



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**SIMULASI CFD DALAM DESAIN SWIRLER  
RUANG BAKAR TURBIN GAS BIOENERGY**

**SKRIPSI**

**SINGGIH PRABOWO**

**06060 735 94**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JANUARI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**SIMULASI CFD DALAM DESAIN SWIRLER  
RUANG BAKAR TURBIN GAS BIOENERGY**

**SKRIPSI**

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**SINGGIH PRABOWO**

**06060 735 94**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
KEKHUSUSAN KONVERSI ENERGI  
DEPOK  
JANUARI 2011**



## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

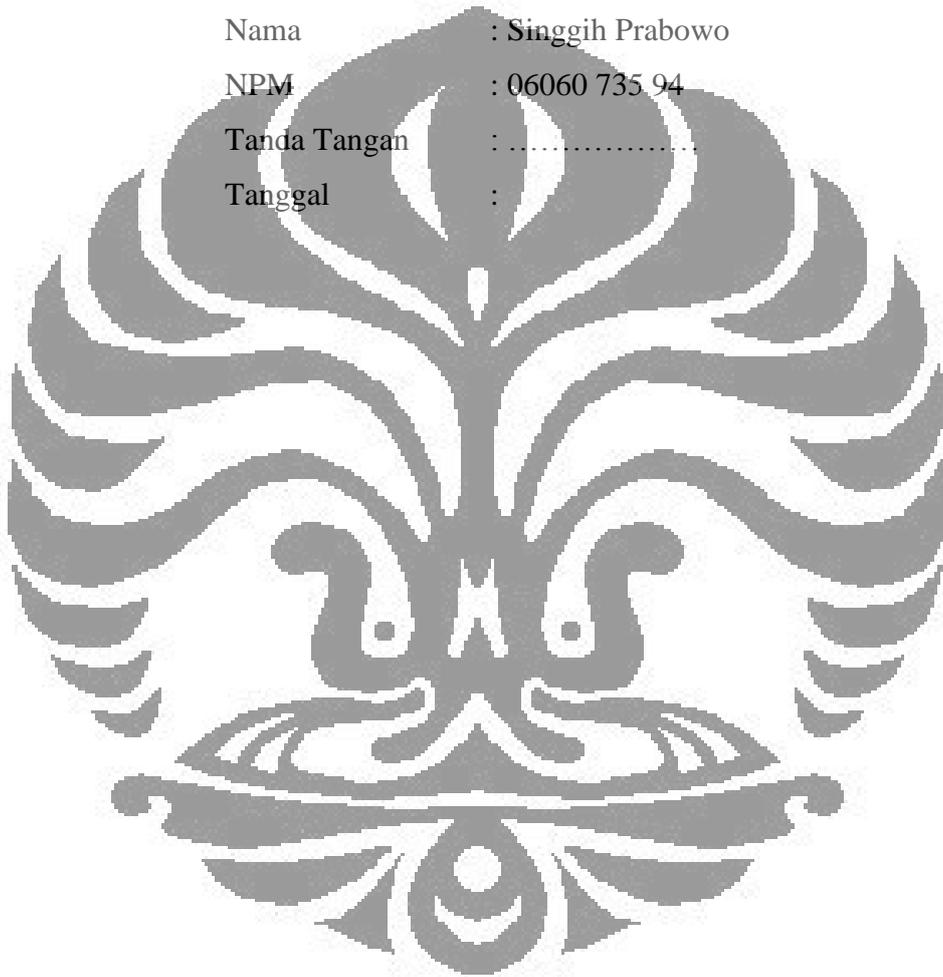
Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar

Nama : Singgih Prabowo

NPM : 06060 735 94

Tanda Tangan : .....

Tanggal :



**HALAMAN PENGESAHAN**

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Singgih Prabowo  
NPM : 06060 735 94  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul Skripsi : SIMULASI CFD DALAM DESAIN SWIRLER  
RUANG BAKAR TURBIN GAS BIOENERGI

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

**DEWAN PENGUJI**

Pembimbing : Dr. Ir. Ahmad Indra Siswantara ( )  
Penguji : Ir. Agung Subagio, Dipl. -Ing ( )  
Penguji : Dr. Ir. Engkos A. Kosasih, MT ( )  
Penguji : Dr. Ir. Warjito, MEng ( )

Ditetapkan di :

Tanggal :



## Ucapan Terima Kasih

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Tanpa seizin-Nya skripsi yang berjudul “*Simulasi CFD Dalam Desain Swirler Ruang Bakar Turbin Gas Bioenergy*” ini tidak akan terselesaikan dengan baik. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Adapun topik yang dibahas dalam skripsi ini adalah mengenai simulasi CFD untuk membandingkan desain swirler pada GT-852 dengan varian baru berbasis blade dalam hal peningkatan *mixing process* dan *flame stability*.

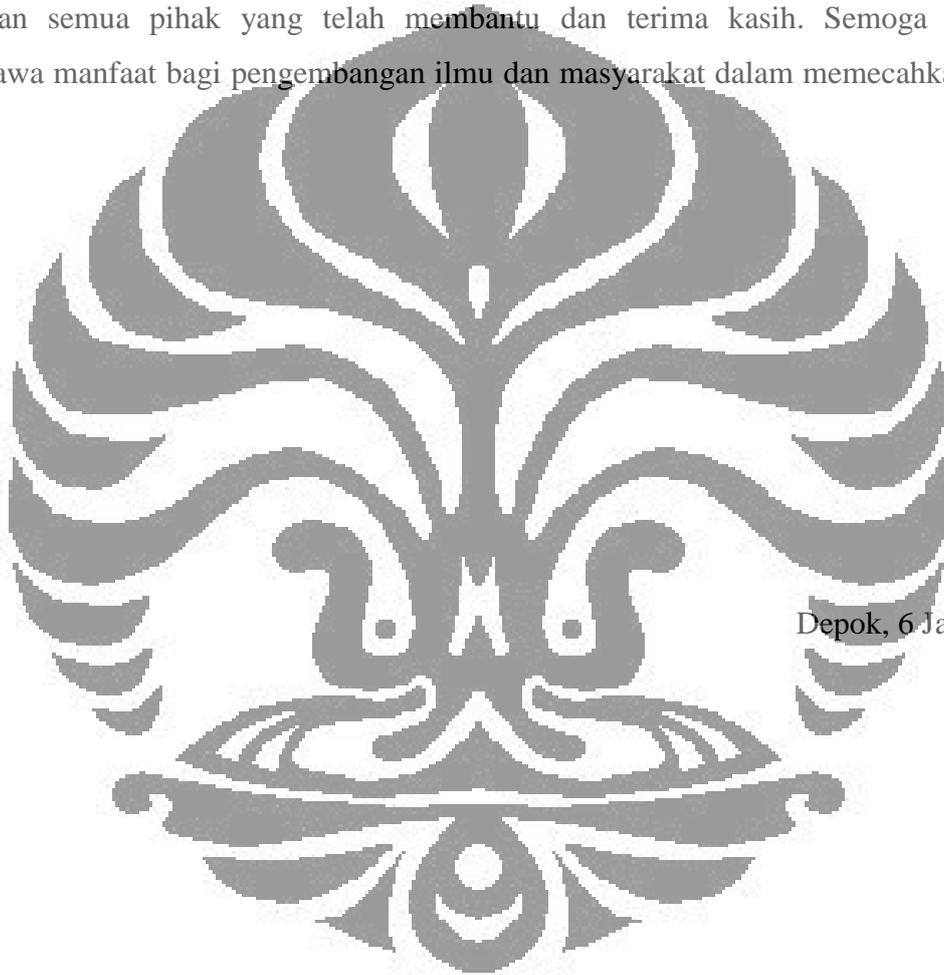
Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- 1) Dr. Ir. Ahmad Indra Siswantara, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini. Bahkan sekaligus menyediakan tempat (garasi dan kelas) sebagai sarana berkreasi ala engineer dari las, milling hingga jidilah alat kami.
- 2) Orang tua di rumah yang walau tak membantu secara langsung pembuatan skripsi ini tapi tanpanya mungkin tidak akan ada skripsi ini. Terima kasih atas bimbingan moral dan materialnya, doa-doanya dan sebagainya.
- 3) Pada team dari orang S2 Pak Efendi dan Mas Steven yang banyak bantu dari mulai material, traktiran makannya, diskusi-diskusinya dari yang benar-bener ke teori sampai diluar teori.
- 4) Anak S1 ekstensi AB yang suka bantu buat alatnya dan Rangga anak Gundar yang skripsi sama Pak Indra yang bikin drum fermentor.
- 5) Pras, teman mikir dan maen CS yang buat pipa saluran oli yang selalu bocor dan jadi sasaran “ceng-cengan” karena ditaksir guru bahasa Inggrisnya Pak Indra.
- 6) Faruk, teman yang entah apa kontribusinya dan selalu bicara perjuangan bahkan mencoba mematahkan teori kesetimbangan massa saat sidang. Tapi setidaknya dia sudah bersedia jadi yang “pertamax” kalau ada hal-hal yang perlu jadi tumbal.
- 7) Anak-anak lantai 2 DTM, ada Rendi, Sriyanto, Andry dan Hadi serta Panji yang di lantai 3 teman studi banding kemampuan perang di CS.



- 8) Teman-teman satu angkatan teknik mesin 2006 yang selama empat tahun ini berjuang bersama khususnya manusia 4,5 tahun.
- 9) Agus dkk yang kerja di tempat Pak Indra terima kasih atas tajil magribnya walau bukan bulan puasa entah mengapa selalu disediakan makanan dan juga gossip serta candaannya yang membuat suasana kerja keep unbored and fun.
- 10) Thank's to diamond act and mocca song to cheer me up and keep swinging. Dan semuanya yang tidak bisa disebutkan satu-persatu.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu dan terima kasih. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu dan masyarakat dalam memecahkan masalah energi.



Depok, 6 Januari 2010

Penulis



## HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Singgih Prabowo

NPM : 06060 735 94

Program Studi : Teknik Mesin

Departemen : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

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

### **Simulasi CFD Dalam Desain Swirler ruang Bakar Turbin Gas Bioenergy**

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

Dibuat di : Depok

Pada tanggal :

Yang menyatakan

(Singgih Prabowo)



## Abstrak

Nama : Singgih Prabowo  
Program studi : Teknik Mesin  
Judul : Simulasi CFD Dalam Desain swirler Ruang Bakar  
Turbin Gas Bioenergy

Zona circular pada ruang bakar cukup diperlukan dalam perannya untuk proses *mixing* dengan bahan bakar dan masalah *flame stability*. Pada mini turbin GT-852 ini menggunakan atau memanfaatkan swirler dengan sistem toroidal menggunakan beberapa tube di sekelilingnya. Maka itu pada tulisan ini akan dicoba dibandingkan dengan swirler berbasis blade dengan konfigurasi menyesuaikan keadaan pada ruang bakar GT-852. Secara *cold flow model* dengan simulasi CFD akan dicoba dibandingkan keduanya. Disamping itu, penggunaan plat penutup bagian bawah (cap) membuat sistem pengaturan tersendiri terhadap komponen axial dan tangensial yang berimbas pada nilai swirl number sebagai salah satu parameter *mixing* dan *stability* dari *flame* (khususnya pada saat low load seperti start up).

*Keyword* : *Zona circular, mixing, flame, stability, swirler, toroidal, blade dan CFD.*



## Abstract

Nama : Singgih Prabowo  
Program studi : Teknik Mesin  
Judul : CFD Simulation in Design of Swirler of Bioenergy  
Gas Turbine Combustion Chamber

Circulation zone in combustion chamber is needed as the roll of it in mixing process and to handle flame stability problem. In mini gas turbine GT-852, it uses swirler with toroidal system which has some small tubes around. Therefore in this research will compare between old design of swirler (default swirler of GT-852) and blade swirler which has configuration compatible to GT-852 combustion chamber. Using CFD (computational fluid dynamic) simulation in cold flow model (with neglect the combustion effect), it compares each other performance both mixing and stability. Furthermore, additional part to cover bottom side of swirler (cap) is used as adjustment system for axial and tangential components. At last both components will influence the value of swirler number as one of parameter mixing and flame stability (especially in low load like start up).

*Keyword : Circulation zone, mixing, flame, stability, swirler, toroidal, blade and CFD.*

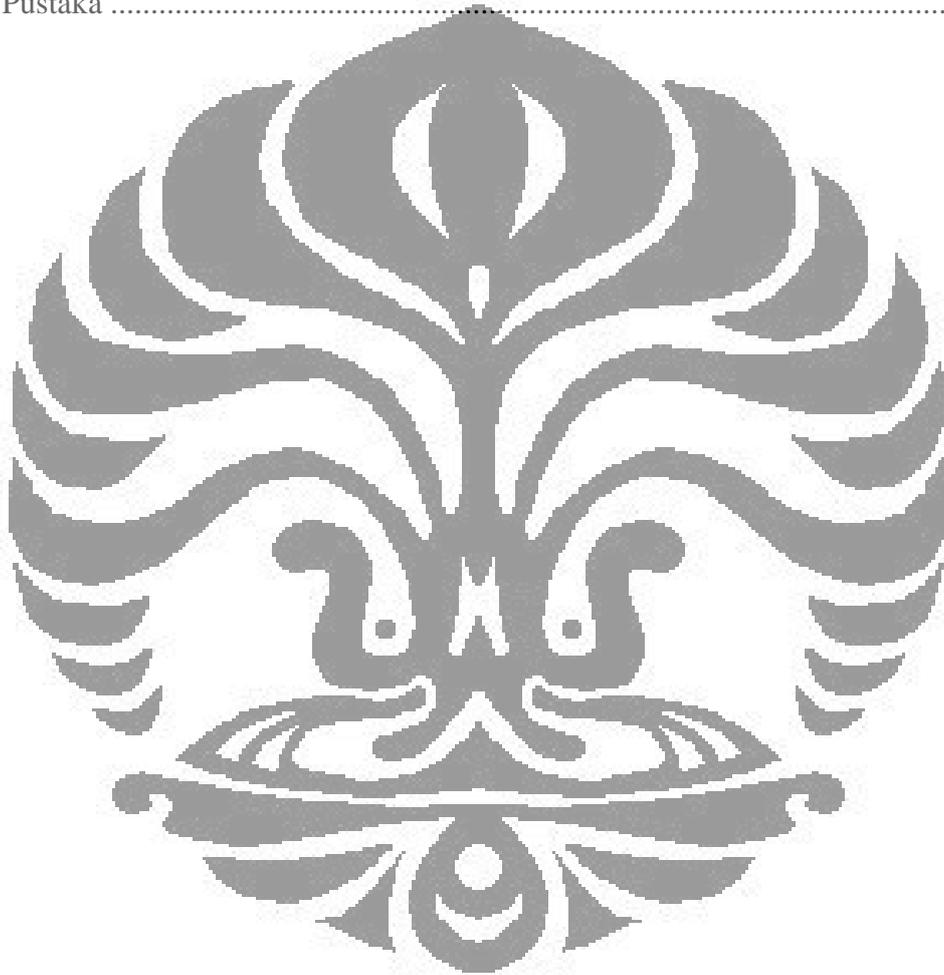


## DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
Ucapan Terima Kasih .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI .....	vi
Abstrak .....	vii
Abstract.....	viii
DAFTAR ISI .....	ix
BAB I.....	13
PENDAHULUAN .....	13
I.I Latar Belakang.....	13
I.II Pembatasan Masalah.....	16
I.III Tujuan penulisan.....	16
I.IV Metode Penyelesaian Masalah.....	16
I.V Sistematika Penulisan .....	16
BAB II.....	18
DASAR TEORI.....	18
II.I Combustion Chamber .....	18
II.II Faktor-Faktor Pada Desain Combustion Chamber.....	19
II.III Kualitas Pencampuran.....	21
II.IV Swirler.....	21
II.V Swirl Number.....	22
II.VI Turbulent.....	23
II.VI.I k-ε Model.....	23
II.VII Gas Turbin Seri GT-85 .....	25
II.VII.I Performa Pada Combustion Chamber GT-85.....	26
BAB III.....	27
SIMULASI DAN PERHITUNGAN .....	27
III.I Pengantar .....	27
III.II Model.....	27
III.III Prosedur dan komputasi.....	28



III.IV Perhitungan .....	34
BAB IV.....	37
HASIL DAN ANALISIS .....	37
BAB V .....	41
KESIMPULAN DAN SARAN .....	41
V.I Kesimpulan.....	41
V.II Saran.....	41
Daftar Pustaka .....	42



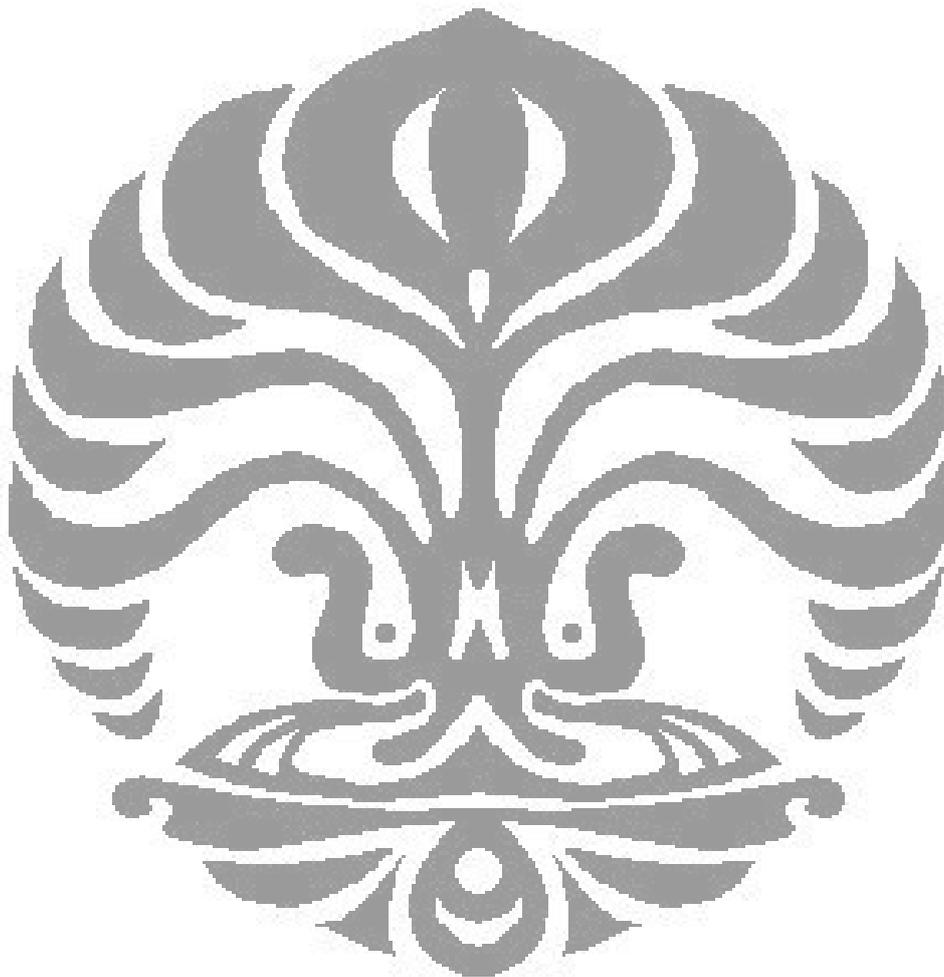


## DAFTAR GAMBAR DAN GRAFIK

Gambar 1. 1 Data Rasio elektrifikasi nasional. Sumber slide kuliah umum kapita selekta “STRATEGI PENGELOLAAN ENERGI NASIONAL DALAM MENJAMIN KEAMANAN KETERSEDIAAN ENERGI” dari ESDM. ....	14
Gambar 1. 2 Data kebutuhan energi nasional. Sumber slide kuliah umum kapita selekta “STRATEGI PENGELOLAAN ENERGI NASIONAL DALAM MENJAMIN KEAMANAN KETERSEDIAAN ENERGI” dari ESDM. ....	14
Gambar 2. 1 Skema dan T-S diagram siklus Bryton .....	18
Gambar 2. 2. IRZ pada swirl .....	22
Gambar 2. 3. Zona resirkulasi pada non-premixed swirl burner .....	22
Gambar 2. 4. Drawing 2 komponen dasar pada sistem Combustion GT-85 .....	26
Gambar 2. 5. Perbesaran pada bagian swirler. ....	26
Gambar 3. 1 Model desain lama .....	28
Gambar 3. 2 Model desain baru .....	28
Gambar 3. 3 Pengaturan computational pada SolidWorks .....	29
Gambar 3. 4 Pengaturan local mesh dan pengaturan global mesh juga memiliki tampilan serupa pada gambar kanan .....	29
Gambar 3. 5 Berikut model disertai collout dari boundy condition .....	30
Gambar 3. 6 Tampilan saat running. ....	31
Gambar 3. 7 Hasil mesh/grid pada tingkat 3 baik global maupun local, namun mesh terkecil disesuaikan geometry masing-masing bagian (kiri desain lama dan kanan desain baru tanpa blade.....	32
Gambar 3. 8 Cutplot kecepatan axial (desain lama) disertai 12 titik radian (tiap $\theta = 30^\circ$ ) untuk axial dan tangensial (diambil pada $r=15\text{mm}$ dan pada jarak 18 mm dari nossel).....	33
Gambar 3. 9 Cutplot kecepatan axial (desain baru dengan cap full) disertai 12 titik radian (tiap $\theta = 30^\circ$ ) untuk axial dan tangensial (diambil pada $r=15\text{mm}$ dan pada jarak 18 mm dari nossel).....	33
Gambar 3. 10 Cut plot k dan $\epsilon$ desain lama (kiri k dan kanan $\epsilon$ ).....	34
Gambar 3. 11 Cut plot k dan $\epsilon$ desain baru full cap (kiri k dan kanan $\epsilon$ ) .....	34



Grafik 4. 1 Grafik distribusi $S_n$ dengan $r=15\text{mm}$ pada ketinggian 18 mm dari nosel untuk masing-masing tipe swirler.....	37
Grafik 4. 2 Distribusi turbulent kinetic energy untuk masing-masing swirler. ....	39
Grafik 4. 3 Distribusi turbulent dissipation untuk masing-masing swirler.....	39





# BAB I

## PENDAHULUAN

### I.1 Latar Belakang

Turbin gas merupakan alat yang terdiri dari *compressor*, *combustion chamber* dan *heat exchanger* yang biasa dipakai pada plant pembangkit listrik karena menghasilkan energi yang besar dan sekarang perkembangannya turbin gas kini dapat dioperasikan dengan bahan bakar berupa *natural gas*, *diesel fuel*, *naphtha*, *methane*, *crude*, *low-Btu gases*, *vaporized fuel oils*, dan *biomass gases*. Atau dengan kata lain dapat digunakan dalam berbagai bahan bakar.

Ruang bakar sebagai elemen penting dalam gas turbin mempunyai fungsi membakar secara sempurna campuran udara dan bahan bakar yang masuk dan diusahakan menghasilkan temperatur aliran gas setinggi mungkin. Oleh karena itu, peningkatan performa dari turbin gas terus diteliti untuk terus dikembangkan dan tercipta performa yang hemat bahan bakar atau efisien. Diantaranya adalah mengenai ruang bakar dimana tantangannya adalah bagaimana peningkatan panas dari gas bertekanan dapat ditingkatkan. Faktor-faktor yang mempengaruhi hal ini diantaranya kemampuan material blade pada turbin, kondisi ambient, humidity, elevasi, losses pada inlet dan exhaust duct, jenis bahan bakar. Hal ini pun mempengaruhi overall performance suatu turbin gas.

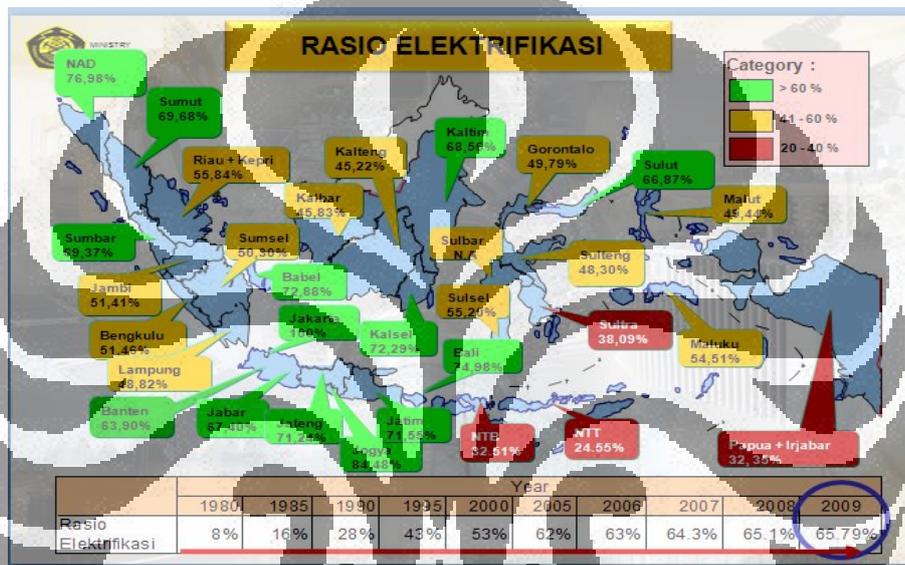
Secara spesifik desain *combustion chamber* dipengaruhi oleh temperature level, material, kecepatan konstan inlet (antara 60-100 m/s) serta proses pencampurannya yang dikarakteristikan dengan bilangan swirl (swirl number) dan AFR yang berkisar antara 60:1 hingga 120:1.

Dalam ruang bakar secara spesifik memiliki beberapa kriteria atau konstrain dalam mendisain ruang bakar yang efektif seperti [8]:

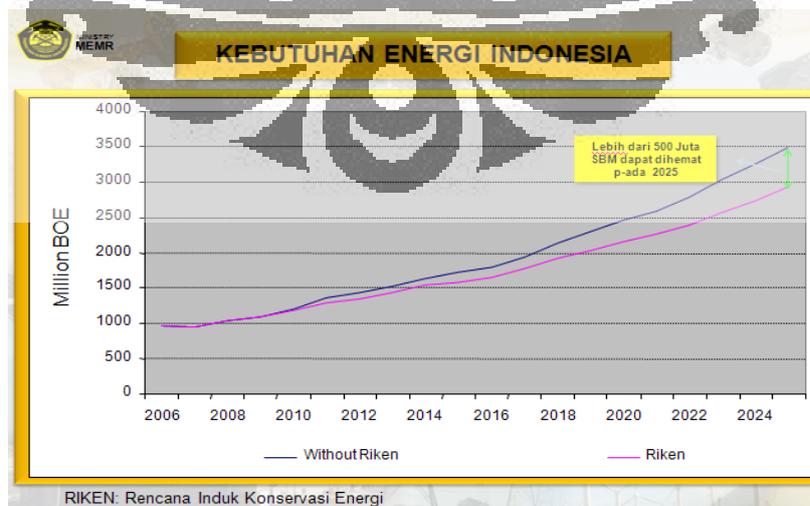


- Flame Stabilizaton,
- Combustion dan dilution,
- Film cooling of liner,
- Fuel atomization and ignition,
- Gas injection,
- Wall cooling,
- Combustor material dan mungkin masih banyak lainnya.

Disamping itu, kebutuhan akan bahan bakar dan energi sangatlah tinggi, khususnya listrik dan bahan bakar migas. Berikut adalah data dari ESDM mengenai rasio elektrifikasi yang menjelaskan penerimaan energi listrik disejumlah daerah seluruh Indonesia. Serta data kebutuhan listrik nasional [12].



Gambar 1. 1 Data Rasio elektrifikasi nasional. Sumber slide kuliah umum kapita selekta “STRATEGI PENGELOLAAN ENERGI NASIONAL DALAM MENJAMIN KEAMANAN KETERSEDIAAN ENERGI” dari ESDM [12].



Gambar 1. 2 Data kebutuhan energi nasional. Sumber slide kuliah umum kapita selekta “STRATEGI PENGELOLAAN ENERGI NASIONAL DALAM MENJAMIN KEAMANAN KETERSEDIAAN ENERGI” dari ESDM [12].



Selain itu, isu lingkungan seperti *global warming* juga semakin marak bahkan menjadi *front page* media tiap harinya di negara-negara barat. Menurut IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) menggambarkan kondisi perubahan iklim yang terjadi saat ini [11]:

- Telah terjadi kenaikan suhu rata-rata sebesar 0,76 derajat Celcius antara periode 1850 – 2005.
- Telah terjadi kenaikan permukaan air laut global rata-rata sebesar 1,8mm per tahun antara periode 1961 – 2003.
- Telah terjadi kekeringan yang lebih intensif pada wilayah yang lebih luas sejak tahun 1970an, terutama di daerah tropis dan sub-tropis.

Sehingga tantangan untuk mereduksi polusi khususnya carbon menjadi tantangan bagi dunia saat ini.

Salah satu dari energi terbarukan dan ramah lingkungan adalah penggunaan bahan bakar berasal dari *bio material* seperti fermentasi selulosa menjadi alcohol/etanol dari singkong, tebu atau sumber lainnya ataupun gas metan dari limbah ternak. Karena seperti yang ditegaskan dalam tujuan *Low Carbon Economy* (upaya dunia dalam mereduksi efek global warming) adalah mengintegrasikan semua aspek, dari pertanian, perusahaan, transportasi, manufaktur, pembangkitan listrik dan lain-lain dengan teknologi yang memproduksi energi (dan barang-barang) dengan emisi gas rumah kaca kecil, sehingga suatu negara dapat memiliki output minimal gas rumah kaca. Dan hal tadi bersumber dari pertanian yang berpotensi limbah karbon dimana hal ini menjadi trigger bagi kami dalam menerapkan teknologi dalam memproduksi energi yang ramah lingkungan [11].

Dari sumber energi tadi akan digunakan sebagai bahan bakar turbin gas karena seperti yang disebutkan sebelumnya gas turbin hampir bisa dioperasikan dalam berbagai bahan bakar. Namun dalam pembahasan ini akan dibahas mengenai proses pembakaran dilihat dari desain swirler yang mencakup pembentukan daerah recirculating untuk keperluan *fuel air mixing process and flame stability*. Maka itu akan dicoba disimulasikan aliran yang terjadi secara cold flow model untuk melihat zona tersebut dari pembentukan atau pengarahan kecepatan aliran pada arah tangensial melalui konfigurasi swirler. Karena dalam literature recirculating ini terjadi umumnya pada swirl number dibawah 0.4 tidak tampak, maka itu umumnya pula swirler didisain pada swirler number lebih dari 0.6 [7]. Dalam tulisan ini kami menggunakan sistem gas turbine persis seperti GT-852 dengan



modifikasi swirler dari tipe vortex swirler menjadi blade swirler dengan harapan meningkatkan mixing dan flame stability-nya.

## **I.II Pembatasan Masalah**

Dalam tulisan ini pembahasannya berkisar mengenai :

1. Simulasi aliran terhadap modifikasi bentuk swirler dari GT-852.
2. Simulasi aliran tidak melibatkan proses pembakaran atau kita sebut sebagai cold flow model sehingga fluida yang digunakan hanya udara saja dengan system non-premixed.
3. Aliran incompressible, inviscid karena Re number besar dan steady flow berkisar pada angka 60,000an.
4. Data aliran untuk simulasi diambil dari manual GT-852 pada putaran turbin compressor terendah.

## **I.III Tujuan penulisan**

Penulisan ini bertujuan :

1. Simulasi swirler dengan sudut sama namun berbeda dalam pengaturan komponen axial (penggunaan plat penutup, kita sebut cap) untuk dibandingkan dengan desain swirler lama Pada GT-852.
2. Hasil simulasi akan dianalisis berdasarkan swirl number,  $k-\epsilon$  sebagai parameter turbulent untuk menunjukkan flame stability dan mixing process.

## **I.IV Metode Penyelesaian Masalah**

Dalam merumuskan permasalahan ini digunakan metode pemecahan masalah dengan simulasi CFD serta secara literatur sebagai validasinya dan untuk kedepannya dilakukan pengujian untuk didapat data secara kuantitatif berdasarkan percobaan. Disamping itu, mesh dependency juga dilakukan dalam memvalidasi persamaan numeric software apakah simulasi telah benar-benar menunjukkan kekonvergenannya.

## **I.V Sistematika Penulisan**

Dalam penyajian tugas akhir ini, penulisannya dibagi dalam beberapa bab. Berikut adalah urutan bab yang disajikan dalam penulisan tugas akhir ini :



## **BAB I PENDAHULUAN**

Bab ini berisi latar belakang, pembatasan masalah, tujuan penulisan, metode penyelesaian masalah dan sistematika penulisan.

## **BAB II DASAR TEORI**

Bab ini berisi mengenai teori combustion chamber, swirl, swirl number, turbulent, dan sekilas mengenai GT-852 sebagai pembanding disain swirler.

## **BAB III SIMULASI DAN PERHITUNGAN**

Adalah bab yang berisi prosedur-prosedur yang dilakukan saat simulasi dan perhitungan parameter lain seperti  $Sn$ .

## **BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN**

Berisi mengenai analisis hasil simulasi komputasi yang disajikan dalam bentuk grafik, cut plot dan hasil post processor lainnya dalam menunjang hasil pengamatan secara komputasi.

## **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Merupakan pengambilan kesimpulan berdasarkan analisis komputasi yang ada disertai saran agar tercipta suatu snowball effect untuk penelitian ini. Khususnya untuk merealisasikan desain.

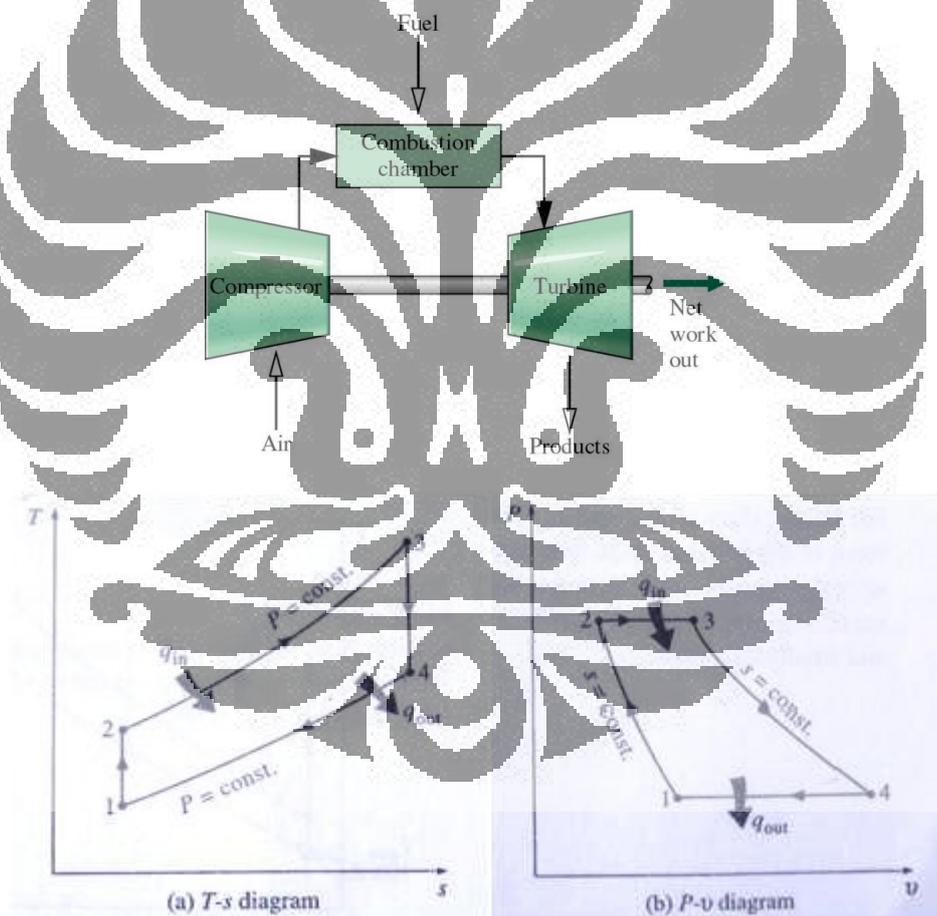
## BAB II

### DASAR TEORI

#### II.1 Combustion Chamber

Ruang bakar atau combustion chamber berfungsi meningkatkan temperatur dari gas bertekanan tinggi. Disamping itu, part ini harus bisa meningkatkan performa pembakaran bahan bakar yang diinjeksikan. Namun, fungsi peningkatan temperatur ini harus ditunjang oleh desain sudu turbin baik dari segi ketangguhan material.

Karena ruang bakar ini adalah yang digunakan pada turbin maka sistem ini akan berlangsung secara siklus Bryton. Berikut adalah diagram kerjanya berdasarkan T-S diagram.



Gambar 2. 1 Skema dan T-S diagram siklus Bryton

Biasanya turbin gas dioperasikan secara *open cycle*, seperti ditunjukkan pada skema diatas. *Fresh air* pada kondisi ambient diambil melalui kompresor dimana tekanan dan temperatur dinaikkan. Udara bertekanan ini dilanjutkan ke *combustion chamber* dimana bahan bakar dibakar secara isobar. Hasilnya gas bertemperatur tinggi yang kemudian masuk ke turbin



mengalami ekspansi terhadap tekanan atmosfer dan menghasilkan tenaga (putaran poros). Selanjutnya, exhaust gas yang meninggalkan turbin dilepas ke lingkungan/tidak disirkulasikan kembali. Dengan demikian, siklus ini disebut *open cycle*. Atau dapat disimpulkan proses yang terjadi adalah [1]:

- 1-2 Isentropic compression (pada kompresor)
- 2-3 constant-pressure heat additional
- 3-4 Isentropic expansion (pada turbin)
- 4-1 constant-pressure heat rejection

Dengan asumsi sistem berjalan secara *steady flow*, dan dengan mengabaikan nilai dari energi kinetik serta potensial dalam perhitungan kesetimbangan energy yang terjadi sehingga didapat persamaan sebagai berikut [1]:

$$(q_{in} - q_{out}) + (W_{in} - W_{out}) = h_{exit} - h_{inlet} \quad (2.1)$$

Dimana,

$$q_{in} = h_3 - h_2 = C_p(T_3 - T_2) \quad (2.2)$$

$$q_{out} = h_4 - h_1 = C_p(T_4 - T_1) \quad (2.3)$$

$$w_{in,comp} = h_2 - h_1 = C_p(T_2 - T_1) \quad (2.4)$$

$$w_{out,turb} = h_3 - h_4 = C_p(T_3 - T_4) \quad (2.5) \text{ dan}$$

$$\text{Back work ratio, } r_{bw} = \frac{w_{comp}}{w_{turb}} \quad (2.6)$$

Dan efisiensi termal secara ideal untuk siklus Bryton adalah sebagai berikut [1]:

$$\eta_{th,Bryton} = \frac{W_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{C_p(T_4 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)} \quad (2.7)$$

Dan karena proses 1-2 dan 3-4 berlangsung secara isentropic dan  $P_2 = P_3$  serta  $P_4 = P_1$ , maka [1]:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(k-1)/k} = \frac{T_3}{T_4} \quad (2.8)$$

## II.II Faktor-Faktor Pada Desain Combustion Chamber

Berikut adalah beberapa faktor yang mempengaruhi desain pada combustion chamber [8]:

1. Flame Stabilizaton:
  - a. Kualitas nossel dalam membuat pusaran aliran bahan bakar.



- b. Bentukkan aliran (udara dan bahan bakar) yang mempengaruhi penyebaran api yang membuat nyala api stabil/tidak mudah padam.
2. Combustion dan dilution:
  - a. Tingkatan proses pembakaran, agar dapat meminimalisir asap
3. Film cooling of liner:
  - a. Mempengaruhi kekuatan material dan fatigue pada liner.
  - b. Umumnya dengan dibuat lubang-lubang kecil pada liner sebagai pendinginannya.
4. Fuel atomization and ignition:
  - a. Proses pencampuran udara dan bahan bakar harus disesuaikan agar daya yang dihasilkan dapat optimal.
  - b. Untuk ignition secara teoritical harus dicari waktu yang optimalnya namun untuk desain ini kami menggunakan spiritus sebagai pemicu awal.
5. Gas injection:
  - a. Perbedaan aliran udara yang ada pada combustor dengan aliran bahan bakar dari injection menyebabkan pencampuran menjadi kurang homogen.
  - b. Sehingga diperlukan alat tambahan berupa orifice, swirlers dan venturi nozzle untuk mengatasinya.
2. Wall-cooling:
  - a. Dapat berupa membuat liner/chamber dengan bahan oxidant-resistance
  - b. Menggunakan udara pendinginan yang optimal pada liner / chamber seperti pada poin 3.
3. Combustor material:
  - a. High fatigue resistance (Nimonic 75, 80 dan 90) yakni campuran antara nikel dan chromium serta titanium carbide sebagai tambahan. Namun, kami menggunakan stainless steel.
4. Disamping itu, Combustor harus memiliki temperature outlet yang seragam untuk menghindari thermal stress pada blade yang menyebabkan fracture. Disamping itu, gradient temperature menyebabkan bending dan retakan pada chamber. Hal lain yang perlu dihindari adalah carbon deposit yang menyebabkan pressure loss dan mengubah aliran dari swirler serta smoke yang dapat mencemari lingkungan.



### II.III Kualitas Pencampuran

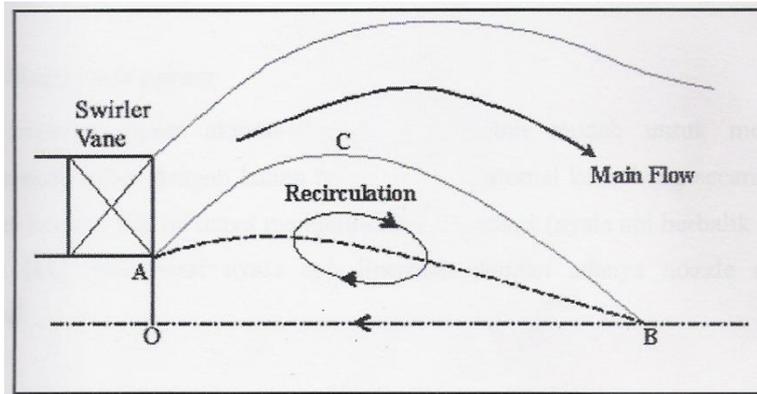
Objektif dari pembakaran yang baik ditandai dengan ”3-T of good Combustion”, yaitu time, temperatur dan turbulensi. Berikut penjelasan singkat dari ketiganya [3]:

1. Waktu persentuhan (*contact time*) yang cukup bagi reaktan untuk saling menyatu dalam kesempurnaan percampuran udara bahan bakar.
2. Kombinasi dari elemen mampu bakar dan campuran bahan bakar dengan keseluruhan udara pembakaran membutuhkan temperatur yang cukup untuk dapat dilakukan ignition/mematik unsur pokok reaktan agar dapat timbul nyala api.
3. Turbulensi untuk menimbulkan kontak yang sempurna antara udara dengan bahan bakar guna menyempurnakan percampuran udara-bahan bakar sehingga dapat tercapai pembakaran yang lebih baik.

### II.IV Swirler

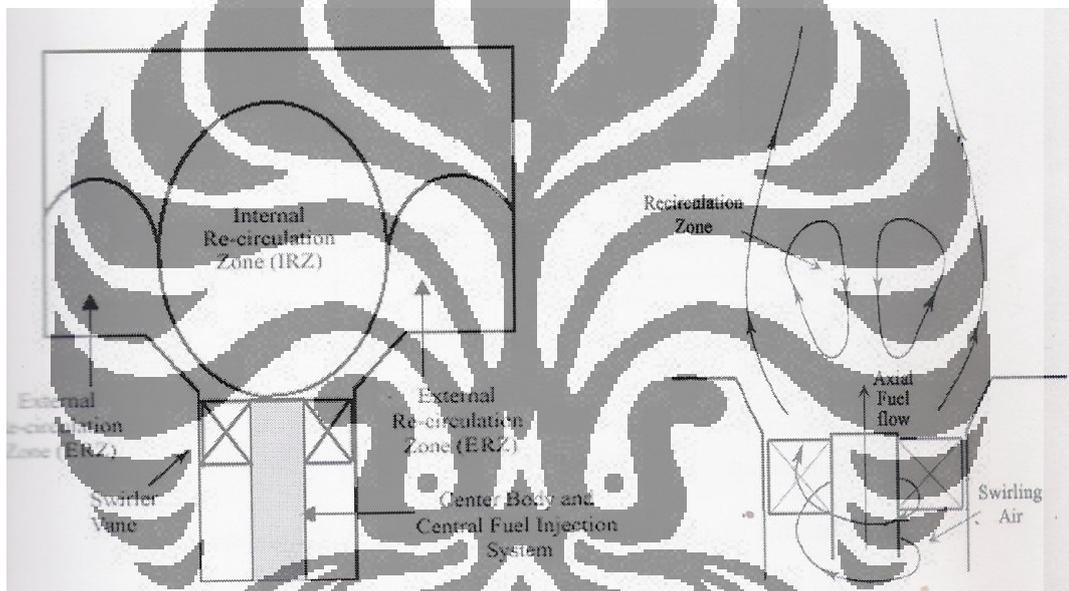
Swirler adalah salah satu metode dalam penginjeksian gas pada turbin gas disamping metode orifice atau venture nosel [8]. Komponen ini berperan dalam mengatur udara masuk untuk dicampur dengan bahan bakar dan disamping itu juga berperan dalam menstabilkan nyala pembakaran. Swirler atau swirl generator juga memiliki beberapa konsep desain seperti swirl vanes, axial-plus-tangential entry swirl generator atau direct tangential entry. Namun swirl vane lebih umum digunakan dan pembuatannya hanya menggunakan plat biasa walaupun ada pula yang menggunakan system airfoil.

Swirl sendiri merupakan gerakan berputar fluida yang diberikan ke arah upstream dari orifice/nosel dan aliran ini memiliki arah tangensial bila terjadi swirl jet dan menghasilkan kecepatan radial bila tidak swirl jet. Pada kasus *strong swirl* terjadi efek *vortek breakdown* yang merupakan rugi terhadap *gradient axial pressure* yang sangat besar menghasilkan aliran balik sepanjang axis dan membentuk *internal recirculation zone* (IRZ). Swirl jet digunakan dalam pembakaran sebagai pengontrol flame [6]. Atau dengan kata lain pembangkitan swirl dengan menambahkan aliran tangensial pada aliran axial membentuk IRZ yang pada pembakaran *non-premixed* berfungsi dalam menyempurnakan percampuran udara dengan bahan bakar agar pembakaran dapat berjalan sempurna, untuk menstabilkan beberapa fraksi hasil pembakaran, agar terbakar kembali sehingga kadar partikel padat pada exhaust gas dapat dikurangi [3].



Gambar 2. 2. IRZ pada swirl

sedangkan timbulnya *zona resirkulasi eksternal* (ERZ) timbul akibat ekspansi geometris dari aliran udara pembakaran, [3].



Gambar 2. 3. Zona resirkulasi pada non-premixed swirl burner.

## II.V Swirl Number

Intensitas dari swirl yang merupakan bentuk aliran pada burner dapat diasosiasikan dengan persamaan dimensionless parameter, swirl number didefinisikan sebagai [5]:

$$S = \frac{G_w}{G_u r_e} \quad (2.9)$$

Variabel  $G_w$  merupakan parameter axial flux dari momentum angular dan  $G_u$  adalah axial flux dari momentum axial (axial thrust) dan  $r_e$  adalah nozzle radius burner atau dalam hal ini diameter masuk ke combustion chamber. Dimana  $G_w$  dan  $G_u$  adalah [5]:



$$G_w = 2\pi \int_0^r (wr)\rho ur \, dr$$

$$\text{and } G_u = 2\pi \int_0^r u\rho ur \, dr + 2\pi \int_0^r Pr \, dr \quad (2.10)$$

Parameter  $G_w$ , axial flux dari momentum angular dan  $G_u$ , axial flux dari momentum axial secara berturut-turut ditentukan sebagai berikut.

- w : Angular velocity atau tangensial volicity  
 u : Axial velocity  
 P : Static pressure  
 r : Radius

Namun, karena sulitnya mendapatkan nilai P yang berubah-ubah terhadap posisi di swirling jet sehingga nilai ini diabaikan. Dan dengan demikian disederhanakan menjadi [7]:

$$S_n = \frac{\int_0^R \rho u^2 Wr^2 \, dr}{R \int_0^R \rho U^2 r \, dr} \quad (2.11)$$

Dimana:

R = Radius swirler

## II.VI Turbulent

Turbulent adalah keadaan aliran fluida dimana nilai Re lebih dari nilai kritisnya sehingga membuat perubahan yang radikal pada karakteristik aliran atau dengan kata lain kecepatan dan properties aliran lainnya berubah secara random dan chaotic. Pada akhirnya menunjukkan perilaku aliran yang juga random dan chaotic karena gerak fluida secara intrinsik bersifat unsteady walau terhadap boundry condition yang konstan. Berikut adalah salah satu pemodelan dari kasus turbulent [4].

### II.VI.I k-ε Model

Pemodelan turbulent ini digunakan ketika factor konvesi dan difusi tidak lagi diabaikan dimana kita memprediksi adanya aliran balik/recirculating flow. K-ε model ini terfokus pada mekanisme yang berpengaruh terhadap *kinetic energy* [4].

Secara sederhana teori ini berawal dari persamaan kinetic energy.



$$K = \frac{1}{2}(U^2 + V^2 + W^2) \quad (2.12)$$

Lalu dikembangkan lebih lanjut dengan penambahan matrix rate of deformation,  $e_{ij}$  dan turbulent stress,  $\tau_{ij}$ . Lebih lanjut lagi dihubungkan dengan komponen x, y dan z persamaan Reynold menghasilkan mean flow kinetic energy (Tennekes and Lumley, 1972). Lalu dihubungkan lagi dengan persamaan Navier-stokes menghasilkan turbulent kinetic energy (Tennekes and Lumley, 1972).

Kemungkinan lainnya dikembangkan dengan persamaan transport serupa untuk kuantitas turbulent lainnya termasuk rate of viscous dissipation,  $\varepsilon$  (Bradshaw et al, 1981). Namun, persamaan  $\varepsilon$  ini banyak memiliki unknown dan unmeasurable term. Standard  $k$ - $\varepsilon$  model memiliki 2 persamaan, satu untuk  $k$  dan satu lagi untuk  $\varepsilon$  (Launder and Spalding, 1974).

Disini digunakan  $k$  dan  $\varepsilon$  untuk mendefinisikan velocity scale,  $\theta$  dan length scale,  $l$  yang menunjukkan large scale turbulence :

$$\theta = k^{1/2} \quad l = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (2.13)$$

Persamaan lainnya yang dilibatkan sebagai validitas dalam  $k$ - $\varepsilon$  model adalah small edy, variable  $\varepsilon$  digunakan sebagai large edy scale  $l$ . Sehingga didapat :

$$\mu_t = C_\mu \rho \theta l = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.14)$$

Dimana  $C_\mu$  adalah dimensionless constant.

Dan berikut adalah standard  $k$ - $\varepsilon$  Model

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k \right] + 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \varepsilon \quad ($$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \mathbf{U}) = \text{div} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad } \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.15)$$



Rate of change of $k$ or $\varepsilon$	+ Transport of $k$ or $\varepsilon$ by convection	= Transport of $k$ or $\varepsilon$ by diffusion  Rate of - destruction of $k$ or $\varepsilon$	+ Rate of production of $k$ or $\varepsilon$
---	---	---	--

(2.16)

Berikut adalah 5 adjustable constant dengan nilai yang kompresip terhadap data dan curvit sebagai berikut.

$C_{\mu} = 0.09;$ $\sigma_k = 1.00;$ $\sigma_{\varepsilon} = 1.30;$ $C_{1\varepsilon} = 1.44;$ $C_{2\varepsilon} = 1.92$
--

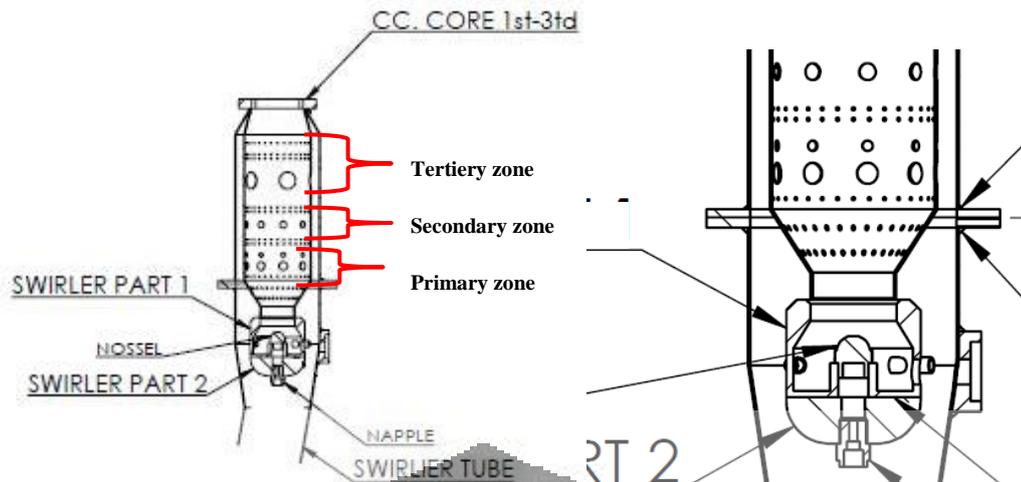
(2.17)

## II.VII Gas Turbin Seri GT-85

Disini kami cantumkan sekilas mengenai gas turbin seri GT-852 karena kami banyak mengadaptasi dari tipe ini. Sistem pembakaran yang dibuat ini sama dengan tipe GT-852 yang terdiri dari 2 komponen dasar yaitu swirler yang terhubung dengan nosel dan combustion chamber. Hanya saja yang dibuat ini akan kami menggunakan swirler dengan varian yang berbeda. Untuk lebih jelasnya mengenai desain kami dapat dilihat pada bab III dan lampiran.

Swirler adalah komponen yang berfungsi memutar aliran udara sehingga terjadi pencampuran yang diharapkan dengan *atomized fuel* yang disemprotkan nosel. Pencampuran bahan bakar dengan udara dimulai dari swirler dan diteruskan ke combustion chamber sebagai *expanding swirling flow* [10].

Berikut adalah *redrawing* dari GT-852 (untuk bentuk swirler yang sama) dari desain *combustion chamber* yang memiliki lubang-lubang disekitarnya ini memungkinkan aliran udara memiliki urutan *flow pattern*. Disamping itu memungkinkan udara masuk dalam bentuk toroidal vortex yang dihasilkan dari *expanding swirl flow* dan udara masuk melalui primary hole atau *primary zone* (jajaran lubang besar pertama dari bawah). Pada zona ini pembakaran diperkirakan memiliki *A/F ratio* secara stoikiometri sebesar 15 : 1 [10].



Gambar 2. 4. Drawing 2 komponen dasar pada sistem  
Combustion GT-85.

Gambar 2. 5. Perbesaran pada bagian swirler.

Pada jajaran lubang besar kedua dari bawah disebut sebagai *secondary zone*. Di zona ini memungkinkan lebih banyak udara sebagai cooling dari hasil pembakaran dan keseluruhan A/F ratio di zona ini sekitar 35 : 1. Atau dapat dikatakan sebagai *reduction of gas temperature* [10].

Dan jajaran lubang besar yang ketiga dan merupakan jajaran lubang terbesar ini disebut tertiary zone. Pada zona ini lebih memungkinkan pemasukkan udara yang lebih besar sehingga menghasilkan A/F ratio aliran gas keluaran sekitar 70 : 1. Atau dapat dikatakan sebagai *dumping of A/F* sekitar sebesar 50% dengan maksud mereduksi *outlet temperature* sehingga didapat temperatur yang terdistribusi merata [10].

Disamping itu, lubang-lubang kecil diantara zona-zona tersebut berperan sebagai cooling flow untuk dinding combustion chamber dan menjaganya pada temperature operasi yang aman [10].

### II.VII.I Performa Pada Combustion Chamber GT-85

Dalam turbin gas, bahan bakar hidro karbon dibakar dalam combustion chamber secara constant process terutama pada tekanan konstan. Untuk itu digunakan AFR sebesar 60/70:1 hal ini ditujukan pula sebagai *safety limit* terhadap temperatur input ke turbin terutama pada material blade turbine. Parameter penting dalam pengamatan proses pembakaran ini adalah pressure loss dan temperatur keluaran dari combustion chamber. Dengan menganggap tekanan sepanjang ruang bakar adalah sama, atau perubahan tekanan serendah mungkin terjadi sehingga output dari power turbin meningkat. Namun, pressure



drop seharusnya diimbangi dengan air mixing yang efektif dan pendinginan dengan pembakaran yang stabil pada combustion chamber. Pressure drop dapat didefinisikan sebagai [10]:

$$\Delta P = \frac{P_2 - P_3}{P_2} \cdot 100\% \quad (2.18)$$

Ketika hasil dari pembakaran meninggalkan ruang bakar, temperature gas seharusnya sama dan setinggi mungkin berdasarkan AFR.

Temperature gas yang didapat biasanya dibandingkan dengan temperature yang didapat secara teoritikal dengan AFR yang sama, berikut adalah hubungan antara teoritikal dengan hasil percobaan [10].

$$\text{Combustion efficiency, } \eta = \frac{T_{3i} - T_2}{T_{3i} - T_2} \times 100\% \quad (2.19)$$

Dimana :  $T_{3i} - T_2 = \text{theoretical temperature less } (\Delta T_{cct})$

Nilai dari  $(\Delta T_{cct})$  didasarkan atas combustion analysis work yang diambil dari NGTE (ref. 1) dan termasuk dissociation effects. Dan berikut adalah persamaannya (persamaan ini hanya berlaku untuk tipe bahan bakar kerosene/minyak tanah) [10]:

$$\Delta T_{cct} = \frac{43740 - 10T_2^1}{1,0078A/F + 6,6} + \delta \text{ deg. C} \quad (2.20)$$

Dimana :

$T_2^1 = \text{Combustion chamber inlet temperature } (^{\circ}\text{C})$

$A/F = \text{air/fuel ratio}$

$\delta = \text{correction factor (biasanya digunakan } 2^{\circ}\text{C)}$

Dan persamaan lainnya yang dirumuskan untuk combustion chamber seri GT-85 adalah sebagai berikut [10]:

$$P_1 = P_{amb} - 97,9 \cdot 10^{-6} \Delta P \quad (2.21)$$

$$\dot{m}_a \frac{\sqrt{T_1}}{P_1} = 0,3005 \sqrt{\frac{\Delta P}{P_1}} \text{ untuk } \Delta P \text{ dalam mm.wg} \quad (2.22)$$

$$\dot{m}_a \frac{\sqrt{T_1}}{P_1} = 0,9597 \sqrt{\frac{\Delta P}{P_1}} \text{ untuk } \Delta P \text{ dalam m.bar} \quad (2.23)$$



## BAB III

### SIMULASI DAN PERHITUNGAN

#### III.I Pengantar

Dalam melakukan simulasi aliran pada ruang bakar ini menggunakan program CFD (*Computational Fluid Dynamic*). Dalam simulasi CFD ini menggunakan software solidworks, dimana software ini menggunakan persamaan *Navier-Stokes* (sebagai *governing equation*) yang merumuskan persamaan kekekalan massa, momentum dan hukum kekekalan energi pada aliran fluida. Serta disempurnakan dengan *fluid state equation* yang mendefinisikan *nature of fluid* dan disempurnakan dengan *empirical dependency* dari densitas fluida, viskositas, dan konduktivitas termal. Sedangkan *inelastic non-Newtonian fluid* bergantung dari viskositas dinamik pada *flow shear rate* dan temperatur. Dan *compressible liquid* bergantung pada densitas di tekanan tertentu. Keterangan-keterangan mengenai ini semua didefinisikan pada geometry, boundary dan initial conditions [9].

Flow simulation juga mampu memprediksi aliran laminar dan turbulenta. Dimana aliran laminar terjadi pada *low reynold number* dan ketika melebihi suatu nilai tertentu (*critical point*) berubah menjadi turbulenta. Untuk memprediksi aliran turbulenta SW menggunakan *the Favre-averaged Navier-Stokes equation* (merupakan *flow equation* untuk *compressible turbulent flow* dimana efek fluktuasi densitas diabaikan dan hanya mengikutsertakan *mean density variation* atau persamaan ini disebut juga *density weighed average*) dimana *time-averaged* mempengaruhi aliran turbulenta pada parameter aliran yang dipertimbangkan. Hal lainnya *seperti large-scale, time dependent phenomena* secara langsung dimasukkan ke perhitungan. Melalui prosedur ini, ada istilah lain seperti *Reynold stress* muncul dalam persamaan yang harus di sediakan sebagai informasi tambahan. Serta dilengkapi dengan persamaan transport untuk turbulenta *kinetic energy* dan *dissipation rate* yang dikenal dengan *K-ε* standard [9].

#### III.II Model

Desain sedikit terinspirasi dari desain swirler pada jurnal “*A Multiple Inlet Swirler for Gas Turbine Combustors*” dimana idenya adalah mencoba memisahkan antara komponen

axial dan tangensial namun mekanisme pemisahannya sendiri tidak begitu terjelaskan. Di sini kami menawarkan suatu ide penggunaan cap (plate penutup bagian bawah blade) dengan dimensi berbeda yang nantinya disesuaikan kebutuhan. Namun disini hanya akan kita bahas seberapa jauh pemanfaatan plate ini disamping ide utamanya adalah membandingkan swirler lama pada GT-852 dengan tipe blade. Berikut adalah model swirler yang kami maksud. Untuk desain detailnya dapat dilihat pada lampiran.



Gambar 3. 1 Model desain lama.



Gambar 3. 2 Model desain baru

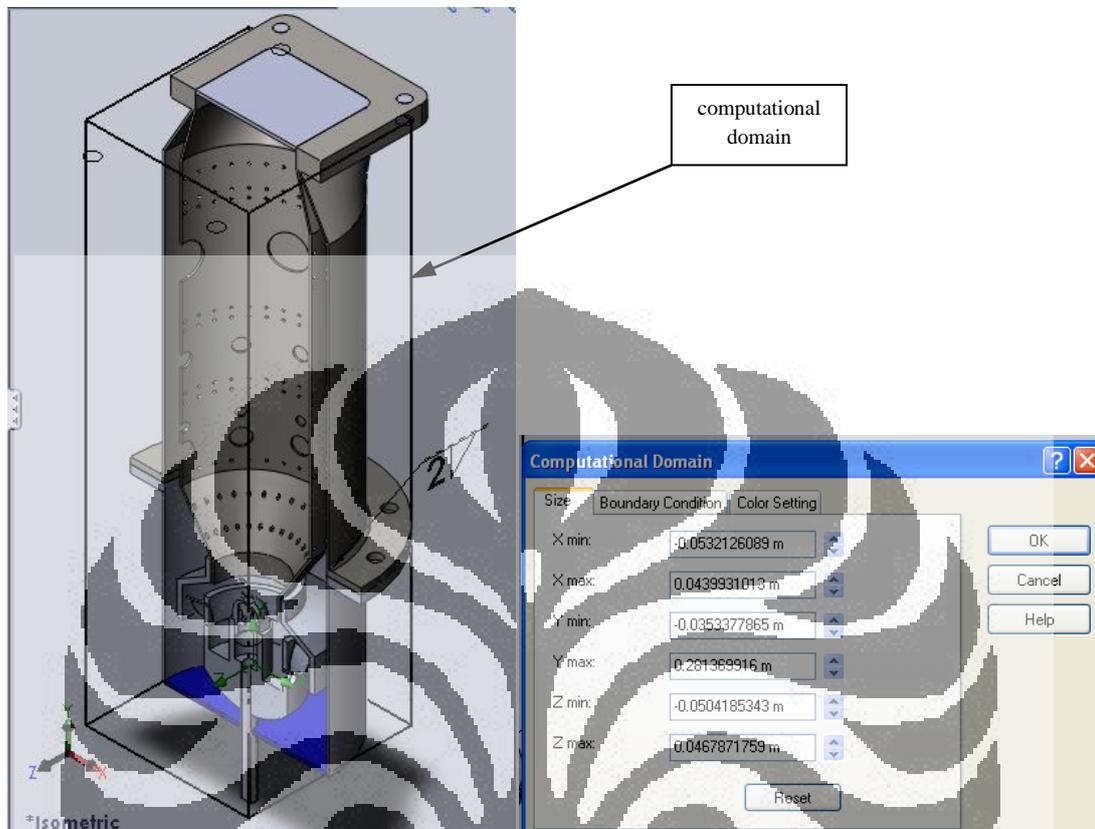
### III.III Prosedur dan komputasi

Seperti umumnya analisis komputasi CFD memiliki 3 elemen utama sebagai berikut :

#### A. *Pre-Processor*

Merupakan langkah dalam menginput flow problem, umumnya adalah :

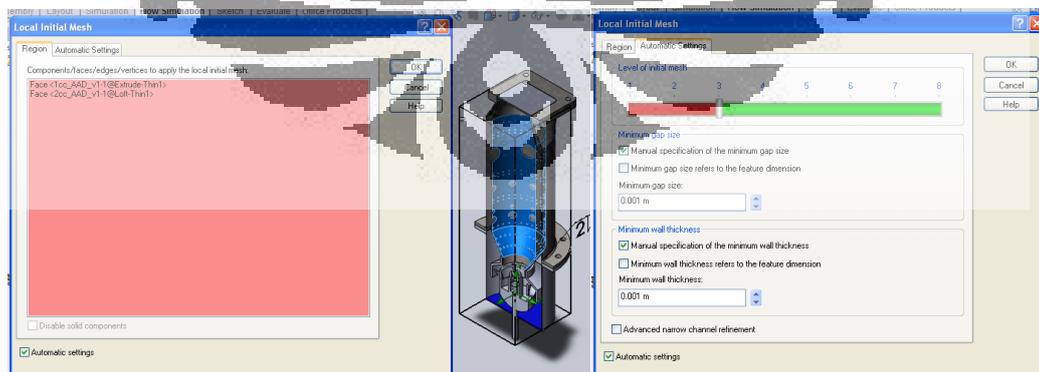
- a. Mendefinisikan geometri yang akan dilibatkan dalam perhitungan/simulasi yang disebut computational domain. Dan berikut adalah model yang dibuat serta computational domain untuk model:



Gambar 3.3 Pengaturan computational pada SolidWorks

- b. Pembuatan grid atau mesh.

Grid atau mesh dibuat secara global dan local untuk mengefektifkan jumlah sel. Berikut adalah pembuatannya:



Gambar 3.4 Pengaturan local mesh dan pengaturan global mesh juga memiliki tampilan serupa pada gambar kanan

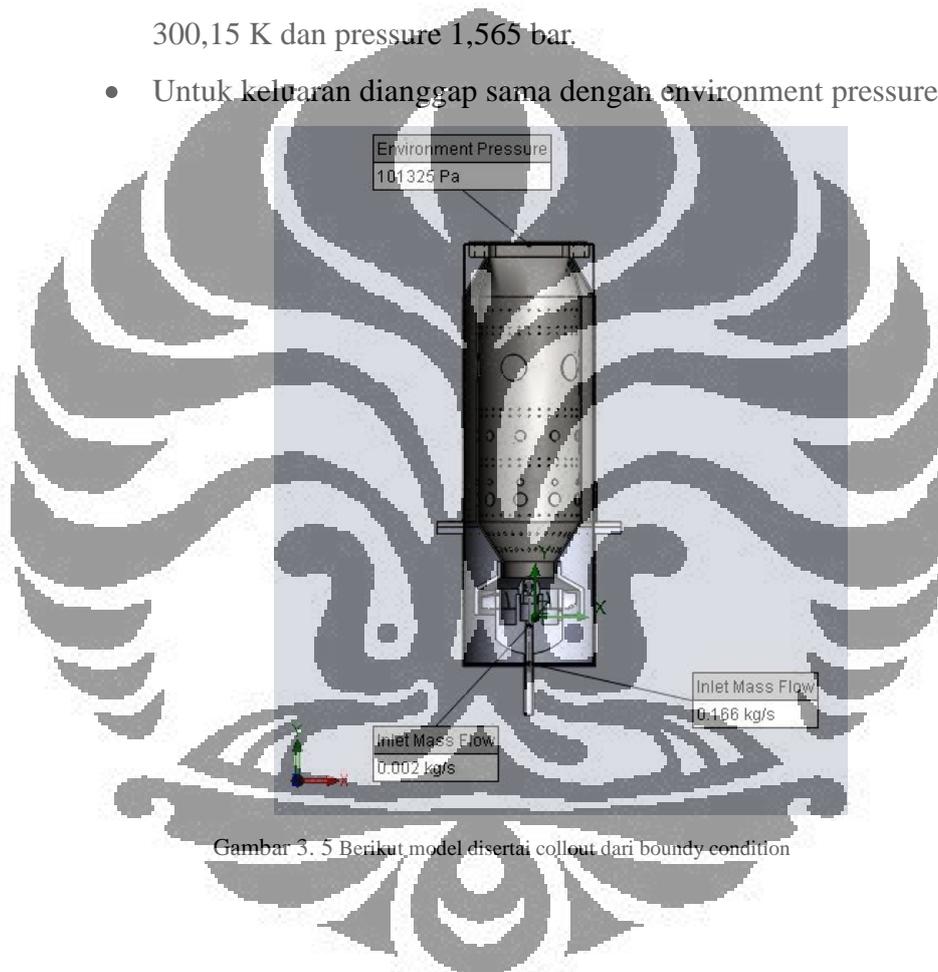
- c. Menentukan parameter fisik dan atau kimia yang terlibat serta property fluida.



- Analisis type : Internal dan gravitasi pada arah Y negative.
- Fluid : Udara (air) dengan secara otomatis memuat data properties-nya yang telah ada pada library properties software.
- Wall condition : Adiabatic dan tidak ada friksi pada permukaan model.
- Initial condition : Default

d. Menentukan boundry condition.

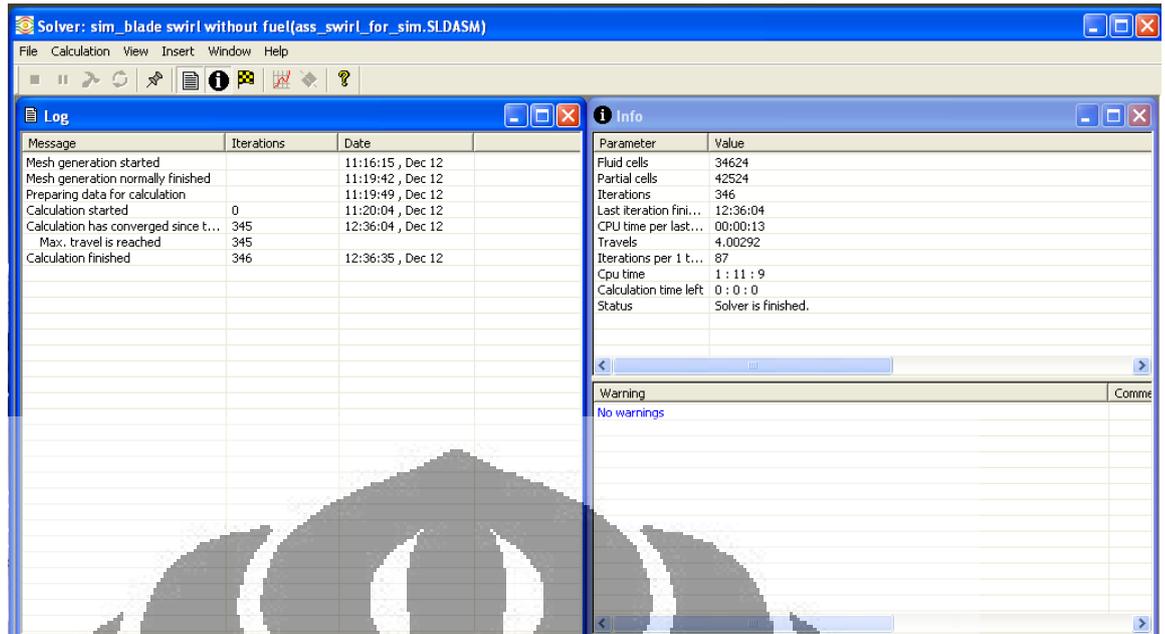
- Untuk Pipa supply udara inlet mass flow udara : 0,166kg/s temperature 300,15 K dan pressure 1,565 bar.
- Untuk keluaran dianggap sama dengan environment pressure.



Gambar 3. 5 Berikut model disertai collout dari boundry condition

### B. Solver atau processor

Merupakan tahap penyelesaian persamaan yang digunakan dalam software atau governing equation. Langkah ini menggunakan metode numeric sehingga tahap solver akan melakukan pendekatan terhadap variable tidak diketahui. selanjutnya, diskritisasi dan dilanjutkan dengan solusi dengan persamaan aljabar. Untuk software ini solver bekerja seperti yang telah sedikit diilustrasikan pada pengantar diatas.



Gambar 3. 6 Tampilan saat running.

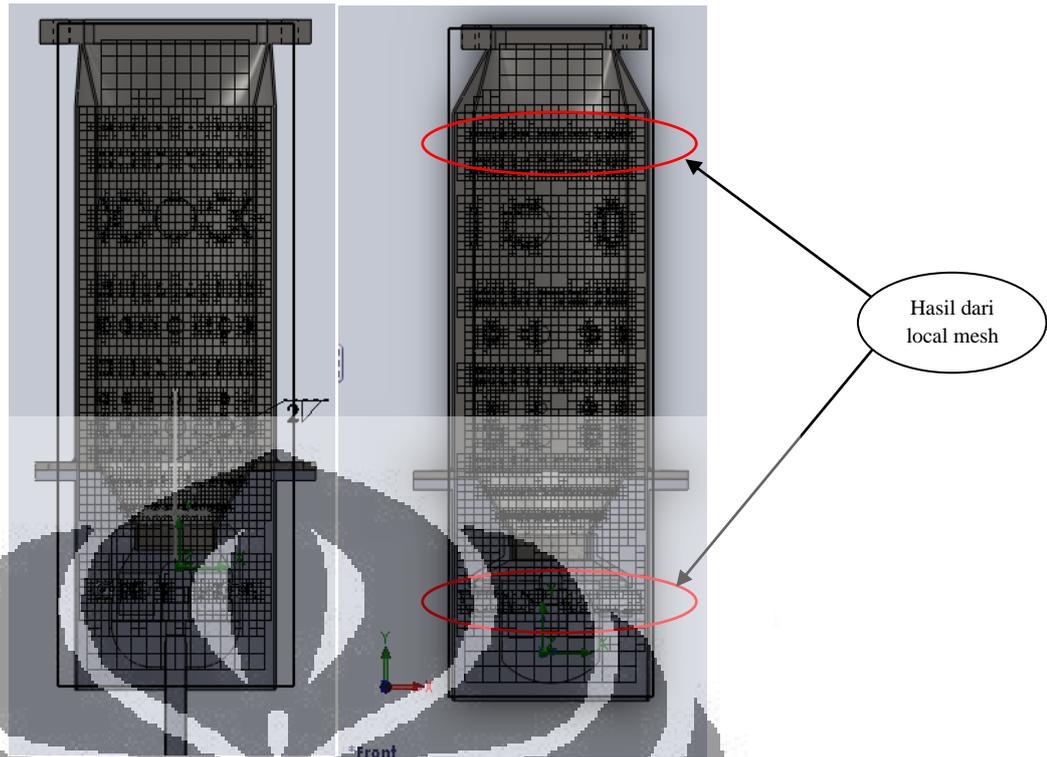
### C. *Post-processor*

Merupakan tahap penyajian hasil dari solver. Umumnya pada tahap ini dapat menyajikan hal-hal berikut:

- a. Domain geometry dan grid display
- b. Vector plots
- c. Line and shaded contour plots
- d. 2D dan 3D surface plots
- e. Particle tracking
- f. View manipulation (translation, rotation, scaling etc.)
- g. Colour postscript output

Berikut adalah beberapa tahap post-processor yang ditampilkan dalam software yang digunakan ini:

Hasil mesh:



Gambar 3. 7 Hasil mesh/grid pada tingkat 3 baik global maupun local, namun mesh terkecil disesuaikan geometry masing-masing bagian (kiri desain lama dan kanan desain baru tanpa blade).

Berikut keterangan mesh dari desain lama:

Cells	68158
Fluid Cells	27616
Solid Cells	6010
Partial Cells	34532
Irregular Cells	0
Trimmed cells	281

Xmin	-0.0597889698 m
Xmax	0.0563084823 m
Ymin	-0.0568351711 m
Ymax	0.259850461 m
Zmin	-0.05525372 m
Zmax	0.0608437321 m

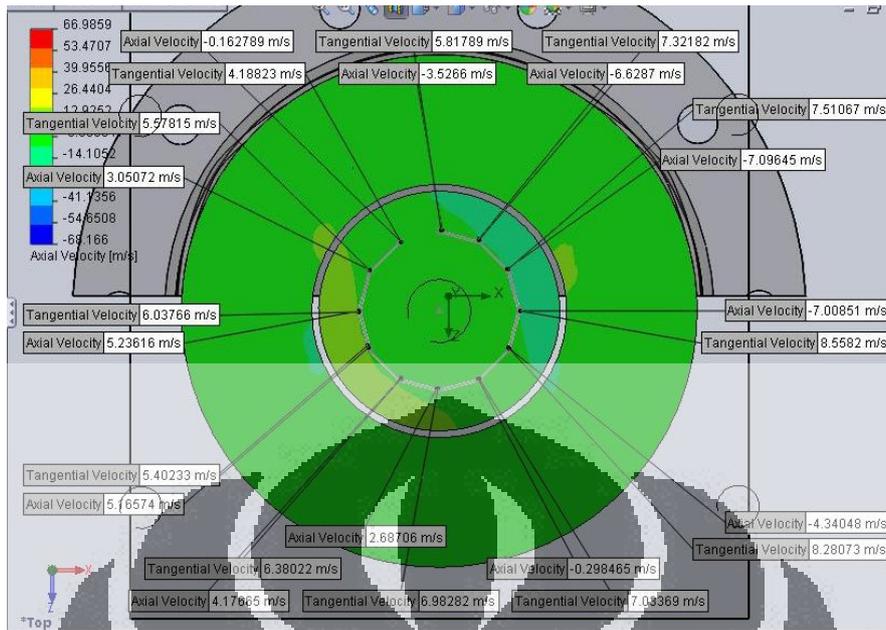
Berikut keterangan mesh dari desain baru:

Cells	66655
Fluid Cells	27258
Solid Cells	3940
Partial Cells	35457
Irregular Cells	0
Trimmed cells	331

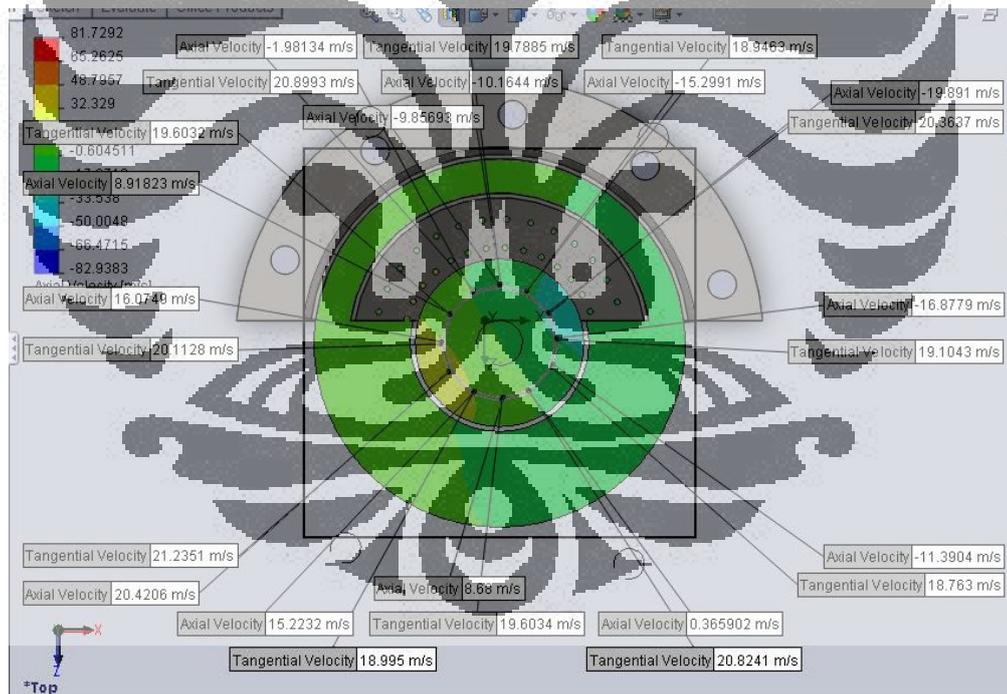
Xmin	-0.0472811167 m
Xmax	0.0550556053 m
Ymin	-0.0209169764 m
Ymax	0.295777463 m
Zmin	-0.0452872791 m
Zmax	0.0570494429 m



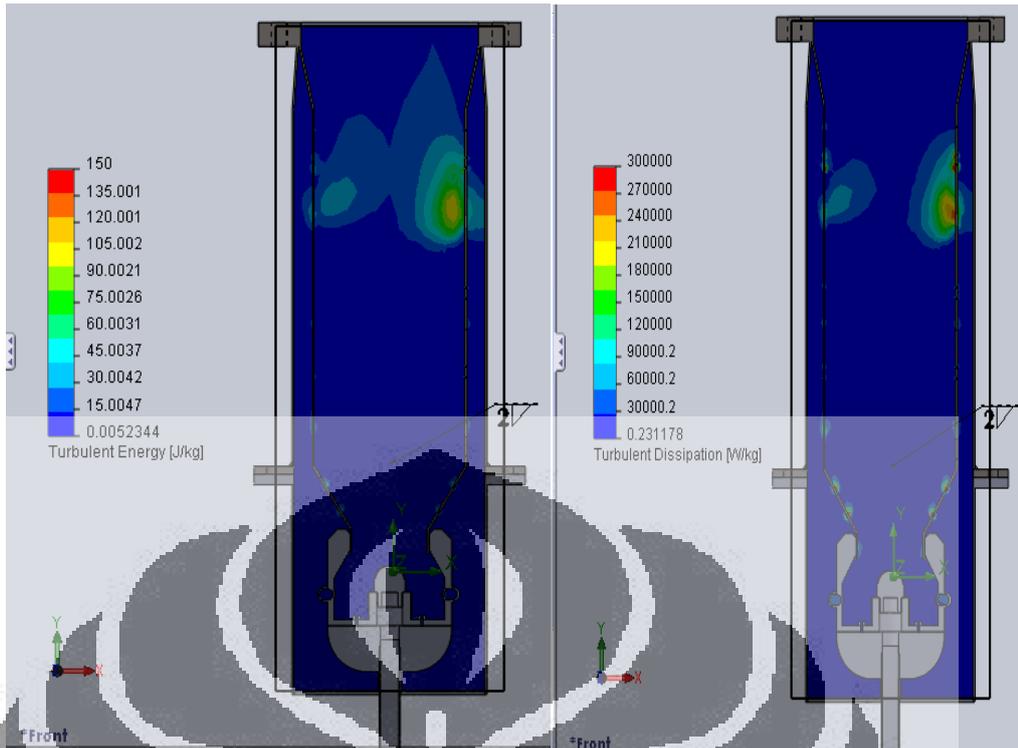
Cut plot : Dibawah ini beberapa plotting dari parameter yang akan dicoba dianalisis.



Gambar 3. 8 Cutplot kecepatan axial (desain lama) disertai 12 titik radian (tiap  $\theta= 30^\circ$ ) untuk axial dan tangensial (diambil pada  $r=15\text{mm}$  dan pada jarak 18 mm dari nosel).

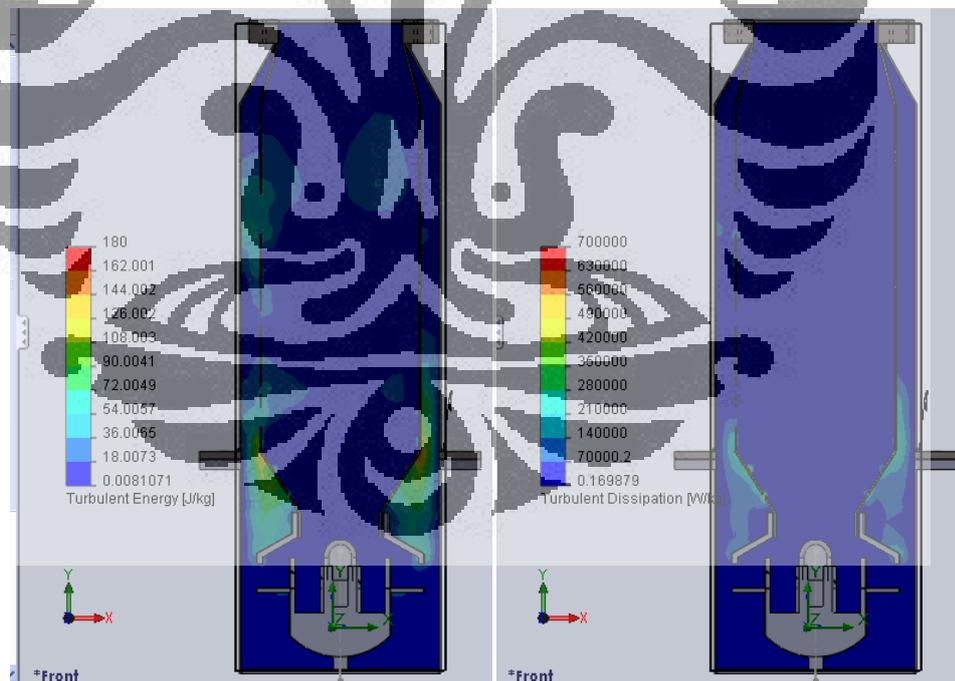


Gambar 3. 9 Cutplot kecepatan axial (desain baru dengan cap full) disertai 12 titik radian (tiap  $\theta= 30^\circ$ ) untuk axial dan tangensial (diambil pada  $r=15\text{mm}$  dan pada jarak 18 mm dari nosel).



Gambar 3. 10 Cut plot k dan ε desain lama (kiri k dan kanan ε)

dan berikut untuk salah satu tipe yang baru.



Gambar 3. 11 Cut plot k dan ε desain baru full cap (kiri k dan kanan ε)

### III.IV Perhitungan

Di sini akan dicoba dihitung besar nilai Sn atau swirl number yang terjadi pada suatu tinggi (sb. Y) dan r tertentu untuk dibandingkan terhadap perbedaan sudut blade passage-nya.



ket:  $r = 15 \text{ mm}$  (radius analisis);  $R = 38 \text{ mm}$  (radius swirler) dan  $\rho = 1,24 \text{ kg/m}^3$

Blade dibuat atau dibentuk dari plat 0.5 mm dengan diameter luar 2 in dan diambil sepanjang juring  $30^\circ$ . Blade ditempatkan pada sekeliling blade holder dengan sudut  $30^\circ$  dari axis Y terhadap singgung blade.

Desai lama:

Posisi	U	W	int( $\rho U W r^2 dr$ )	R.int( $\rho U^2 r dr$ )	Sn
	m/s	m/s			
1	-3.526	5.817	2.6305E-05	6.05906E-05	0.434143
2	-6.628	7.3218	6.22383E-05	0.000214095	0.290705
3	-7.096	7.5106	6.83511E-05	0.000245396	0.278533
4	-7.008	8.558	7.69173E-05	0.000239348	0.321362
5	-4.34	8.28	4.60869E-05	9.17953E-05	0.502062
6	-0.298	7.033	2.68791E-06	4.32786E-07	6.210703
7	2.687	6.982	2.40605E-05	3.51865E-05	0.683799
8	4.176	6.38	3.41695E-05	8.49888E-05	0.402047
9	5.165	5.402	3.57835E-05	0.000130011	0.275233
10	5.23	6.037	4.0493E-05	0.000133304	0.303764
11	3.05	5.57	2.17878E-05	4.53357E-05	0.480587
12	-0.162	4.188	8.7012E-07	1.279E-07	6.803119

Desain Baru dengan blade cap (tanpa penutup bagian bawah):

Posisi	U	W	int( $\rho U W r^2 dr$ )	R.int( $\rho U^2 r dr$ )	Sn
	m/s	m/s			
1	-4.61	27.51	0.000162648	0.000103572	1.570385
2	-15.35	27.7	0.000545313	0.001148306	0.474884
3	-22.69	26.688	0.00077655	0.002508611	0.309554
4	-25.36	26.11	0.000849207	0.003134292	0.270941
5	-22.07	27.5	0.000778381	0.002373808	0.327904
6	-13.49	26.97	0.000466606	0.00088688	0.526121
7	2.75	26.4	9.31E-05	3.69E-05	2.526316
8	14.84	26.7	0.000508162	0.001073269	0.473471
9	21.7	25.79	0.000717742	0.002294882	0.312758
10	24.78	25.82	0.000820569	0.002992565	0.274202
11	20.95	26.61	0.000714967	0.002138991	0.334254



12	10.73	26	0.000357792	0.0005611	0.637661
----	-------	----	-------------	-----------	----------

Cap menutup setengah bagian:

Posisi	U	W	$\int(\rho U W r^2 dr)$	$R.\int(\rho U^2 r dr)$	Sn
	m/s	m/s			
1	-5.658	23.1574	0.001344312	0.000624061	2.154137
2	-11.953	22.3942	0.002746375	0.00278519	0.986064
3	-17.114	21.3067	0.003741236	0.005709578	0.655256
4	-20.453	21.0216	0.004411336	0.008154832	0.540948
5	-19.321	22.9105	0.004541628	0.00727713	0.624096
6	-11.177	21.8285	0.002503206	0.002435294	1.027886
7	2.3278	21.2821	0.000508285	0.000105631	4.811885
8	11.993	22.1546	0.002726083	0.002803862	0.97226
9	16.988	19.6889	0.003431714	0.005625815	0.609994
10	19.2461	20.36	0.004020387	0.007220819	0.556777
11	17.1864	21.9966	0.003878715	0.005757988	0.673623
12	8.6618	21.6781	0.001926534	0.001462572	1.317223

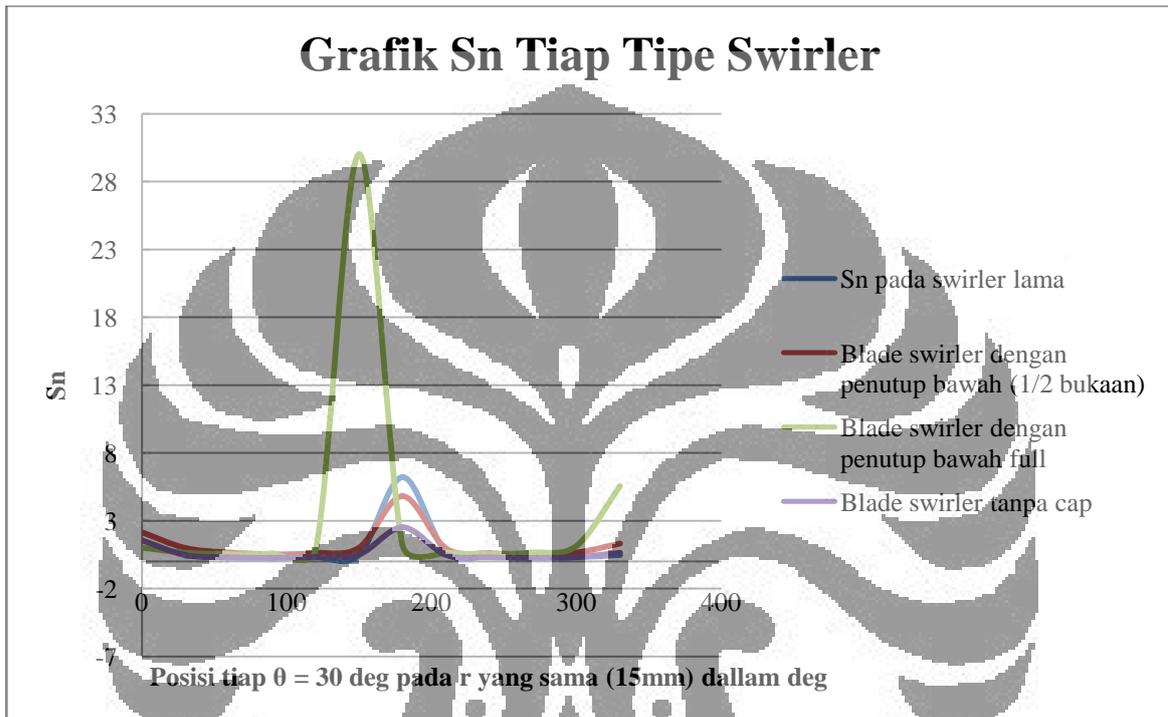
Cap menutup full:

Posisi	U	W	$\int(\rho U W r^2 dr)$	$R.\int(\rho U^2 r dr)$	Sn
	m/s	m/s			
1	-10.164	19.788	0.002063545	0.002013865	1.024669
2	-15.299	18.946	0.002973911	0.004562754	0.65178
3	-19.89	20.363	0.004155506	0.007712062	0.538832
4	-16.877	19.104	0.003308011	0.005552537	0.595766
5	-11.39	18.763	0.00219267	0.002528998	0.867012
6	0.365	20.824	7.79838E-05	2.59709E-06	30.0274
7	8.68	19.6	0.001745513	0.001468725	1.188455
8	15.223	18.995	0.002966791	0.004517534	0.656728
9	20.42	21.235	0.004448928	0.008128538	0.547322
10	16.074	20.112	0.003316856	0.005036733	0.658533
11	8.918	19.603	0.001793649	0.001550372	1.156915
12	-1.98	20.899	0.000424559	7.64243E-05	5.55529

## BAB IV

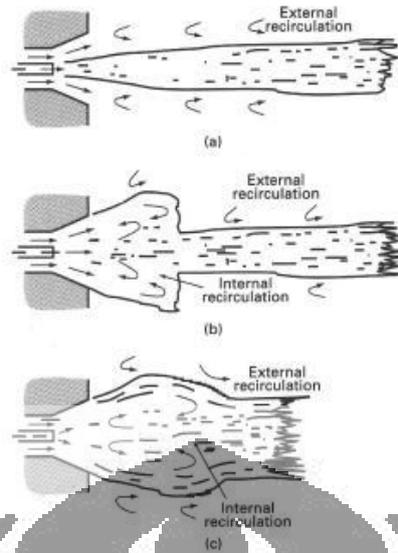
### HASIL DAN ANALISIS

Berikut didapat nilai-nilai dari swirl number  $S_n$  dari desain swirler lama dan yang baru dengan variasi cap untuk desain baru.



Grafik 4. 1 Grafik distribusi  $S_n$  dengan  $r=15\text{mm}$  pada ketinggian 18 mm dari nosel untuk masing-masing tipe swirler.

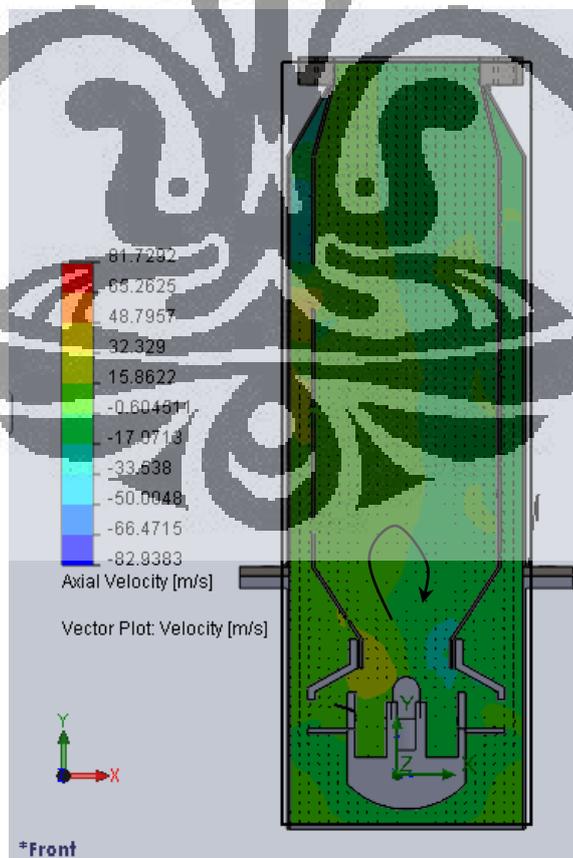
Dari grafik menunjukkan penggunaan penggunaan blade dengan cap akan menghasilkan nilai  $S_n$  yang sangat besar. Namun di sisi lain pada masing-masing grafik menunjukkan adanya nilai  $S_n$  yang ekstrim sekali pada suatu titik pengamatan pada simulasi. Diperkirakan hal ini adalah vortex breakdown akibat  $S_n$  yang terlalu besar. Hal ini menghasilkan apa yang disebut IRZ karena adanya aliran balik arah axial. Berikut berdasarkan literature percobaan proses pembakaran yang telah dilakukan. Dan gambar ke 2 dan ke 3 kurang lebih adalah gambaran untuk bentuk pembakaran yang terjadi.



Scaling 400 study flame types. Reproduced from [12]. (a) Type-0 flame; no swirl. (b) Type-1 flame; intermediate swirl. (c) Type-2 flame; high swirl.

Gambar 4. 1 Ilustrasi pembakaran dengan  $Sw$  berbeda diambil dari jurnal FLOW, TURBULENCE AND COMBUSTION OF PREMIXED SWIRLING JET FLAMES [6].

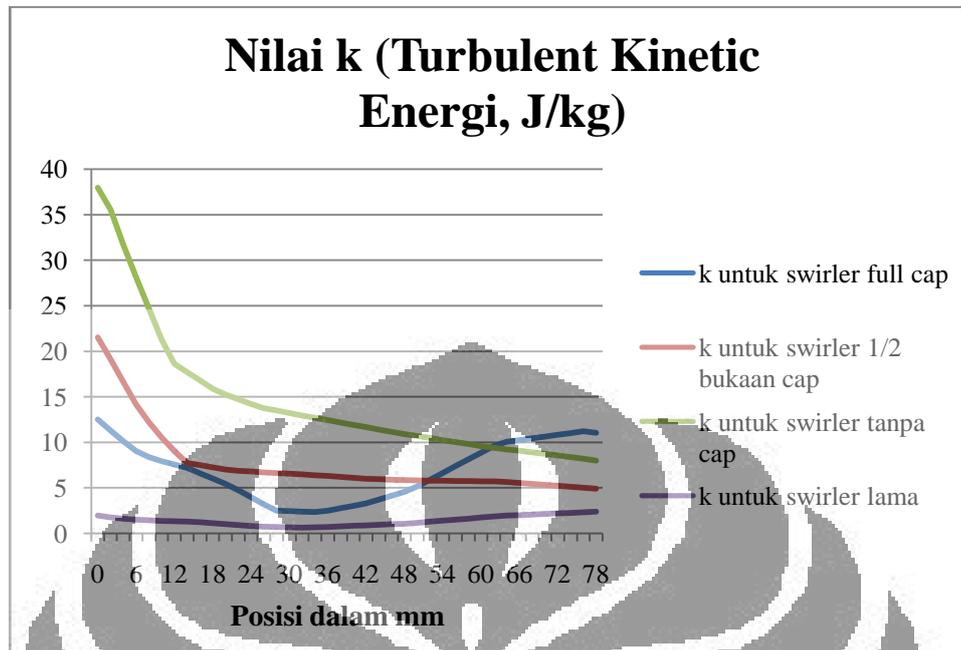
Dan berikut plot kecepatan axial dari arah depan untuk lebih jelasnya melihat peristiwa *vortex breakdown*. Terlihat peristiwa ini terjadi saat sebelum masuk zona 1.



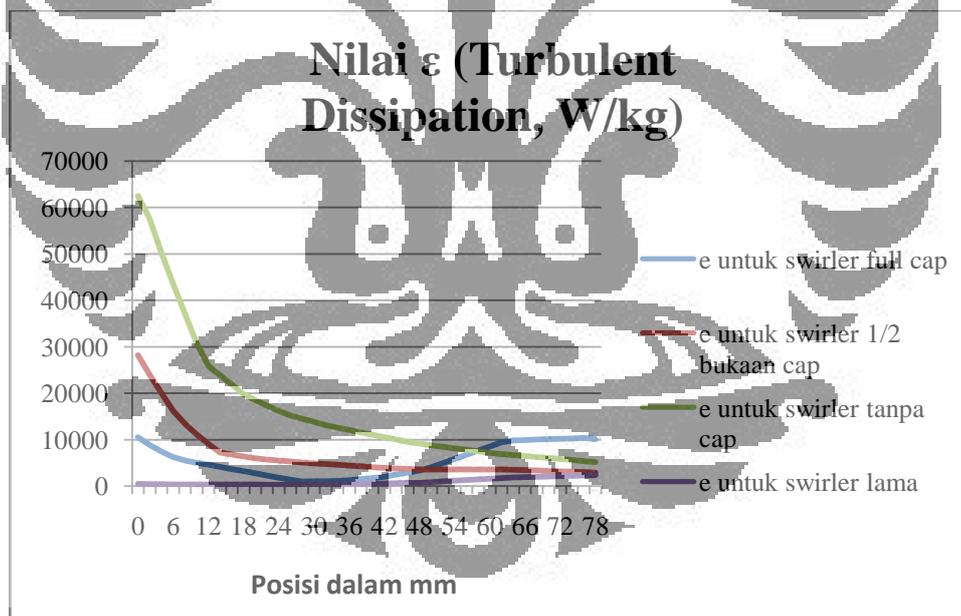
Gambar 4. 2 Plot kecepatan axial dari depan (pada model baru full cap).



Grafik  $k$  (*turbulent energy*) dan  $\varepsilon$  (*turbulent dissipation*) sebagai parameter *flame stability* dari segi turbulensi.



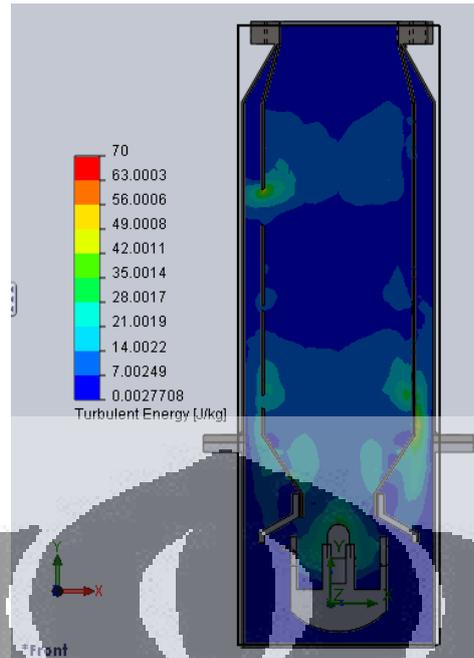
Grafik 4. 2 Distribusi turbulente kinetic energy untuk masing-masing swirler.



Grafik 4. 3 Distribusi turbulente dissipation untuk masing-masing swirler.

Berdasarkan grafik  $k$  yang merupakan *energy kinetic* dari turbulen dan  $\varepsilon$  yang merupakan dissipasi dari  $k$  yang dihasilkan dari kerja yang dilakukan pada suatu olakan kecil melawan viscous stress. Dari tiap tipe swirler antara  $k$  dan  $\varepsilon$  memiliki hubungan yang selalu sebanding. Ketika  $k$  turun secara proporsional nilai  $\varepsilon$  juga turun dan sebaliknya.

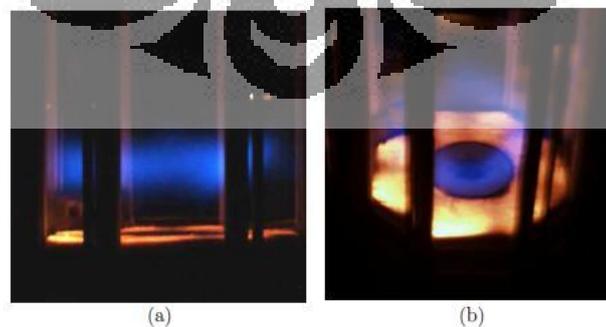
Dari grafik menunjukkan faktor axial justru memperbesar efek dari energi turbulen.



Gambar 4. 3 Cut plot nilai k pada desain baru tanpa cap.

Dari grafik jelas bahwa penggunaan swirler tipe blade tanpa cap memiliki nilai k yang lebih besar pada awalnya (dekat nosel) dibanding yang lain. Namun besarnya nilai k pada dekat nosel dikhawatirkan berpotensi api mudah padam pada saat start up. Dengan kata lain cap disamping mereduksi komponen axial ternyata juga mereduksi energi turbulen dekat nosel.

Disamping itu, peningkatan nilai  $Sn$  diiringi oleh penurunan bahkan arah dari komponen axial sehingga tercipta daerah IRZ atau daerah reciprocating. Dimana daerah ini didominasi faktor tangensial dan berdasarkan literature hal ini dapat diprediksi bahwa tipe flame yang akan muncul adalah tipe (*Swirl Stabilized Flame, SSF*) hal ini dicirikan oleh bentuk ring yang mengangkat ke arah downstream. Berikut adalah prediksinya.



Gambar 4. 4 Swirl stabilized flame ( $S \approx 0.94$ ). (a) Side view. (b) Angled view.

Gambar 4. 4 Diambil dari literatur berjudul " FLOW, TURBULENCE AND COMBUSTION OF PREMIXED SWIRLING JET FLAMES " [6].



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### V.I Kesimpulan

Melalui pemaparan data secara simulasi diatas telah membuktikan bahwa:

1. Penggunaan blade pada swirler memiliki  $Sn$  lebih besar dibanding sistem toroidal tube. Atau dengan kata lain  $Sn$  desain baru lebih besar dibanding desain lama.
2. Dan penggunaan plate pada bagian bawah blade yang disebut cap memiliki pengaruh dalam mengatur nilai  $Sn$  dan energi turbulent.
3. Khususnya cap membantu mereduksi nilai  $k$  (sebagai indicator energi kinetik turbulent) yang terjadi pada/dekat nosel atau cukup efektif dalam mengenerate *low turbulent kinetic energy* dan *high swirl number*.
4. Disamping itu, peningkatan nilai  $Sn$  diiringi oleh penurunan arah dari komponen axial sehingga tercipta daerah IRZ atau daerah recirculating yang lebih besar. Dimana daerah ini didominasi faktor tangensial yang diprediksi bentuk api akan lift up ke arah downstream.

#### V.II Saran

Penulis sarankan pengembangan selanjutnya adalah simulasi dengan proses pembakarannya agar diketahui benar-benar proses pembakarannya. Disamping itu, pengembangan lebih jauh masih banyak dapat dilakukan seperti dari segi jumlah blade, bentuk, dan lain sebagainya. Masalah lainnya yang belum dipertimbangkan adalah desain liner itu sendiri apakah perlu perubahan dari segi jumlah lubangnya ataupun rasio dimensinya.



## Daftar Pustaka

- [1] Cengel, Yunus A. dan Michael A. Boles. *Thermodynamic An Engineering Approach*. 2002. New York: Mc Graw Hill.
- [2] Fox, Robert W; McDonald, Alan T dan Pritchard, Phillip J. *Introduction to Fluid Mechanics*. 2003. USA: John Wiley & Sons.
- [3] Prabowo, Anggariawan Adi. “*Simulasi Karakteristik Pembakaran Gas Hasil Gasifikasi Biomassa pada Gas Burner Dengan Variasi Jumlah Swirl Vane*”. DTM FTUI. (2010)

- [4] VERSTEEG, H. K dan W. MALALASEKERA. *An introduction to computational fluid dynamics The finite volume method*. 1995. England : Longman Scientific & Technical.

### Jurnal :

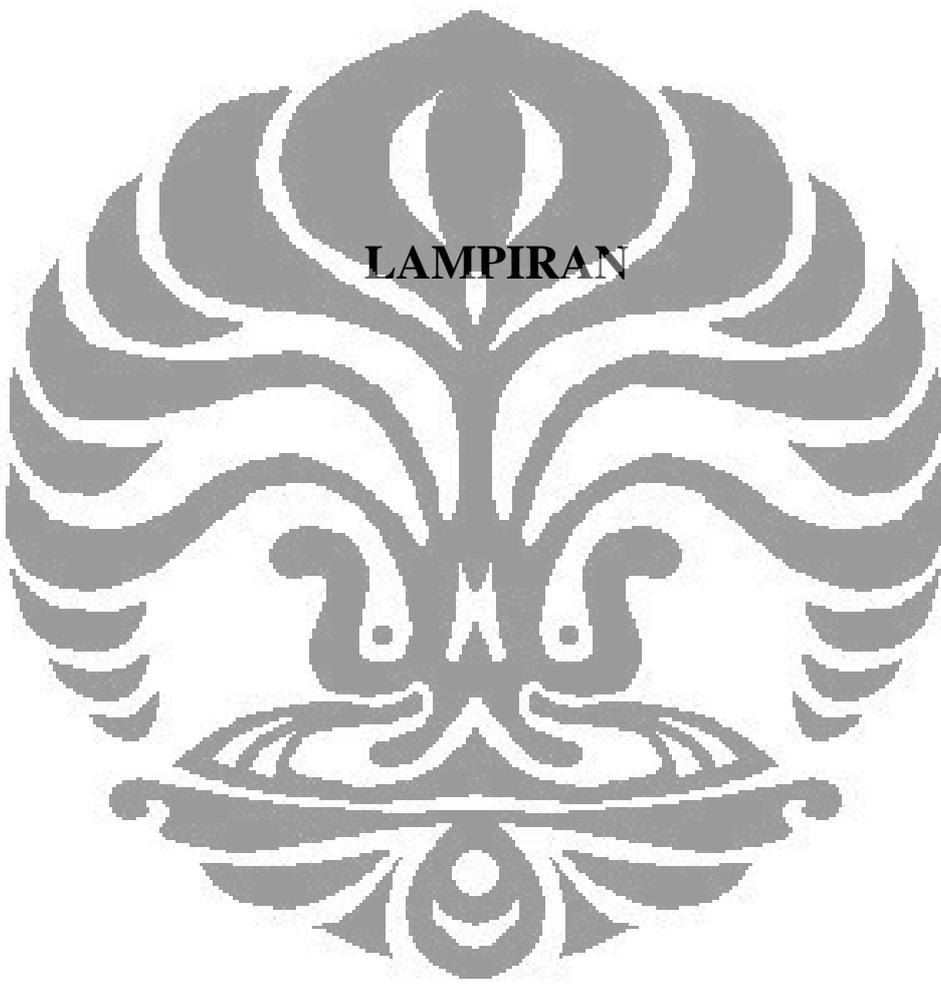
- [5] THE THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL AERODYNAMICS OF A MOVABLE BLOCK BURNER. T.J.Fudihara, L.Goldstein Jr. and M.Mori, *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 2003.
- [6] FLOW, TURBULENCE AND COMBUSTION OF PREMIXED SWIRLING JET FLAMES. Koen Vanoverberghe. 2004.
- [7] A Multiple Inlet Swirler for Gas Turbine Combustors. Yehia A. Eldrainy, Hossam S. Aly, Khalid M. Saqr, and Mohammad Nazri Mohd Jaafar. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 53. 2009.

### Web :

- [8] <http://xa.yimg.com/kq/groups/12971802/2029774189/name/GAS+TURBINE+FUNDAMENTAL.ppt>

### Sumber lainnya :

- [9] Technical Reference, help topic dan tutorial dari Solidworks.
- [10] Manual Book GT85-2 “Two Shaft gas Turbine”
- [11] Slide kuliah kapita selekta, “Low Carbon Economy” dari PT. Brema Batara.
- [12] Slide kuliah kapita selekta, “STRATEGI PENGELOLAAN ENERGI NASIONAL DALAM MENJAMIN KEAMANAN KETERSEDIAAN ENERGI” dari ESDM.

A large, semi-transparent watermark of the Universitas Indonesia logo is centered on the page. The logo is a stylized Garuda bird with its wings spread, perched on a circular base. The word "LAMPIRAN" is overlaid on the upper part of the watermark.

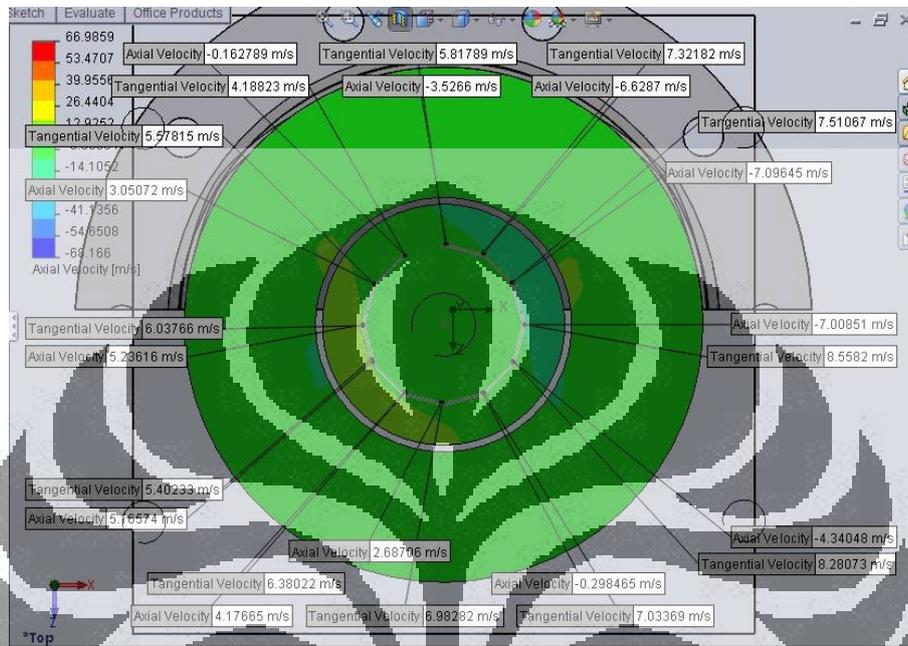
**LAMPIRAN**



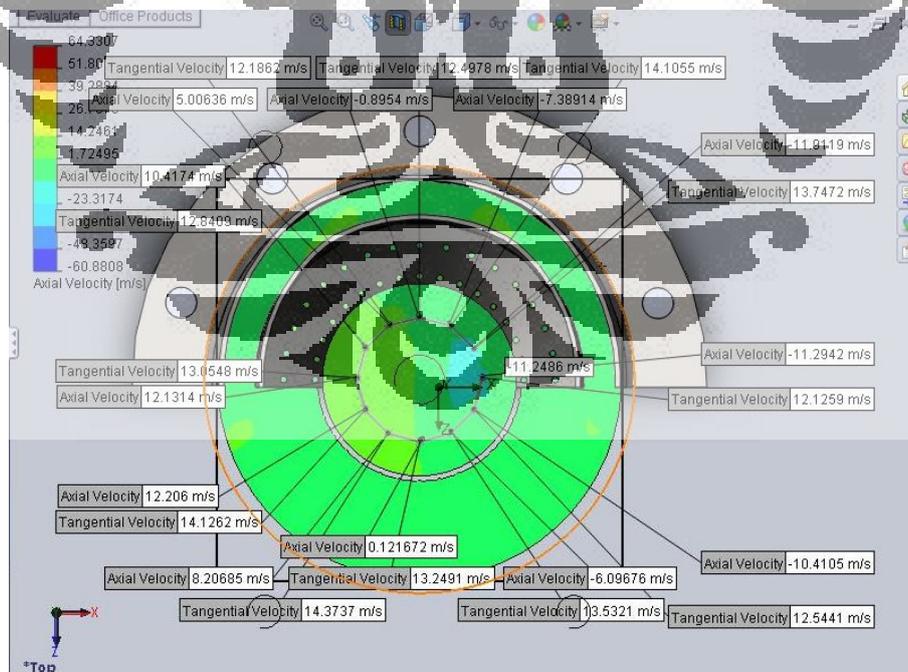
➤ **Cut Plot Distribusi Kecepatan Axial**

**Disertai 12 Titik Pada Tiap  $\theta = 30^\circ$  Dengan  $r = 15 \text{ mm}$**

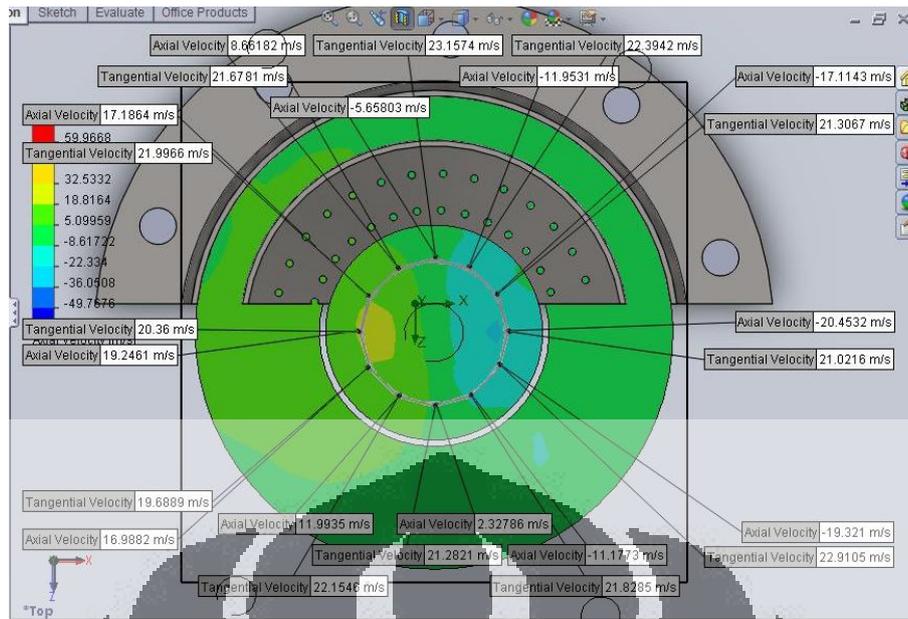
Desain lama dengan toroidal system



Desain baru tanpa cap



Desain baru dengan cap  $\frac{1}{2}$  antara top-button radius.



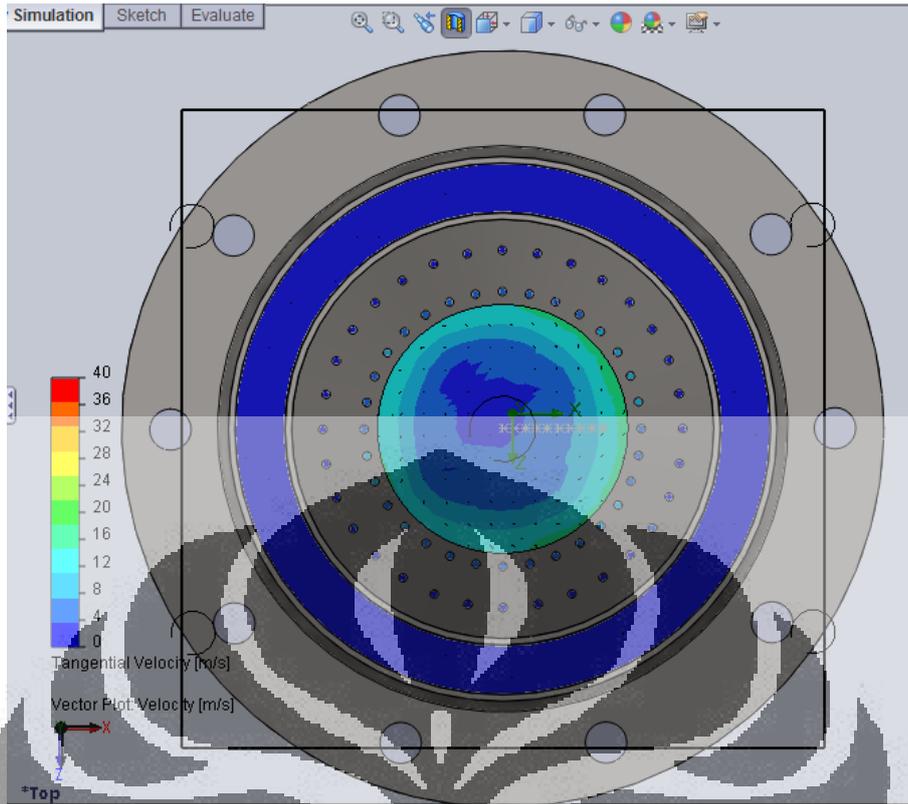
Desain baru dengan full cap (top radius sama dengan radius liner guide)



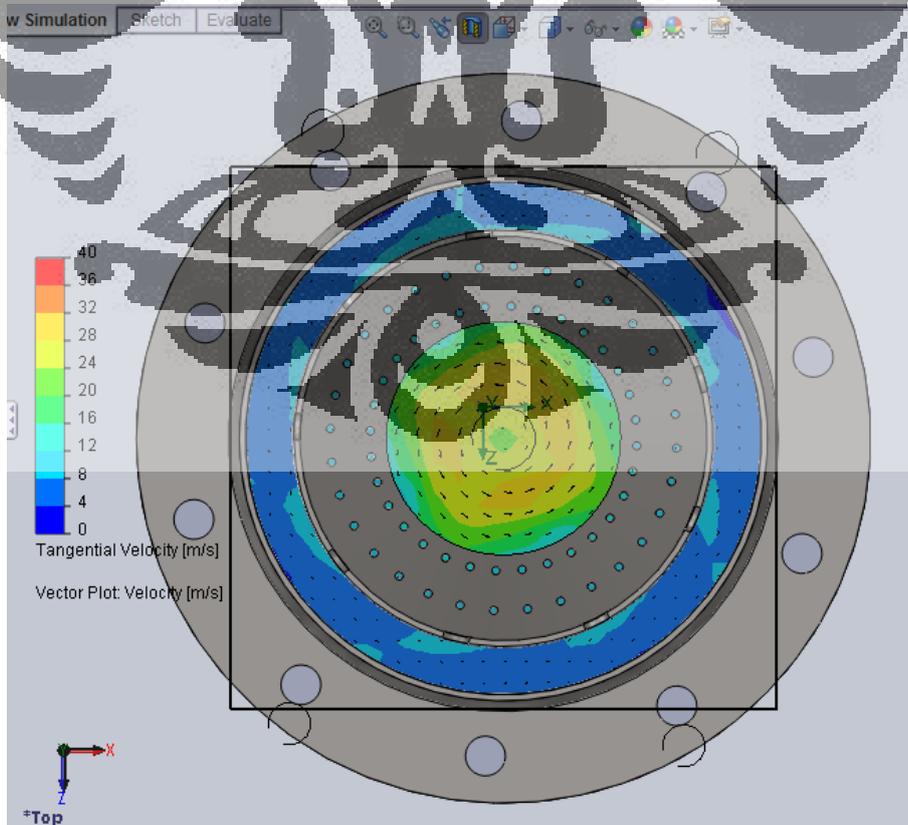
Perubahan warna secara drastis menunjukkan terciptanya IRZ.

➤ **Cut Plot Distribusi Kecepatan Tangensial**

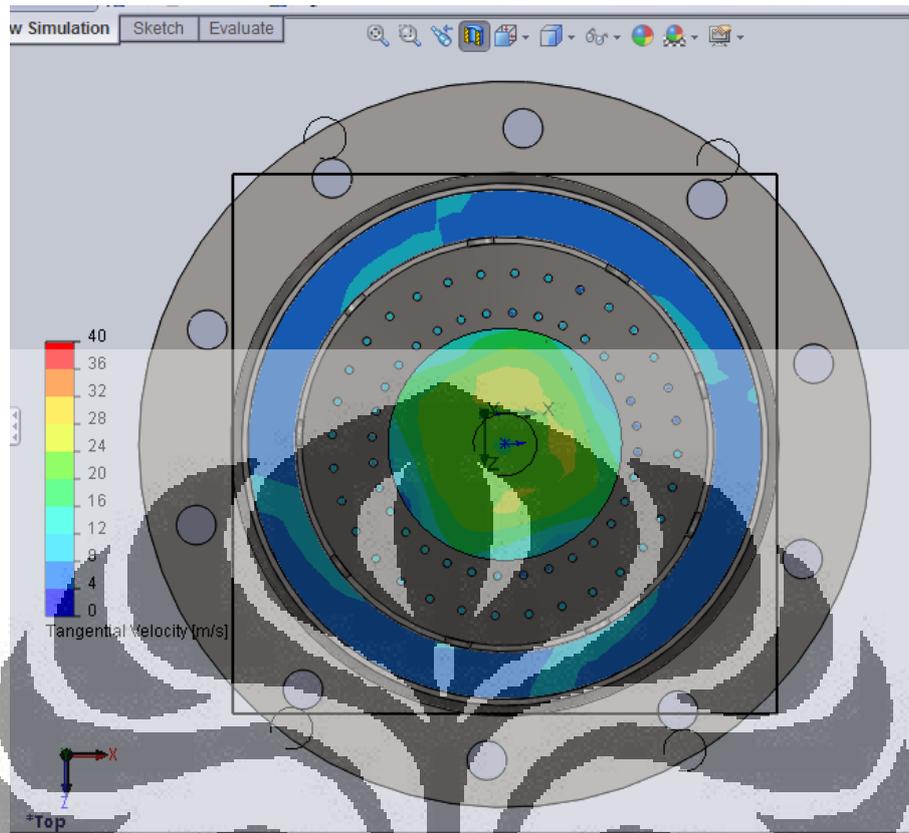
Desain lama dengan toroidal system



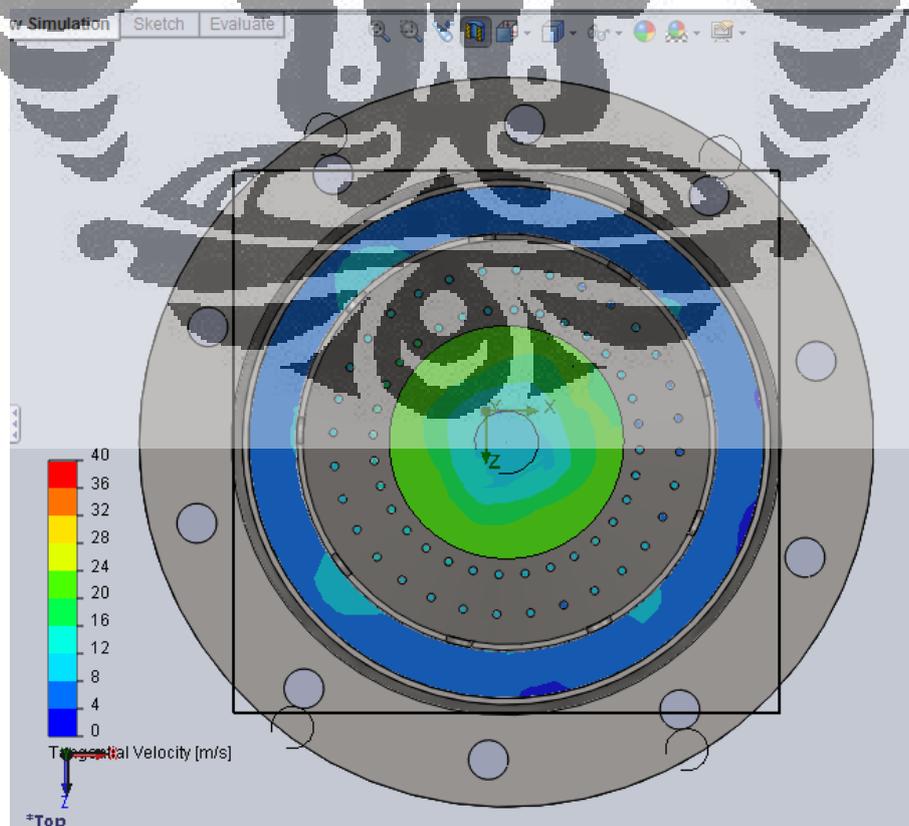
Desain baru tanpa cap



Desain baru dengan cap  $\frac{1}{2}$  antara top-button radius



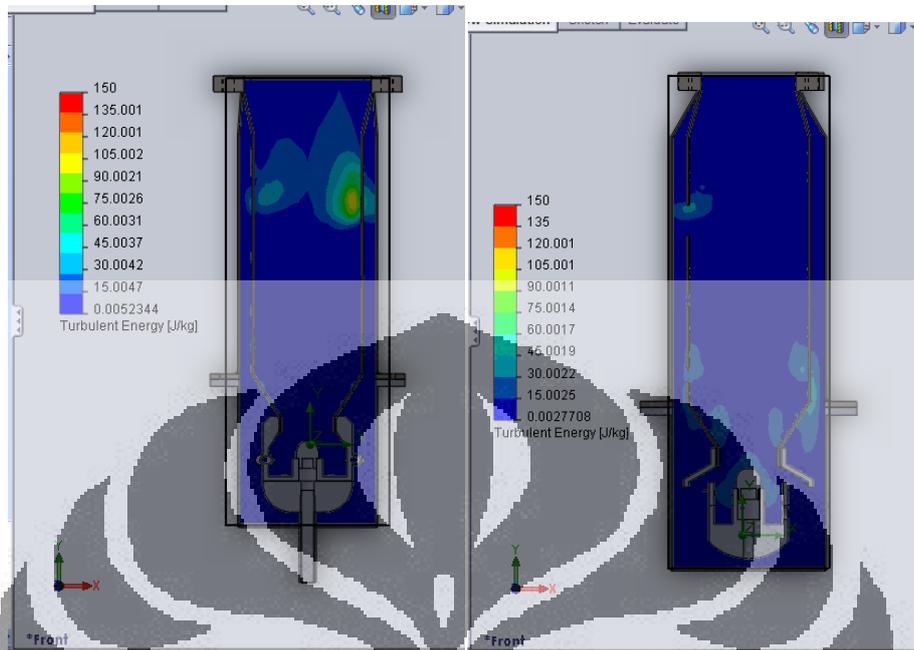
Desain baru dengan full cap



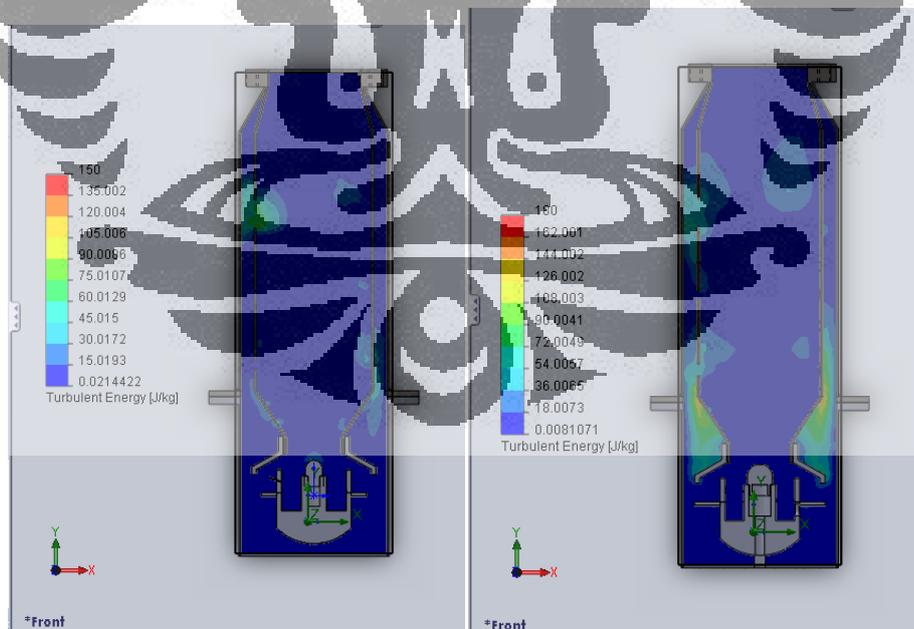


➤ **Cut Plot Turbulent Kinetic Energy**

Desain lama dengan toroidal system (kiri) dan desain baru tanpa cap (kanan)



Desain baru dengan cap  $\frac{1}{2}$  antara top-button radius (kiri) dan desain baru dengan full cap (kanan)





➤ Data Nilai Turbulent Kinetic Energy dan Dissipation Tiap Tipe



Posisi (mm)	Desain Lama		Desain Baru tanpa Cap		Desain baru dengan cap 1/2 antara top-button radius		Desain baru dengan full cap	
	k (J/kg)	e (W/kg)	k <sub>t</sub> (J/kg)	ε (W/kg)	k <sub>t</sub> (J/kg)	ε (W/kg)	k (J/kg)	ε (W/kg)
0	1.963	491.088	36.649	56000.459	21.535	28159.180	12.530	10539.240
2	1.770	429.261	32.783	48181.893	19.107	23984.956	11.293	8873.835
4	1.634	400.117	28.757	40481.861	16.654	19975.387	10.124	7403.817
6	1.506	373.780	24.479	32967.735	14.162	16224.059	9.062	6240.242
8	1.431	364.862	21.000	27196.443	12.187	13399.824	8.383	5500.794
10	1.367	360.384	18.008	22466.651	10.524	11126.615	7.933	5010.182
12	1.347	372.826	15.321	18187.402	9.026	9058.830	7.562	4576.429
14	1.310	377.710	12.976	14424.968	7.723	7242.070	7.182	4149.355
16	1.224	362.973	12.475	13473.036	7.485	6813.362	6.599	3671.273
18	1.133	345.999	11.975	12521.123	7.247	6384.661	6.017	3193.173
20	1.029	324.839	11.474	11569.242	7.010	5955.973	5.435	2715.043
22	0.925	303.679	11.156	10917.304	6.867	5669.367	4.736	2252.558
24	0.821	282.519	10.952	10451.338	6.784	5470.857	3.964	1799.771
26	0.751	276.351	10.748	9985.423	6.701	5272.369	3.192	1347.013
28	0.715	285.869	10.551	9532.907	6.618	5077.022	2.498	947.213
30	0.680	295.388	10.412	9190.485	6.540	4907.459	2.447	982.771
32	0.645	304.906	10.274	8848.064	6.462	4737.896	2.395	1018.329
34	0.668	344.055	10.135	8505.642	6.385	4568.332	2.344	1053.888
36	0.727	400.675	9.972	8164.016	6.293	4398.441	2.485	1219.276
38	0.785	457.294	9.792	7822.920	6.194	4228.330	2.754	1471.358
40	0.843	512.689	9.613	7481.825	6.094	4058.219	3.023	1723.439
42	0.901	566.860	9.444	7151.635	5.998	3894.583	3.305	1993.904
44	0.959	621.030	9.377	6930.676	5.945	3795.798	3.717	2448.489
46	1.016	675.200	9.311	6709.717	5.891	3697.013	4.128	2903.074



48	1.074	729.370	9.244	6488.757	5.838	3598.227	4.539	3357.659
50	1.182	868.897	9.183	6306.640	5.805	3556.433	5.146	4065.657
52	1.294	1016.881	9.128	6152.426	5.787	3555.579	5.893	4955.697
54	1.407	1164.864	9.072	5998.211	5.769	3554.725	6.640	5845.737
56	1.520	1312.848	9.016	5843.997	5.751	3553.871	7.387	6735.778
58	1.632	1460.831	8.961	5689.782	5.733	3553.017	8.134	7625.818
60	1.745	1608.815	8.905	5535.567	5.715	3552.163	8.881	8515.858
62	1.858	1756.798	8.849	5381.353	5.698	3551.310	9.628	9405.898
64	1.961	1889.668	8.707	5192.945	5.632	3503.073	10.062	9844.230
66	2.022	1958.378	8.498	4978.136	5.530	3418.252	10.254	9933.779
68	2.083	2027.088	8.289	4763.327	5.428	3333.430	10.446	10023.329
70	2.144	2095.798	8.080	4548.518	5.326	3248.608	10.638	10112.878
72	2.205	2164.508	7.871	4333.709	5.224	3163.786	10.830	10202.428
74	2.266	2233.218	7.663	4118.900	5.121	3078.964	11.022	10291.977
76	2.327	2301.928	7.454	3904.091	5.019	2994.142	11.214	10381.527
78	2.388	2370.638	7.253	3715.902	4.898	2884.535	11.056	10099.044

