

KOEFISIEN LIFT DAN DRAG PADA SUDU RUNNER TURBIN ALIRAN SILANG DENGAN MENGGUNAKAN BRITISH PROFIL 9C7/32,5 C50

Kennedy Marsan *

Abstract

As a system using airfoil as its component, hence design of turbine crossflow hardly in influencing by the runner blade design. This research aim to see flow parameter influence angle of attack (α), the price of water outlet angle (α_2), velocity ratio (C_2/C_1) and angle of stagger to dynamic Lift and Drag Coefficient from the runner cross-flow turbine which using British Profile 9C7/32,5 C50, experiment conducted at a linear runner turbine with various angle of attack and three angle of stagger. The result of research indicates that velocity ratio inversely proportional to blade dynamic lift Coefficient, the highest dynamic lift Coefficient; 1,281, residing in at angle of stagger 50°. Stalling limit happened at angle of attack 18°, for third angle of stagger.

Keyword: Angle of attack (α), air outlet angle (α_2), velocity ratio (C_2/C_1), dynamic lift Coefficient dan Drag Coefficient.

Abstrak

Sebagai sebuah sistem yang menggunakan menggunakan *airfoil* sebagai komponennya, maka pendisainan turbin aliran crossflow sangat di pengaruhi oleh disain sudu runnernya. Penelitian ini bertujuan untuk melihat pengaruh parameter aliran yaitu *angle of attack* (α), *harga air outlet angle* (α_2), *velocity ratio* (C_2/C_1) dan sudut *stagger* terhadap koefisien *lift* dan *drag* dari runner turbin aliran silang yang menggunakan British Profil 9C7/32,5 C50. Pengujian di simulasikan pada sebuah linear runner turbin dengan variasi *angle of attack* dan tiga sudut *stagger*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *velocity ratio* berbanding terbalik terhadap koefisien *lift* sudu, koefisien *lift* yang tertinggi sebesar 1,281 berada pada sudut *stagger* 50°. Stalling limit terjadi pada sudut serang 18° untuk ketiga sudut *stagger*.

Kata kunci: *Angle of attack* (α), *harga air outlet angle* (α_2), *velocity ratio* (C_2/C_1), *Koefisien Lift* dan *Koefisien drag*.

1. Pendahuluan

1.1 Latar belakang

Hingga saat ini di turbin pada Pembangkit Listrik Tenaga Hidro terbagi menjadi dua bagian besar yaitu Turbin Reaksi yang memanfaatkan tekanan aliran air terhadap sudu turbin dan Turbin Impuls, yang memanfaatkan energy kinetik air yang melintasi susunan sudu turbin.

Turbin aliran silang atau *cross flow* merupakan salah satu jenis turbin impuls yang banyak digunakan untuk

pembangkit listrik skala mikro, atau yang biasa disebut dengan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH). Turbin ini merupakan susunan beberapa sudu yang berbentuk *airfoil*

Putaran turbin aliran silang merupakan hasil reaksi kecepatan aliran melintasi sudu-sudu turbin dan pada sudut serang (*angle of attack*) tertentu untuk menghasilkan gaya angkat (*lift force*) yang tertinggi, agar turbin dapat berputar dan dapat mengatasi pembebanan pada poros turbin.

* Staf Pengajar Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Tadulako, Palu

Salah satu faktor penting dari sebuah turbin aliran silang aksial adalah bentuk dari blade kaskade yang akan digunakan, untuk itu maka informasi mengenai karakteristik dari sebuah profil sudu runner yang akan digunakan sangat dibutuhkan.

Pada kebanyakan perencanaan turbin aliran silang, sudu yang digunakan adalah sudu tipis pada sudut serang 16° . Untuk itu penelitian ini dibuat untuk melihat kemungkinan penggunaan British Profil 9C7/32,5 C50 pada turbin aliran silang.

Meskipun perancangan sebuah turbin aliran silang dapat menggunakan hasil perhitungan teoritis, namun informasi eksperimental tetap diperlukan, sebab dari informasi inilah pemodelan teoritis tersebut dapat semakin disempurnakan.

1.2 Rumusan masalah

Melalui eksperimen ini akan diteliti secara nyata dan mendetail mengenai efek variasi stagger dan sudut serang terhadap koefisien lift, koefisien drag dan *stalling limit* dari blade cascade British profil 9C7/32,5 C50 dalam penggunaannya pada turbin aliran silang.

Batasan Masalah :

- Pengujian di simulasikan pada sebuah linear runner turbin dengan menggunakan British profil 9C7//32,5 C50 dengan panjang $l = 120$ mm.
- Pengujian dilakukan dengan menggunakan 3 buah variasi sudut stagger (λ) $30^\circ, 40^\circ$ dan 50° dan variasi angle of attack (α) dari 0° hingga 22° pada space chord ratio (s/l) = 1
- Kecepatan aliran masuk yang konstan (Bilangan Reynold konstan) = 25.6628

2. Tinjauan Pustaka

Sebagai suatu turbin aliran radial atmosferik, yang berarti bekerja pada tekanan atmosfer, turbin aliran silang menghasilkan daya dengan mengkonversikan energy kecepatan fluida.

Meninjau dari kecepatan spesifiknya, ia berada diantara turbin pelton dan turbin Francis aliran campuran.

Persyaratan awal bagi pertukaran energy antara fluida yang bergerak dengan sudu runner, yang juga bergerak pada sebuah mesin hidrolis adalah perubahan kecepatan akibat sudu runner. Dalam hal fluida dipercepat oleh sudu runner, maka akan terjadi penyerahan energy oleh sudu ke fluida, seperti yang terjadi pada pompa. Sebaliknya, dimana fluida diperlambat oleh sudu maka terjadi perpindahan energy dari fluida ke runner mesin yang merupakan prinsip kerja semua turbin air.

2.1 Koefisien Lift dan Drag.

Dengan mengacu pada gambar 2.1, maka besarnya gaya aksial (X) yang diberikan oleh fluida pada tiap sudu dapat ditentukan dari persamaan momentum pada volume atur dalam arah aksial.

$$X = (\rho_2 - \rho_1) \cdot S = \frac{1}{2} \rho (C_1^2 - C_2^2) S - \Delta p \cdot S$$

$$= \frac{1}{2} \rho C_x^2 (\tan^2 \alpha_1 - \tan^2 \alpha_2) S - \Delta p \cdot S \dots\dots(1)$$

Dalam hal ini dianggap tidak ada perubahan kecepatan dalam arah aksial, jadi $C_{x1} = C_{x2} = C_x$. Gaya tangensial (Y) yang diberikan oleh aliran fluida pada tiap sudu ditentukan dari persamaan momentum pada volume atur dalam arah tangensial.

$$Y = \rho C_x S (C_{y1} - C_{y2})$$

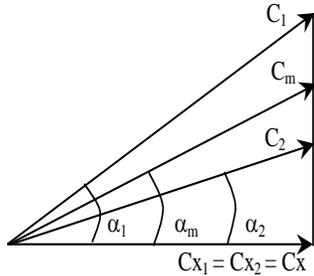
$$= \rho C_x^2 S (\tan \alpha_1 - \tan \alpha_2)$$

Jika kecepatan rata-rata pada runner dinyatakan sebagai :

$$C_m = C_x \sec \alpha_m$$

Dimana, $\tan \alpha_m = \frac{1}{2} (\tan \alpha_1 + \tan \alpha_2)$, maka arah dari gaya angkat (lift) dan seret (drag) akan mengacu kesini. Konsep kecepatan rata-rata pada

runner ini dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 1. Definisi sudut dan kecepatan rata-rata.

Dalam konsep ini, gaya angkat (*lift force*) akan di evaluasi sebagai gaya pada sudu yang tegak lurus terhadap kecepatan rata-rata, C_m . Besarnya gaya angkat (L) adalah,

$$\begin{aligned}
 L &= X \sin \alpha_m + Y \cos \alpha_m \\
 &= \frac{1}{2} \rho C_x^2 S (\tan^2 \alpha_1 - \tan^2 \alpha_2) \sin \alpha_m - \\
 &\quad \Delta p_0 S \sin \alpha_m + \rho C_x^2 S (\tan \alpha_1 - \tan \alpha_2) \cos \alpha_m \\
 &= \rho C_x^2 S \sec \alpha_m (\tan \alpha_1 - \tan \alpha_2) - \Delta p_0 S \sin \alpha_m
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Sehingga harga koefisien lift (C_L) adalah :

$$\begin{aligned}
 C_L &= \frac{L}{\frac{1}{2}(\rho C_m^2)} \\
 &= \frac{\{2(s/l)[\tan \alpha_1 - \tan \alpha_2] \cos \alpha_m - \Delta p_0 (s/l) \sin \alpha_m\}}{\frac{1}{2}(\rho C_m^2)} \dots 3)
 \end{aligned}$$

Gaya seret (*drag force*) yang dialami dalam hal ini di evaluasi sebagai gaya pada sudu yang paralel terhadap kecepatan rata-rata , C_m , besarnya adalah :

$$D = Y \sin \alpha_m - X \cos \alpha_m = \Delta p_0 S \cos \alpha_m \tag{4}$$

Koefisien seret (*drag coefficient*) dengan demikian adalah :

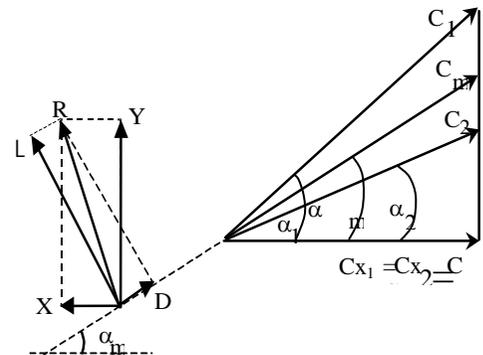
$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}(\rho C_m^2 l)} = \frac{\Delta p_0}{\frac{1}{2}(\rho C_m^2 l)} \frac{S \cos \alpha_m}{l \cos^2 \alpha_1} \tag{5}$$

Seringkali didefinisikan bahwa,

$$\frac{\Delta p_0}{\frac{1}{2}(\rho C_1^2)} = \zeta_{v1} = \text{total pressure loss coefficient. , sehingga :}$$

$$C_D = \zeta_{v1} \frac{S \cos \alpha_m}{l \cos^2 \alpha_1} \tag{6}$$

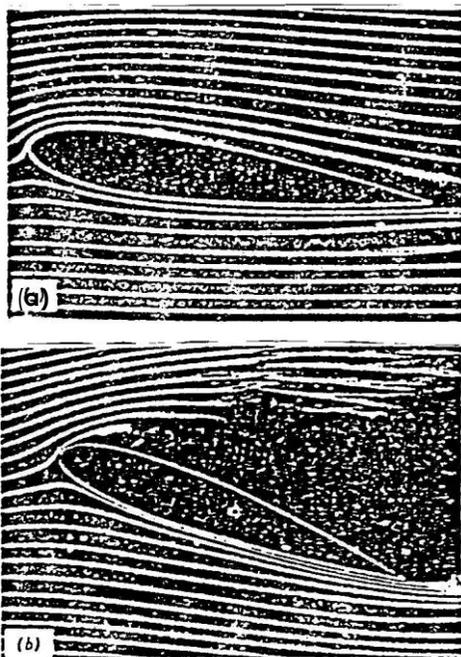
vektor gaya-gaya tersebut diatas dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 2. Definisi arah dari gaya-gaya aerodinamik

2.2. Separation (Stall).

Pemisahan aliran (*separation flow*) adalah fenomena perubahan aliran terhadap aliran utama (*main body*), yang terbentuk akibat adanya inersia pada permukaan saluran yang dilintasi aliran. Bilamana aliran berpisah dari dinding, maka akan terbentuk lapisan geser bebas (*free shear layer*) antara *core flow* dengan daerah pemisahan (*separation region*) yang mengganggu arah aliran utama.



Gambar 3. Stream line yang melewati suatu airfoil (a) $\alpha \approx 0^\circ$, (b) $\alpha \approx 20^\circ$ ^[4]

Separasi mempunyai pengaruh yang serius terhadap rancangan unjuk kerja yang signifikan pada komponen suatu sistem, baik pada sistem yang menggunakan aliran internal maupun aliran eksternal, bahkan seringkali dapat menyebabkan kerusakan pada komponen tersebut.

Pada sistem aerodinamik yang menggunakan airfoil sebagai komponennya, proses separasi ini menyebabkan terjadinya kondisi stall, dimana terjadinya penurunan koefisien lift dari airfoil tersebut. Pada sebuah pesawat terbang pada kondisi stall ini merupakan kondisi batas dari daya angkat sebuah pesawat terbang, sementara pada kompresor aerodinamik, stall dinyatakan sebagai kerugian energi (energy losses).

3. Metode Penelitian

3.1 Pengambilan data

Susunan sudu/blade di tempatkan pada dinding yang dapat

berputar pada wind tunnel sebagai simulasi dari casing runner turbin aliran silang. Pergerakan putaran bervariasi per 2° sebagai variasi perubahan angle of attack. Untuk mengetahui karakteristik medan aliran yang terjadi, maka pengukuran yang dilakukan pada pengujian ini adalah pengukuran aliran 2 dimensi dengan menggunakan five hole probe dan Inclined manometer. Parameter yang diukur adalah tekanan stagnasi dan tekanan statis yang dilakukan pada :

- a) Sepanjang Pitch (t) = 120 mm, di tengah span untuk tiap variasi incidence dan variasi stagger dengan pergerakan Fife hole probe per 6 mm.
- b) Didepan blade (daerah inlet kaskade), untuk mengetahui distribusi kecepatan masuk (C₁).

3.2 Data pengukuran

Persamaan yang digunakan dalam menganalisis data, sebagai berikut :

Data pengukuran :

$$\begin{matrix} (P_0 - P_1) & ; & (P_0 - P_2) & ; & (P_0 - P_3) \\ (P_0 - P_4) & ; & (P_0 - P_H) & ; & (P_0 - P_{St}) \end{matrix}$$

Koefisien sudut aliran :

$$k_\beta(y, z) = \frac{P_4 - P_2}{\Delta P} \dots\dots\dots (7)$$

$$k_\gamma(y, z) = \frac{P_3 - P_1}{\Delta P} \dots\dots\dots (8)$$

dimana :

$$\Delta P(y, z) = \left[\frac{1}{5} \sum_{i=0}^4 \left(P_i - \frac{1}{5} \sum_{j=0}^4 P_j \right)^2 \right]^{1/2} + \left[P_0 - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 P_i \right] \dots\dots\dots (9)$$

Variabel sebagai fungsi terhadap koefisien sudut aliran α dan γ :

$$\begin{matrix} \alpha(y, z) = f1(k_\beta, k_\gamma), & k_p(y, z) = f3(k_\beta, k_\gamma), \\ \gamma(y, z) = f2(k_\beta, k_\gamma), & k_{pt}(y, z) = f4(k_\beta, k_\gamma). \end{matrix} \dots\dots\dots (10)$$

dimana : f1 s/d f4 merupakan persamaan polinomial berderajat m dan n :

$$f(k_\beta, k_\gamma) = \sum_{i=0}^m k_\beta^i \left[\sum_{j=0}^n a_{ij} k_\gamma^j \right] \dots\dots\dots (11)$$

dimana koefisien persamaan regresi polinomial a_{ij} dari masing-masing fungsi tersebut diperoleh dari hasil kalibrasi ⁽⁸⁾.

Sudut aliran keluaran kaskade :

$$\alpha_2(y, z) = \beta_s - \alpha_2(k_\beta k_\gamma)$$

dan

$$\gamma_2(y, z) = \arctan \left[\frac{\tan \gamma(k_\beta, k_\gamma)}{\cos \beta_2} \right] \dots\dots\dots (12)$$

Kerugian tekanan tak berdimensi (secondary losses) sepanjang pitch dan span

$$[\xi_v = f(y, z)] ;$$

$$\zeta_v(y, z) = \frac{(P_{H1} - P_0) - \Delta P_{k_{pt}}(k_\beta, k_\gamma)}{q_1} \dots\dots\dots (13)$$

Perbandingan kecepatan aksial AVR (μ) :

$$\mu(y, z) = \frac{C_{2X}}{C_{1X}}(y, z) = \frac{C_2}{C_1}(y, z) \cdot \frac{\cos \gamma(y, z) \cdot \cos \alpha_2(y, z)}{\cos \alpha_1} \dots\dots\dots (14)$$

dimana :

$$\frac{q_2}{q_1}(y, z) = 1 - \frac{\Delta p}{q_1}(y, z) - \zeta_{V1,N}(y, z) \dots\dots\dots (15)$$

$$\frac{C_2}{C_1}(y, z) = \sqrt{\frac{q_2}{q_1}(y, z)} \dots\dots\dots (16)$$

$$\frac{\Delta p}{q_1} = \frac{P_2(y, z) - P_1}{q_1} = \frac{(P_0 - P_{st}) - \Delta P_{k_p}(k_\beta, k_\gamma)}{q_1} \dots\dots\dots (17)$$

Vektor kecepatan aliran :

$$\frac{C_{2x}}{C_1}(y, z) = \frac{C_2}{C_1}(y, z) \cdot \cos \gamma(y, z) \cdot \cos \alpha_2(y, z) \dots\dots\dots (18)$$

$$\frac{C_{2y}}{C_1}(y, z) = \frac{C_2}{C_1}(y, z) \cdot \cos \gamma(y, z) \cdot \sin \alpha_2(y, z) \dots\dots\dots (19)$$

$$\frac{C_{2z}}{C_1}(y, z) = \frac{C_2}{C_1}(y, z) \cdot \sin \gamma(y, z) \dots\dots\dots (20)$$

Vektor kecepatan aliran sekunder :

$$\frac{C_{sek,y}}{C_1}(y, z) = -\frac{C_2}{C_1}(y, z) \cdot \cos \gamma(y, z) \cdot \sin [\alpha_2(y, z) - \alpha_{2,M}(z)] \dots\dots\dots (21)$$

$$\frac{C_{sek,z}}{C_1}(y, z) = \frac{C_{2z}}{C_{10}}(y, z) = \frac{C_2}{C_1}(y, z) \sin \gamma(y, z) \dots\dots\dots (22)$$

Rata-rata

$$\alpha_2(z), \gamma_2(z), \frac{\Delta P}{q_1}(z), \mu(z), \text{ dan } \zeta_V(z) :$$

$$\tan \alpha_2(z) = \frac{\int_y^{y+1} \frac{C_{2y}}{C_1}(y, z) \frac{C_{2x}}{C_1}(y, z) dy}{\int_y^{y+1} \left[\frac{C_{2x}}{C_1}(y, z) \right]^2 dy} \dots\dots\dots (23)$$

$$\tan \gamma_2(z) = \frac{\int_y^{y+1} \frac{C_{2z}}{C_1}(y, z) \frac{C_{2x}}{C_1}(y, z) dy}{\int_y^{y+1} \left[\frac{C_{2x}}{C_1}(y, z) \right]^2 dy} \dots\dots\dots (24)$$

$$\zeta_V(z) = \frac{\int_y^{y+1} \zeta_V(y, z) \frac{C_{2x}}{C_1}(y, z) dy}{\int_y^{y+1} \left[\frac{C_{2x}}{C_1}(y, z) \right]^2 dy} \dots\dots\dots (25)$$

$$\mu(z) = \frac{\int_y^{y+1} \mu(y, z) \frac{C_{2x}}{C_1}(y, z) dy}{\int_y^{y+1} \left[\frac{C_{2x}}{C_1}(y, z) \right]^2 dy} \dots\dots\dots(26)$$

$$\frac{\Delta p}{q_1}(z) = \frac{\int_y^{y+1} \frac{\Delta p}{q_1}(y, z) \frac{C_{2x}}{C_1}(y, z) dy}{\int_y^{y+1} \left[\frac{C_{2x}}{C_1}(y, z) \right]^2 dy} \dots\dots\dots(27)$$

Turning angle, $\Delta\alpha(z)$:

$$\Delta\alpha_{12}(z) = \alpha_1 - \alpha_{2,M}(z) \dots\dots\dots(28)$$

4. Hasil dan Pembahasan

Harga koefisien lift dan koefisien drag tidak lepas dari pengaruh perubahan harga *air outlet angle* (α_2) yang terjadi, dimana harga α_2 sangat dipengaruhi oleh terjadinya separasi (*wake*) yang terjadi pada permukaan sudu. Dari hasil penelitian yang ditunjukkan pada gambar 4 untuk ketiga variasi stagger ($\lambda = 30^\circ, 40^\circ$ dan 50°), harga α_2 menurun tajam pada sudut serang (α) = 0° hingga 4° dan kemudian meningkat secara drastis pada $\alpha = 20^\circ$. Sementara pada $\alpha = 14^\circ$ hingga 18° harga α_2 terlihat meningkat secara perlahan, bahkan cenderung konstan.

Posisi blade yang masih cenderung datar (sejajar arah aliran) pada angle of attack $\alpha = 0^\circ$ menyebabkan aliran cenderung akan mengalir secara bebas tanpa mengikuti kelengkungan dari blade, sehingga sudut α_2 relatif lebih besar dibandingkan sudut serang (angle of attack).

Seiring dengan peningkatan harga angle of attack maka perlahan menyebabkan titik pressure minimum bergerak kearah *pressure side*, sehingga

perlahan aliran fluida dapat mengalir mengikuti kelengkungan blade. Hal ini menyebabkan turunnya harga α_2 hingga pada sudut serang $\alpha = 4^\circ$.

Selanjutnya pada sebuah blade, jika α terus diperbesar akan menyebabkan aliran yang memiliki lintasan lengkung pada daerah *suction side* makin dipercepat karena seiring dengan peningkatan *blade loading* maka titik stagnasi akan bergeser ke arah *pressure side* dan dengan sendirinya akan menggeser titik tekanan minimum pada *suction side* kedepan (ke arah *leading edge*), hal ini akan mendorong terjadinya separasi aliran pada section side yang lebih hebat karena adverse pressure gradient yang terjadi semakin besar, yang terjadi pada $\alpha = 18^\circ$ hingga 20°

Sepanjang aliran fluida pada *suction side* masih mampu mengikuti lintasan permukaan blade maka *outlet angle* (α_2) tidak mengalami perubahan yang signifikan, yang tampak pada $\alpha = 14^\circ$ hingga 18° . hal ini menunjukkan bahwa pada range tersebut belum terjadi *free shear layer*.

Akibat dari separasi aliran ini juga berpengaruh pada grafik koefisien drag pada gambar 5 yang memiliki pola yang sama dengan gambar 4. Hal ini membuktikan bahwa koefisien drag pada sudu berbanding lurus terhadap perubahan *air outlet angle* (α_2).

Gambar 6, menunjukkan bahwa kecepatan keluar sudu semakin menurun seiring dengan perubahan *angle of attack* hingga pada sudut $\alpha = 18^\circ$, kemudian menanjak tajam pada pembesaran sudut serang berikutnya, hal ini juga merupakan efek *wake* pada permukaan sudu. Akibat *wake* tersebut maka aliran akan terdesak ke atas menuju *pressure side* sudu berikutnya, akibatnya luas daerah lintasan fluida akan semakin sempit dan akhirnya berdampak kepada naiknya kecepatan aliran keluar sudu.

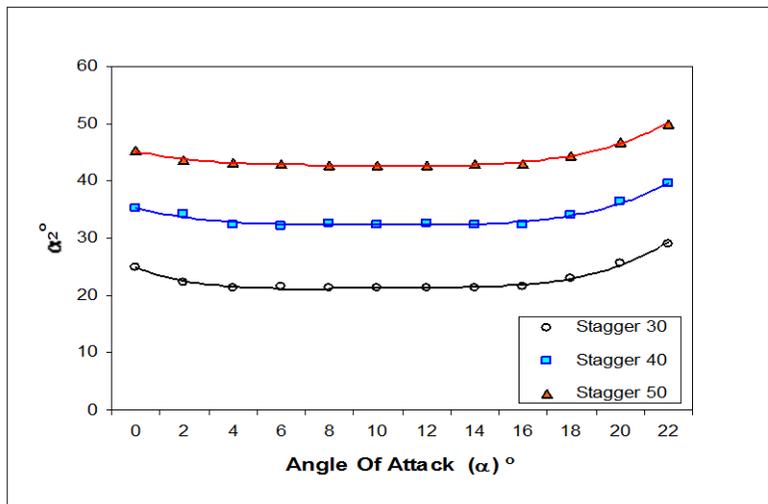
Harga koefisien lift yang ditunjukkan pada gambar 7., grafik 7 menunjukkan kecenderungan yang terbalik dengan gambar 6. dimana

harga koefisien meningkat seiring dengan peningkatan sudut serang hingga mencapai puncak pada sudut $\alpha = 18^\circ$. Selanjutnya koefisien lift menurun drastis atau telah mencapai kondisi *stall* pada angle of attack diatas 18° .

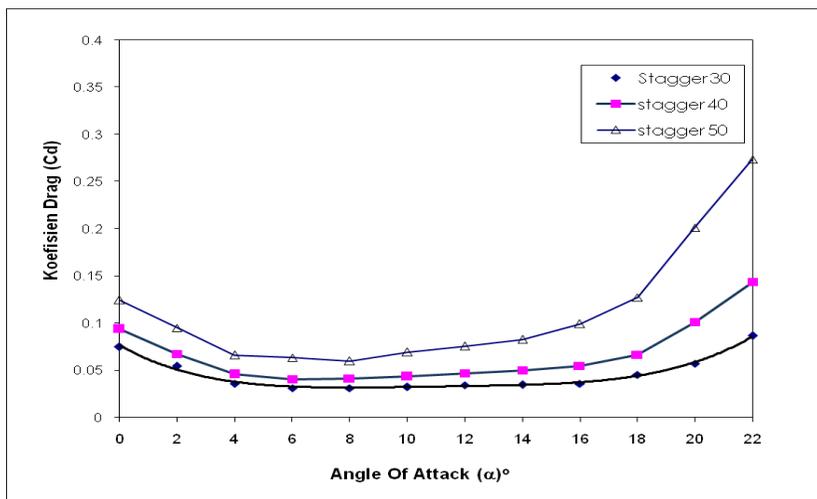
Mengacu kepada pernyataan bahwa penurunan kecepatan aliran fluida oleh sudu akan menyebabkan perpindahan energy dari fluida ke runner, maka gambar 6 tersebut menunjukkan bahwa perpindahan energy terbesar oleh fluida ke runner

yang terjadi pada sudut serang 18° , seiring dengan peningkatan dan titik puncak harga koefisien lift.

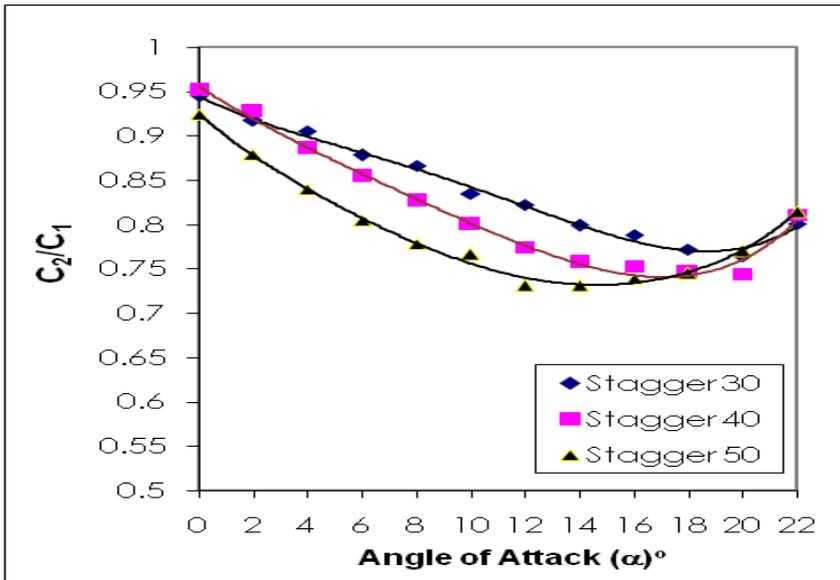
Dari gambar 6 dan 7 hasil penelitian menunjukkan pengaruh dari sudut stagger terhadap harga koefisien lift, semakin besar sudut stagger runner maka akan semakin besar perpindahan energy ke runner, dimana harga koefisien lift terbesar terjadi pada stagger 50, yaitu 1,281 pada $\alpha = 18^\circ$.



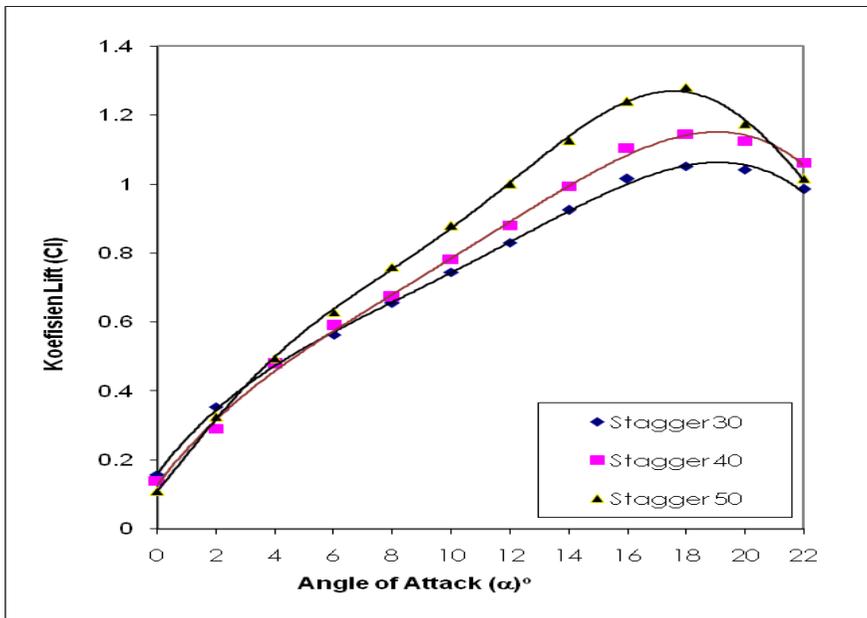
Gambar 4. Grafik air outlet angle terhadap Angle of attack



Gambar 5. Grafik koefisien drag terhadap Angle of attack



Gambar 6. Grafik Perbandingan Kecepatan Aliran terhadap Angle of attack



Gambar 7. Grafik Perubahan Koefisien lift terhadap Angle of attack

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian maka disimpulkan bahwa untuk British Profil 9C7/32,5 C50, :

- 1) Nilai atau harga koefisien drag berbanding lurus terhadap perubahan harga *air outlet angle* (α_2) dan peningkatan *angle of attack* (α).
- 2) Perbandingan kecepatan aliran fluida (C_2/C_1) melintasi sudu berpengaruh terhadap koefisien lift. Semakin diperlambatnya aliran melintasi sudu akan meningkatkan harga koefisien lift.
- 3) Koefisien lift tertinggi; 1,281; dicapai pada stagger 50, pada susudt serang 18°
- 4) Batas *stall* (*stalling limit*) untuk ketiga variasi stagger terjadi pada *angle off attack* = 18° .

6. Daftar Pustaka

M.Edy Sunarto, Alex Arter, Ueli Meier, (1991), Pedoman Rekayasa Tenaga Air, MHPG-BPPT, Bandung, Indonesia.

Kennedy, (2007), Stalling Limit Kompresor Stator Kaskade Dengan British Profil 9C7/32,5 C50 pada Stagger 40, Jurnal MEKTEK edisi Januari 2007, Palu, Indonesia.

Pryohutomo, B. (1999), *Kalibrasi Five-holes Probe dan Aplikasinya pada Medan Aliran Sekunder*, Tugas akhir Jurusan Teknik Mesin Fak. Teknologi Industri ITS, Surabaya, Indonesia.

Horlock, J.H [1973], *Axial Flow Compressors*, Robert E. Krieger Publishing Company Huntington, New York.

David Gordon W. [1989], *The Design of High-Efficiency Tubomachinery and Gas Turbines*, Massachusetts Institute of Technology, USA.

Walter R. Debler, [1990], *Fluid Mechanics Fundamentals*, The University of Michigan, Prentice-hall New Jersey, USA.

John D. Anderson, JR. [1988], *Fundamentals Of Aerodynamics*, Mc.Graw-Hill, International edition, Singapore.