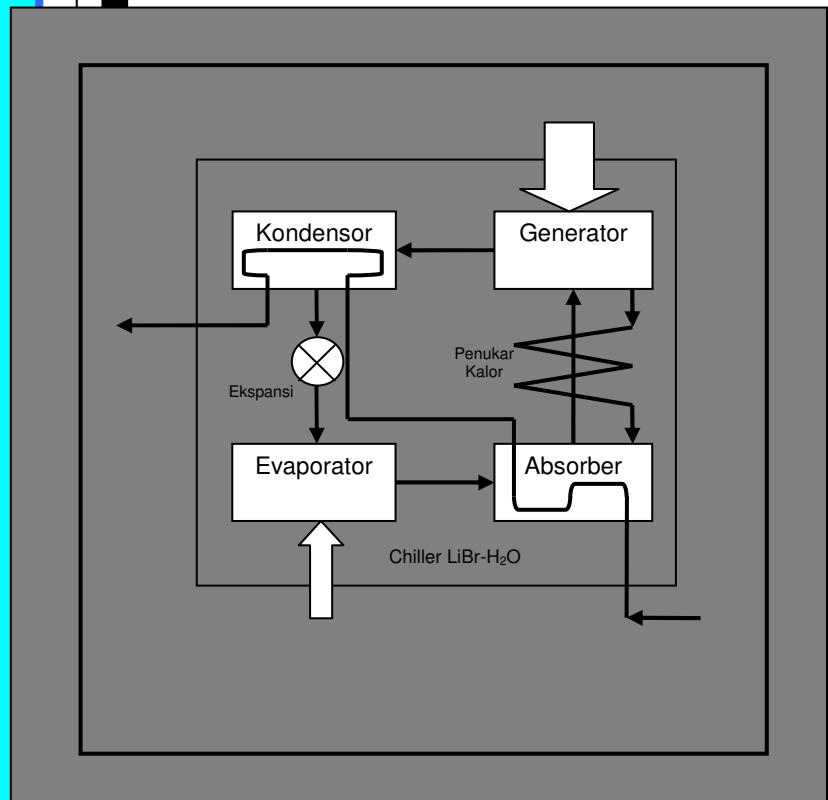


Jurnal Mesin

Jurnal Teknik Mesin
Volume 20- No. 2 – Oktober 2005



EDITOR

*B. Sutjiatmo (Ketua), A. Suwono,
D. Suharto, K. Bagiasna,
S. D. Jenie, S. S. Brodjonegoro,
Abdurrachim, I. Nurhadi,
R. Suratman, P. S. Darmanto.*

MITRA BESTARI

*I. P. Nurprasetio (ITB)
I. S. Putra (ITB)
A. I. Mahyuddin (ITB)
Y. Yuwana (ITB)
Z. Abidin (ITB)
P. Sutikno (ITB)
T. Hardianto (ITB)
T. A. F. Soelaiman (ITB)
N. P. Tandian (ITB)
S. Wiryolukito (ITB)
A. Basuki (ITB)*

REDAKSI PELAKSANA

*A. D. Pasek (Ketua), I. G. W. Puja,
Indrawanto, W. Adriansyah,
A. Wibowo, I. N. Diasta.*

ALAMAT REDAKSI

*Gedung LITBANG Sarana dan
Prasarana-Lt.III
Institut Teknologi Bandung
Jalan Tamansari 126
Bandung 40132
Tel. :(022)-2502342
Fax: (022)-2502342
E-mail: ari@termo.pauir.itb.ac.id*

CARA BERLANGGANAN

*Permintaan berlangganan dapat
dikirimkan ke alamat redaksi di
atas.*

*Terbit 2 (dua) kali dalam satu tahun
Bulan April dan Oktober.*

EDITORIAL

Pada volume ini Jurnal Mesin terbit dengan lima buah makalah. Makalah pertama yang ditulis oleh I Gede Parwata dkk. berjudul Studi Numerik Pengaruh Jumlah dan Puntiran Swirler Vanes Pada Aliran Masuk Tabung dari Departemen Teknik Penerbangan ITB. Makalah ini membahas pengaruh jumlah dan sudut *vanes* pada distribusi kecepatan axial dan *swirl* pada medan aliran di belakang *Swirler Vanes*. Kajian dilakukan secara numerik terhadap model medan aliran yang dikembangkan sendiri. Salah satu kesimpulan dari hasil kajian adalah jumlah dan sudut *vanes* tidak mempengaruhi distribusi kecepatan aksial tetapi sangat mempengaruhi kecepatan *swirl*.

Makalah kedua berjudul Analysis Using Alternative Refrigerant for Energy Saving in Design Framework of Air-Conditioning System, ditulis oleh I Made Astina dkk. dari Departemen Teknik Mesin ITB. Makalah ini membahas tentang perbandingan karakteristik beberapa refrigeran alternatif pengganti refrigeran HCFC-22. Beberapa refrigeran dari kelompok refrigeran hidrokarbon, dan halokarbon non CFC dibandingkan performansinya pada temperatur kondensor dan evaporator yang tetap. Performansi refrigeran tersebut pada beberapa konfigurasi sistem refrigerasi kompresi uap juga ditunjukkan dalam makalah ini.

Agus Hermanto, mahasiswa program doktor Departemen Teknik Mesin ITB, beserta para pembimbingnya menulis makalah ketiga yang diberi judul: Pengembangan Metode Simulasi Sistem Pengkondisian Udara Energi Surya. Makalah ini berisi informasi parameter-parameter penting di pengumpul surya, penyimpan panas temperatur tinggi dan temperatur rendah, mesin refrigerasi absorpsi dan pengaruhnya terhadap sistem pengkondisian udara secara keseluruhan. Disamping itu dalam makalah ini juga dikemukakan perbandingan hasil-hasil simulasi dengan data pengujian.

Makalah keempat adalah makalah yang ditulis dalam bahasa Inggris oleh Phan Anh Tuan, mahasiswa program magister Departemen Teknik Mesin ITB, dan para pembimbingnya. Makalah ini berjudul Measuring and Compensating for Off-Line to Running Machinery Movement. Dalam makalah ini dibahas karakteristik ketidakseimbangan poros dalam keadaan panas dan dingin dan cara-cara mengkompensasi pergerakan mesin dari keadaan diam hingga mesin berputar (OL2R). Hasil-hasil pengujian yang dilakukan menunjukkan bahwa kondisi ketidakseimbangan poros berubah selama beroperasi dan hal tersebut sangat mempengaruhi tingkat getaran pada mesin-mesin rotasi. Kompensasi OL2R dapat dilakukan dengan merendahkan posisi kaki motor listrik penggerak relatif terhadap beban yang digerakan (generator).

Makalah terakhir ditulis oleh Amoranto Trisnobudi dari Departemen Teknik Fisika ITB. Makalah ini berjudul Analisis Frekuensi pada Uji Tak Merusak Ultrasonik. Dalam makalah dibahas kesuksesan analisis frekuensi pada prediksi cacat kecil dalam material yang posisinya miring terhadap berkas gelombang ultrasonik.

Akhir kata Redaksi mengucapkan selamat membaca semoga makalah-makalah dalam Jurnal Mesin ini memberi informasi dan pengetahuan yang bermanfaat.

MESIN

Jurnal Teknik Mesin

Vol. 20, No. 2, Oktober 2005

No. ISSN: 0852-6095

Diterbitkan oleh : Departemen Teknik Mesin, FTI
Institut Teknologi Bandung

Surat ijin : STT No. 964/DIT-JEN/PPG/STT/1982.

DAFTAR ISI

<i>Studi Numerik Pengaruh Jumlah dan Puntiran Swirler Vanes pada Aliran Masuk Tabung</i> I Gede Parwatha, Firman Hartono, Hisar M. Pasaribu, Djoko Sardjadi dan Aryadi Suwono	40
<i>Analysis of Using Alternative Refrigerants for Energy Saving in Design Framework of Air-Conditioning System</i> I Made Astina, Prihadi Setyo Darmanto, Warsito and Edwin Adryanto	49
<i>Pengembangan Metode Simulasi Sistem Pengkondisian Udara Energi Surya</i> Agus Hermanto, Aryadi Suwono, Abdurrachim dan Ari D. Pasek	58
<i>Measuring and Compensating for Off-Line to Running Machinery Movement</i> Phan Anh Tuan, Zainal Abidin and Komang Bagiasna	68
<i>Analisis Frekuensi pada Uji Tak Merusak Ultrasonik</i> Amoranto Trisnobudi	73

M E S I N

Jurnal Teknik Mesin

Vol. 20, No. 2, Oktober 2005

STUDI NUMERIK PENGARUH JUMLAH DAN PUNTIRAN SWIRLER VANES PADA ALIRAN MASUK TABUNG

I Gede Parwatha⁽¹⁾, Firman Hartono⁽¹⁾,
Hisar M. Pasaribu⁽¹⁾, Djoko Sardjadi⁽¹⁾ dan Aryadi Suwono⁽²⁾

⁽¹⁾ Departemen Teknik Penerbangan

⁽²⁾ Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha 10, Bandung 40132

Ringkasan

Medan aliran pada sisi masukan ruang pembakaran akibat variasi konfigurasi swirler vanes dikaji secara komputasional. Medan aliran swirl isothermal yang terjadi di dalam tabung diamati untuk memprediksi kestabilan pembakaran. Dari hasil simulasi diperoleh bahwa, bilangan swirl yang sama dapat dicapai dengan karakteristik medan aliran yang berbeda. Selain itu, adanya komponen kecepatan swirl menginduksikan gaya sentrifugal di dalam aliran. Gaya ini mempengaruhi puncak distribusi kecepatan, distribusi tekanan statik, serta daerah resirkulasi.

Abstract

Flow field at the inlet of a combustor under the influence of swirler vanes was investigated computationally. The isothermal flow was examined to predict the combustion stability. The simulations indicate different flow-field characteristics can be achieved under the same swirl number. In addition to swirl number, swirl velocity induces the existence of centrifugal force. This force affect velocity profile peak, static pressure profile, radially; and recirculation zone, axially.

Keywords: swirler vanes, swirl number, computational fluid dynamics

1. PENDAHULUAN

Aliran putar (*swirling flow*) di dalam tabung adalah aliran yang memiliki komponen kecepatan *swirl*. Kombinasi antara komponen kecepatan aksial dan *swirl* tersebut mempengaruhi pencampuran dua atau lebih jenis fluida yang mengalir di tabung tersebut. Dalam reaksi pembakaran, aliran *swirl* mempengaruhi kestabilan nyala api (*flame stability*). Hal ini dikarenakan berhubungan dengan proses pencampuran antara bahan bakar dan udara. Untuk mengkuantifikasi intensitas aliran *swirl*, didefinisikan bilangan swirl yang merupakan perbandingan antara momentum rata-rata aliran *swirl* terhadap momentum arah aksial.

Studi numerik tentang karakteristik nyala api pada kondisi transien dilakukan oleh Christiansen [1]. Pengendalian kestabilan pembakaran menggunakan pemodelan turbulen *Large Eddy Simulation (LES)* dilakukan oleh Schluter [2]. Penelitian lain berkenaan dengan pemodelan *LES*, juga dilakukan Schluter dengan mengintegrasikan pemodelan *LES* dengan pemodelan *Reynold Average Navier Stokes (RANS)* untuk dapat mensimulasikan aliran di dalam mesin turbin gas secara keseluruhan [3]. Simulasi numerik tentang aliran *swirl* dalam pipa yang dilengkapi semburan arah tangensial, dilakukan oleh Chen [4].

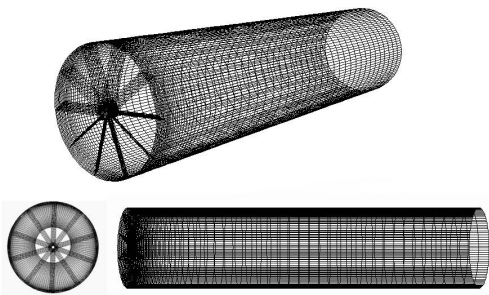
Simulasi numerik aliran *swirl* menggunakan pemodelan *LES* untuk mengamati pengaruh aliran *swirl* masukan terhadap reaksi pembakaran dilakukan oleh Stone [5]. Pemodelan reaksi pembakarannya menggunakan formula *G-equation flamelet*. Hasil penelitian Stone menegaskan bahwa pada bilangan swirl yang lebih rendah, *flame* mengalami pergerakan pada arah aksial yang lebih cepat daripada bilangan swirl yang lebih tinggi. Selain itu, *flame* lebih stabil pada bilangan swirl yang lebih tinggi. Peningkatan kestabilan *flame* ditandai dengan turunnya fluktuasi letak *flame* dan fluktuasi tekanan. Pemodelan numerik yang serupa dengan Stone, dilakukan oleh Shinjo [6]. Dalam penelitian ini, dua model tabung pembakaran disimulasikan. Satu menggunakan aliran *swirl* sebagai penstabil reaksi pembakaran dan yang lain menggunakan *flame holder*. *Flame holder* merupakan komponen di daerah masukan untuk membangkitkan efek *bluff body wake*. Simulasi numerik tersebut memperlihatkan bahwa pembakaran yang tidak stabil dipengaruhi oleh paduan antara resonansi akustik, fluktuasi kecepatan dan temperatur, serta konsentrasi campuran.

Mengingat pentingnya peran aliran *swirl* dalam mempengaruhi proses dan hasil reaksi pembakaran, dilakukan studi numerik untuk mengamati pengaruh konfigurasi *swirler vanes* terhadap karakteristik aliran *swirl* pada sisi masukan tabung. *Swirler vanes* merupakan susunan sudu pengarah statis untuk

membangkitkan aliran *swirl* di dalam tabung. Simulasi numerik aliran dalam tabung pada variasi jumlah *vanes* dan besar sudut pengarah dilakukan dengan menggunakan *software* Fluent 5.2. Pada akhirnya, pemahaman tentang pengaruh konfigurasi *swirler vanes* ini digunakan untuk memilih konfigurasi yang dapat menghasilkan bilangan *swirl* tertentu.

2. PEMODELAN NUMERIK

Medan aliran disimulasikan pada tabung berdiameter 94 mm dan panjang 400 mm. Pada masukan dipasang suatu konfigurasi *swirler vanes*, dengan lebar 10 mm. *Swirler vanes* terdiri dari sejumlah *vanes* yang dipasang pada sebuah silinder pangkal atau *hub* dengan diameter luar 10 mm. Di tengah *hub* terdapat lubang berdiameter 3 mm sebagai saluran semburan bahan bakar. Geometri model secara umum dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Pandangan isometri, pandangan depan, dan pandangan samping geometri tabung

Vanes divariasikan dengan jumlah 10, 20, 40, dan 60. Sudut pengarah (*stagger*) divariasikan pada 30°, 45°, dan 60° terhadap arah aksial. Distribusi sudut pengarah dibuat seragam dan juga divariasikan pada arah radial. Variasi sudut dibuat dengan memberikan puntiran ke arah pangkal dan juga puntiran ke arah ujung. Puntiran dilakukan untuk memperoleh besar maksimum sudut pengarah *vanes* pada bagian pangkal ataupun bagian ujung. Arti kode konfigurasi yang disimulasikan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kode konfigurasi *swirler vanes*

Kode	Jumlah	Sudut Pangkal	Sudut Ujung	Variasi
10a30	10	30°	30°	seragam
20a30	20	30°	30°	seragam
40a45	40	45°	45°	seragam
60a60	60	60°	60°	seragam
10tu30	10	30°	0°	linier
20tu30	20	30°	0°	linier
40tu45	40	45°	0°	linier
60tu60	60	60°	0°	linier
10td30	10	0°	30°	linier
20td30	20	0°	30°	linier
40td45	40	0°	45°	linier
60td60	60	0°	60°	linier

Model didiskritisasi menjadi sekitar 270000 elemen heksahedral. Pada bagian masukan didefinisikan kecepatan aksial sebesar 30 m/s dan bagian keluaran didefinisikan kondisi batas *outflow*. Kondisi batas *outflow* mensyaratkan fluks difusif pada daerah ini sama dengan nol untuk segala arah. Untuk penelitian kali ini, semburan bahan bakar tidak didefinisikan sebagai suatu masukan tertentu untuk memperoleh medan aliran isothermal.

Pemodelan numerik aliran [7] dilakukan dengan menggunakan persamaan konservasi massa (kontinuitas) dan persamaan konservasi momentum dalam bentuk integral dan kondisi stasioner.

Persamaan Kontinuitas

$$\oint \rho \underline{u} \cdot d \underline{A} = 0 \quad (1)$$

Persamaan Momentum

$$\oint \rho \underline{u} \underline{u} \cdot d \underline{A} = - \oint p d \underline{A} + \oint \underline{\tau} \cdot d \underline{A} + \int_V \underline{F} dV \quad (2)$$

dengan

ρ = densitas fluida

\underline{u} = vektor kecepatan

\underline{A} = vektor normal bidang batas

p = tekanan

τ_{ij} = matriks tegangan geser fluida

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (3)$$

\underline{E} = faktor *body forces* dalam fluida

Kedua persamaan tersebut dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan transport.

$$\oint \rho \phi \underline{u} \cdot d \underline{A} = \oint \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d \underline{A} + \int_V S_\phi dV \quad (4)$$

Untuk persamaan kontinuitas, faktor skalar ϕ berharga 1 dan Γ_ϕ berharga 0. Sedangkan untuk persamaan konservasi momentum, ϕ merupakan vektor kecepatan dan koefisien Γ_ϕ merupakan koefisien viskositas fluida (μ). Suku S merupakan rangkuman dari gaya konservatif (*body forces*) dan kontribusi kecil dari tegangan viskos (*viscous stress*). Suku yang mengandung faktor gradien tekanan akan dikaitkan dengan metode *velocity-pressure coupling*.

Aliran turbulen ditandai dengan hadirnya medan aliran yang berfluktuasi. Fluktuasi ini memiliki sifat mencampur besaran yang mengalami proses transpor seperti momentum. Untuk itu, pada persamaan atur aliran harus ditambahkan fungsi *time-averaged*. Dengan menambahkan fungsi tersebut, akan muncul besaran baru hasil dari pemodelan fluktuasi tersebut. Proses ini dinamakan pemodelan turbulen. Dalam penelitian ini digunakan pemodelan turbulen RNG *k-ε*.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (5)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R$$

$$k(t) = K + k \quad (6)$$

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

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$$

dengan

- G_k = faktor pembentukan energi kinetik turbulen akibat gradien kecepatan rata-rata
- G_b = faktor pembentukan energi kinetik turbulen akibat *buoyancy*
- Y_M = faktor kontribusi dilatasi fluktuatif dalam aliran turbulen kompresibel pada disipasi keseluruhan
- $\alpha_k, \alpha_\varepsilon$ = bilangan Prandtl efektif untuk k dan ε
- $C_{1\varepsilon}$ = 1,42
- $C_{2\varepsilon}$ = 1,68
- $C_{3\varepsilon}$ = 0,2
- R = faktor kontribusi tambahan akibat pengaruh laju regangan (*strain rate*)

Dari harga k dan ε tersebut, dihitung suatu besaran μ_t , koefisien viskositas turbulen, yang menyatakan difusi turbulen.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

dengan

$$C_\mu = 0,0845$$

Persamaan-persamaan atur di atas didiskritisasi menggunakan skema *upwind* orde pertama dengan menyertakan metode SIMPLE (Semi Implicit Pressure Linked Equation) untuk *coupling* tekanan dan kecepatan. Simulasi setiap konfigurasi diiterasi hingga mencapai nilai residu maksimum 10^{-3} untuk kecepatan, tekanan, dan turbulen k - ε .

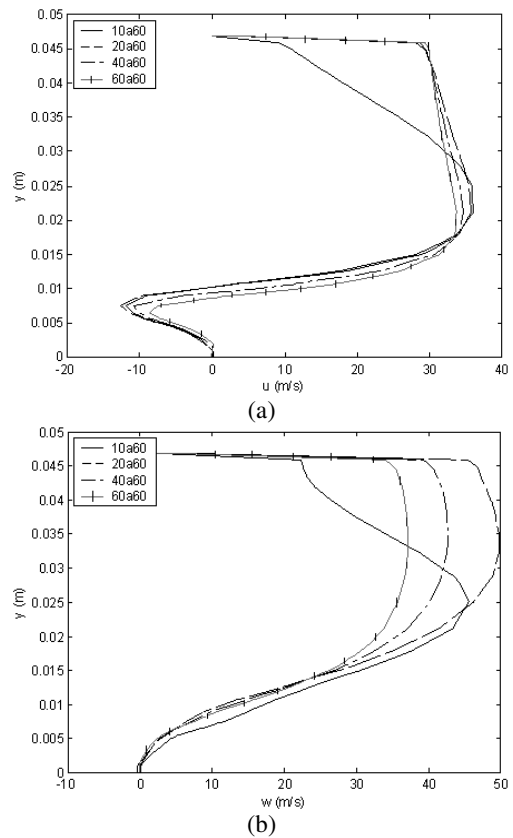
3. HASIL DAN DISKUSI

Semua besaran properti aliran dievaluasi pada daerah 2,25 mm di belakang keluaran *vanes*. Hal ini dimaksudkan agar dapat memahami efektivitas konfigurasi *vanes* dalam membangkitkan aliran *swirl* masukan.

3.1 Distribusi Kecepatan

3.1.1 Pengaruh Jumlah Vanes

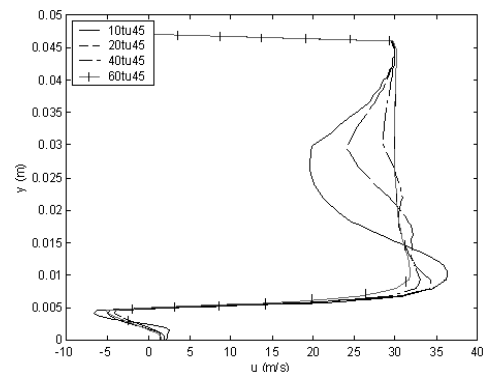
Pengaruh jumlah *vanes* pada distribusi kecepatan aksial dan *swirl* 2,25 mm dari sisi masukan tabung ditunjukkan pada Gambar 2, 3 dan 4 masing-masing untuk kasus sudut *vanes* seragam, *vanes* dipuntir di pangkal dan *vanes* dipuntir di ujung.

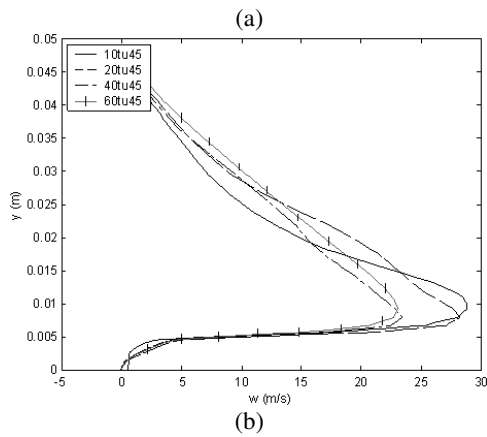


Gambar 2. Pengaruh jumlah *vanes* pada kecepatan aksial dan swirl, distribusi sudut *vanes* konstan 60° , (a) kecepatan aksial, (b) kecepatan swirl

Hasil simulasi pada Gambar 2.a menunjukkan, distribusi kecepatan aksial semakin berimpit dengan bertambahnya jumlah *vanes*. Distribusi kecepatan aksial akan cenderung konstan ketika jumlah *vanes* 20 atau lebih. Ini berarti jumlah *vanes* minimum untuk mendapatkan kecepatan aksial konstan (tidak tergantung jumlah *vanes*) adalah 20.

Berbeda dengan distribusi kecepatan aksial, distribusi kecepatan swirl tergantung pada jumlah *vanes*. Gambar 2.b menunjukkan, semakin banyak *vanes*, kecepatan *swirl* di daerah ujung semakin rendah. Kecenderungan yang berbeda tampak pada kasus jumlah *vanes* 10. Perbedaan ini tampaknya terjadi karena pada jumlah *vanes* 10, kondisi aliran aksisimetrik belum tercapai.





Gambar 3. Pengaruh jumlah *vanes* pada kecepatan aksial dan swirl, distribusi sudut *vanes* bervariasi linier 45° di pangkal dan 0° di ujung, (a) kecepatan aksial, (b) kecepatan swirl

Gambar 3.a memperlihatkan distribusi kecepatan aksial kasus *vanes* dipuntir di pangkal. Ditinjau dari tingkat keseragaman distribusi kecepatan aksial, tampak bahwa, serupa dengan kasus distribusi sudut *vanes* seragam, jumlah *vanes* minimum untuk mendapatkan distribusi kecepatan aksial konstan adalah 20.

Mengacu pada Gambar 3.b, kecepatan *swirl* di daerah pangkal turun dengan bertambahnya jumlah *vanes*. Kecenderungan ini serupa dengan kasus sudut *vanes* seragam. Perbedaannya, pada kasus ini perubahan distribusi kecepatan swirl terhadap perubahan jumlah *vanes* tidak memiliki pola yang teratur.

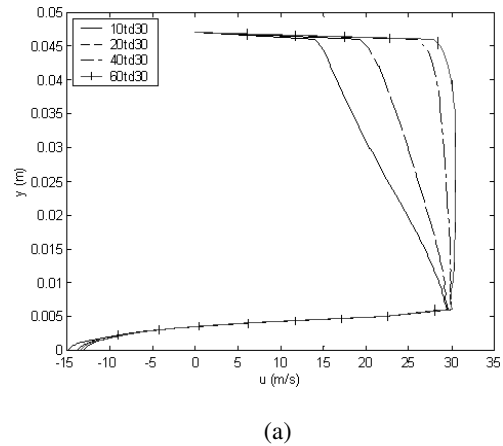
Distribusi kecepatan aksial dan swirl kasus *vanes* dipuntir diujung masing-masing ditunjukkan oleh Gambar 4.a dan 4.b. Dari kedua gambar tersebut, tampak bahwa semakin banyak *vanes*, kecepatan aksial dan kecepatan *swirl* di daerah ujung semakin tinggi. Perubahan distribusi kecepatan terhadap jumlah *vanes* memiliki pola yang teratur.

Dari uraian di atas, dapat diambil kesimpulan berikut.

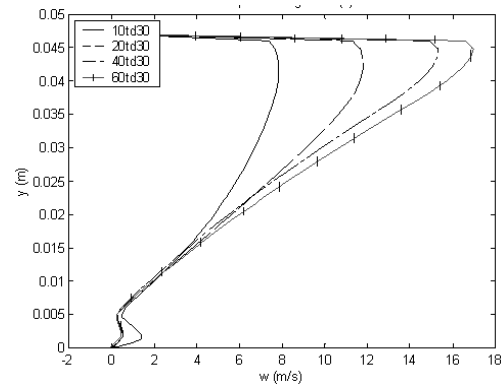
1. Setelah mencapai 20 *vanes*, distribusi kecepatan aksial tidak dipengaruhi jumlah *vanes*. Hal ini tampaknya terjadi karena dua alasan, yaitu distribusi kecepatan aksial harus selalu memenuhi persamaan kontinuitas dan tambahan *vanes* tidak berpengaruh terlalu besar pada perubahan kecepatan *swirl*.
2. Pada kasus sudut *vanes* seragam dan *vanes* dipuntir di pangkal, kecepatan *swirl* turun dengan bertambahnya jumlah *vanes*. Hal ini tampaknya berkaitan dengan efektifitas *vanes* dalam membangkitkan aliran *swirl*. Secara teoritis, semakin banyak *vanes*, semakin efektif *vanes* membelokkan aliran. Pada kenyataannya, terdapat jumlah *vanes* optimal. Setelah jumlah

optimal tercapai, efektifitas *vanes* dalam membelokkan aliran turun dengan naiknya jumlah *vanes*. Fenomena ini tampaknya berkaitan dengan efek *blockage*, yaitu turunnya luas efektif karena pertumbuhan lapisan batas. Dalam kasus ini, efek *blockage* terasa setelah jarak antar *vanes* kurang dari 3 mm. Jarak antar *vanes* naik dengan bertambahnya jari-jari.

3. Pada kasus *vanes* dipuntir di ujung, kecepatan *swirl* naik dengan bertambahnya jumlah *vanes*. Jarak antar *vanes* pada kasus ini lebih dari 3 mm bahkan pada jumlah *vanes* 60. Hal ini menyebabkan, pada semua konfigurasi, *vanes* masih efektif dalam membelokkan aliran.



(a)



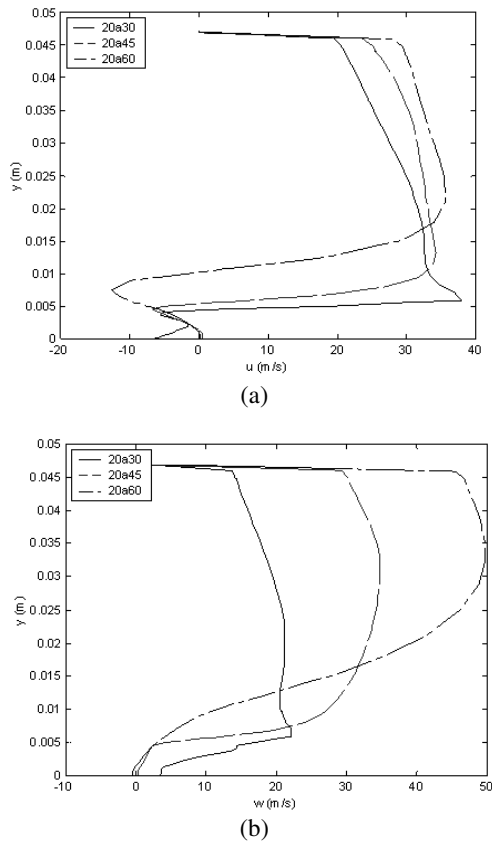
(b)

Gambar 4. Pengaruh jumlah *vanes* pada kecepatan aksial dan swirl, distribusi sudut *vanes* bervariasi linier 0° di pangkal dan 30° di ujung, (a) kecepatan aksial, (b) kecepatan swirl.

3.1.2 Pengaruh Sudut Vanes

Telah diketahui bahwa jumlah *vanes* minimum untuk mendapatkan distribusi kecepatan aksial konstan adalah 20. Untuk meneliti pengaruh sudut vanes pada distribusi kecepatan aksial dan *swirl*, simulasi dilakukan dengan jumlah *vanes* 20.

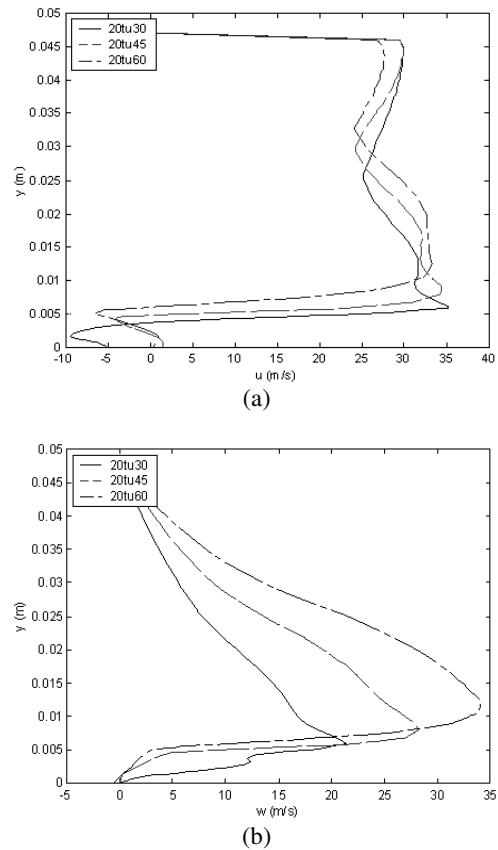
Hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 5, 6 dan 7 masing-masing untuk kasus distribusi sudut *vanes* konstan, *vanes* dipuntir di pangkal dan *vanes* dipuntir di ujung.



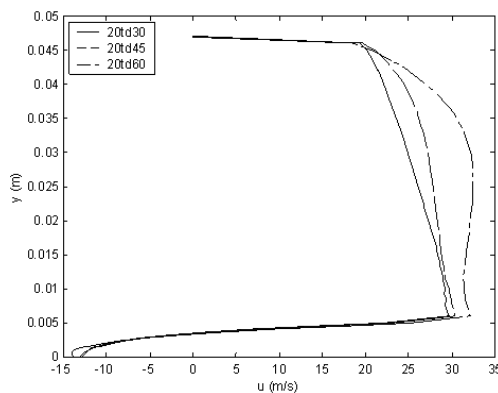
Gambar 5. Pengaruh sudut *vanes* pada kecepatan aksial dan *swirl* sisi masukan; kasus: distribusi sudut *vanes* seragam, (a) kecepatan aksial, (b) kecepatan *swirl*

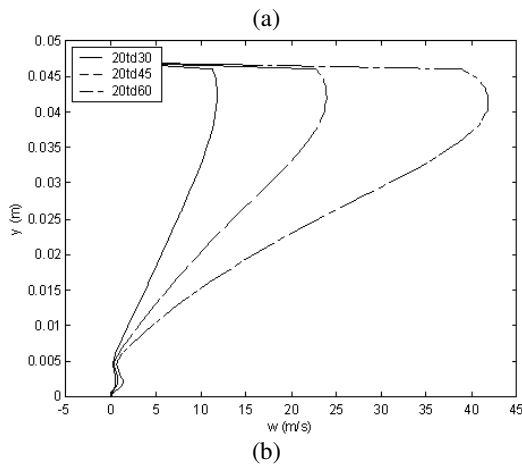
Gambar 5. menunjukkan pengaruh besar sudut terhadap distribusi kecepatan aksial dan *swirl* kasus distribusi sudut *vanes* seragam. Kecepatan *swirl* akan semakin bertambah ketika sudut *vanes* semakin besar. Hal ini dapat dipahami dengan mudah karena semakin besar sudut *vanes*, aliran akan dibelokkan lebih jauh. Distribusi kecepatan aksial tampak mengalami hal yang serupa, namun dengan anggapan bahwa kecepatan aksial konstan karena prinsip kontinuitas maka penambahan kecepatan aksial bukan akibat pembelokan *vanes*.

Penambahan ini terjadi akibat pengaruh gaya sentrifugal yang ditimbulkan oleh aliran *swirl*. Sehingga, puncak distribusi kecepatan aksial terdesak ke arah luar dan besarnya bertambah sesuai persamaan kontinuitas. Karena kecepatan *swirl* bertambah seiring pertambahan sudut *vanes*, gaya sentrifugal yang timbul semakin besar ketika sudut *vanes* semakin besar.



Gambar 6. Pengaruh sudut *vanes* pada kecepatan aksial dan *swirl* sisi masukan; kasus: *vanes* dipuntir di pangkal, (a) kecepatan aksial, (b) kecepatan *swirl*





Gambar 7. Pengaruh sudut *vanes* pada kecepatan aksial dan *swirl* sisi masukan; kasus: *vanes* dipuntir di ujung, (a) kecepatan aksial, (b) kecepatan *swirl*

Memperhatikan Gambar 6 dan 7, dan membandingkannya dengan kasus distribusi sudut *vanes* seragam (Gambar 5), tampak bahwa perubahan sudut *vanes* memberikan pengaruh yang sama, yaitu:

- semakin besar sudut puntiran, kecepatan *swirl* naik, kecepatan aksial relatif konstan
- semakin besar sudut puntiran, puncak distribusi kecepatan aksial dan *swirl* semakin terdesak ke arah luar

Gambar 5, 6 dan 7 juga menunjukkan, distribusi kecepatan *swirl* merupakan fungsi distribusi puntiran. Pada kasus *vanes* dipuntir di pangkal, puncak distribusi kecepatan *swirl* di daerah pangkal. Pada kasus *vanes* dipuntir di ujung, puncak distribusi kecepatan *swirl* di daerah ujung. Pada kasus distribusi sudut *vanes* seragam, kecepatan *swirl* pada sudut rendah relatif seragam. Semakin besar sudut *vanes*, distribusi kecepatan *swirl* semakin tidak seragam dengan puncak semakin terdesak ke arah luar karena pengaruh gaya sentrifugal.

3.2 Bilangan Swirl

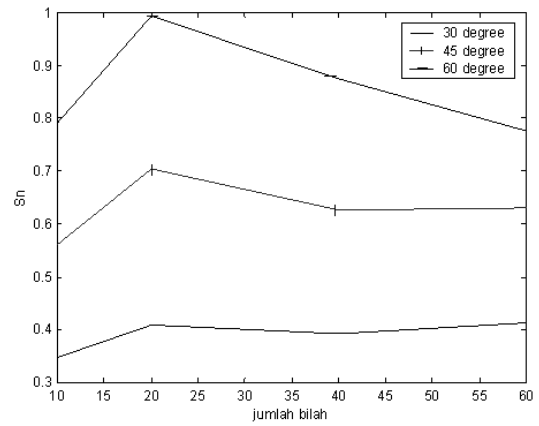
Bilangan swirl menyatakan perbandingan antara momentum rata-rata aliran *swirl* dengan momentum aksial. Formulasi matematis bilangan swirl ditunjukkan pada persamaan (8).

$$S = \frac{\int_0^R r^2 \overline{u} w dr}{R \int_0^R r \overline{u} dr} \quad (8)$$

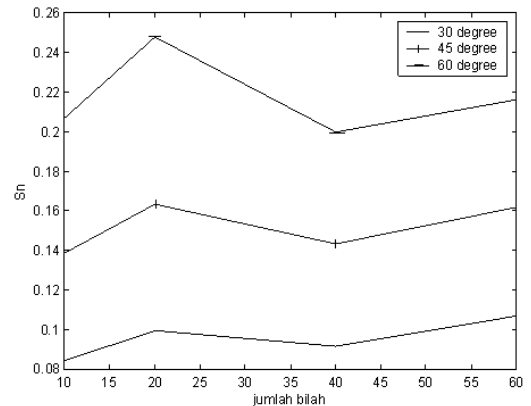
dimana,

- S = bilangan swirl
- R = jari-jari tabung pembakaran
- r = posisi radial
- u = komponen kecepatan aksial
- w = komponen kecepatan *swirl*

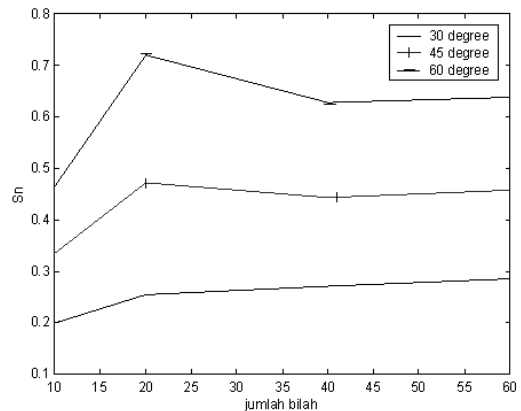
Hasil perhitungan bilangan swirl pada sisi masukan tabung ruang pembakaran akibat pengaruh konfigurasi *vanes* ditampilkan pada Gambar 8, 9 dan 10.



Gambar 8. Bilangan swirl pada distribusi sudut *vanes* seragam



Gambar 9. Bilangan swirl pada distribusi sudut *vanes* terpuntir di pangkal



Gambar 10. Bilangan swirl pada distribusi sudut *vanes* terpuntir di ujung

Mengacu pada gambar, bilangan swirl yang sama dapat diperoleh pada konfigurasi *swirler vanes* yang berbeda. Sebagai contoh, untuk memperoleh bilangan swirl sekitar 0,7 dapat digunakan konfigurasi *swirler vanes* 20a45 dan 20td60. Kedua konfigurasi tersebut, meskipun pada bilangan swirl sama, memiliki karakteristik medan aliran yang berbeda.

Secara umum, bilangan *swirl* yang dibangkitkan menjadi semakin besar akibat penambahan sudut *vanes*. Di samping itu, penurunan efektivitas pembangkitan aliran *swirl* terjadi ketika jumlah *vanes* mencapai lebih dari 20.

Hal ini berhubungan dengan penurunan kecepatan *swirl* yang dihasilkan ketika jarak antar *vanes* lebih kecil dari harga tertentu (*blockage effect*).

Pada kasus *vanes* dipuntir di pangkal, diperoleh bilangan *swirl* yang kecil karena pengaruh faktor $\int_0^R r^2 \overline{u\omega} dr$ dalam perhitungan bilangan *swirl* menjadi kecil.

Untuk penelitian secara eksperimen, dibutuhkan konfigurasi swirler *vanes* yang dapat membangkitkan aliran dengan bilangan *swirl* 0,33; 0,67 dan 1. Dengan asumsi hubungan bilangan *swirl* dengan sudut *vanes* bersifat linier, interpolasi dilakukan untuk memperoleh sudut *vanes* seperti pada tabel 2.

Tabel 2. Pemilihan konfigurasi bilah untuk eksperimen

bilangan <i>swirl</i>	konfigurasi
0,33	20a26
	20td35
0,67	20a43
	20td55
1	20a60

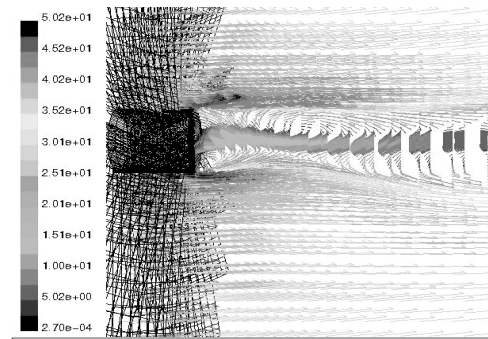
3.3 Daerah Resirkulasi

Seperti yang dapat dilihat pada geometri pangkal *vanes*, terdapat *bluff body* dengan diameter sekitar 10 mm yang membuat terbentuknya suatu *wake vortex* ketika tidak ada semburan bahan bakar. *Vortex* ini akan menginduksikan suatu kecepatan di daerah sumbu utama. Bila kecepatan induksi yang dihasilkan berharga negatif, maka akan terjadi resirkulasi. Keberadaan gaya sentrifugal akibat aliran *swirl* juga mempengaruhi keberadaan *vortex* ini. Secara tidak langsung, gaya tersebut juga mempengaruhi karakteristik daerah resirkulasi yang diinduksi.

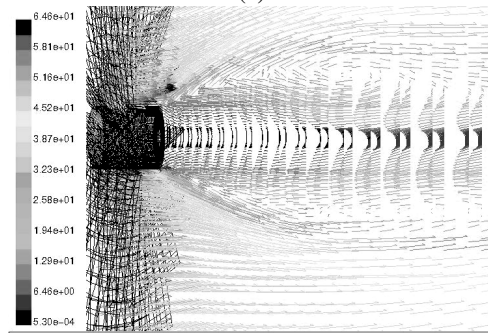
Keberadaan *wake vortex* akibat pengaruh distribusi sudut *vanes* ditampilkan dalam Gambar 11. Gaya sentrifugal akibat aliran *swirl* membuat pasangan *wake vortex* bergerak ke arah luar. Pergerakan ini membuat daerah resirkulasi pada Gambar 11.a, 11.b, dan 11.c terlihat melebar ke arah radial. Pelebaran ini juga menginduksikan kecepatan aksial seperti yang ditunjukkan Gambar 12.a. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa, semakin dekat jarak pasangan *vortex*, kecepatan aksial yang diinduksi semakin negatif. Semakin jauh jaraknya, daerah resirkulasi semakin terdorong ke belakang dengan intensitas semakin berkurang.

Posisi pasangan *vortex* tersebut tidak semata-mata bergantung pada bilangan *swirl* aliran. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 11.d – 11.i. Untuk distribusi kecepatan *swirl* daerah pangkal lebih besar daripada daerah ujung, posisi pasangan *vortex* akan mengikuti seperti anggapan sebelumnya. Untuk distribusi kecepatan *swirl* daerah ujung lebih besar daripada daerah pangkal, posisi pasangan *vortex* tidak terpengaruh oleh bilangan *swirl*. Begitu pula dengan kecepatan aksial di daerah sumbu utama yang diinduksi, seperti yang ditampilkan pada Gambar 12.b dan 12.c. Dari pengamatan ini dapat diambil sebuah anggapan bahwa

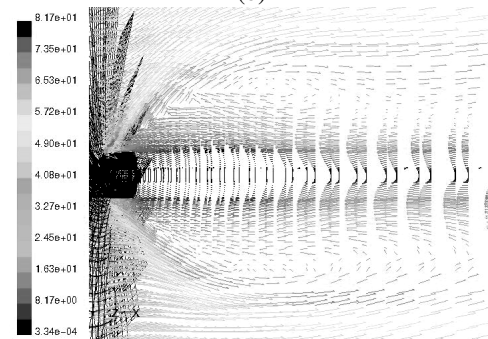
gaya sentrifugal akibat aliran *swirl* dipengaruhi oleh besar kecepatan *swirl* lokal.



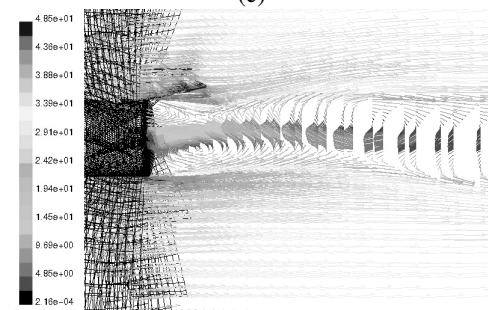
(a)



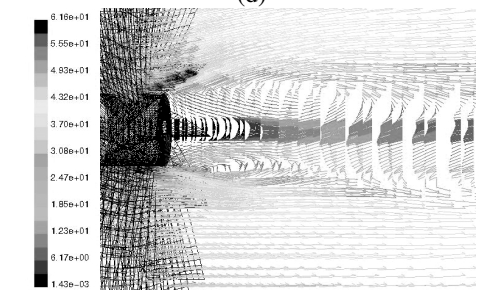
(b)



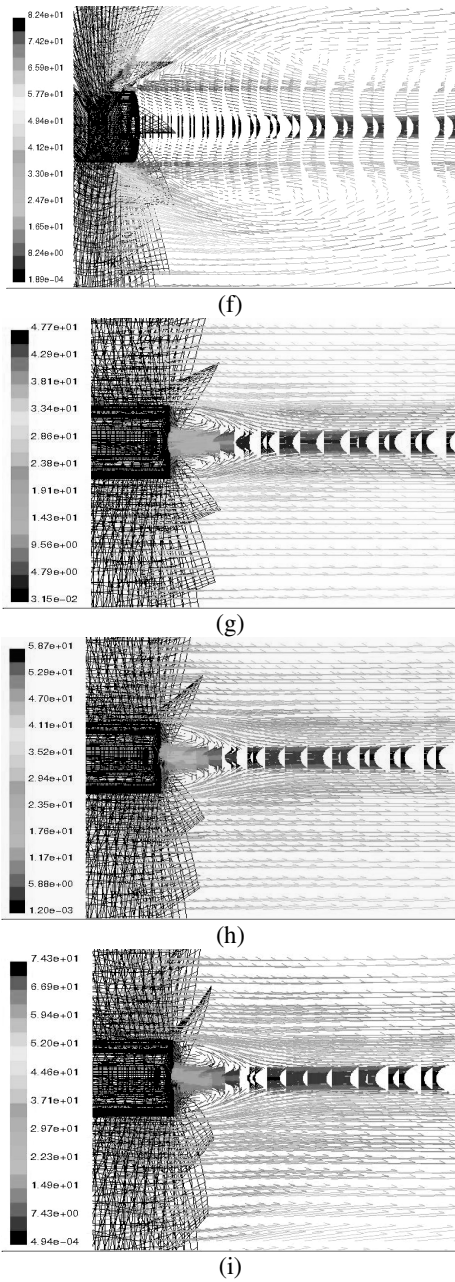
(c)



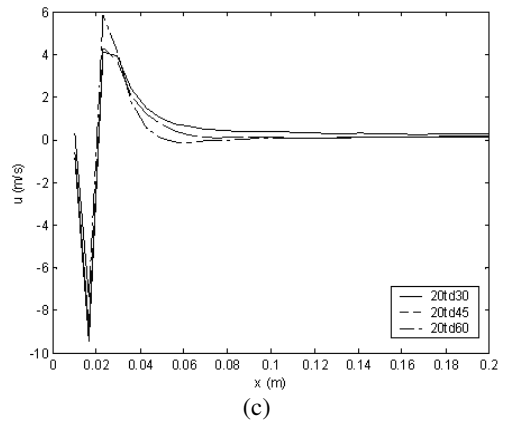
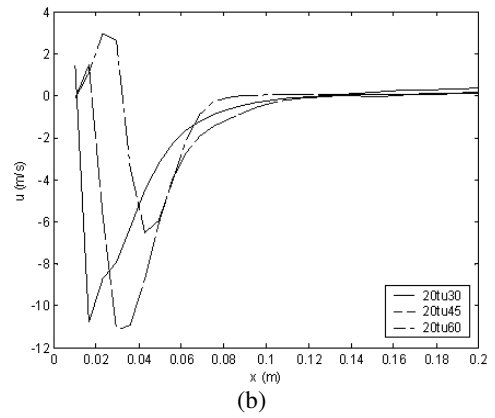
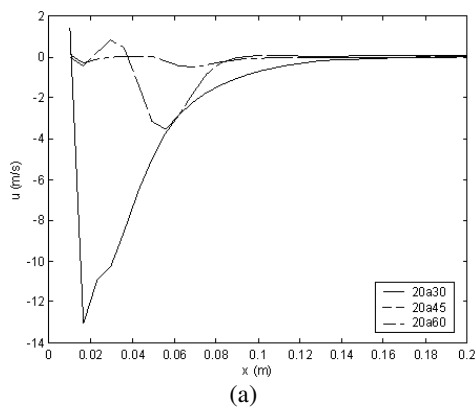
(d)



(e)



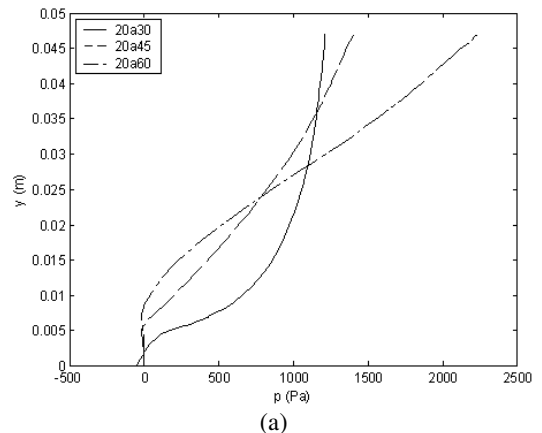
Gambar 11. Posisi wake vortex akibut pengaruh besar dan distribusi sudut vanes, (a) 20a30, (b) 20a45, (c) 20a60, (d) 20tu30, (e) 20tu45, (f) 20tu60, (g) 20td30, (h) 20td45, (i) 20td60

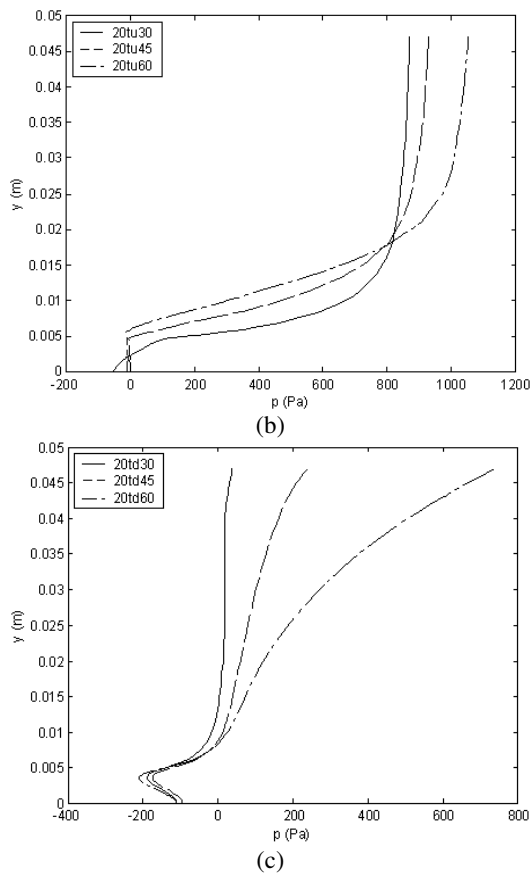


Gambar 12. Distribusi kecepatan aksial pada sumbu utama tabung akibut pengaruh besar dan distribusi sudut vanes

3.4 Distribusi Tekanan Statik

Distribusi tekanan statik pada arah radial ditampilkan pada Gambar 13. Dari gambar tersebut tampak bahwa tekanan statik dipengaruhi oleh gaya sentrifugal lokal. Pada Gambar 13.b, peningkatan tekanan statik tampak lebih curam pada daerah radius kecil. Pada Gambar 13.c terlihat kenaikan tekanan statik hanya pada daerah ujung.





Gambar 13. Distribusi tekanan statik pada arah radial akibat pengaruh besar dan distribusi sudut *vanes*

4. KESIMPULAN

Pengamatan medan aliran di belakang *swirler vanes* secara numerik telah dilakukan. Pada sudut *vanes* tertentu, menaikkan jumlah *vanes* mengubah distribusi kecepatan aksial dan *swirl*. Pengaruh jumlah *vanes* terhadap distribusi kecepatan aksial tidak terlalu dominan, terutama setelah jumlah *vanes* mencapai 20. Berbeda dengan distribusi kecepatan aksial, pada kasus sudut *vanes* seragam dan dipuntir di pangkal, kecepatan *swirl* turun dengan bertambahnya *vanes*. Pada kasus *vanes* dipuntir diujung, kecepatan *swirl* naik dengan bertambahnya *vanes*. Tampaknya hal ini berkaitan dengan efektifitas *vanes* dalam membelokkan aliran.

Pada jumlah *vanes* tertentu, menaikkan sudut *vanes* relatif tidak mempengaruhi distribusi kecepatan aksial. Sebaliknya, pada semua kasus, kecepatan *swirl* selalu naik dengan naiknya sudut *vanes*.

Keberadaan komponen kecepatan *swirl* menimbulkan gaya sentrifugal pada medan aliran. Namun, distribusi kecepatan *swirl* pada arah radial juga mempengaruhi distribusi gaya sentrifugal. Gaya tersebut mempengaruhi letak puncak distribusi kecepatan aksial serta posisi pasangan *vortex* dari *bluff body wake*. Perubahan posisi pasangan *wake vortex* tadi menginduksi intensitas dan posisi terjadinya daerah resirkulasi di sumbu utama tabung.

Dengan memiliki distribusi kecepatan *swirl* lebih besar di daerah pangkal *vanes*, diperoleh bilangan *swirl* yang kecil karena pengaruh faktor $\int_0^R r^2 \overline{u\omega} dr$ dalam perhitungan

bilangan *swirl*. Namun distribusi kecepatan *swirl* yang dekat dengan *wake vortex* dapat menginduksikan terjadinya daerah resirkulasi yang lebih luas. Selain itu, gaya sentrifugal juga dapat menambah tekanan statik di daerah tertentu pada arah radial.

Untuk langkah selanjutnya, akan dilaksanakan penelitian serupa secara eksperimental. Eksperimen akan dilakukan dengan mengamati medan aliran dalam tabung dengan bilangan *swirl* 0,33; 0,67 dan 1. Dengan metode yang sama, diprediksi bilangan *swirl* tersebut akan diperoleh dengan konfigurasi seperti yang ditampilkan dalam Tabel 2.

5. DAFTAR PUSTAKA

1. E.W. Christiansen, S.D. Tse, C.K. Law, A Computational Study of Oscillatory Extinction of Spherical Diffusion Flames, *Combustion and Flame*, vol. 134, 327-337, 2003.
2. J.U. Schluter, Large-Eddy Simulations of Suppression of Combustion Oscillation by Static Control, *AIAA 2002-3283*, 1-9, 2002
3. J.U. Schluter, S. Shankaran, S. Kim, H. Pitsch, J.J. Alonso, P. Moin, Integration of RANS and LES Flow Solvers for Simultaneous Flow Computations, *AIAA 2003-0085*, 1-8, 2003
4. J. Chen, B.S. Haynes, D.F. Fletcher, A Numerical and Experimental Study of Tangentially Injected Swirling Pipe Flows. *2nd International Conference in the Minerals and Process Industry*, 485-490, December 1999.
5. C. Stone, and S. Menon, Dynamics and Analysis of Vortex-Flame Interaction in Swirling Combustion Flows, *2nd International Symposium on Turbulent and Shear Flow Phenomena*.
6. J. Shinjo, Y. Mizobuchi, and S. Ogawa, Numerical Analysis of Flame Behavior in Gas Turbine Combustors Using LES.
7. Fluent Manual, Fluent Inc, 2001