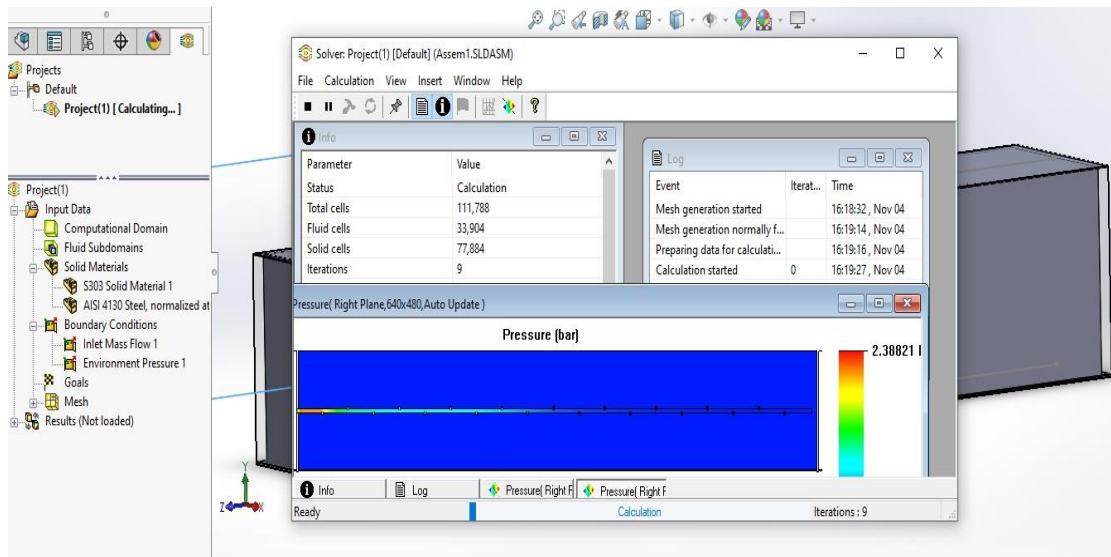
g. Memilih material bahan



h. Masukan boundary condition



i. Run simulation



Lampiran 4 Data lengkap hasil simulasi

Dibawah ini akan disajikan seluruh data yang diambil dari semua hasil simulasi dalam bentuk tabel.

4.1.1 HI-PIP nozzle

a. *full cone nozzle* (400 mm)

Tabel 4.1 jarak antar nozzle 400 mm dengan *full cone nozzle* (HI-PIP nozzle)

Nomor nozzle		Jarak antar nozzle 400 mm									
		Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
		Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	outlet	inlet	Outlet	Inlet	Outlet
1	Atas	15,7	0,5	46,03	110,67	300,9	362,2	37,0	1,0	0,9999	0,3308
	Bawah	15,4	0,5	42,13	114,12	300,0	358,6	36,2	1,1	0,9999	0,3476
2	Atas	15,3	0,5	49,54	130,59	299,4	323,2	36,0	1,1	0,9999	0,5036
	Bawah	15,3	0,5	45,95	184,84	299,6	326,9	36,0	1,2	0,9999	0,4911
3	Atas	15,3	0,5	44,80	161,10	299,4	333,4	36,1	1,1	0,9999	0,4541
	Bawah	15,3	0,5	37,18	154,99	299,8	335,1	36,1	1,1	0,9999	0,4658
4	Atas	15,6	0,5	48,67	153,93	300,1	343,2	36,7	1,0	0,9999	0,3826
	Bawah	15,3	0,5	36,95	160,69	299,8	340,2	36,1	1,1	0,9999	0,3957
5	Atas	15,3	0,5	39,09	154,46	299,2	341,0	35,9	1,1	0,9999	0,4323
	Bawah	15,2	0,5	36,84	164,88	299,3	335,1	35,9	1,2	0,9999	0,4666
6	Atas	15,4	0,5	38,31	190,52	299,4	329,9	36,1	1,1	0,9999	0,4596
	Bawah	15,3	0,5	37,10	109,74	299,5	319,2	36,0	1,2	0,9999	0,5447
7	Atas	15,2	0,5	32,31	214,37	298,8	315,7	35,8	1,1	0,9999	0,4814
	Bawah	15,3	0,5	37,65	37,75	299,7	338,8	36,1	1,0	0,9999	0,4323
8	Atas	15,2	0,5	35,75	178,74	299,2	322,4	35,8	1,1	0,9999	0,4996
	Bawah	15,2	0,5	31,22	169,22	299,7	325,3	35,9	1,1	0,9999	0,4979
9	Atas	15,5	0,5	36,14	145,85	299,8	358,8	36,4	1,0	0,9999	0,2976
	Bawah	15,2	0,5	32,47	180,43	299,4	321,8	35,9	1,2	0,9999	0,5236
10	Atas	15,2	0,5	28,37	131,24	299,4	345,1	35,8	1,0	0,9999	0,3938
	Bawah	15,4	0,5	35,70	147,18	300,0	336,9	36,2	1,1	0,9999	0,4297
11	Atas	15,2	0,5	27,35	155,45	299,6	343,1	35,8	1,1	0,9999	0,4187
	Bawah	15,2	0,5	28,16	171,26	299,3	334,8	35,7	1,1	0,9999	0,4616
12	Atas	15,1	0,5	26,48	169,44	299,0	340,2	35,6	1,1	0,9999	0,4461
	Bawah	15,1	0,5	30,62	158,56	299,1	334,6	35,6	1,2	0,9999	0,4783
13	Atas	15,1	0,5	24,62	172,41	298,9	345,3	35,6	1,1	0,9999	0,4042
	Bawah	15,2	0,5	24,69	169,77	299,2	342,9	35,7	1,1	0,9999	0,4243
14	Atas	15,1	0,5	22,11	107,21	298,9	365,0	35,6	1,0	0,9999	0,3174
	Bawah	15,2	0,5	23,50	116,39	299,0	363,2	35,7	1,0	0,9999	0,3202
15	Atas	15,2	0,5	24,55	104,01	299,1	336,9	35,9	1,1	0,9999	0,4791
	Bawah	15,1	0,5	25,70	173,97	298,6	331,9	35,6	1,1	0,9999	0,4887
16	Atas	15,3	0,5	22,67	146,81	299,1	344,4	35,9	1,1	0,9999	0,4288
	Bawah	15,1	0,5	22,10	157,19	298,7	331,9	35,6	1,1	0,9999	0,4947
17	Atas	15,2	0,5	27,90	138,57	298,6	338,9	35,8	1,1	0,9999	0,4294
	Bawah	15,2	0,5	21,99	197,03	297,6	322,4	35,6	1,1	0,9999	0,4763

Nomor nozzle		Jarak antar nozzle 400 mm									
		Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
		Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	outlet	inlet	Outlet	Inlet	Outlet
18	Atas	15,2	0,5	16,71	147,18	297,8	350,8	35,6	1,1	0,9999	0,4194
	Bawah	15,2	0,5	19,31	148,02	298,2	341,6	35,7	1,1	0,9999	0,4658
19	Atas	15,2	0,5	18,08	175,61	298,0	337,7	35,8	1,1	0,9999	0,4678
	Bawah	15,2	0,6	17,22	126,33	297,4	323,7	35,6	1,2	0,9999	0,5157
20	Atas	15,1	0,5	17,44	149,95	298,4	346,7	35,6	1,1	0,9999	0,3972
	Bawah	15,2	0,5	23,92	42,96	298,8	342,6	35,8	1,1	0,9999	0,4662
21	Atas	15,0	0,5	13,86	159,12	303,0	352,5	35,6	1,1	0,9999	0,4176
	Bawah	15,0	0,5	11,47	159,77	303,3	348,2	35,6	1,1	0,9999	0,4451
22	Atas	14,4	0,5	17,17	177,79	318,7	368,0	35,5	1,1	0,9999	0,3933
	Bawah	14,5	0,5	14,34	166,24	316,9	360,7	35,6	1,1	0,9999	0,4389
23	Atas	13,4	0,5	16,25	112,23	356,0	404,3	35,8	1,0	0,9999	0,2933
	Bawah	13,2	0,5	12,30	135,08	360,2	401,1	35,6	1,1	0,9999	0,3194
24	Atas	12,3	0,5	10,99	20,40	404,0	458,2	35,7	1,0	0,9998	0,0654
	Bawah	12,1	0,5	9,24	23,41	409,7	459,0	35,6	1,0	0,9998	0,0598
25	Atas	10,0	0,4	0,14	187,97	477,0	445,0	32,8	1,1	0,9334	0,3908
	Bawah	10,3	0,5	0,11	118,66	462,8	447,9	33,1	1,1	0,932	0,3752
26	Atas	9,2	0,4	12,91	236,87	597,5	496,6	35,7	1,1	0,9965	0,4063
	Bawah	9,5	0,4	10,02	225,29	578,5	491,9	36,0	1,2	0,9974	0,4374
27	Atas	8,4	0,4	20,80	215,64	708,7	556,2	35,7	1,0	0,8924	0,3204
	Bawah	8,2	0,4	26,31	307,94	722,1	563,2	35,7	1,1	0,9028	0,4077
28	Atas	16,7	0,6	4,18	179,49	318,6	364,1	35,8	1,1	0,5006	0,2324
	Bawah	16,6	0,6	6,76	175,46	320,5	362,8	35,7	1,2	0,5028	0,2423
29	Atas	16,7	0,5	4,90	157,95	318,2	371,7	35,7	1,1	0,5	0,2158
	Bawah	16,7	0,6	6,93	168,22	318,2	369,6	35,7	1,1	0,5	0,2211

b. Full cone nozzle (500 mm)

Tabel 4.2 jarak antar nozzle 500 mm dengan full cone nozzle (HI-PIP nozzle)

Nomor nozzle		Jarak antar nozzle 500 mm									
		Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
		Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	Outlet	inlet	Outlet	Inlet	Outlet
1	Atas	21,3	0,48	30,58	111,73	300,06	394,86	48,0	1,0	0,9999	0,1584
	Bawah	21,3	0,57	31,39	199,28	299,88	324,88	47,9	1,2	0,9999	0,4578
2	Atas	21,6	0,48	34,73	122,10	300,78	384,12	48,6	1,0	0,9999	0,1971
	Bawah	21,3	0,63	32,91	146,00	299,8	309,51	47,9	1,3	0,9999	0,5244
3	Atas	19,5	0,58	0,26	158,45	302,66	335,15	44,0	1,2	0,928	0,4142
	Bawah	19,5	0,57	0,28	125,13	300,8	317,59	43,7	1,2	0,9234	0,4949
4	Atas	21,3	0,49	26,72	132,38	299,05	388,64	47,8	1,0	0,9999	0,1746
	Bawah	21,2	0,57	25,20	193,02	299,34	326,41	47,7	1,2	0,9999	0,4601
5	Atas	21,4	0,48	26,53	129,71	299,5	386,57	48,0	1,0	0,9999	0,1784
	Bawah	21,2	0,58	25,07	199,58	299,19	312,58	47,7	1,2	0,9999	0,5056
6	Atas	21,2	0,49	23,32	131,12	299,16	349,69	47,6	1,0	0,9999	0,3298
	Bawah	21,4	0,50	22,31	153,39	299,68	336,01	48,1	1,1	0,9999	0,3783
7	Atas	21,4	0,50	29,28	142,15	299,36	330,39	48,0	1,1	0,9999	0,3907

Nomor nozzle		Jarak antar nozzle 200 mm									
		Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
		Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	Outlet	inlet	Outlet	Inlet	Outlet
8	Bawah	21,2	0,55	24,70	304,55	298,89	273,01	47,6	1,1	0,9999	0,5745
	Atas	21,5	0,50	27,36	158,98	299,81	328,58	48,4	1,1	0,9999	0,3874
9	Bawah	21,3	0,50	20,27	158,71	299,39	331,7	47,9	1,1	0,9999	0,3897
	Atas	21,2	0,49	21,35	124,90	298,46	361,79	47,5	1,0	0,9999	0,2354
10	Bawah	21,2	0,64	18,80	171,24	299,02	307,77	47,6	1,3	0,9999	0,4935
	Atas	21,4	0,48	23,05	111,66	298,56	368,37	47,9	1,0	0,9999	0,212
11	Bawah	21,1	0,61	19,34	183,12	297,83	319,41	47,3	1,3	0,9999	0,4373
	Atas	21,1	0,57	18,60	128,09	298,14	331,9	47,4	1,2	0,9999	0,4363
12	Bawah	21,2	0,48	16,29	97,59	297,38	365,14	47,4	1,0	0,9999	0,227
	Atas	21,2	0,58	15,75	206,22	297,75	317,04	47,4	1,2	0,9999	0,4957
13	Bawah	21,3	0,48	25,66	97,41	297,85	400,03	47,8	1,0	0,9999	0,1538
	Atas	21,2	0,57	27,90	196,27	297,33	320,06	47,4	1,2	0,9999	0,4794
14	Bawah	21,2	0,48	13,81	120,40	296,96	379,39	47,3	1,0	0,9999	0,1942
	Atas	21,2	0,55	11,27	192,26	297,55	308,17	47,4	1,2	0,9999	0,4937
15	Bawah	21,2	0,48	22,53	156,24	297,21	331,93	47,4	1,0	0,9999	0,4134
	Atas	21,2	0,49	18,64	169,10	296,8	324,19	47,3	1,1	0,9999	0,4143
16	Bawah	21,0	0,49	11,47	158,14	300,37	338,47	47,4	1,1	0,9999	0,4059
	Atas	21,0	0,55	11,76	85,26	299,69	292,88	47,3	1,2	0,9999	0,6222
17	Bawah	19,9	0,45	8,87	64,23	319,79	380,56	47,4	1,0	0,9999	0,3277
	Atas	19,6	0,45	8,85	80,34	324,46	387,58	47,4	1,0	0,9999	0,2833
18	Bawah	18,1	0,48	10,15	185,00	361,03	371,59	47,3	1,1	0,9999	0,4733
	Atas	18,1	0,52	10,46	119,87	360,01	365,51	47,3	1,2	0,9999	0,5211
19	Bawah	15,4	0,47	10,30	246,31	452,4	425,34	47,7	1,2	0,9999	0,4691
	Atas	15,5	0,47	14,21	216,76	444,26	428,28	47,3	1,2	0,9999	0,479
20	Bawah	11,8	0,41	0,13	209,01	562,74	489,37	43,5	1,1	0,9325	0,409
	Atas	12,3	0,43	0,06	139,51	547,75	492,67	44,0	1,2	0,9318	0,4119
21	Bawah	9,1	0,35	15,31	263,22	888,57	652,09	47,5	1,1	0,9835	0,4132
	Atas	9,2	0,36	28,28	307,93	876,69	663,44	47,5	1,2	0,9844	0,4648
22	Bawah	10,0	0,37	18,71	287,10	867,03	641,4	47,7	1,1	0,8034	0,3376
	Atas	9,9	0,38	28,59	311,66	869,83	650,47	47,5	1,3	0,7975	0,3846
23	Bawah	22,3	0,51	10,81	141,62	323,5	379,11	47,5	1,1	0,5	0,1976
	Atas	22,3	0,51	9,57	142,80	323,92	378,28	47,7	1,1	0,5	0,2017

c. Full cone nozzle (600 mm)

Tabel 4.3 jarak antar nozzle 600 mm dengan full cone nozzle (HI-PIP nozzle)

Nomor nozzle		Jarak antar nozzle 600 mm									
		Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
		Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	outlet	inlet	Outlet	Inlet	Outlet
1	Bawah	25,1	0,49	27,26	117,58	299,77	387,63	54,9	1,00	0,9999	0,1640
	Atas	25,1	0,60	24,59	209,92	299,86	310,92	54,9	1,24	0,9999	0,4857
2	Bawah	25,3	0,49	24,33	123,91	300,06	387,47	55,2	1,00	0,9999	0,1639
	Atas	25,2	0,60	24,98	205,64	299,80	310,11	55,0	1,25	0,9999	0,4981
3	Bawah	25,3	0,48	23,35	144,61	299,87	384,63	55,2	0,99	0,9999	0,1750
	Atas	25,1	0,59	24,23	236,79	299,53	306,99	54,9	1,22	0,9999	0,4787

Nomor nozzle		Jarak antar nozzle 300 mm									
		Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
		Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	outlet	inlet	Outlet	Inlet	Outlet
4	Atas	25,3	0,48	25,61	133,27	299,82	381,24	55,2	0,99	0,9999	0,1860
	Bawah	25,1	0,66	24,14	140,28	299,35	301,49	54,9	1,36	0,9999	0,5480
5	Atas	25,1	0,48	18,43	68,56	299,88	389,55	54,9	1,01	0,9999	0,1648
	Bawah	25,1	0,51	21,95	158,28	299,91	333,60	54,9	1,05	0,9999	0,3582
6	Atas	25,4	0,49	27,02	119,37	300,32	380,37	55,4	1,00	0,9999	0,1820
	Bawah	25,1	0,63	23,56	213,25	299,65	313,71	54,8	1,31	0,1820	0,4891
7	Atas	25,3	0,49	14,89	82,29	300,01	360,51	55,2	1,01	0,9999	0,2279
	Bawah	25,2	0,53	24,08	210,99	300,00	292,73	55,1	1,08	0,9999	0,4761
8	Atas	25,0	0,50	19,62	181,31	298,86	332,14	54,5	0,99	0,9999	0,2587
	Bawah	25,0	0,63	19,31	200,12	299,16	286,41	54,6	1,29	0,9999	0,5536
9	Atas	25,2	0,50	28,51	134,70	299,40	320,98	54,9	1,05	0,9999	0,3821
	Bawah	24,6	0,51	68,81	54,06	293,22	314,23	53,5	0,99	0,9999	0,3496
10	Atas	25,0	0,48	11,97	88,16	298,64	251,55	54,6	0,98	0,9999	0,2807
	Bawah	25,0	0,61	15,02	218,05	299,03	288,94	54,6	1,26	0,9999	0,5646
11	Atas	24,9	0,49	9,96	138,03	300,33	329,32	54,6	1,05	0,9999	0,4215
	Bawah	25,1	0,50	12,31	188,42	299,87	304,43	54,8	1,07	0,9999	0,5225
12	Atas	24,1	0,51	10,31	171,24	311,10	342,59	54,6	1,13	0,9999	0,4921
	Bawah	24,1	0,55	10,32	196,35	310,16	330,05	54,5	1,21	0,9999	0,5247
13	Atas	22,0	0,49	21,92	182,08	350,89	369,86	55,2	1,12	0,9999	0,4605
	Bawah	21,8	0,51	15,24	200,59	349,67	360,07	54,6	1,18	0,9999	0,5001
14	Atas	18,2	0,46	9,90	203,14	440,81	418,44	54,4	1,14	0,9999	0,4634
	Bawah	18,8	0,48	10,23	218,57	422,69	400,92	54,4	1,19	0,9999	0,4959
15	Atas	15,2	0,42	10,10	218,69	553,05	484,71	54,5	1,13	0,9999	0,4424
	Bawah	15,6	0,46	12,50	142,81	533,33	477,12	54,3	1,27	0,9999	0,4819
16	Atas	12,4	0,42	9,52	36,65	711,64	506,90	54,5	1,00	0,9999	0,1047
	Bawah	12,9	0,44	8,41	26,65	680,72	490,25	54,5	1,00	0,9998	0,0733
17	Atas	10,5	0,37	35,67	155,25	891,68	623,45	55,1	1,07	0,9999	0,2976
	Bawah	10,3	0,38	43,89	350,12	899,12	654,08	54,3	1,29	0,9909	0,4962
18	Atas	12,8	0,37	17,92	349,48	788,79	587,65	54,7	1,09	0,9912	0,3450
	Bawah	12,5	0,34	12,64	303,81	825,21	642,45	54,9	1,07	0,7409	0,3266
19	Atas	25,5	0,69	9,91	193,04	327,18	352,74	54,4	1,35	0,7722	0,2372
	Bawah	25,5	0,61	5,44	99,25	327,86	382,84	54,5	1,27	0,5000	0,1975

c. Flat fan nozzle (200 mm)

Tabel 4.4 jarak antar nozzle 400 mm dengan flat fan nozzle (HI-PIP nozzle)

Nomor nozzle		Jarak antar nozzle 400 mm									
		Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
		Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	outlet	inlet	Outlet	Inlet	Outlet
1	Atas	2,61	0,42	226,08	172,98	292,1	335,3	6,71	1,00	0,9999	0,6205
	Bawah	2,59	0,42	220,56	179,02	292,8	336,9	6,69	1,00	0,9999	0,6015
2	Atas	2,52	0,45	229,75	196,84	292,9	344,5	6,48	1,05	0,9999	0,5655
	Bawah	2,52	0,45	226,65	207,01	293,0	343,9	6,48	1,05	0,9999	0,5537
3	Atas	2,46	0,44	223,30	176,97	292,0	350,7	6,31	1,03	0,9999	0,5502
	Bawah	2,44	0,45	214,98	177,65	293,3	354,1	6,29	1,03	0,9999	0,5168

Nomor nozzle		Jarak antar nozzle 400 mm									
		Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
		Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	outlet	inlet	Outlet	Inlet	Outlet
4	Atas	2,33	0,42	216,26	207,52	292,2	333,7	6,01	1,00	0,9999	0,6078
	Bawah	2,32	0,42	215,76	208,22	292,3	333,5	5,99	1,00	0,9999	0,6021
5	Atas	2,19	0,45	222,36	194,16	293,7	364,0	5,65	1,00	0,9999	0,4326
	Bawah	2,19	0,44	221,91	192,60	293,6	363,8	5,64	1,00	0,9999	0,4331
6	Atas	2,12	0,45	215,01	183,35	293,3	362,4	5,48	1,03	0,9999	0,5015
	Bawah	2,12	0,45	211,24	184,10	293,5	361,2	5,46	1,03	0,9999	0,5024
7	Atas	2,01	0,42	199,74	196,06	293,8	337,7	5,21	1,00	0,9999	0,5839
	Bawah	2,01	0,43	202,50	190,40	293,4	340,3	5,20	1,00	0,9999	0,5668
8	Atas	1,88	0,43	224,58	118,06	293,7	371,7	4,86	1,00	0,9999	0,4595
	Bawah	1,87	0,43	217,26	122,94	295,0	373,2	4,84	1,00	0,9999	0,4541
9	Atas	1,83	0,44	212,29	169,47	292,7	363,8	4,73	1,02	0,9999	0,4925
	Bawah	1,83	0,44	209,74	175,77	293,0	363,1	4,72	1,02	0,9999	0,4898
10	Atas	1,76	0,42	205,00	170,85	293,5	347,7	4,55	1,00	0,9999	0,5431
	Bawah	1,75	0,43	194,22	168,81	294,9	348,4	4,55	1,00	0,9999	0,5368
11	Atas	1,63	0,44	199,68	95,82	296,0	386,1	4,24	1,00	0,9999	0,3884
	Bawah	1,63	0,44	203,44	99,66	295,6	384,5	4,24	1,00	0,9999	0,4048
12	Atas	1,62	0,44	198,97	162,85	295,1	365,9	4,22	1,01	0,9999	0,4926
	Bawah	1,62	0,44	196,88	159,22	295,1	362,8	4,20	1,02	0,9999	0,509
13	Atas	1,57	0,44	196,25	137,60	295,5	376,1	4,09	1,01	0,9999	0,4389
	Bawah	1,57	0,44	182,93	138,88	296,9	373,0	4,08	1,01	0,9999	0,4502
14	Atas	1,47	0,42	182,41	98,80	297,8	358,5	3,83	1,00	0,9999	0,515
	Bawah	1,47	0,42	185,88	135,48	297,1	353,8	3,85	1,00	0,9999	0,5256
15	Atas	1,45	0,44	182,33	156,69	297,4	376,2	3,79	1,00	0,9999	0,4026
	Bawah	1,45	0,44	184,92	158,71	297,2	377,0	3,78	0,99	0,9999	0,3992
16	Atas	1,44	0,44	173,38	126,24	298,3	376,1	3,77	1,00	0,9999	0,4404
	Bawah	1,44	0,44	166,15	122,39	299,2	376,5	3,77	1,01	0,9999	0,444
17	Atas	1,39	0,42	159,56	139,56	300,2	351,2	3,66	1,00	0,9999	0,5414
	Bawah	1,39	0,42	157,66	141,03	300,5	348,9	3,65	1,00	0,9999	0,5553
18	Atas	1,36	0,44	155,76	126,03	301,7	378,1	3,59	1,00	0,9999	0,4053
	Bawah	1,36	0,44	157,75	129,06	301,4	377,1	3,58	1,00	0,9999	0,4108
19	Atas	1,36	0,44	142,07	150,62	302,1	368,1	3,59	1,01	0,9999	0,4823
	Bawah	1,36	0,44	144,77	151,90	301,8	365,7	3,59	1,01	0,9999	0,4918
20	Atas	1,31	0,42	127,71	103,01	304,6	353,1	3,46	1,00	0,9999	0,5534
	Bawah	1,3	0,42	128,34	107,77	304,5	352,0	3,46	1,00	0,9999	0,5597
21	Atas	1,29	0,43	130,89	91,29	305,4	370,5	3,41	1,00	0,9999	0,484
	Bawah	1,28	0,43	128,25	95,46	305,6	370,6	3,40	1,00	0,9999	0,4834
22	Atas	1,3	0,43	122,59	151,81	304,7	361,8	3,43	1,01	0,9999	0,5187
	Bawah	1,29	0,43	123,50	159,22	304,6	360,8	3,43	1,01	0,9999	0,5163
23	Atas	1,26	0,42	108,51	112,12	306,3	355,3	3,34	1,00	0,9999	0,5472
	Bawah	1,25	0,42	112,91	114,35	306,3	353,8	3,33	1,00	0,9999	0,5564
24	Atas	1,25	0,43	103,24	91,06	308,1	376,3	3,32	1,00	0,9999	0,4461
	Bawah	1,24	0,43	103,61	90,54	308,2	373,6	3,32	1,00	0,9999	0,4635
25	Atas	1,26	0,43	98,61	149,70	307,7	363,6	3,36	1,01	0,9999	0,514
	Bawah	1,26	0,43	102,25	153,34	307,5	360,1	3,35	1,02	0,9999	0,5301
26	Atas	1,24	0,43	83,83	104,91	309,6	373,6	3,32	1,00	0,9999	0,4745
	Bawah	1,24	0,43	80,10	104,10	309,7	369,9	3,32	1,00	0,9999	0,4941
27	Atas	1,23	0,42	81,87	111,67	311,0	355,6	3,29	1,00	0,9999	0,5529
	Bawah	1,22	0,42	86,72	113,40	310,8	354,9	3,27	1,00	0,9999	0,5594
28	Atas	1,24	0,44	81,75	161,38	310,8	374,6	3,33	1,00	0,9999	0,4198

Nomor nozzle		Jarak antar nozzle 400 mm									
		Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
		Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Inlet	outlet	inlet	Outlet	Inlet	Outlet
	Bawah	1,24	0,44	86,72	164,42	310,7	372,9	3,33	1,00	0,9999	0,4296
29	Atas	1,23	0,43	67,90	105,26	315,4	373,2	3,32	1,00	0,9998	0,4862
	Bawah	1,23	0,43	68,63	106,48	315,4	377,7	3,32	1,00	0,9999	0,4558

d. Flat fan nozzle (500 mm)

Tabel 4.5 jarak antar nozzle 500 mm dengan flat fan nozzle (HI-PIP nozzle)

Nomor nozzle		Jarak antar nozzle 500 mm									
		Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
		Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	outlet	inlet	Outlet	Inlet	Outlet
1	Atas	2,82	0,45	216,98	194,91	298,23	352,66	7,29	1,05	0,9999	0,5332
	Bawah	2,81	0,45	209,75	193,21	298,63	351,72	7,28	1,04	0,9999	0,5282
2	Atas	2,65	0,45	211,55	224,93	298,93	345,79	6,90	1,06	0,9999	0,5585
	Bawah	2,65	0,46	207,01	221,83	298,67	344,87	6,89	1,07	0,9999	0,5555
3	Atas	2,54	0,46	206,22	207,04	299,98	352,19	6,63	1,07	0,9999	0,5283
	Bawah	2,54	0,46	206,73	216,13	299,3	351,29	6,61	1,06	0,9999	0,5244
4	Atas	2,43	0,45	200,90	220,20	301,26	357,81	6,36	1,00	0,9999	0,4563
	Bawah	2,43	0,44	202,44	214,44	300,74	357,08	6,35	1,00	0,9999	0,4637
5	Atas	2,3	0,43	206,50	142,87	301,07	368,21	6,00	1,01	0,9999	0,4825
	Bawah	2,29	0,44	200,61	148,17	301,62	370,33	5,98	1,01	0,9999	0,4759
6	Atas	2,16	0,42	202,20	138,16	298,53	355,61	5,64	1,00	0,9999	0,5304
	Bawah	2,15	0,42	196,96	141,89	299,57	356,41	5,64	1,00	0,9999	0,519
7	Atas	2,12	0,42	186,64	211,10	300,35	337,21	5,57	1,00	0,9999	0,6013
	Bawah	2,13	0,42	191,86	221,27	299,25	333,07	5,56	1,00	0,9999	0,6261
8	Atas	2,08	0,42	191,67	197,38	300,06	344,99	5,43	1,00	0,9999	0,5585
	Bawah	2,07	0,42	184,17	198,91	300,93	343,83	5,42	1,00	0,9999	0,5672
9	Atas	2,03	0,44	187,45	168,52	301,41	371,57	5,33	1,02	0,9999	0,4635
	Bawah	2,02	0,45	174,98	174,52	302,72	370,16	5,31	1,02	0,9999	0,4606
10	Atas	1,98	0,45	180,56	183,40	302,37	364,68	5,21	1,03	0,9999	0,5006
	Bawah	1,98	0,45	169,64	190,38	303,2	365,89	5,21	1,03	0,9999	0,4792
11	Atas	1,94	0,45	161,03	196,42	304,58	364,27	5,12	1,03	0,9999	0,4874
	Bawah	1,94	0,45	161,39	191,72	304,58	363,39	5,11	1,04	0,9999	0,5005
12	Atas	1,9	0,44	150,84	207,78	305,71	368,07	5,04	1,00	0,9999	0,4191
	Bawah	1,9	0,44	151,49	212,75	305,58	367,84	5,04	0,99	0,9999	0,4209
13	Atas	1,85	0,44	137,17	122,94	308,06	380,17	4,92	1,01	0,9999	0,4362
	Bawah	1,85	0,44	138,93	130,34	307,75	377,37	4,91	1,01	0,9999	0,4428
14	Atas	1,81	0,44	136,86	126,88	308,28	381,58	4,82	1,01	0,9999	0,4306
	Bawah	1,8	0,44	134,98	127,09	308,58	384,93	4,80	1,01	0,9999	0,4103
15	Atas	1,77	0,42	125,87	123,19	308,68	362,69	4,71	1,00	0,9999	0,4945
	Bawah	1,76	0,42	130,26	116,27	308,49	362,92	4,70	1,00	0,9999	0,4993
16	Atas	1,74	0,42	119,44	129,40	309,4	359,33	4,64	1,00	0,9999	0,5143
	Bawah	1,73	0,42	126,73	135,99	308,97	358,99	4,62	1,00	0,9999	0,5092
17	Atas	1,73	0,44	114,42	123,90	309,78	383,57	4,60	1,01	0,9999	0,4225
	Bawah	1,72	0,44	121,05	130,45	309,06	384,88	4,58	1,01	0,9999	0,407

Nomor nozzle		Jarak antar nozzle 500 mm									
		Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
		Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	outlet	inlet	Outlet	Inlet	Outlet
18	Atas	1,72	0,44	106,61	137,59	310,63	381,89	4,59	1,01	0,9999	0,4335
	Bawah	1,72	0,44	107,87	138,82	310,37	379,72	4,58	1,01	0,9999	0,4427
19	Atas	1,73	0,44	106,79	188,30	310,74	366,4	4,61	1,03	0,9999	0,5027
	Bawah	1,73	0,45	105,39	193,29	310,62	368,37	4,61	1,03	0,9999	0,4884
20	Atas	1,73	0,45	93,00	193,27	312,88	365,65	4,63	1,03	0,9999	0,4892
	Bawah	1,72	0,45	100,22	192,43	312,62	363,2	4,62	1,04	0,9999	0,5127
21	Atas	1,71	0,44	88,65	196,35	314,37	369,05	4,60	1,00	0,9999	0,4316
	Bawah	1,71	0,44	90,87	201,71	314,08	366,76	4,60	1,00	0,9999	0,4405
22	Atas	1,68	0,43	74,04	130,75	317,52	375,17	4,56	1,01	0,9999	0,461
	Bawah	1,68	0,43	76,98	134,08	317,33	372,08	4,55	1,01	0,9999	0,4786
23	Atas	1,64	0,41	83,38	152,20	324,89	359,32	4,49	1,00	0,9875	0,5629
	Bawah	1,64	0,41	88,30	158,48	324,24	357,59	4,49	1,00	0,9906	0,5698

e. Flat fan nozzle (600 mm)

Tabel 4.6 jarak antar nozzle 600 mm dengan flat fan nozzle (HI-PIP nozzle)

Nomor nozzle		Jarak antar nozzle 600 mm									
		Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
		Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	Outlet	Inlet	Outlet
1	Atas	3,05	0,44	198,15	161,07	296,77	361,36	7,88	1,02	0,9999	0,4790
	Bawah	3,05	0,44	195,35	165,51	297,20	360,20	7,89	1,02	0,9999	0,4944
2	Atas	3,04	0,47	193,59	202,14	296,31	354,21	7,83	1,07	0,9999	0,5001
	Bawah	3,02	0,47	190,84	201,15	296,42	354,92	7,79	1,07	0,9999	0,4981
3	Atas	2,88	0,44	195,49	172,13	297,66	356,45	7,46	1,02	0,9999	0,5103
	Bawah	2,88	0,45	200,47	176,51	297,01	358,35	7,44	1,03	0,9999	0,4924
4	Atas	2,85	0,47	189,54	233,18	297,13	344,12	7,37	1,09	0,9999	0,5347
	Bawah	2,84	0,47	173,68	220,59	298,53	345,01	7,36	1,08	0,9999	0,5483
5	Atas	2,64	0,42	184,51	176,74	296,30	343,85	6,85	0,99	0,9999	0,5477
	Bawah	2,63	0,43	184,94	174,36	296,35	346,64	6,83	1,00	0,9999	0,5306
6	Atas	2,65	0,47	175,63	223,59	298,07	347,54	6,88	1,08	0,9999	0,5324
	Bawah	2,65	0,47	173,17	231,49	298,12	345,38	6,88	1,07	0,9999	0,5342
7	Atas	2,53	0,43	159,66	172,10	298,97	343,00	6,60	1,00	0,9999	0,5536
	Bawah	2,52	0,42	162,47	180,58	299,06	340,38	6,58	1,00	0,9999	0,5670
8	Atas	2,53	0,46	153,87	224,30	300,69	342,97	6,60	1,07	0,9999	0,5525
	Bawah	2,53	0,47	156,96	220,09	300,24	340,97	6,59	1,08	0,9999	0,5635
9	Atas	2,42	0,42	147,15	174,92	300,57	340,21	6,35	1,00	0,9999	0,5727
	Bawah	2,42	0,42	148,46	174,01	300,43	340,78	6,33	1,00	0,9999	0,5676
10	Atas	2,43	0,45	144,98	245,02	301,62	346,56	6,36	1,00	0,9999	0,4876
	Bawah	2,43	0,45	144,54	250,59	301,54	346,01	6,37	1,00	0,9999	0,4913
11	Atas	2,36	0,43	129,01	193,13	303,03	340,99	6,21	1,00	0,9999	0,5664
	Bawah	2,36	0,42	129,03	194,48	302,94	340,23	6,20	1,00	0,9999	0,5710
12	Atas	2,35	0,45	124,86	212,27	304,22	360,80	6,19	1,01	0,9999	0,4458
	Bawah	2,35	0,45	126,78	213,60	304,23	360,04	6,18	1,01	0,9999	0,4487
13	Atas	2,31	0,45	112,66	160,72	305,06	368,20	6,09	1,03	0,9999	0,4681
	Bawah	2,31	0,45	114,79	164,89	305,00	371,06	6,08	1,03	0,9999	0,4548

Nomor nozzle		Jarak antar nozzle 600 mm									
		Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
		Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	Outlet	Inlet	Outlet
14	Atas	2,28	0,44	106,71	158,16	307,20	365,17	6,03	1,02	0,9999	0,4896
	Bawah	2,27	0,44	107,43	165,73	307,01	367,14	6,01	1,02	0,9999	0,4789
15	Atas	2,27	0,44	99,53	168,97	307,56	363,62	6,00	1,02	0,9999	0,4947
	Bawah	2,26	0,44	97,88	171,73	307,39	360,07	5,99	1,03	0,9999	0,5127
16	Atas	2,22	0,44	102,46	150,23	308,51	369,20	5,91	1,02	0,9999	0,4672
	Bawah	2,22	0,44	99,30	151,42	308,49	365,91	5,91	1,02	0,9999	0,4919
17	Atas	2,27	0,46	91,99	215,81	309,21	352,70	6,02	1,07	0,9999	0,5274
	Bawah	2,27	0,46	91,74	223,63	309,22	351,15	6,01	1,07	0,9999	0,5354
18	Atas	2,20	0,42	92,62	185,20	310,87	347,73	5,88	1,00	0,9999	0,5507
	Bawah	2,19	0,42	95,53	193,24	311,00	345,07	5,86	1,00	0,9999	0,5629
19	Atas	2,25	0,46	78,17	226,68	319,31	357,83	6,03	1,08	0,9808	0,5162
	Bawah	2,24	0,47	89,42	227,45	316,72	356,13	6,01	1,09	0,9919	0,5270

4.1.2 Fully expanded nozzle

a. Full cone nozzle (400 mm)

Tabel 4.7 jarak antar nozzle 400 mm dengan full cone nozzle (fully expanded nozzle)

Nomor nozzle		Jarak antar nozzle 400									
		Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
		Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	outlet	inlet	Outlet
1	2,92	0,35	91,96	64,18	976,86	563,88	16,76	1,00	0,9999	0,3485	
2	2,99	0,32	64,43	96,91	976,86	770,18	17,18	1,04	0,9999	0,3853	
3	3,01	0,33	60,10	131,03	976,86	708,84	17,30	1,05	0,9999	0,3107	
4	3,02	0,34	58,23	83,06	976,86	625,43	17,31	1,01	0,9999	0,2607	
5	3,00	0,33	57,31	132,83	976,86	713,10	17,20	1,05	0,9999	0,3028	
6	3,00	0,33	55,40	130,49	976,86	708,27	17,24	1,04	0,9999	0,2797	
7	3,02	0,33	53,55	25,70	976,86	692,72	17,35	1,01	0,9999	0,2872	
8	3,03	0,32	56,39	125,22	976,86	691,81	17,37	1,03	0,9999	0,3298	
9	2,99	0,34	53,07	125,79	976,86	694,42	17,17	1,04	0,9999	0,2934	
10	3,01	0,33	49,19	87,68	976,86	660,90	17,29	1,01	0,9999	0,2404	
11	3,01	0,33	50,93	123,68	976,86	701,42	17,26	1,04	0,9999	0,2923	
12	2,97	0,34	47,30	146,21	976,86	679,16	17,06	1,03	0,9999	0,3189	
13	3,00	0,33	43,43	145,92	976,86	688,13	17,21	1,04	0,9999	0,3412	
14	2,99	0,34	40,48	111,34	976,86	614,02	17,14	1,01	0,9999	0,3107	
15	2,99	0,33	43,57	165,47	976,86	684,65	17,15	1,05	0,9998	0,3834	
16	2,99	0,35	39,04	172,01	976,86	620,38	17,16	1,03	0,9991	0,3487	
17	3,01	0,31	31,85	236,09	976,86	670,73	17,21	1,03	0,9933	0,3777	
18	3,01	0,36	35,82	185,99	976,86	614,18	17,12	1,03	0,9728	0,3228	
19	3,41	0,37	29,75	111,87	905,74	600,25	17,16	1,04	0,8337	0,32	
20	7,15	0,48	23,86	29,58	383,43	394,32	17,30	1,02	0,5036	0,1817	
21	7,94	0,50	9,81	96,89	325,64	397,77	17,19	1,04	0,4571	0,1582	
22	7,94	0,50	12,64	95,60	318,42	388,02	17,13	1,04	0,4781	0,1782	
23	8,02	0,48	11,40	69,30	316,09	410,09	17,30	1,01	0,4876	0,1248	
24	7,99	0,48	6,46	21,33	319,13	437,00	17,22	1,00	0,4734	0,0521	
25	7,45	0,51	0,07	72,92	337,68	427,68	16,03	1,06	0,4223	0,0829	
26	8,00	0,50	7,44	100,09	324,44	408,45	17,22	1,03	0,4482	0,1242	

Nomor nozzle	Jarak antar nozzle 400									
	Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	outlet	inlet	Outlet
27	7,99	0,49	7,30	107,97	326,74	397,88	17,22	1,03	0,4407	0,1529
28	7,93	0,50	5,92	98,92	321,16	364,39	17,22	1,04	0,4809	0,2526
29	7,98	0,49	7,08	89,60	319,25	335,65	17,22	1,04	0,477	0,3462

b. Full cone nozzle (500 mm)

Tabel 4.8 jarak antar nozzle 500 mm dengan full cone nozzle (fully expanded nozzle)

Nomor nozzle	Jarak antar nozzle 500									
	Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	outlet	inlet	Outlet
1	6,57	0,56	54,94	173,73	314,81	367,54	14,15	1,14	0,4814	0,2346
2	6,53	0,58	57,44	213,25	319,20	360,84	14,16	1,17	0,4814	0,2493
3	6,10	0,62	0,40	102,67	334,21	423,86	13,26	1,28	0,4447	0,0255
4	6,60	0,53	39,70	151,05	319,52	381,02	14,32	1,10	0,4816	0,2085
5	6,63	0,50	35,21	87,05	319,87	413,46	14,40	1,04	0,4820	0,1252
6	6,69	0,50	29,64	115,98	319,31	396,83	14,53	1,04	0,4830	0,1608
7	6,75	0,54	30,99	210,85	317,96	355,00	14,63	1,10	0,4842	0,2538
8	6,85	0,51	31,69	150,74	316,63	379,38	14,81	1,06	0,4844	0,1994
9	6,94	0,64	24,09	115,56	317,09	389,58	15,00	1,33	0,4842	0,1728
10	7,07	0,56	24,33	179,76	316,58	371,82	15,25	1,14	0,4828	0,2192
11	7,17	0,53	20,68	19,71	322,66	452,50	15,49	1,11	0,4626	0,0114
12	7,32	0,57	17,61	123,22	317,98	361,04	15,80	1,16	0,4785	0,2460
13	7,43	0,56	10,85	115,27	325,97	439,97	16,05	1,16	0,4489	0,0210
14	7,56	0,54	7,00	173,61	323,20	371,40	16,34	1,11	0,4611	0,2203
15	7,65	0,51	4,97	187,80	324,68	367,89	16,56	1,06	0,4597	0,2236
16	7,78	0,56	6,90	71,40	325,05	362,38	16,88	1,14	0,4636	0,2857
17	7,96	0,47	2,36	44,15	329,37	460,93	17,29	0,99	0,4509	0,0033
18	8,05	0,53	5,52	162,73	323,78	380,04	17,50	1,10	0,4747	0,2028
19	8,14	0,53	9,45	114,39	321,38	371,71	17,70	1,10	0,4859	0,2535
20	7,58	0,57	0,09	201,43	328,55	363,62	16,48	1,17	0,4512	0,2484
21	8,34	0,53	6,92	133,21	324,46	370,03	18,19	1,11	0,4806	0,2559
22	8,36	0,54	6,36	163,38	325,51	375,02	18,27	1,11	0,4832	0,2177
23	8,38	0,50	4,87	119,04	326,88	384,85	18,37	1,06	0,4818	0,2112

c. Full cone nozzle (600 mm)

Tabel 4.9 jarak antar nozzle 600 mm dengan full cone nozzle (fully expanded nozzle)

Nomor nozzle	Jarak antar nozzle 600									
	Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	outlet	inlet	Outlet
1	21,01	0,56	11,11	191,65	293,45	286,89	46,65	1,19	0,9999	0,5884
2	20,93	0,66	11,55	161,16	294,09	342,57	46,57	1,12	0,9999	0,4348
3	20,51	0,55	10,48	216,93	301,65	296,77	46,65	1,17	0,9999	0,5654

Nomor nozzle	Jarak antar nozzle 600									
	Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	outlet	Inlet	Outlet
4	20,15	0,52	17,52	170,75	309,84	321,83	46,85	1,13	0,9999	0,5137
5	19,69	0,48	18,68	134,50	318,73	327,32	46,88	1,05	0,9999	0,4805
6	18,94	0,52	17,83	195,07	331,67	334,85	46,60	1,13	0,9988	0,4827
7	18,20	0,46	26,87	127,21	356,51	361,02	47,01	1,04	0,9722	0,3927
8	17,01	0,49	12,64	205,95	405,71	375,24	46,71	1,15	0,8589	0,4679
9	16,16	0,45	29,92	166,98	474,80	420,84	47,00	1,05	0,6770	0,3103
10	18,53	0,51	18,57	132,60	422,48	409,18	47,55	1,14	0,5521	0,2846
11	21,51	0,51	7,96	140,43	334,92	371,52	46,94	1,06	0,5026	0,2317
12	22,04	0,54	18,90	152,61	325,09	348,43	47,14	1,11	0,4999	0,2793
13	21,98	0,58	8,22	186,62	323,83	323,26	46,91	1,18	0,5000	0,3508
14	22,07	0,55	6,32	163,30	322,88	322,40	46,99	1,12	0,4989	0,3588
15	22,05	0,62	6,39	113,31	322,44	325,83	46,84	1,25	0,4936	0,3437
16	22,01	0,47	2,78	32,31	322,96	387,72	46,89	1,00	0,4987	0,1807
17	22,08	0,60	7,72	194,52	322,19	319,55	46,93	1,21	0,4980	0,3574
18	22,16	0,50	11,47	122,28	322,82	349,83	47,17	1,04	0,4979	0,2873
19	22,03	0,59	6,82	119,68	323,30	364,85	46,84	1,21	0,4900	0,2448

d. Flat fan nozzle (400 mm)

Tabel 4.10 jarak antar nozzle 400 mm dengan flat fan nozzle (fully expanded nozzle)

Nomor nozzle	Jarak antar nozzle 400									
	Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	outlet	inlet	Outlet
1	3,47	0,43	169,53	216,38	295,72	328,41	8,96	1,01	0,9999	0,6069
2	3,53	0,50	176,94	244,66	296,60	340,04	9,09	1,14	0,9999	0,5374
3	3,51	0,48	160,65	223,78	297,45	346,89	9,04	1,11	0,9999	0,5155
4	3,38	0,43	168,23	207,67	295,38	337,21	8,73	1,00	0,9999	0,5407
5	3,40	0,46	159,78	265,61	298,16	346,00	8,79	1,02	0,9999	0,4675
6	3,40	0,50	151,67	251,26	298,67	343,08	8,79	1,13	0,9999	0,5309
7	3,25	0,43	149,64	223,78	297,33	329,73	8,43	1,00	0,9999	0,5806
8	3,26	0,45	151,69	179,73	299,67	359,14	8,46	1,03	0,9999	0,5005
9	3,31	0,51	147,53	264,92	298,89	340,56	8,55	1,15	0,9999	0,5173
10	3,19	0,43	141,15	234,57	298,48	325,28	8,28	1,00	0,9999	0,6133
11	3,16	0,46	141,15	178,12	300,07	357,99	8,21	1,05	0,9999	0,4941
12	3,23	0,50	131,24	259,55	300,74	340,54	8,40	1,13	0,9999	0,5214
13	3,15	0,47	124,76	195,29	300,32	359,67	8,19	1,07	0,9999	0,4818
14	3,09	0,43	131,60	215,35	299,49	334,19	8,04	1,00	0,9999	0,5720
15	3,16	0,47	129,72	294,31	300,73	336,46	8,21	1,03	0,9999	0,4819
16	3,13	0,46	114,35	191,85	302,04	352,89	8,15	1,06	0,9999	0,5143
17	3,03	0,43	121,35	209,32	301,07	335,46	7,93	1,00	0,9999	0,5604
18	3,10	0,46	111,17	256,56	302,92	346,27	8,10	1,01	0,9999	0,4790
19	3,10	0,50	109,65	253,50	303,32	339,45	8,10	1,14	0,9999	0,5456
20	3,02	0,43	110,06	207,89	303,48	332,38	7,92	1,00	0,9999	0,5896
21	3,03	0,46	98,33	202,08	305,35	349,54	7,97	1,06	0,9999	0,5297
22	3,09	0,50	103,77	253,43	306,21	336,54	8,11	1,15	0,9999	0,5583
23	3,01	0,42	105,09	245,96	306,77	325,17	7,95	1,00	0,9999	0,6397
24	3,00	0,46	89,92	186,87	309,67	361,15	7,95	1,06	0,9999	0,4964
25	3,04	0,51	100,25	262,09	311,55	344,11	8,07	1,18	0,9999	0,5369
26	2,98	0,46	91,63	194,73	316,20	366,76	7,99	1,07	0,9999	0,4897
27	2,93	0,42	104,41	239,76	319,62	339,54	7,91	1,00	0,9991	0,6083

Nomor nozzle	Jarak antar nozzle 400									
	Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	outlet	inlet	Outlet
28	2,98	0,47	99,77	306,10	325,31	347,97	8,08	1,04	0,9864	0,4790
29	3,15	0,48	89,58	200,76	334,58	377,09	8,04	1,07	0,7851	0,3665

e. Flat fan nozzle (500 mm)

Tabel 4.11 jarak antar nozzle 500 mm dengan flat fan nozzle (fully expanded nozzle)

Nomor nozzle	Jarak antar nozzle 500									
	Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	outlet	inlet	Outlet
1	4,15	0,51	147,64	243,80	296,11	331,93	10,61	1,15	0,9999	0,5610
2	4,14	0,55	146,28	289,77	296,65	329,71	10,59	1,23	0,9999	0,5335
3	4,09	0,54	144,86	281,96	296,79	330,84	10,48	1,22	0,9999	0,5316
4	4,05	0,49	138,82	302,97	297,46	328,88	10,40	1,06	0,9999	0,4980
5	3,96	0,47	130,24	212,49	298,60	349,06	10,22	1,07	0,9999	0,5032
6	3,89	0,44	140,66	247,81	296,35	320,35	10,03	1,02	0,9999	0,6083
7	3,87	0,44	129,70	242,13	297,02	319,07	9,99	1,02	0,9999	0,6149
8	3,81	0,44	131,92	260,35	296,84	313,97	9,83	1,01	0,9999	0,6367
9	3,83	0,48	121,48	215,53	298,33	339,57	9,88	1,11	0,9999	0,5524
10	3,88	0,52	125,37	254,14	298,72	331,32	9,98	1,19	0,9999	0,5619
11	3,87	0,55	117,49	282,50	299,84	322,41	9,97	1,25	0,9999	0,5731
12	3,84	0,50	116,49	313,98	299,98	314,96	9,93	1,08	0,9999	0,5487
13	3,79	0,48	106,87	215,56	301,22	340,21	9,82	1,10	0,9999	0,5474
14	3,74	0,48	105,27	208,70	301,94	352,22	9,73	1,10	0,9999	0,4919
15	3,73	0,44	107,48	248,66	300,66	322,99	9,70	1,01	0,9999	0,5945
16	3,70	0,44	109,93	239,68	300,96	325,59	9,63	1,02	0,9999	0,5897
17	3,73	0,49	101,95	210,00	302,73	355,59	9,70	1,12	0,9999	0,4933
18	3,75	0,49	93,30	224,64	304,69	349,56	9,77	1,11	0,9999	0,5089
19	3,79	0,55	100,40	289,32	305,75	334,75	9,88	1,24	0,9999	0,5311
20	3,75	0,54	96,21	286,74	309,72	338,02	9,87	1,24	0,9999	0,5231
21	3,72	0,50	94,65	319,33	313,67	334,49	9,86	1,09	0,9994	0,5018
22	3,65	0,48	91,54	212,93	323,37	360,10	9,80	1,11	0,9824	0,5102
23	3,86	0,45	103,77	284,77	329,92	330,58	9,72	1,02	0,7675	0,5382

f. Flat fan nozzle (600 mm)

Tabel 4.12 jarak antar nozzle 600 mm dengan flat fan nozzle (fully expanded nozzle)

Nomor nozzle	Jarak antar nozzle 600									
	Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	Outlet	inlet	outlet	inlet	Outlet
1	4,83	0,49	132,78	226,06	293,69	338,89	12,26	1,11	0,9999	0,5248
2	4,89	0,54	135,54	249,83	293,32	335,69	12,36	1,22	0,9999	0,5227
3	4,77	0,50	135,81	230,64	293,70	339,89	12,11	1,13	0,9999	0,5109
4	4,84	0,57	124,79	291,47	294,47	323,02	12,26	1,28	0,9999	0,5514

Nomor nozzle	Jarak antar nozzle 600									
	Densitas (kg/m ³)		Kecepatan (m/s)		Temperatur (°C)		Tekanan (Bar)		Mass fraction of steam	
	<i>Inlet</i>	<i>Outlet</i>	<i>Inlet</i>	<i>Outlet</i>	<i>inlet</i>	<i>Outlet</i>	<i>inlet</i>	<i>outlet</i>	<i>Inlet</i>	<i>Outlet</i>
5	4,68	0,44	131,68	293,02	292,81	296,08	11,90	1,00	0,9999	0,7029
6	4,78	0,58	122,20	290,11	295,03	318,66	12,14	1,30	0,9999	0,5648
7	4,62	0,44	116,14	274,43	293,77	304,49	11,80	1,00	0,9999	0,6433
8	4,71	0,58	117,26	299,94	295,90	316,33	12,00	1,29	0,9999	0,5618
9	4,59	0,44	116,82	289,51	294,30	298,41	11,74	1,00	0,9999	0,6721
10	4,70	0,52	109,32	343,79	296,20	304,71	11,97	1,11	0,9999	0,5523
11	4,56	0,44	108,35	309,30	295,84	290,66	11,67	1,01	0,9999	0,7312
12	4,65	0,50	98,77	316,50	297,38	308,32	11,89	1,09	0,9999	0,5688
13	4,60	0,51	97,67	232,09	297,46	327,29	11,77	1,16	0,9999	0,5713
14	4,58	0,51	91,05	235,44	298,68	338,80	11,75	1,15	0,9999	0,5209
15	4,59	0,51	92,96	245,57	299,06	337,81	11,77	1,16	0,9999	0,5218
16	4,54	0,51	95,44	218,73	300,27	348,56	11,68	1,14	0,9999	0,4894
17	4,62	0,58	97,26	297,46	302,54	324,00	11,92	1,31	0,9999	0,5605
18	4,45	0,43	112,04	310,46	307,39	306,34	11,64	1,01	0,9954	0,6856
19	4,63	0,6	93,25	298,89	320,90	335,83	11,96	1,35	0,9082	0,5021