
Penggunaan Perangkat Lunak dari Open Source dan Metode Komputasi untuk Prediksi Kebisingan yang Ditimbulkan oleh Airframe Pesawat Terbang

Aprilia Sakti Kusumalestari^{1*}, Santoso Soekirno¹, Harry Sudibyo²,
Muhamad Suryanegara²

¹ Program Pascasarjana Fisika, Universitas Indonesia, Jl. Salemba Raya IV Jakarta
Pusat 10430, Indonesia

² Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Jl. Kampus UI, Kukusan, Beji, Kota Depok,
Jawa Barat 16424, Indonesia

- Corresponding author. E-mail: aprilias_k@yahoo.com
(Aprilia Sakti Kusumalestari),

ABSTRAK

Prediksi kebisingan airframe pesawat terbang, sudah banyak dilakukan dengan berbagai perangkat lunak oleh para peneliti di berbagai negara. Tetapi hanya beberapa peneliti yang menggunakan perangkat lunak dari *Open Source*. Studi ini merupakan bagian dari disertasi penulis tentang pemodelan peredaman kebisingan *airframe* pesawat terbang. Mengacu pada penelitian Jarosz, dkk (2016) dan pada diskusi internal di bagian aerodinamika, Direktorat Teknologi dan Pengembangan PTDI (2019), pada studi ini dianalisis kemungkinan penggunaan perangkat lunak OpenFOAM[®] dari *Open Source* untuk prediksi kebisingan salah satu pesawat buatan Indonesia di hangar PTDI. Kebisingan airframe pesawat terbang, yang merupakan fluktuasi rapat massa dan momentum dalam medium fluida yang bergerak dengan kecepatan tinggi, dinyatakan dalam persamaan diferensial Ffowcs Williams – Hawkings. Persamaan ini terdiri dari suku-suku yang menginterpretasikan medan quadrupol, dipol, dan monopol dari rapat massa dan momentum terhadap posisi dan waktu. Dengan menganalisis sifat-sifat persamaan, bentuk airframe pesawat, dan asumsi fisis yang diterapkan, maka disimpulkan kepastiannya untuk penggunaan OpenFOAM, dengan metode komputasi yang menggunakan simulasi untuk kebisingan yang ditimbulkan oleh aliran murni

aerodinamiknya, dan menggunakan pemodelan untuk kebisingan yang ditimbulkan oleh aliran turbulensinya. Hal ini diharapkan menjadi salah satu *benchmark* dalam penelitian perancangan pesawat terbang di Indonesia yang memperhitungkan peredaman kebisingan sebagai bagian dari optimasi perancangan.

Kata Kunci : kebisingan pesawat terbang; kebisingan airframe; Open-FOAM; Computational Fluid Dynamic; Persamaan Ffowcs Williams - Hawkings

ABSTRACT

Prediction of aircraft airframe noise has been done using various software by researchers in several countries. But only a few researchers use software from Open Source. This study is part of the author's dissertation, for doctoral program, on modeling aircraft airframe noise reduction. Referring to the research of Jarosz, et al (2016) and to internal discussions in the aerodynamics section, the Directorate of Technology and Development of PTDI (2019), this study analyzed the possibility of using OpenFOAM® software from Open Source for noise prediction of the aircraft made in Indonesia in the PTDI hangar. Airframe noise, which is the fluctuation of mass and momentum density in a fast-moving fluid medium, is expressed in the Ffowcs Williams-Hawkings differential equation. This equation consists of terms that interpret the quadrupole, dipole, and monopolistic fields of mass density and momentum with respect to position and time. By analyzing the properties of equations, aerodynamical shapes of aircraft airframe, and physical assumptions which are applied, the decision is concluded for the use of OpenFOAM, with computational methods that use simulations for noise generated by pure aerodynamic flow, and use modeling for noise generated by turbulence flow. This is expected to be one of the benchmarks in aircraft design research in Indonesia which considering noise reduction as part of design optimization.

Keywords: Aircraft Noise; Airframe Noise; OpenFOAM, CFD, FWH Equation

1. Pendahuluan

Kebisingan merupakan salah satu topik penelitian dunia yang menjadi bagian dari polusi yang mempengaruhi kehidupan manusia [1]. Kebisingan yang akan dibahas pada tulisan ini adalah kebisingan yang berasal dari pesawat terbang. Sejak perkembangannya pada akhir tahun 60-an, teknologi untuk mengurangi kebisingan pesawat terbang sudah berkembang cukup signifikan, khususnya dalam teknologi perancangan pesawat terbang. Pada awalnya, penelitian ini diinisiasi untuk pengembangan pesawat pengintai militer ultra-senyap, namun kemudian juga berkembang di perancangan pesawat terbang sipil. Upaya peredaman kebisingan pada rancangan pesawat di Indonesia sendiri akan dikembangkan sebagaimana diungkapkan pada tulisan penulis sebelumnya [2].

Setelah berhasil menurunkan kebisingan pesawat terbang pada bagian utamanya, yaitu mesin jet, sebagian peneliti tertarik untuk mempelajari peredaman kebisingan bagian yang lain, yaitu *airframe*. Kebisingan mesin jet dapat diturunkan dari 150 dB di awal tahun 1960, hingga menjadi sekitar 80 dB di awal tahun 2000an, dengan teknologi by-pass. Pada saat itu, kebisingan *airframe* mulai tampak signifikan, terutama pada saat pesawat terbang *approach* menuju pendaratan.

Resume penelitian tentang kebisingan *airframe* sejak dimulainya penelitian awal, dirangkum dalam tulisan Dobrzynski [3]. Ditunjukkan bahwa kebisingan *airframe* pesawat terbang bisa menjadi cukup significant pada pesawat-pesawat besar pada waktu pendaratan. Fenomena ini menarik perhatian para peneliti dan desainer pesawat untuk mengembangkan teknologi peredaman kebisingannya. Hal ini disebabkan oleh korelasi bahwa kebisingan berbanding terbalik dengan efisiensi. Pesawat yang mempunyai kebisingan tinggi cenderung mempunyai efisiensi yang rendah. Jadi selain mengurangi polusi kebisingan yang dapat merugikan pada manusia yang terpapar, pengurangan kebisingan pesawat terbang juga dapat menambah efisiensi bahan bakar. Selain itu jika pesawat digunakan pada kepentingan militer, selain penampakan dan deteksi radar, suara sedesis apapun sangat beralasan untuk dikurangi.

Sebagai salah satu isu pengembangan teknologi desain pesawat di dunia, kebisingan *airframe* pesawat terbang mempunyai kerumitan tersendiri yang cukup tinggi. Perhitungan bunyi yang timbul dari aliran udara berkecepatan tinggi, turbulensi, getaran atau gesekan permukaan badan pesawat, serta pemantulan-pemantulan dari ketiga sumber tersebut memunculkan persamaan-persamaan kompleks. Di samping itu tantangan yang dihadapi

adalah kerumitan dalam pengukuran eksperimen terhadap airframe itu sendiri, sehingga validasi perhitungan tidak mudah dilakukan. Tetapi setelah berbagai eksperimen dan pendekatan dilakukan, hasil yang sesuai cukup memuaskan.

Dilihat dari *Technology Readiness Level* (TRL) untuk penelitian airframe pesawat terbang, bidang ini masih dalam percobaan untuk aplikasi. Mengacu kepada tinjauan ICAO, TRL untuk kebisingan airframe pesawat terbang, ditargetkan mencapai level 9 pada tahun 2020 [4].

Dalam tulisan ini akan dipaparkan tentang metode analogi yang diambil untuk membuat prediksi kebisingan airframe suatu pesawat terbang, dengan Persamaan Ffowcs Williams – Hawkins [5] dan kondisi yang memungkinkan menggunakan perangkat lunak OpenFoam[6], yaitu salah satu yang berasal dari opensource. Hal ini jarang dilakukan oleh peneliti dunia maupun Indonesia karena umumnya analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak berbayar yang dimiliki oleh perusahaan manufaktur pesawat terbang maupun lembaga penelitian nasional.

2. Bahan dan Metode

2.1. Aeroakustika

Aeroakustika dikembangkan dari aerodinamika yang mempelajari dinamika

aliran udara [7]. Dari sini para peneliti mencoba mengungkapkan komponen dari energi kinetik dari gerakan aliran udara yang berubah menjadi energi bunyi atau energi akustik. Energi akustik didefinisikan sebagai gangguan energi yang berubah-ubah yang melewati suatu medium dalam bentuk gelombang.

Dalam merepresentasikan bunyi dari aliran udara, maka diungkapkan fluktuasi momentum dan massa per volume aliran, yang dihantarkan oleh udara di sekitarnya dalam bentuk gelombang longitudinal. Fluktuasi ini merupakan mekanisme konversi energi dari energi kinetik menjadi energi akustik. Jadi, parameter kunci dari kebisingan airframe pesawat terbang adalah momentum dan massa. Sehingga di dalam pembahasan ini yang akan menjadi obyek persamaan adalah medan momentum dan medan (kerapatan) massa di aliran udara sekitar badan pesawat terbang.

Kasus ini tentunya sangat rumit dilihat dari banyaknya faktor yang harus diperhitungkan. Tetapi solusi yang lebih sederhana dapat diambil dengan melakukan integrasi dan mengabaikan beberapa hal yang cukup kecil, yaitu: difraksi, refleksi, dan interferensi gelombang bunyi di sekitar airframe pesawat itu sendiri.

Dasar yang digunakan di dalam teori aeroakustik adalah persamaan diferensial Lighthill [8]. Persamaan ini mengungkapkan fluktuasi kerapatan

udara dan momentum terhadap posisi dan waktu sebagai interpretasi bunyi yang ditimbulkan oleh aliran aerodinamika. Sistem persamaan Lighthill merepresentasikan bunyi yang timbul akibat aliran udara berkecepatan, yang disebut sebagai kebisingan akibat aerodinamika. Bagian pertama dari teori Lighthill memaparkan tentang aliran dan gesekannya dengan suatu permukaan, sedangkan bagian kedua memaparkan tentang turbulensi sebagai sumber bunyi.

Pada aliran udara di sekitar suatu permukaan, jika ρ adalah kerapatan udara yang mengalir, v_i adalah kecepatan aliran udara yang menimbulkan bunyi pada arah i , x_i kedudukan dalam ruang atau bidang aliran, t adalah waktu, maka bunyi yang timbul direpresentasikan sebagai :

Pada aliran udara di sekitar suatu permukaan, jika ρ adalah kerapatan udara yang mengalir, v_i adalah kecepatan aliran udara yang menimbulkan bunyi pada arah i , x_i kedudukan dalam ruang atau bidang aliran, t adalah waktu, maka bunyi yang timbul direpresentasikan sebagai :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v_i) + c_0^2 \frac{\partial \rho}{\partial x_i} = 0 \quad (1b)$$

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} + c_0^2 \bar{\nabla}^2 \rho = 0 \quad (1c)$$

c_0 adalah kecepatan suara pada medium di sekitar aliran, sedangkan $\bar{\nabla}^2$ adalah operator Laplace.

Dengan memperhitungkan bunyi yang timbul dari getaran permukaan benda padat di sekitar aliran, yaitu permukaan airframe pesawat, maka persamaan ini menjadi :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = 0 \quad (2a)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v_i) + c_0^2 \frac{\partial \rho}{\partial x_i} = -\frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} \quad (2b)$$

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} + c_0^2 \bar{\nabla}^2 \rho = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (2c)$$

T_{ij} adalah tensor tekanan pada setiap titik yang direpresentasikan oleh :

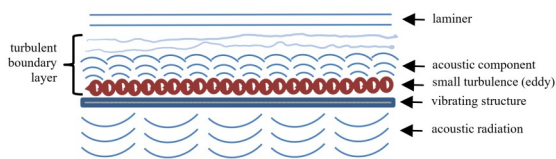
$$T_{ij} = \rho v_i v_j + p_{ij} - c_0^2 \rho \delta_{ij} \quad (3)$$

dengan v_i dan v_j adalah komponen kecepatan pada arah x_i dan x_j .

Tensor tekanan ini muncul dari penerapan tekanan di setiap titik aliran, akibat adanya getaran dari permukaan padat, yang berfluktuasi menghasilkan bunyi sebagai gelombang longitudinal.

Indeks i dan j bernilai 1, dan 2, sedangkan δ_{ij} adalah delta Kronecker yang bernilai 1 (satu) pada saat $i = j$ dan bernilai 0 (nol) pada saat $i \neq j$.

Bagian kedua dari publikasi Lighthill [9] menunjukkan adanya fenomena turbulensi pada aliran yang diperhitungkan sebagai sumber bunyi. Digambarkan secara umum turbulensi dalam berbagai ukuran dan frekuensi bunyi. Pendekatan untuk masing-masing ukuran turbulensi akan berbeda. Ilustrasi tentang aliran dan getaran di sekitar permukaan padat digambarkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Ilustrasi aliran dan getaran yang menimbulkan kebisingan aerodinamika

Di dalam perkembangannya, persamaan yang merepresentasikan bunyi mempunyai beberapa bentuk bergantung pada asumsi dan kondisi yang diterapkan. Demikian juga dengan

simulasi dan pemodelannya untuk melakukan prediksi kebisingan airframe pesawat terbang.

Pada publikasi penulis tahun 2019 [10] melakukan analisis kemungkinan digunakannya persamaan analogi Ffowcs Williams – Hawkins untuk memprediksi airframe pesawat N219, dengan mempertimbangkan ukuran pesawat dan kecepatan terbangnya. Di analisis juga kemungkinan diterapkannya metode lain yang dapat dijadikan acuan dalam prediksi kebisingan airframe pesawat tersebut untuk rekomendasi perancangan berikutnya.

Persamaan Ffowcs Williams – Hawkins, dalam bentuk integralnya tanpa suku non linier adalah sebagai berikut [5] :

$$4\pi c_0^2 \rho = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_V \frac{[T_{ij}]}{|\hat{r} - \hat{r}_0|} dV(\hat{r}_0) - \frac{\partial}{\partial x_i} \int_S \frac{[p_{ij}]}{|\hat{r} - \hat{r}_0|} l_i dS(\hat{r}_0) + \rho_0 \int_S \frac{[v_i]}{|\hat{r} - \hat{r}_0|} l_i dS(\hat{r}_0) \quad (4)$$

Suku pertama pada ruas kanan, menyatakan integral volume, yang menggambarkan variasi tekanan quadropole yang timbul dari turbulensi pada volume V . Suku kedua menggambarkan variasi tekanan dipol dari integral permukaan pada aliran aerodinamika. Sedangkan suku ketiga menggambarkan variasi kecepatan yang menghasilkan

medan monopoli di permukaan aliran.

Untuk persamaan Ffowcs Williams - Hawkins, tekanan pada suku kedua bukan hanya terdiri dari tekanan akustik, tetapi merupakan ekspresi dari :

$$p_{ij} = p\delta_{ij} + \mu \left(-\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{2}{3} \frac{\partial u}{\partial x} \delta_{ij} \right) \quad (5)$$

dengan μ adalah viskositas dari medium udara.

Zinozev [11] melakukan koreksi untuk bunyi yang teradiasi dari getaran benda padat pada aliran fluida yang viskos. Dalam tulisannya dijelaskan tentang inkonsistensi dan solusi menggunakan persamaan FWH untuk bunyi dari vibrasi benda padat di dalam aliran. Persamaan (4) menjadi :

$$4\pi c_0^2 \rho = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_V \frac{[\tau_{ij}]}{|\hat{r} - \hat{r}_0|} dV(\hat{r}_0) - \frac{\partial}{\partial x_i} \int_S \frac{[p]}{|\hat{r} - \hat{r}_0|} l_i dS(\hat{r}_0) + \rho_0 \int_S \frac{[v_i^{pot}]}{|\hat{r} - \hat{r}_0|} l_i dS(\hat{r}_0) \quad (6)$$

dengan perbedaan pada suku kedua dan ketiganya.

Suku kedua pada persamaan (6) merepresentasikan hanya tekanan akustik p , sedangkan kecepatan pada suku ketiga diambil dari medan

potensial $(\rho \vec{v})^{pot}$, di mana $(\rho \vec{v})^{pot} = \vec{\nabla} \psi$. Pada kasus ini medan potensial solenoidal $(\rho \vec{v})^{sol}$ tidak diperhitungkan, di mana $(\rho \vec{v})^{sol} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$. Terlihat bahwa ψ , merepresentasikan skalar, sedangkan \vec{A} , merepresentasikan vektor.

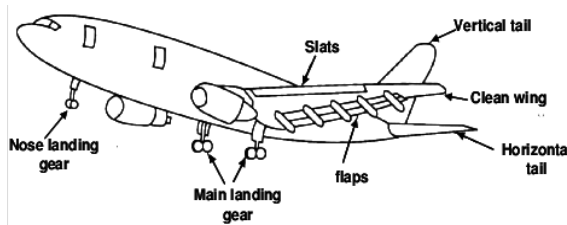
2.1. Metode

Bagian-bagian airframe pesawat terbang yang diidentifikasi sebagai sumber kebisingan, sebagaimana digambarkan pada Gambar 2, adalah sebagai berikut :

- bagian dari sistem pendaratan yang berada di luar badan pesawat terbang pada waktu lepas landas dan mendarat, yaitu *landing gear*
- bagian sayap yang terdiri dari *slat*, *flap*, dan *clean wing*
- bagian ekor yang terdiri dari *vertical tail* dan *horizontal tail*

Pada tahun 2014, International Civil Aviation Organization (ICAO), melaporkan *Technology Readiness Level* (TRL) untuk kebisingan *airframe* pesawat terbang, di antaranya bagian *landing gear*, bagian perangkat pengendali ketinggian (*high lift devices*) yaitu pada TRL 6, dan diprediksi akan

mencapai kesiapan aplikasi dan pengembangan TRL 9 pada tahun 2020 ini^[4].



Gambar 2. Bagian-bagian *airframe* pesawat yang menimbulkan kebisingan

Pada studi sebelumnya sudah dianalisis kesesuaian persamaan FWH untuk obyek penelitian kebisingan *airframe* pesawat N219, yang merupakan konsorsium beberapa lembaga penelitian dan manufaktur di Indonesia [10]. Tetapi di dalam analisis tersebut belum dibandingkan dengan metode komputasi yang sesuai. Di dalam tulisan ini dianalisis metode komputasi yang sesuai untuk memprediksi kebisingan obyek tersebut.

Pemodelan kebisingan *airframe* pesawat terbang yang teori dasarnya adalah aerodinamika dapat dilakukan dengan metode yang sudah umum digunakan dalam perancangan aerodinamika pesawat terbang yaitu *Computational Fluid Dynamic* (CFD). Jika dikhususkan pada kebisingannya, maka dapat digunakan metode yang lebih presisi, yaitu *computational aeroacoustics* (CAA). Selanjutnya akan

dipaparkan bagaimana kesimpulan untuk menggunakan metode dan perangkat lunak yang sesuai, dari hasil analisis, dapat diambil dengan mempertimbangkan beberapa kondisi.

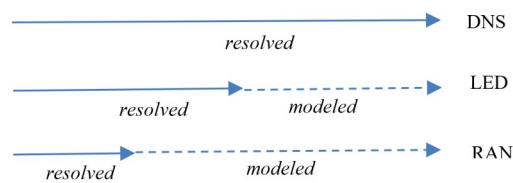
Dalam komputasi perancangan pesawat terbang umumnya digunakan metode simulasi dan pemodelan. Hal ini dipertimbangkan tingkat kesulitan penerapan parameter-parameter untuk melakukan simulasi. Jika simulasi tidak memungkinkan untuk dilakukan, maka dibuat pemodelan untuk mendekati kondisi sebenarnya, atau untuk mendekati hasil yang sama dengan eksperimen. Skenario antara pemodelan dan simulasi untuk CFD ini antara lain DNS, LES, RANS, atau DES, yang akan diuraikan selanjutnya.

Direct Numerical Simulation (DNS) atau simulasi numerik langsung, merupakan metode simulasi CFD dengan menyelesaikan persamaan Navier – Stokes pada rentang waktu dan ruang dari turbulensi fluida yang bergerak

Large Eddy Simulation (LES) adalah simulasi numerik yang juga menyelesaikan persamaan Navier – Stokes untuk turbulensi, dalam rentang waktu dan ruang yang lebih panjang

Reynolds Average Navier-Stokes Equation (RANS) merupakan metode komputasi yang menggunakan pemodelan matematik untuk turbulensi yang berubah-ubah.

Perbandingan ketiganya diilustrasikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Ilustrasi perbandingan metode komputasi CFD

Resolved artinya penyelesaian persamaan, dalam kasus ini adalah persamaan diferensial FWH, dilanjutkan dengan simulasi yang dijalankan oleh perangkat lunak. Sedangkan modeled artinya solusi yang ditampilkan oleh perangkat lunak adalah hasil dari pendekatan pemodelan.

Selain ketiganya, saat ini sudah dikembangkan metode baru yaitu DES. *Detached Eddy Simulation* (DES) adalah metode hybrid yang memperlakukan sebagian aliran yang berkelakuan *near-wall region* dengan RANS, dan memperlakukan sebagian aliran yang lain dengan LES.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Mendez [12], persamaan FWH diterapkan pada komputasi untuk memprediksi kebisingan pada aliran mesin jet. Tulisan tersebut menggambarkan tentang aliran turbulensi dengan dimensi yang relatif besar.

Pada awalnya sangat sulit menemukan kecocokan antara pemodelan

kebisingan *airframe* pesawat ini dengan hasil eksperimen. Hal ini sangat bergantung pada ketelitian penggunaan model dan atau simulasi yang tepat untuk *airframe* pesawatnya. Selain itu, pengujian sendiri juga bergantung pada banyak hal yang mempengaruhi:

- hasil uji lapangan merupakan kebisingan yang terintegrasi dari seluruh bagian pesawat terbang
- pengujian dengan menggunakan terowongan angin hanya untuk *airframe* pesawat, memerlukan terowongan angin yang memiliki *acoustic treatment*

Tetapi di dalam perkembangannya, beberapa penelitian menemukan kesesuaian yang cukup memuaskan [13,14].

2.3. OpenFOAM

OpenFOAM merupakan salah satu perangkat lunak Open Source dari OpenFOAM Foundation, yang dapat digunakan untuk komputasi aerodinamika, struktur, dan aeroakustik. OpenFOAM dapat digunakan sebagai solver dan juga untuk menerapkan pemodelan. Adapun pemrograman dikembangkan dari C++ *libraries*.

Dalam aerodinamika, perangkat lunak ini digunakan antara lain untuk simulasi aliran dengan menampilkan distribusi kecepatan. Dalam analisis struktur, perangkat lunak ini dapat menunjukkan distribusi tekanan pada permukaan atau

volume suatu bahan. Dan berbagai pemodelan untuk aliran-aliran turbulen [6].

3. Hasil dan Pembahasan

Kebisingan yang timbul dari airframe pesawat terbang, merupakan gabungan antara kebisingan yang ditimbulkan oleh laju aliran, efek turbulens, dan getaran permukaan airframe itu sendiri. Di dalam studi sebelumnya sudah dibahas tentang penggunaan persamaan yang sesuai untuk pemodelan kebisingan airframe pesawat terbang ini, yaitu persamaan FWH. Tetapi di dalam tulisan ini dimasukkan koreksi dari Zinonev. Sedangkan untuk metode komputasi dipertimbangkan beberapa yang dikembangkan di dalam CFD. Untuk ini ditinjau beberapa metode yang sudah dilakukan di dalam aeroakustik dan perkembangannya, antara lain paparan seminar yang disampaikan oleh Jurij Sodja di *Department of Physics, University of Ljubljana* pada 2007, dan Yueping Guo dalam *International Workshop "Computational Experiment in Aeroacoustics"* 2016, dan diskusi dengan tim aerodinamika P.T. Dirgantara Indonesia (PTDI) pada tahun 2018 sampai saat ini. Metode komputasi tidak bisa sepenuhnya menggunakan simulasi, mengingat kerumitan persamaan yang harus diselesaikan.

Untuk memodelkan simulasi dari turbulensi di permukaan airframe pesawat terbang, tidak bisa mengacu kepada Mendez, 2013 [12]. Hal ini disebabkan karena obyek penelitian Mendez adalah jet yang turbulensinya cenderung berukuran besar. Sedangkan turbulensi pada permukaan airframe pesawat adalah turbulensi kecil yang cenderung berbentuk seperti solenoidal (lihat lagi Gambar 1).

Untuk perangkat lunak, jika mengacu kepada penelitian-penelitian tentang kebisingan yang sudah dilaksanakan, sangat banyak pilihannya. Baik yang biasa digunakan untuk aerodinamika secara umum, maupun aeoakustika secara khusus. Diskusi penulis dengan tim aerodinamika PTDI, memungkinkan untuk menggunakan perangkat lunak yang diambil dari Open Source, yaitu OpenFOAM. Walaupun di PTDI sendiri belum pernah dilakukan simulasi ataupun pemodelan menggunakan perangkat tersebut untuk prediksi kebisingan. Maka diambil suatu referensi dari penelitian dan eksperimen yang dilakukan oleh Jarozs pada tahun 2016^[14].

4. Simpulan

Berdasarkan analisis dan diskusi di atas, metode yang dianggap paling sesuai adalah RANS yang hanya sebagian kecil menggunakan perangkat lunak sebagai

solver, dan sebagian besar yang lain adalah pemodelan. Pendekatan ini dinilai paling sesuai untuk diterapkan di dalam kelanjutan penelitian prediksi kebisingan airframe pesawat terbang, khususnya pesawat N219 yang saat ini diproduksi di PTDI. Sedangkan perangkat lunak yang akan digunakan adalah OpenFOAM. Selain itu diharapkan bisa menjadi referensi dalam perancangan pesawat terbang di Indonesia selanjutnya.

5. Ucapan Terima Kasih

Tulisan ini merupakan bagian dari penelitian penulis yang akan menjadi desertasi di Program Studi Ilmu Fisika di Universitas Indonesia, atas dukungan dari Universitas Dirgantara Marsekal Suryadarma, Jakarta.

6. Referensi

1. World Health Organization. (2011). *Burden of Disease from Environmental Noise*. European Commission.
2. Kusumalestari, A.S., Sukirno, S., Suryanegara, Muh., Sudiby, H. (2019). On Developing the Noise Reduction Model for Indonesian Aviation. *International Journal of Aviation Science and Technology*, 1 : 2715-6958
3. Dobrzynski, Werner. (2010). Almost 40 Years of Airframe Noise Research: What Did We Achieve? *Journal of Aircraft*. Vol.47 No.2: 353 – 367
4. Adib, M., Catalano, F., Hileman, J., Huff, D., Ito, T., Joselzon, A., Khaletskiy, Y., Michel, U., Mongeau, L., Tester, B.J. (2014) *Novel Aircraft Noise Technology Review and Medium and Long Term Noise Reduction Goals*. International Civil Aviation Organization.
5. Ffowcs Williams, J.E., Hawkings, D.L. (1969). *Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion*. Royal Society Publishing.
6. Greenshields, C.J. (2019) *OpenFOAM User Guides ver.7*, The OpenFOAM Foundation.
7. Goldstein, M.E. (1976). *Aeroacoustics*. Mc Graw - Hill
8. Lighthill, M.J. (1952). On Sound Generated Aerodynamically: I. General Theory. Royal Society Publishing.
9. Lighthill M.J. (1954). On Sound Generated Aerodynamically: II. Turbulence as a Source of Sound. Royal Society Publishing.
10. Kusumalestari, A.S., Sukirno, S., Suryanegara, Muh., Sudiby, H. (2019). Prediksi Kebisingan Airframe Pesawat Terbang dengan Aplikasi Ffowcs Williams – Hawking Equation.



Proseding Seminar Nasional Sains Teknologi dan Inovasi Indonesia: 35-40. Akademi Angkatan Udara.

11. Zinonev, A. (2002). Aplication of Ffowcs Williams – Hawkings Equation to Sound Radiation and Vibrating Solid Object in a Viscous Fluid: Inconsistencies and The Correct Solution. *Proceeding of Innovation in Acoustics and Vibration Annual Conference: 364-371.* Australian Acoustical Society.
12. Mendez, S., Shoeybi, M., Lele, S.K., Moin, P. (2013). On the Use of the Ffowcs Williams – Hawkings Equation to Predict far-field Jet Noise from Large Eddy Simmulation. *International Journal of Aeroacoustics Vol.12 Issue 1-2: 1-20.*
13. Lilley, G.M. (2001). The Prediction of Airframe Noise and Comparison with Experiment. *Journal of Sound and Vibration (239)4: 849-859*
14. Jarosz, K., Czajka, I., Golaś, A. (2016). Implementation of Ffowcs Williams and Hawkings Aeroacoustics Analogy in OpenFOAM. *Vibration in Physical Systems Vol.27: 161-168*