

PENGUKURAN TURBULENSI DAN ANGULARITAS ALIRAN PADA TEROWONGAN ANGIN SUBSONIK LAPAN (THE MEASUREMENT OF TURBULENCE AND FLOW ANGULARITY IN LAPAN'S SUBSONIC WIND TUNNEL)

Firman Hartono^{1*}, Ronald Bessie^{}, Agus Arlbowo^{***}**

¹Program Studi Aeronotika dan Astronotika

Institut Teknologi Bandung, Bandung, INDONESIA

²PT Uavindo Nusantara

³Pusat Teknologi Penerbangan LAPAN

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

Jl. Raya LAPAN, Sukamulya, Rumpin, Bogor 16350 Indonesia

¹e-mail: firman7738@gmail.com

Diterima 10 November 2015; Direvisi 21 Maret 2016; Disetujui 18 Mei 2016

ABSTRACT

This paper explains the measurement of turbulence intensity and angularity in LAPAN's Open Loop Subsonic Wind Tunnel. The objective of the research is to find out the aerodynamic characteristic of the tunnel. Turbulence intensities were measured using 200 mm and 300 mm diameter turbulence sphere. The flow angularity in the cross section of tunnel's test section was measured using five holes probe at two different axial position i.e. 1. above internal balance turning table and 2. above external balance turning table. The number of measured points are 110 for every cross section plane and the average velocity during angular flow measurement is 15 m/s. Turbulence measurements shows wind tunnel's turbulence intensity of 0.26% at 25.9 m/s and 0.1% at 19 m/s. Angularity measurement shows relatively large angular flow variation in the jet, i.e. pitch angle of $\pm 3^\circ$ and achieving $+7^\circ$ at some locations and yaw angle of $\pm 2.5^\circ$.

Keywords: *wind tunnel, turbulence measurement, angularity*

ABSTRAK

Makalah ini menjelaskan pengukuran intensitas turbulensi dan angularitas aliran pada seksi uji terowongan angin sirkuit terbuka kecepatan rendah Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional. Tujuan dilakukannya pengukuran intensitas turbulensi dan angularitas adalah untuk mengetahui karakteristik aerodinamika terowongan angin kecepatan rendah LAPAN. Pengukuran intensitas turbulensi dilakukan menggunakan dua bola turbulensi (*turbulence sphere*) dengan diameter 200 mm dan 300 mm sedangkan pengukuran angularitas aliran dilakukan menggunakan probe 5 lubang pada bidang melintang di dua posisi aksial yaitu: di tengah roda putar *internal balance* dan di tengah roda putar *external balance*. Keseluruhan jumlah titik yang diukur per bidang adalah sebanyak 110 titik. Pengukuran dilakukan pada kecepatan rata-rata 15 m/s. Hasil pengukuran intensitas turbulensi menunjukkan bahwa intensitas turbulensi terowongan angin subsonik LAPAN pada kecepatan 25,9 m/s dan 19 m/s adalah sebesar 0,26% dan 0,1%. Hasil pengukuran angularitas aliran menunjukkan bahwa terowongan angin ini memiliki angularitas yang cukup besar yaitu sudut *pitch* $\pm 3^\circ$ dengan beberapa titik mencapai $+7^\circ$ dan sudut *yaw* $\pm 2,5^\circ$.

Kata kunci: *terowongan angin, pengukuran turbulensi, angularitas*

1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Terowongan angin kecepatan rendah LAPAN merupakan salah satu fasilitas penelitian aerodinamika yang aktif digunakan untuk pengembangan teknologi dirgantara. Sebagai alat yang digunakan untuk mengukur gaya-gaya aerodinamika model, karakteristik medan aliran di dalam terowongan angin ini perlu diketahui sehingga hasil pengukuran yang dilakukan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

Karakteristik medan aliran di dalam sebuah terowongan angin akan menentukan kesahihan hasil pengukuran terowongan angin tersebut. Parameter-parameter penting yang menyatakan karakteristik medan aliran sebuah seksi uji terowongan angin di antaranya adalah: intensitas turbulensi, angularitas aliran, variasi tekanan dinamik sepanjang seksi uji dan tebal lapisan batas pada dinding-dinding seksi uji (Pope and Harper, 1966). Parameter-parameter tersebut perlu diketahui untuk memberikan koreksi yang tepat atas hasil pengukuran aerodinamika sebuah model di dalam

seksi uji terowongan angin. Sebagai contoh, terowongan angin yang memiliki intensitas turbulensi yang tinggi dapat menyebabkan model-model yang diukur mengalami transisi ke lapisan batas turbulen lebih cepat sehingga koefisien gaya hambat yang terukur pada bilangan Reynolds tertentu akan tampak lebih kecil dari yang seharusnya.

Dalam makalah ini dijelaskan proses dan hasil pengukuran intensitas turbulensi dan angularitas aliran pada terowongan angin subsonik LAPAN. Intensitas turbulensi di dalam seksi uji sebuah terowongan angin dapat diukur dengan beberapa metode, di antaranya adalah: menggunakan laser, menggunakan *hotwire* dan menggunakan bola turbulensi (Rehman *et al.*, 2011). Dari ketiga metode yang disebutkan di atas, metode ketiga adalah yang paling sederhana namun memberikan hasil yang akurat. Pengukuran intensitas turbulensi menggunakan bola turbulensi berbasis pada karakteristik aerodinamika sebuah bola di dalam aliran seragam. Hasil-hasil pengujian sifat aerodinamika bola di dalam aliran seragam menunjukkan

bahwa bola memiliki karakteristik $C_D - Re$ yang unik pada daerah bilangan Reynolds antara 1×10^5 dengan 1×10^6 . Sifat yang unik tersebut dikaitkan dengan kondisi lapisan batas dan intensitas turbulensi aliran ketika separasi terjadi.

Seperti juga intensitas turbulensi, angularitas aliran dapat diukur dengan beberapa cara, di antaranya adalah: menggunakan laser, menggunakan *hotwire*, menggunakan *yaw probe* dan menggunakan *multi hole probes* (Tropea et al., 2007). Di antara *multi hole probes* yang banyak digunakan adalah probe 5 lubang yang juga sering dikenal sebagai *cobra-probe*. Dengan pertimbangan ketersediaan peralatan, angularitas aliran diukur menggunakan probe 5 lubang.

1.2 Tujuan

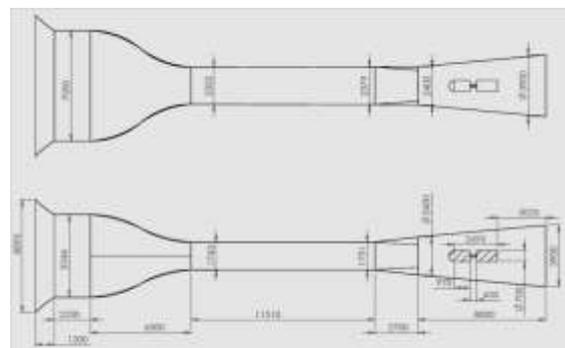
Tujuan dilakukannya pengukuran intensitas turbulensi dan angularitas adalah untuk mengetahui karakteristik aerodinamika terowongan angin kecepatan rendah LAPAN. Selanjutnya jika diperlukan data-data ini dapat digunakan untuk mengoreksi hasil pengukuran aerodinamika model uji.

2 KONFIGURASI AERODINAMIKA TEROWONGAN ANGIN

Terowongan angin kecepatan rendah LAPAN merupakan terowongan angin sirkuit terbuka dengan ukuran penampang seksi uji pada sisi masukan sebagai berikut: lebar 2325 mm dan tinggi 1743 mm. Seksi uji terowongan angin berbentuk divergen sehingga ukuran penampang seksi uji membesar menjadi lebar 2379 mm dan tinggi 1751 mm pada sisi keluaran seksi uji. Panjang total seksi uji adalah 11510 mm. Terowongan angin ini menggunakan 4 lapis *anti-turbulent screen* dan nosel

dengan rasio kontraksi mencapai 9. Kecepatan angin maksimum di dalam terowongan angin ini adalah 60 m/s. Konfigurasi aerodinamika terowongan angin kecepatan rendah LAPAN, termasuk ukuran-ukurannya, ditunjukkan pada Gambar 2-1 (PT UAVINDO NUSANTARA, 2012).

Terowongan angin subsonik LAPAN memiliki seksi uji yang panjang dengan dua posisi dudukan model, yaitu: dudukan model untuk *internal balance* (bagian depan) dan meja putar untuk dudukan model untuk *external balance* (bagian belakang). Dengan seksi uji yang panjang dan dua posisi dudukan model, tempat untuk pengukuran intensitas turbulensi dan angularitas aliran ditentukan dengan pertimbangan nilainya akan menjadi acuan di sepanjang seksi uji. Dengan demikian, untuk pengukuran intensitas turbulensi dipilih lokasi tepat di tengah-tengah antara kedua dudukan model sedangkan untuk pengukuran angularitas aliran dilakukan pada bidang tempat model terpasang. Posisi kedua bidang ini adalah: bidang depan, berjarak 2870 mm dari sisi masukan seksi uji, dan bidang belakang, berjarak 7890 mm dari sisi masukan seksi uji. Untuk mendapatkan distribusi sudut yang cukup baik, dalam setiap bidang dilakukan pengukuran pada 110 titik.

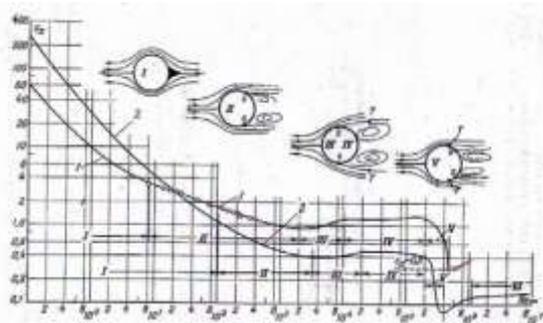


Gambar 2-1: Konfigurasi aerodinamika terowongan angin kecepatan rendah LAPAN

3 KARAKTERISTIK AERODINAMIKA BOLA TURBULENSI DAN PROBE 5 LUBANG

3.1 Bola Turbulensi

Pada bilangan Reynolds yang rendah (lebih rendah dari nilai kritisnya), bagian depan permukaan bola di dalam aliran seragam dilingkupi oleh lapisan batas laminer. Lapisan batas laminer memiliki energi kinetik rata-rata yang relatif rendah di dekat permukaan bola sehingga lemah dalam menghadapi kenaikan tekanan aliran. Kondisi ini menyebabkan lapisan batas laminer mudah mengalami separasi. Pada bola, separasi lapisan batas laminer terjadi pada permukaan bola bagian depan sehingga menyebabkan daerah ulakan yang luas dan menghasilkan koefisien gaya hambat, C_D , yang besar.

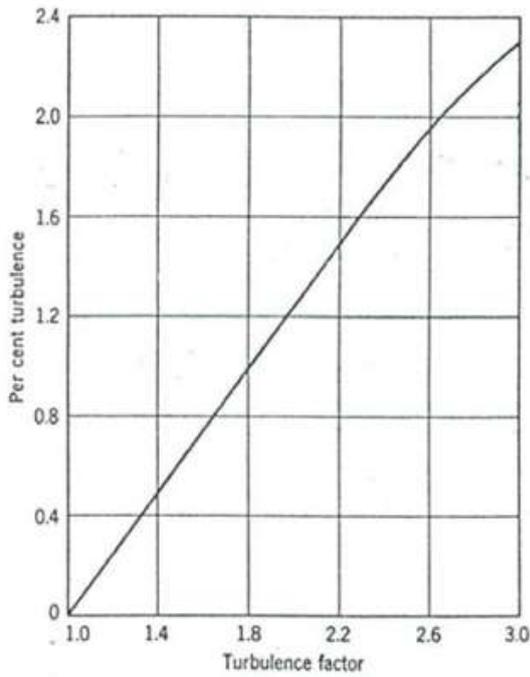


Gambar 3-1: Koefisien gaya hambat, C_D , vs Bilangan Reynolds, Re , pada silinder dan bola (Rehman *et al.*, 2011)

Jika kecepatan aliran seragam dinaikkan, bilangan Reynolds bola naik. Hal ini menyebabkan terjadinya transisi dari lapisan batas laminer menjadi lapisan batas turbulen di permukaan bagian depan bola. Lapisan batas turbulen memiliki energi kinetik rata-rata yang lebih tinggi sehingga lebih tangguh dalam menghadapi kenaikan tekanan ketika aliran bergerak turun

pada bagian belakang bola. Hal ini menyebabkan titik separasi bergeser ke belakang dengan cepat sehingga daerah ulakan di belakang bola mengecil. Berkurangnya daerah ulakan di belakang bola ini menyebabkan C_D bola turun. Distribusi C_D pada silinder dan bola pada berbagai kecepatan aliran untuk diameter bola tertentu ditunjukkan pada Gambar Gambar 3-1.

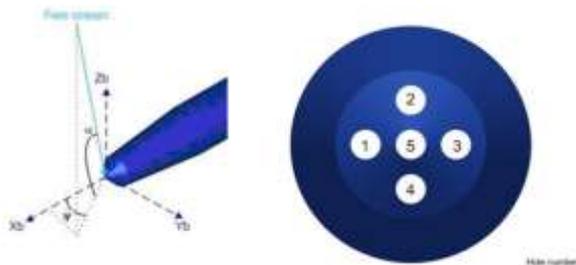
Selain pengaruh bilangan Reynolds, hasil-hasil penelitian juga menunjukkan bahwa karakteristik C_D bola tergantung pada variabel aliran yang lain, yaitu: intensitas turbulensi (Zarin, 1970). Ketergantungan karakteristik C_D bola terhadap intensitas turbulensi terkait dengan seberapa cepat aliran mengalami transisi dari laminer menjadi turbulen. Pada medan aliran dengan intensitas turbulensi yang tinggi, transisi dari lapisan batas laminer menjadi lapisan batas turbulen pada permukaan bagian depan bola terjadi lebih cepat sehingga C_D turun pada bilangan Reynolds kritis yang lebih rendah. Dengan demikian, intensitas turbulensi medan aliran dapat diukur dengan cara membandingkan bilangan Reynolds kritis pada kondisi aliran dengan tingkat turbulensi sangat rendah (intensitas turbulensi aliran mendekati 0) dengan bilangan Reynolds kritis pada kondisi aliran nyata yang diukur. Semakin tinggi intensitas turbulensi medan aliran, perbandingan ini akan semakin besar. Hubungan antara intensitas turbulensi dengan faktor turbulensi ditunjukkan pada Gambar 3-2. Pada gambar tersebut, faktor turbulensi adalah perbandingan bilangan Reynolds kritis kondisi intensitas turbulensi hampir nol dengan kondisi nyata aliran hasil pengukuran.



Gambar 3-2: Kurva intensitas turbulensi vs. faktor turbulensi (Phoreman et al., 2000)

3.2 Probe 5 Lubang

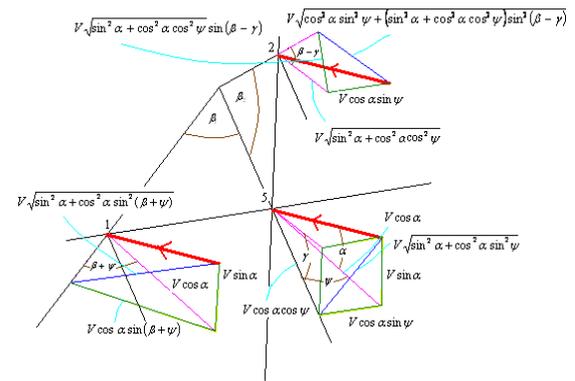
Probe 5 lubang adalah sebuah alat ukur tekanan yang memiliki lima buah lubang pada bagian ujung probe. Lubang-lubang tersebut disusun membentuk tanda plus (+) sehingga menjadi susunan satu lubang di sebelah kiri, satu lubang di sebelah atas, satu lubang di sebelah kanan, satu lubang di sebelah bawah dan satu lubang di tengah-tengah. Sistem koordinat dan sistem penomoran probe 5 lubang ditunjukkan pada Gambar 3-3.



Gambar 3-3: Sistem koordinat dan sistem penomoran probe 5 lubang (Hartono et al., 2008)

Prinsip kerja probe 5 lubang mirip dengan prinsip kerja tabung Pitot –

statik. Setiap lubang akan mengukur tekanan statik lokal udara di sekitar lubang tersebut. Pada kasus udara berarah sejajar dengan garis sumbu sebuah lubang, tekanan statik yang terukur pada lubang tersebut sama dengan tekanan total. Sebagai ilustrasi dari penjelasan tersebut, Gambar 3-4 menunjukkan sistem kecepatan pada lubang 1, 2 dan 5 dari probe 5 lubang.



Gambar 3-4: Sistem kecepatan pada lubang 1, 2 dan 5 probe 5 lubang (Hartono et al., 2007)

Probe 5 lubang memiliki 5 variabel yang merupakan tekanan yang terukur pada setiap lubang. Untuk mengurangi jumlah variabel, didefinisikan koefisien tekanan arah yaw dan pitch berikut (Gundongdu and Goksel, 1998), (Gonsales and Arrington, 1999):

- koefisien tekanan arah yaw

$$C_\psi = \frac{p_3 - p_1}{q_p} \tag{3-1}$$

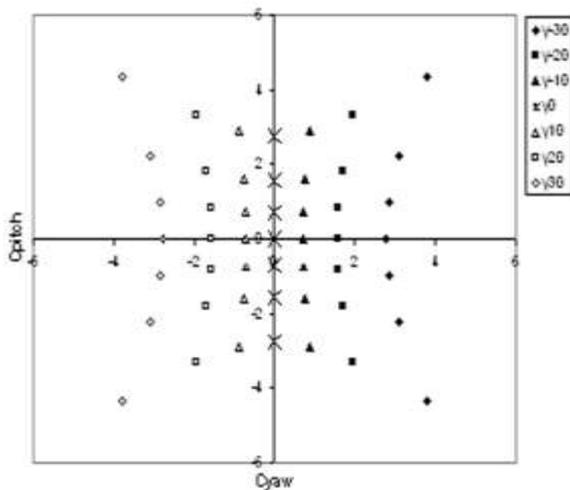
- koefisien tekanan arah pitch

$$C_\alpha = \frac{p_4 - p_2}{q_p} \tag{3-2}$$

dengan tekanan dinamik probe q_p :

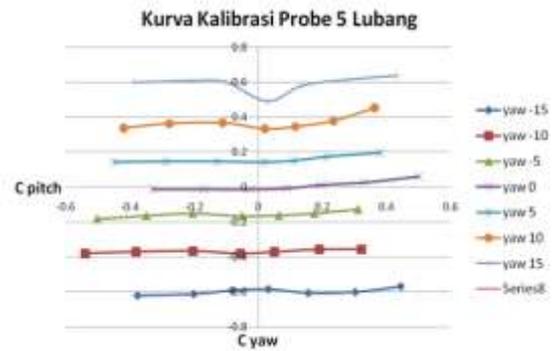
$$q_p = p_5 - \frac{1}{4}(p_1 + p_2 + p_3 + p_4) \tag{3-3}$$

Selain koefisien yang menyatakan arah, dapat didefinisikan juga koefisien tekanan dinamik dan koefisien tekanan total. Untuk menyelidiki angularitas aliran hanya sudut aliran yang akan diukur sehingga cukup dengan koefisien tekanan arah *pitch* dan koefisien tekanan arah *yaw*. Dengan menerapkan formulasi diatas pada sistem kecepatan pada Gambar 3-4, diperoleh kurva koefisien tekanan arah aliran hasil pendekatan teoritik. Kurva koefisien tekanan arah aliran dapat dilihat pada Gambar 3-5.



Gambar 3-5: Kurva koefisien tekanan arah *pitch* dan arah *yaw*

Kurva koefisien tekanan arah aliran teoritik diperoleh dengan anggapan probe yang digunakan memiliki geometri yang sempurna sehingga pola kurva sangat simetris. Pada kenyataannya probe yang digunakan tidak sempurna sehingga perlu dilakukan kalibrasi. Hasil kalibrasi probe 5 lubang yang digunakan untuk pengukuran angularitas ditunjukkan pada Gambar 3-6.



Gambar 3-6: Kurva hasil kalibrasi probe 5 lubang

4 PENGATURAN EKSPERIMEN

4.1 Pengukuran Intensitas Turbulensi

Untuk mengukur intensitas turbulensi pada dua kecepatan yang berbeda digunakan dua buah bola turbulensi dengan diameter yang berbeda yaitu 200 mm dan 300 mm. Bola turbulensi dengan diameter yang lebih besar akan memiliki bilangan Reynolds yang lebih tinggi pada kecepatan yang sama. Dengan demikian bilangan Reynolds kritis bola turbulensi yang lebih besar akan terjadi pada kecepatan angin yang lebih rendah. Oleh karena bilangan Reynolds kritis setiap bola turbulensi tidak diketahui, untuk setiap kasus kecepatan divariasikan dari rendah ke tinggi hingga terjadi penurunan C_D secara signifikan.

Untuk mengukur besar gaya hambat bola turbulensi, digunakan sebuah external balance 1 komponen yang hanya akan mengukur gaya hambat. External balance menggunakan *load cell* tipe *shear beam* dengan beban maksimum yang dapat diukur sebesar 1 kg. Gambar 4-1 menunjukkan pemasangan bola turbulensi 300 mm di dalam seksi uji terowongan angin.



Gambar 4-1: Pemasangan bola turbulensi 300 mm di dalam seksi uji

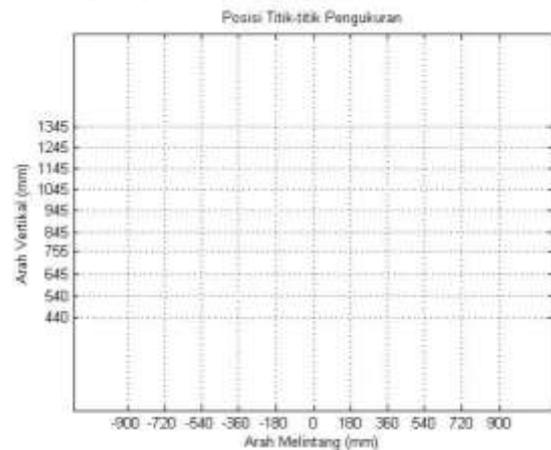
4.2 Pengukuran Angularitas Aliran

Pengukuran angularitas aliran dilakukan menggunakan probe 5 lubang yang telah dikalibrasi. Oleh karena ukuran seksi uji yang besar, dudukan probe 5 lubang tidak dapat dipasang di luar seksi uji terowongan angin. Untuk membantu pemasangan probe 5 lubang, sebuah dudukan berbentuk sayap dengan penampang berupa airfoil simetris digunakan sebagai alat bantu. Pemasangan probe 5 lubang pada dudukan sayap ditunjukkan pada Gambar 4-2.



Gambar 4-2: Pemasangan probe 5 lubang pada dudukan

Posisi titik-titik minimum dan maksimum arah vertikal yang diukur di dalam seksi uji ditentukan dengan mempertimbangkan peletakan dudukan sayap. Dalam kasus terowongan angin LAPAN, terdapat keterbatasan rentang peletakan dudukan sayap karena keterbatasan ukuran jendela seksi uji tempat dudukan sayap bertumpu. Dengan demikian daerah pengukuran dibatasi oleh tinggi jendela seksi uji. Untuk mendapatkan distribusi sudut yang cukup baik, dalam setiap bidang dilakukan pengukuran terhadap 110 titik. Titik-titik ini diperoleh dengan memvariasikan posisi pengukuran menjadi 10 titik ke arah vertikal dan 11 titik ke arah melintang. Untuk lebih jelasnya titik-titik pengukuran di dalam seksi uji diperlihatkan pada Gambar 4-3.



Gambar 4-3: Posisi titik-titik pengukuran

Dalam penelitian ini pengukuran angularitas aliran hanya dilakukan pada satu harga kecepatan yaitu 15 m/s.

5 HASIL PEMBAHASAN

5.1 Intensitas Turbulensi

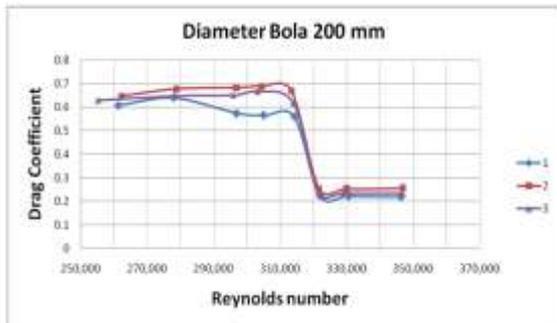
5.1.1 Bola turbulensi 200 mm

Hasil pengukuran intensitas turbulensi menggunakan bola dengan diameter 200 mm ditunjukkan pada Gambar 5-1.

Dari Gambar 5-1 dapat dilihat bahwa bilangan Reynolds kritis terjadi

pada $Re = 320.000$. Bilangan Reynolds kritis ini ditandai dengan nilai koefisien gaya hambat $C_D = 0,3$. Pada aliran laminer, bilangan Reynolds kritis bola adalah 385.000 . Dengan demikian, faktor turbulensi aliran di dalam terowongan angin subsonik LAPAN pada kasus bola berdiameter 200 mm adalah:

$$TF = 385.000/320.000 = 1.2$$



Gambar 5-1: Kurva koefisien gaya hambat vs bilangan Reynolds bola turbulensi 200 mm

Mengacu pada kurva intensitas turbulensi vs faktor turbulensi (Gambar 3-2), nilai faktor turbulensi ini berkaitan dengan nilai intensitas turbulensi $0,26\%$. Untuk terowongan angin edukasi, nilai intensitas turbulensi sebesar $0,3\%$ masih dapat diterima sedangkan untuk terowongan angin penelitian, nilai intensitas turbulensi biasanya pada kisaran $0,1\%$ (Pope and Harper, 1966).

Dengan diameter bola diketahui sebesar 200 mm dan bilangan Reynolds kritik diketahui sebesar 320.000 , kecepatan angin ketika bilangan Reynolds kritis terjadi dapat dihitung. Dari hasil perhitungan diketahui bahwa kecepatan angin pada kondisi ini adalah $25,9\text{ m/s}$.

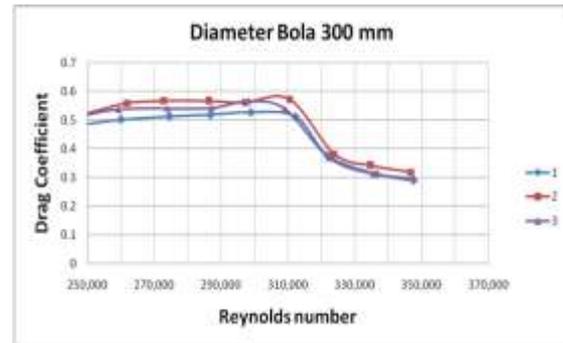
5.1.2 Bola turbulensi 300 mm

Hasil pengukuran intensitas turbulensi menggunakan bola dengan

diameter 300 mm ditunjukkan pada Gambar 5-2.

Dari Gambar 5-2 dapat dilihat bahwa bilangan Reynolds kritis terjadi pada $Re = 348.000$. Dengan menggunakan metode yang sama seperti pada kasus diameter bola 200 mm , diperoleh:

$$TF = 385.000/348.000 = 1.1$$



Gambar 5-2: Kurva koefisien gaya hambat vs bilangan Reynolds bola turbulensi 300 mm

Nilai faktor turbulensi ini berkaitan dengan nilai intensitas turbulensi $0,1\%$. Dengan membandingkan hasil dari kasus ini dengan kasus sebelumnya dapat ditarik kesimpulan intensitas turbulensi aliran di dalam seksi uji terowongan angin turun dengan turunnya kecepatan. Nilai intensitas turbulensi sebesar $0,1\%$ cukup baik untuk terowongan angin yang digunakan untuk penelitian.

Dengan diameter bola diketahui sebesar 300 mm dan bilangan Reynolds kritik diketahui sebesar 348.000 , kecepatan angin ketika bilangan Reynolds kritis terjadi dapat dihitung. Dari hasil perhitungan diketahui bahwa kecepatan angin pada kondisi ini adalah $19,0\text{ m/s}$.

5.2 Angularitas Aliran

Angularitas aliran di dalam seksi uji terowongan angin dinyatakan dengan variasi sudut arah *pitch* dan arah *yaw*. Variasi sudut arah *pitch* artinya variasi

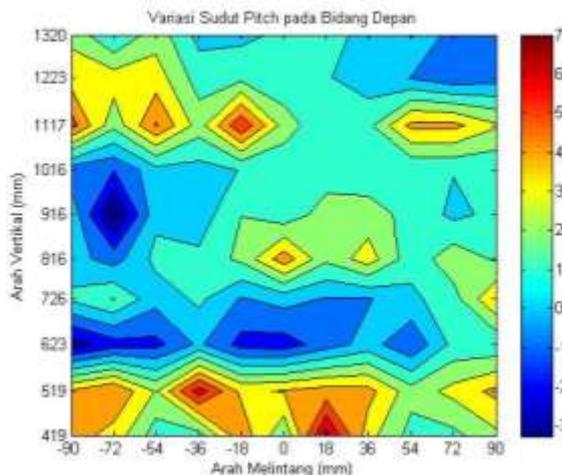
sudut aliran pada bidang vertikal dan aksial. Sudut *pitch* positif artinya aliran memiliki komponen arah vertikal ke atas selain bergerak dalam arah aksial. Sudut *pitch* negatif berarti sebaliknya, yaitu aliran memiliki komponen arah vertikal ke bawah selain bergerak dalam arah aksial.

Selain variasi sudut arah *pitch*, aliran angin juga memiliki variasi sudut dalam arah *yaw*, yaitu variasi sudut dalam bidang aksial dan melintang. Sudut *yaw* didefinisikan sebagai positif jika aliran memiliki komponen kecepatan melintang ke arah kiri dan didefinisikan negatif jika aliran memiliki komponen kecepatan melintang ke arah kanan. Arah kanan dan kiri dalam definisi ini adalah kanan dan kiri terowongan angin dengan settling chamber sebagai bagian depan.

5.2.1 Bidang depan

A. Distribusi *Pitch*

Distribusi *pitch* pada bidang depan seksi uji ditampilkan pada Gambar 5-3. Untuk memudahkan dalam analisis, distribusi *pitch* disajikan dalam kurva kontur.



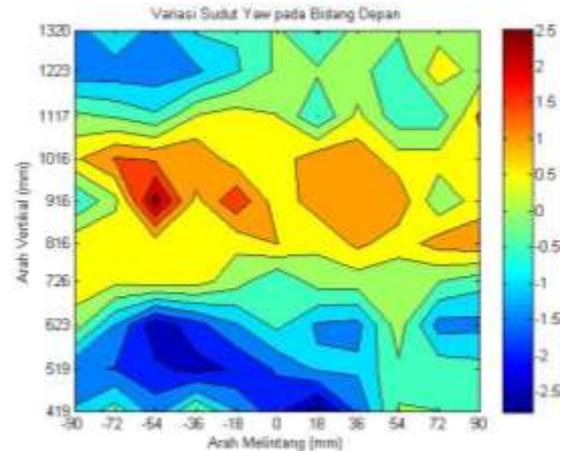
Gambar 5-3: Distribusi sudut *pitch* pada bidang depan, $x = 2870$ mm

Dari Gambar 5-3, dapat dilihat bahwa sebagian besar aliran memiliki sudut *pitch* kurang dari $\pm 3^\circ$. Namun demikian

terdapat titik dengan sudut *pitch* positif yang cukup besar, yaitu mencapai 7° .

B. Distribusi *Yaw*

Selain distribusi sudut *pitch*, karakteristik angularitas aliran juga dapat ditinjau dari distribusi sudut *yaw*. Distribusi sudut *yaw* pada bidang depan ditunjukkan pada Gambar 5-4.



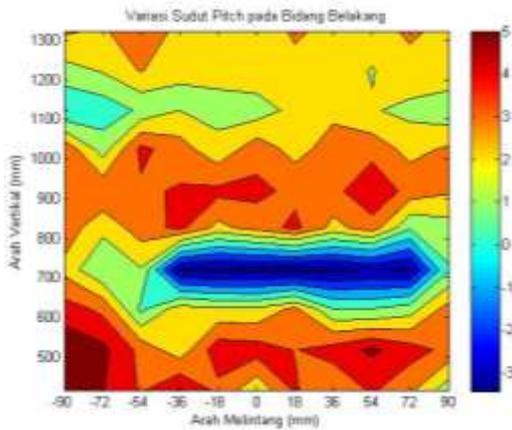
Gambar 5-4: Distribusi sudut *yaw* pada bidang depan, $x = 2870$ mm

Dari Gambar 5-4 terlihat bahwa distribusi *yaw* medan aliran pada bidang depan cukup baik yaitu maksimum $\pm 2.5^\circ$. Selain itu dapat juga dilihat pola yang jelas yaitu pada bagian tengah seksi uji aliran cenderung bergerak ke arah kiri sedangkan pada bagian atas dan bawah seksi uji aliran cenderung bergerak ke kanan. Secara umum, jika dibandingkan dengan distribusi sudut *pitch*, distribusi sudut *yaw* pada bidang depan ini lebih baik.

5.2.2 Bidang belakang

A. Distribusi *Pitch*

Gambar 5-5 menunjukkan distribusi sudut *pitch* pada bidang belakang. Seperti juga kasus yang lain, distribusi sudut *pitch* disajikan dalam bentuk kurva kontur.



Gambar 5-5: Distribusi sudut *pitch* pada bidang belakang, $x = 7890$ mm

Dengan membandingkan Gambar 5-5 dengan Gambar 5-3, terlihat bahwa daerah dengan sudut *pitch* kurang dari $\pm 3^\circ$ pada bidang belakang lebih luas daripada yang pada bidang depan. Namun demikian, sudut *pitch* maksimum pada bidang belakang masih cukup tinggi yaitu mencapai 5° .

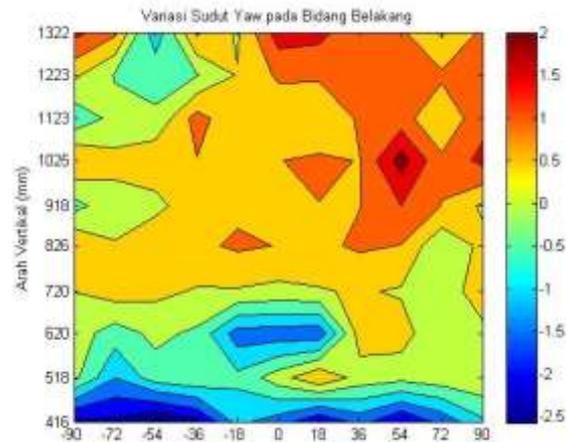
Fenomena yang menarik pada distribusi sudut *pitch* ini adalah pada bidang depan sudut *pitch* dominan positif di bagian bawah dan dominan negatif di bagian atas. Hal ini menunjukkan pengaruh kontraksi yang mendorong udara dari bagian dinding atas ke arah bawah sehingga menciptakan aliran dengan *pitch* negatif dan mendorong udara dari bagian dinding bawah ke arah atas sehingga menciptakan aliran dengan *pitch* positif.

Pada bidang belakang, terdapat daerah dengan sudut *pitch* negatif pada bagian tengah sedangkan pada bagian atas dan bawah memiliki sudut *pitch* positif. Ini menunjukkan telah terjadi pencampuran yang cukup intens selama udara mengalir dari bidang depan ke bidang belakang sehingga tidak terjadi lagi dominasi *pitch* yang dipengaruhi dinding kontraksi.

B. Distribusi Yaw

Distribusi sudut *yaw* pada bidang belakang ditunjukkan pada **Error!**

Reference source not found.5-6. Untuk memudahkan analisis, distribusi sudut *yaw* disajikan dalam bentuk kurva kontur.



Gambar 5-6: Distribusi sudut *yaw* pada bidang belakang, $x = 7890$ mm

Dengan membandingkan **Error!** **Reference source not found.**5-6 dengan Gambar 5-4 terlihat bahwa distribusi *yaw* pada bidang belakang lebih baik karena bervariasi dari $-2,5^\circ$ sampai dengan 2° (pada bidang depan bervariasi dari $-2,5^\circ$ sampai dengan $+2,5^\circ$) dengan sebagian besar aliran pada bagian tengah tempat model dipasang memiliki sudut *yaw* kurang dari $\pm 0,5^\circ$. Perbedaan lain yang dapat dilihat adalah distribusi sudut *yaw* pada bidang belakang cenderung positif di bagian atas dan cenderung negatif di bagian bawah. Dengan kata lain, aliran cenderung bergerak ke kiri pada bagian atas dan cenderung bergerak ke kanan pada bagian bawah. Sekilas fenomena ini seakan-akan menunjukkan adanya pusaran dengan radius yang cukup besar. Namun demikian jika data distribusi *yaw* ini disatukan dengan distribusi *pitch*, tidak ada cukup bukti yang menunjukkan hal itu.

6 KESIMPULAN

Untuk mengetahui karakteristik aerodinamika terowongan angin subsonik LAPAN, telah dilakukan pengukuran

intensitas turbulensi dan angularitas aliran. Pengukuran intensitas turbulensi dilakukan menggunakan bola turbulensi dengan diameter 200 mm dan 300 mm. Hasil pengukuran menggunakan bola turbulensi 300 mm menunjukkan intensitas turbulensi aliran di dalam seksi uji terowongan angin sebesar 0,1% pada kecepatan 19,0 m/s. Hasil pengukuran menggunakan bola turbulensi 200 mm menunjukkan intensitas turbulensi aliran di dalam seksi uji terowongan angin sebesar 0,26% pada kecepatan 25,9 m/s. Dibandingkan dengan nilai intensitas turbulensi terowongan angin standar untuk penelitian, intensitas turbulensi terowongan angin ini relatif tinggi. Namun demikian hasil pengujian aerodinamika menggunakan terowongan angin ini masih dapat diterima jika dilakukan koreksi-koreksi yang tepat.

Seksi uji terowongan angin subsonik LAPAN memiliki dua lokasi pengukuran model, yaitu: pengukuran model menggunakan *internal balance* dan *external balance* yang masing-masing berjarak 2870 mm (bidang depan) dan 7890 mm (bidang belakang) dari sisi masukan seksi uji. Oleh karena itu angularitas aliran diukur pada dua posisi tersebut. Hasil pengukuran menunjukkan sudut *pitch* aliran pada bidang depan umumnya berada di dalam range $\pm 3^\circ$ dengan beberapa titik mencapai $+7^\circ$. Hasil pengukuran menunjukkan selama udara mengalir dari bidang depan ke bidang belakang angularitas dalam arah *pitch* berkurang. Pada bidang belakang, sudut *pitch* maksimum turun menjadi $+5^\circ$.

Angularitas aliran dalam arah *yaw* lebih baik dari arah *pitch*. Hal ini terlihat pada hasil pengukuran sudut *yaw* pada bidang depan dan bidang belakang. Pada bidang depan sudut *yaw* berada di dalam rentang $\pm 2,5^\circ$,

sedangkan pada bidang belakang sudut *yaw* berada pada rentang yang lebih kecil yaitu dari $-2,5^\circ$ sampai dengan $+2^\circ$ dengan sebagian besar aliran pada bagian tengah tempat model dipasang memiliki sudut *yaw* kurang dari $\pm 0,5^\circ$. Secara umum, hasil pengukuran angularitas aliran menunjukkan bahwa semakin jauh dari sisi masukan seksi uji, aliran semakin lurus. Namun demikian dibandingkan dengan nilai angularitas aliran terowongan angin ideal, yaitu maksimum $\pm 0,5^\circ$ pada arah *pitch* dan *yaw*, angularitas aliran terowongan angin ini relatif tinggi.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya pada tim *engineering* PT UAVINDO NUSANTARA yang telah banyak membantu dalam penyiapan alat dan pengambilan data dan Pustekbang LAPAN yang telah memberi ijin untuk proses pengukuran.

DAFTAR RUJUKAN

- Gonsalez, J.C. and Arrington, E.A., 1999. *Five-Hole Flow Angle Probe Calibration for the NASA Glenn Icing Research Tunnel*. NASA/CR—1999-202330, AIAA-96-2201.
- Gundogdu, M.Y. and Goksel, O.T., 1998. *Calibration and Use of a Five-Tube Pressure Probe in the Swirling Flow Field*. : Tr. J. of Engineering and Environmental Science, Vol. 22.
- Hartono, F., Suwono A., Sardjadi, D., Pasaribu, H.M., 2007. *Calibration and Measurement of High Angle Swirling Flows by Using Five-Hole Pressure Probe*. Paper presented at Regional Conference on Aerospace Science Technology and Industry 2007.
- Hartono, F., Suwono A., Sardjadi, D., Pasaribu, H.M., 2008. *The Effects of Swirl Vane Angle Distribution to the Mean Flow-*

- Field Characteristic of a Confined Annular Swirling Flows: Simulation And Experiment.* Int. Journal of Energy Machinery, 50-61.
- Phoreman, J., Saephan, S. and Vander Kam, J.C., 2000. *Determination of Turbulence Level in the UC Davis Aeronautical Wind Tunnel.* California : University of California, Internal Report of UC Davis Aeronautical Wind Tunnel.
- Pope, A., and Harper, J.J., 1966. *Low Speed Wind Tunnel Testing.* New York : John Wiley and Sons, Inc.
- PT Uavindo Nusantara, 2012. *Upgrade Terowongan Angin Subsonik LAPAN.* Bandung.
- Rehman, K., Malik, A. M., Sarwar, W., Zafar, M. F., 2011. *An analysis of flow turbulence in a wind tunnel using Turbulence Sphere,* Proceedings of International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology, Januari 2011.
- Tropea, C., Yarin, A. and Foss, J. F., 2007. *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Zarin, Neil A., 1970. *Measurement of Non Continuum and Turbulence Effects on Subsonic Sphere Drag.* NASA CR-1585