

Optimasi Kekuatan Sumber Sekunder Multipol untuk Pengendalian Bising Aktif

¹Muhammad Kusni*

Corresponding Author: * kusni@ae.itb.ac.id

¹ Institut Teknologi Bandung, Indonesia

Abstrak

Pengendalian bising di lingkungan industri-industri maupun pada wahana transportasi merupakan masalah yang selalu ingin dipecahkan oleh orang, sehingga fisibilitas komersial reduksi bising secara aktif sangat menjanjikan. Tulisan ini menjelaskan tentang penggunaan sumber sekunder multipol untuk pengendalian bising. Konsep ini dalam tahap selanjutnya dapat diimplementasikan, kekuatan sumber sekunder multipol yang diturunkan dengan menggunakan deret Taylor harus dioptimasi. Optimasi kekuatan sumber sekunder memberikan manfaat bahwa dengan jumlah sumber sekunder yang terbatas masih dapat diperoleh reduksi suara yang signifikan.

Kata kunci: Optimasi, Sumber Sekunder, Multipol, Bising Aktif

Pendahuluan

Batas frekuensi tertinggi yang dapat direduksi merupakan suatu parameter yang tidak mudah dicapai pada saat melakukan reduksi bising aktif. Begitu juga jarak sumber sekunder terhadap sumber primer juga merupakan parameter yang sangat mempengaruhi efektifitas reduksi bising aktif. Hal tersebut disebabkan karena selama ini fokus perhatian para peneliti hanya diarahkan pada penggunaan sumber sekunder monopol. Dalam makalah ini disampaikan konsep optimasi kekuatan sumber sekunder multipol untuk mengatasi masalah tersebut.

Penggunaan sumber sekunder multipol memeberikan beberapa keuntungan, antara lain: reduksi bising untuk frekuensi yang lebih tinggi, selain pengurangan banyaknya sumber sekunder. Dengan jumlah sumber sekunder yang makin sedikit maka sistem reduksi bising aktif menjadi lebih kompak. Meskipun konsep sumber sekunder multipol tersebut sudah dikenal, tetapi penggunaan sumber sekunder multipol untuk melenyapkan suara secara aktif masih mempunyai beberapa kendala, antara lain: bahwa tidak mungkin digunakan sumber sekunder multipol dengan order yang tidak terbatas. Untuk mengatasi masalah tersebut, dalam makalah ini dilakukan optimasi kekuatan sumber sekunder sehingga diperoleh radiasi daya suara yang minimal pada medan suara. Dengan optimasi tersebut dapat ditunjukkan bahwa dengan order multipol yang terbatas masih dimungkinkan untuk mereduksi suara dengan efisien.

Reduksi Bising dengan Sumber Sekunder Multipol

Konsep reduksi suara dengan sumber multipol pertama kali dikembangkan oleh Kempton [1], dengan menggunakan deret Taylor untuk menyatakan sumber monopol sebagai kombinasi monopol

yang lain dan dipol, quadrupol, oktopol dst. Kombinasi ini selanjutnya disebut multipol. Setiap fungsi analitik, $g(x)$, dapat dinyatakan dalam deret Taylor sebagai berikut;

$$g(x+h) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{h^n}{n!} \frac{\partial^n}{\partial x^n} g(x), \tag{1}$$

dimana h merupakan kenaikan inkremental variabel x . Kempton menggunakan hasil tersebut untuk menunjukkan bahwa medan tekanan suara sumber monopol yang diletakkan di suatu titik dapat dinyatakan sebagai medan titik multipol order tak-terbatas yang diletakkan sejauh h dari titik yang pertama.

Tekanan suara pada titik M tertentu (yang mempunyai koordinat x, y dan z) akibat sumber primer monopol dapat dinyatakan dengan persamaan

$$P_{pm}(x, y, z) = \frac{j\omega\rho}{4\pi} Q_{pm} \frac{e^{-jkr_h}}{r_h} \tag{2}$$

dimana Q_{pm} menyatakan kekuatan sumber primer monopol, $r_h = \sqrt{(x+h)^2 + y^2 + z^2}$, ρ adalah rapat udara luar, $\omega = 2\pi f$ dengan f menyatakan frekuensi, $k = \omega/c$ dengan c menyatakan kecepatan suara, dan $j = \sqrt{-1}$. Konvensi tanda $e^{+j\omega t}$ harus ditentukan sebelumnya. Jika bagian kanan persamaan (2) diuraikan dalam deret Taylor di sekitar $O(0,0,0)$, maka diperoleh

$$P_{pm}(x, y, z) = \frac{j\omega\rho}{4\pi} \sum_{n=0}^{\infty} Q_{pm} \frac{h^n}{n!} \frac{\partial^n}{\partial x^n} \left(\frac{e^{-jkr}}{r} \right) \tag{3}$$

dimana $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$. Dapat ditunjukkan bahwa untuk $n=0$, $\left(\frac{j\omega\rho}{4\pi} \right) Q_{pm} \left(\frac{e^{-jkr}}{r} \right)$ merupakan medan tekanan suara yang dibentuk oleh titik monopol yang diletakkan pada pusat sistem koordinat. Dengan cara yang sama, untuk $n=1$, $\left(\frac{j\omega\rho}{4\pi} \right) Q_{pm} h \left(\frac{\partial}{\partial x} \right) \left(\frac{e^{-jkr}}{r} \right)$ menyatakan medan tekanan suara yang dibentuk oleh titik dipol yang diletakkan pada pusat koordinat. Dengan sumber primer yang diletakkan pada sumbu x maka sumber dipol ini mengarah sepanjang sumbu x . Untuk selanjutnya komponen medan multipol longitudinal order- n yang mengarah sepanjang sumbu x dan terletak pada pusat sistem koordinat dapat dinyatakan dalam bentuk umum sebagai berikut:

$$\left(\frac{j\omega\rho}{4\pi} \right) Q_{pm} \left(\frac{h^n}{n!} \right) \left(\frac{\partial^n}{\partial x^n} \right) \left(\frac{e^{-jkr}}{r} \right)$$

Perlu dicatat bahwa monopol di sini didefinisikan sebagai sumber dengan order 0.

Dapat dilihat pada persamaan (3), bahwa medan tekanan suara yang dihasilkan oleh monopol yang diletakkan pada posisi $-h$ pada sumbu x dapat dihasilkan dari titik multipol order tak-terbatas yang diletakkan pada pusat sistem koordinat. Jika multipol yang dicirikan oleh persamaan (3) diletakkan pada titik pusat koordinat, dan dioperasikan dengan fasa yang berkebalikan dengan sumber primer,



maka tiap titik medan yang terletak diluar bola yang berpusat di posisi sumber primer dengan radius $|h|$ akan dilynapkan.

Selanjutnya kekuatan sumber sekunder dapat diperoleh dengan dua cara, yaitu dengan pendekatan langsung dan dengan jalan optimasi kekuatan sumber berdasarkan daya suara yang minimum.

Kekuatan Sumber Sekunder dengan Pendekatan Langsung

Medan suara dapat dinyatakan secara eksplisit dalam bentuk kekuatan sumber multipol, yaitu;

$$P_{pm}(x, y, z) = \frac{j\omega\rho}{4\pi} \sum_{n=0}^{\infty} Q_{sn} \frac{\partial^n}{\partial x^n} \left(\frac{e^{-jkr}}{r} \right) \quad (4)$$

Kekuatan sumber multipol pada persamaan (4), Q_{sn} , dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (3) jika kekuatan sumber primer monopol, Q_{pm} , dan jarak sumber sekunder, h , keduanya telah ditentukan. Jadi order monopol pada ekspansi deret mempunyai kekuatan sumber yang sama dengan kekuatan sumber primer monopol, yaitu, $Q_{s0} = Q_{pm}$. Sumber sekunder dipol mempunyai kekuatan sumber $Q_{s1} = hQ_{pm}$, dan, dalam bentuk umum, komponen multipol order ke- n mempunyai kekuatan sumber $Q_{sn} = h^n Q_{pm} / n!$. Pendekatan ini digunakan untuk mendefinisikan kekuatan sumber sekunder, yang selanjutnya disebut sebagai pendekatan langsung.

Q_{sn} merupakan kekuatan sumber sekunder yang diperlukan untuk menghasilkan secara eksak medan tekanan suara yang sama dengan medan tekanan suara primer monopol jika ekspansi deret Taylor persamaan (3) dan (4) diselesaikan dalam bentuk jumlah yang tak terbatas. Dalam implementasinya tidak dimungkinkan untuk membuat multipol dengan order tak-terbatas, sehingga jumlah multipol tersebut harus dibatasi dengan pemotongan deret. Jika jumlah komponen multipol yang digunakan terbatas, Q_{sn} yang diperoleh dengan pendekatan langsung tidak menghasilkan penyalpan yang optimal terhadap medan primer monopol. Untuk mengatasi masalah tersebut digunakan Q_{sn} yang optimum, sehingga akan diperoleh daya suara total yang minimum dari gabungan radiasi sumber primer dan sekunder.

Kekuatan Sumber Sekunder dengan Pendekatan Optimasi

Kekuatan sumber sekunder optimal diperoleh dengan jalan sebagai berikut: Pertama-tama kita tentukan daya suara. Daya suara, W , yang diradiasikan oleh sumber akustik dapat dinyatakan sebagai

$$W = \iint_S \mathbf{I} \cdot \mathbf{n} dS \quad (5)$$

dimana \mathbf{I} menyatakan vektor intensitas akustik, vektor \mathbf{n} menyatakan vektor normal yang berarah keluar terhadap permukaan S , dan dS merupakan elemen inkremental permukaan tersebut. Jika diasumsikan gerakan harmonik, intensitas rata-rata diberikan oleh $\mathbf{I} = (1/2)\text{Re}(\mathbf{p}^* \mathbf{v})$, dimana \mathbf{p}

merupakan tekanan suara, v adalah vektor kecepatan yang diberikan oleh persamaan Euler, $v = -(1/j\omega\rho)\nabla p$, $\text{Re}\{\}$ menyatakan bagian real argumen, superscript * menyatakan konjugasi kompleks dan ∇ menyatakan operator gradien. Jika dilakukan integrasi pada persamaan (5) sepanjang permukaan bola, maka daya suara dapat dinyatakan sebagai

$$W = \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} I_r r^2 \sin \theta d\theta d\phi \tag{6}$$

dimana $I_r = (1/2) \text{Re}\{P^* V_r\}$ merupakan komponen radial intensitas suara, V_r merupakan komponen radial kecepatan partikel, dan sudut θ dan ϕ ditunjukkan pada gambar 2. Untuk berbagai kasus yang dibahas pada bagian ini, distribusi tekanan suara simetrik sirkular terhadap sumbu x , sehingga tidak ada variasi tekanan terhadap ϕ . Pada kasus tersebut, persamaan (6) direduksi menjadi,

$$W = 2\pi r^2 \int_0^\pi I_r \sin \theta d\theta \tag{7}$$

Sebelum dilakukan penggunaan persamaan (7) untuk menghitung daya suara hasil kombinasi sumber primer monopul dan sumber sekunder multipol terpotong, maka medan variasi komponen multipol dinyatakan dalam koordinat bola. Medan suara yang dihasilkan oleh sumber primer monopul yang mempunyai kekuatan sumber Q_{pm} dan diletakkan pada posisi $-h$ pada sumbu x adalah:

$$P_{pm}(r, \theta) = \frac{j\omega\rho}{4\pi} Q_{pm} \frac{e^{-jk r_h}}{r_h} \tag{8}$$

Figure 1 adalah transformasi koordinat.

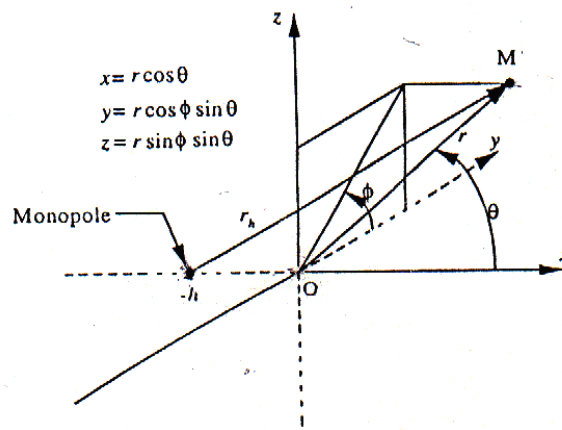
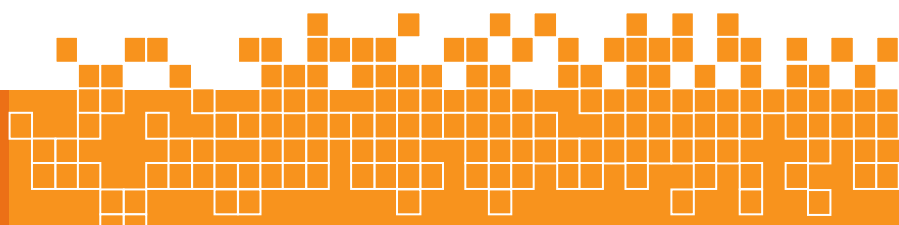


Fig. 1. The header image of journals in IISTR

Pada Fig 1. r_h merupakan jarak sumber primer monopul ke titik medan, yang sekarang dinyatakan sebagai $r_h = \sqrt{r^2 + h^2 + 2rh \cos \theta}$.



Dari ekspresi medan suara yang dibentuk oleh sumber sekunder monopol, dipol, quadrupol dan oktopol akan dapat diperoleh daya suara total dari sumber primer dan sumber sekunder yang terdiri dari sumber sekunder monopol, dipol, quadrupol, dan oktopol. Kemudian kekuatan sumber sekunder dioptimasi sehingga diperoleh daya suara total yang minimum.

Hasil Simulasi Reduksi Suara

Ada beberapa hasil penelitian yang menggunakan metode komputasi untuk memperoleh gambaran fenomena kebisingan dengan berbagai metode seperti supervisi gelombang [2]. Konsep dengan multipol juga dikaji dalam fenomena rasiasi akustik [3]. Bagian ini berisi simulasi numerik reduksi tekanan suara yang dinyatakan sebagai perbandingan tekanan suara setelah direduksi terhadap tekanan suara medan primer sebelum direduksi. Pada sub-bab tersebut dipaparkan hasil simulasi menggunakan pendekatan langsung maupun menggunakan cara optimasi kekuatan sumber sekunder multipol. Geometri dan parameter yang digunakan dalam simulasi ini dapat dilihat pada Fig. 1.

Hasil reduksi tekanan suara dinyatakan dalam $L_c = 20 \log_{10} \left| \frac{P_m}{P_{pm}} \right|$, dimana $P_m = P_{pm} + P_{sn}$ merupakan tekanan suara setelah menggunakan reduksi aktif multipol, P_{pm} menyatakan tekanan suara yang dihasilkan sumber primer monopol dan P_{sn} menyatakan tekanan suara yang dihasilkan oleh sumber sekunder multipol yang dipotong pada order ke-n jika dioperasikan berbalik fasa terhadap sumber primer monopol. L_c bernilai negatif jika level tekanan suara direduksi dengan adanya sumber sekunder.

A. Reduksi Tekanan Suara Dengan Pendekatan Langsung

Bagian ini memaparkan hasil-hasil yang diperoleh dengan menggunakan pendekatan langsung. Jika kekuatan sumber sekunder multipol dinyatakan sebagai $Q_{sn} = -h^n Q_{pm} / n!$, dimana tanda negatif menunjukkan bahwa sumber sekunder dioperasikan berbalik fasa terhadap sumber primer, maka tekanan suara yang dihasilkan sumber sekunder adalah:

$$P_{sn}^f = -\frac{j\omega^p}{4\pi} Q_{pm} \frac{e^{-jkr}}{r} \sum_{p=0}^n \frac{(-jkh \cos \theta)^p}{p!} \quad (9)$$

dimana n menyatakan order pemotongan deret.

Dengan menggunakan persamaan (9), akan memperoleh rasio tekanan residu terhadap tekanan primer, yaitu:

$$\frac{P_m^f}{P_{pm}^f} = e^{jkh \cos \theta} \sum_{p=n+1}^{\infty} \frac{(-jkh \cos \theta)^p}{p!} \quad (10.a)$$

Reduksi suara dinyatakan dengan;

$$L_c^f = 20 \log_{10} \left| \sum_{p=n+1}^{\infty} \frac{(-jkh \cos \theta)^p}{p!} \right| \quad (10.b)$$

Persamaan (10.b) memperlihatkan bahwa reduksi suara pada medan-jauh tidak tergantung jarak r , tetapi tergantung kepada jarak non-dimensional sumber primer ke sumber sekunder kh , sudut θ , dan order pemotongan sumber sekunder monopole.

Perbandingan tekanan suara setelah menggunakan kontrol multipol dengan tekanan suara sebelum menggunakan kontrol multipol dapat didekati dengan

$$\frac{P_{rn}^f}{P_{pm}^f} \approx e^{jkh \cos \theta} \frac{(-jkh \cos \theta)^{n+1}}{(n+1)!} \tag{11.a}$$

dan reduksi suara didekati dengan;

$$L_c^f \approx 20 \log_{10} \left| \frac{(-jkh \cos \theta)^{n+1}}{(n+1)!} \right| \tag{11.b}$$

Untuk nilai kh tertentu, persamaan (11) akan lebih akurat jika order pemotongan dinaikkan. Apabila $kh < 1$, maka persamaan (11.b) juga akan akurat untuk order pemotongan yang kecil.

Dengan menyamakan argumen logaritma persamaan (11.b) sama dengan satu, diperoleh batas frekuensi maksimum yang mana medan suara tidak direduksi tapi malah diperkuat ,yaitu;

$$f_{\max_{pd}}^f = \frac{c[(n+1)!]^{1/(n+1)}}{2\pi h |\cos \theta|} \tag{12}$$

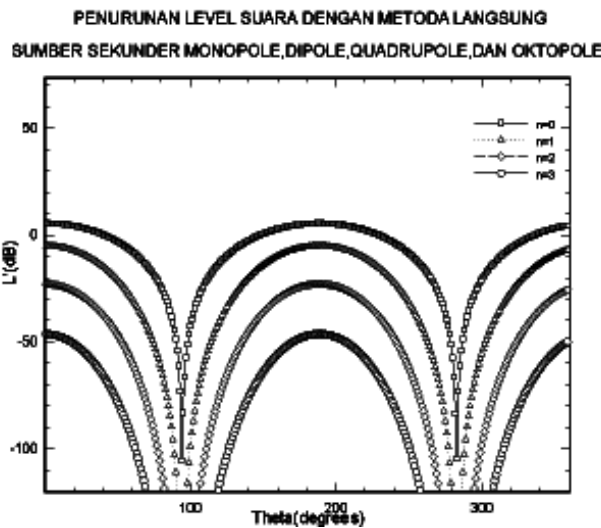
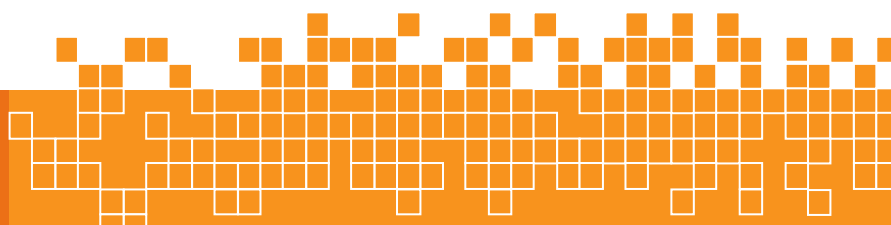


Fig. 2. The header image of journals in IISTR Reduksi suara (L' dB) Vs θ dengan metoda langsung dimana $f=250$ Hz, $h=0.27$ m, $\phi = 0$, untuk berbagai nilai n

Persamaan (10.b) diplot pada Fig. 2 sebagai fungsi θ untuk $\phi = 0$ (yaitu, pada bidang sumber) dan untuk $n=0$ hingga $n=3$ (yaitu, untuk sumber sekunder yang berisi monopole untuk $n=0$; berisi monopole dan dipole untuk $n=1$; berisi monopole, dipole dan quadrupole untuk $n=2$; dan berisi monopole, dipole, quadrupole dan oktopole untuk $n=3$).

Data untuk perhitungan pada Fig. 2 adalah; frekuensi = 250 Hz, jarak antara sumber primer dan sekunder = 0.27 m (1/5 panjang gelombang), dan kecepatan suara udara luar adalah 343 m/s. Sehingga pada kasus ini kh sama dengan 1.24. Fig. 2 memperlihatkan bahwa tingkat reduksi suara akan naik,



apabila order sumber sekunder multipol diperbesar. Jika sumber sekunder dipotong pada order oktopol ($n=3$), reduksi suara mencapai 20 dB, yaitu pada $\theta = 0^\circ$ dan $\theta = 180^\circ$.

B. Reduksi Tekanan Suara dengan Optimasi Kekuatan Sumber

Bagian berikut membahas reduksi tekanan suara yang diperoleh dengan mengoptimasi kekuatan sumber sekunder multipol sehingga diperoleh daya suara total yang minimum. Q_{sn} dihitung dengan menggunakan cara yang telah disampaikan sebelumnya. Data yang digunakan untuk perhitungan adalah; frekuensi = 250 Hz, jarak sumber primer ke sumber sekunder = 0,27 m. Reduksi tekanan suara sebagai fungsi θ untuk order sumber sekunder yang makin besar ditunjukkan pada Fig. 3.

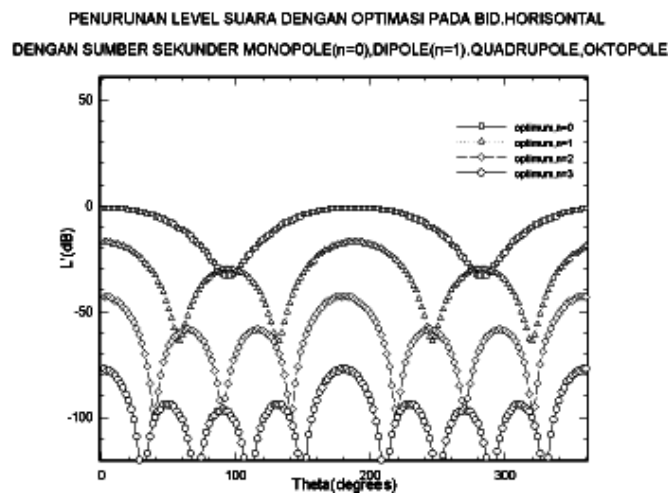


Fig. 3. Reduksi suara sebagai fungsi θ dengan optimasi: $f=250$ Hz, $h=0.27$ m, $\phi = 0$

Fig. 3 memperlihatkan bahwa reduksi tekanan suara minimum terjadi pada arah sumbu x. Hal ini sama seperti yang terjadi pada pendekatan langsung. Terdapat kenaikan tingkat reduksi suara yang diperoleh melalui cara optimasi, jika dibanding dengan hasil reduksi suara yang diperoleh dengan menggunakan pendekatan langsung. Dengan membandingkan Fig. 2 dan Fig. 3, dapat dilihat bahwa tingkat reduksi suara yang diperoleh dengan cara optimasi lebih seragam dibanding dengan reduksi suara yang dihasilkan melalui pendekatan langsung. Fig. 4 menunjukkan perbandingan hasil reduksi level suara dengan cara langsung dan cara optimasi untuk tiap tiap order sumber sekunder.

- (a) $n = 3$, order oktopol
- (b) $n = 2$, order quadrupol
- (c) $n = 1$, order dipol
- (d) $n = 0$, order monopol

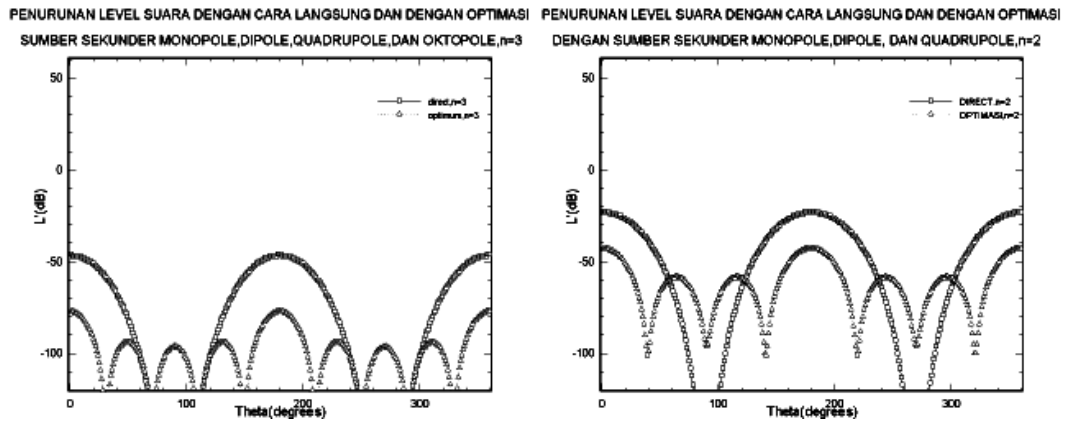


Fig. 4. (a) dan (b) Perbandingan hasil reduksi level suara dengan cara langsung dan optimasi

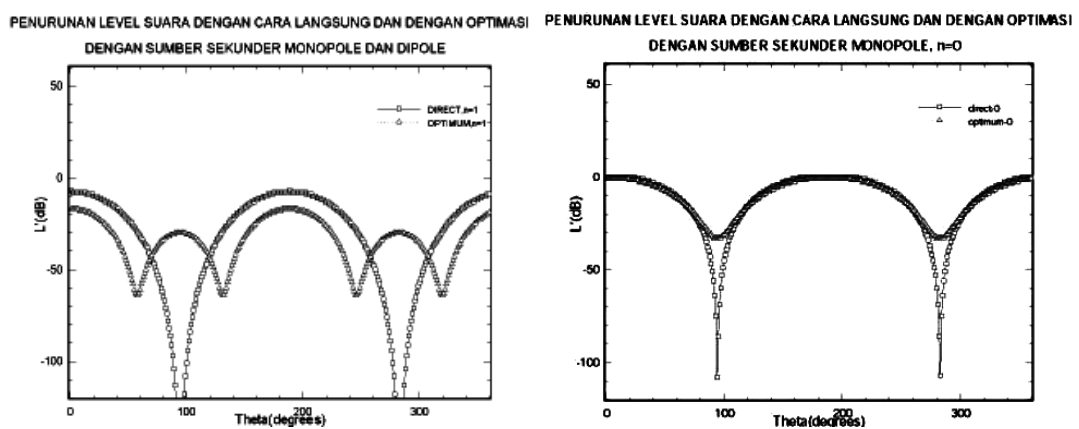


Fig. 5. (a) dan (b) Perbandingan hasil reduksi level suara dengan cara langsung dan optimasi

Fig. 4 dan Fig. 5 menjelaskan perbandingan hasil reduksi level suara dengan cara langsung dan optimasi. Hasil analisis konsep ini dapat digunakan dalam pengembangan simulasi untuk mengurangi kebisingan pada area tertentu dan teknologi yang mendukungnya. Kajian pendukung tentang penerapan konsep multipol dilakukan pula dalam Ref. [4][5]. Sumber kedua (secondary sources) seperti dalam kajian ini juga dilakukan simulasi komputesional pada kasus berbeda oleh Ref. [5][6]. Penggunaan dalam dunia penerbangan akan mendukung konsep akustik yang penting dalam pesawat [7].

Kesimpulan

Penggunaan sumber sekunder multipol untuk kontrol bising aktif sangat menjanjikan karena mempunyai kelebihan-kelebihan dibandingkan dengan sumber sekunder konvensional, antara lain: diperoleh reduksi tekanan suara yang lebih besar dan diperoleh sistem reduksi yang lebih kompak. Dengan menggunakan kekuatan sumber sekunder yang optimum diperoleh hasil reduksi suara yang lebih baik. Implementasi sumber sekunder multipol masih merupakan tantangan yang harus dilakukan secara bertahap.

Referensi

- [1] J. Kempton, 'The ambiguity of acoustic sources: a possibility for active noise control?' *J. Sound Vib.* 48, 475-483 (1976).
- [2] G.H. Koopman, L. Song, and J. B. Fahline, "A method for computing acoustic fields based on the principle of wave superposition," *J. Acoust. Soc. Am.* 86, 2433-2438 (1989).
- [3] P.A. Nelson, A.R.D. Curtis, and S.J. Elliott, Optimal multipole source distribution for the active suppression and absorption of acoustic radiation, ' *Proc. Euromech Colloc.* 213 (1986)
- [4] J. S. Bolton and T. A Beauvilain, "Multipole sources for cancellation of radiated sound fields," *J. Acoust. Soc. Am.* 91, 2349 (A) (1992).
- [5] T.A. Beauvilain and J. S. Bolton, "Cancellation of radiated sound fields by the use of multipole secondary sources," in *Proceedings of the second Conference on Recent Advances in Active Control of Sound and Vibration* (Tehnomonic, Lancaster, PA, 1993), pp. 957-968.
- [6] J. S. Bolton, B. K. Gardner, and T. A. Beauvilain, "Cancellation by the use of secondary multipoles," *J. Acoust. Soc Am.* 98(A), October 1995
- [7] G. J. J. Ruijgrok, "*Elements of Aviation Acoustics*", Delft University Press, 1993

Penulis

Muhammad Kusni adalah dosen di Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung (ITB), Indonesia. Beliau memperoleh gelar sarjana dan gelar master dari Jurusan Teknik Dirgantara, ITB. Bidang keahliannya adalah Struktur Ringan, Analisis Numerik, dan Simulasi Komputer. Beliau telah menangani banyak proyek di bidang pengembangan pesawat terbang. (email: kusni@ae.itb.ac.id).