

**PENGENDALI DERAU SECARA AKTIF
MENGUNAKAN ANFIS
(Active Noise Controller Using ANFIS)**

Goegoes Dwi Nusantoro

ABSTRACT

ANFIS Controller used for the reduction of noise actively (active noise cancellation, ANC) in a duct, at this research, only use three input and two membership function of every input and also two rule so that totalize the parameter used by 20 parameters, good of premis and also it concequent. While algorithm learn used to update its parameter is on line backpropagation.

Pickings got in simulation indicate that the ANFIS controller own the better performance in noise cancellation in all frequency area, good of narrowband and also broadband, compared to by a performance a FIR filter Filterd-X LMS algorithm though with the parameter which must be update slimmer.

Keyword : ANFIS, ANC, *Filtered-X* LMS algorithm

1. PENDAHULUAN

Salah satu aspek dari pengolahan isyarat digital yaitu penapisan adaptif (*adaptive filtering*), yang telah digunakan secara luas pada sejumlah penerapan seperti penghapusan derau secara adaptif (*adaptive noise cancellation*), pemodelan adaptif (*adaptive modeling*), penghapusan gema secara adaptif (*adaptive echo cancellation*), dan lain-lain (Widrow B., et al, 1985). Bahkan dewasa ini penerapannya diperluas pada kendali derau secara aktif (*active noise control, ANC*) (Elliott, S.J., et al, 1993).

Sistem ANC menggunakan isyarat buatan (*artificial signal*) dengan besar yang sama serta fasanya berlawanan untuk menghapuskan derau atau bunyi yang tidak diinginkan (Chang YC., et al, 2000). Gelombang akustik (*akustik wave*) atau derau yang tidak diinginkan memberikan pengaruh negatif pada manusia. Karena dapat mengalami kecelakaan kerja akibat pendengaran yang terganggu karena derau. Metode konvensional yang biasa digunakan dalam mengendalikan atau melemahkan derau yang sering disebut kendali derau secara pasif (*passive noise control, PNC*) memiliki kesanggupan untuk menekan derau akustik pada frekuensi tinggi, namun untuk derau akustik frekuensi rendah, PNC tidak dapat bekerja secara baik. Misalkan untuk frekuensi yang rendah dibawah 500 Hz, yaitu gelombang bunyi yang memiliki frekuensi 100 Hz akan memiliki panjang gelombang kira-kira 3,4 m pada kondisi normal (Elliott, S.J., et al, 1993). Hal ini menyebabkan material penyerap derau (*noise absorber*) ketebalannya harus ditambah untuk cukup mereduksi derau dengan baik, yang menjadikannya tidak praktis (Park, H.K., et al, 1999).

Berbeda dengan metode pasif, ANC tidak hanya dapat menghapuskan derau frekuensi rendah, tetapi juga bobot, volume dan biaya sistem kendali derau secara keseluruhan. Dengan menempatkan sistem ANC pada suatu tempat, ia akan mengidentifikasi fungsi alih dari plant akustik, dan transduser seperti speaker dan microphone serta plant saluran (*duct plant*) untuk membangkitkan isyarat anti derau yang tepat. Banyak peneliti telah menerapkan algoritma *filtered-X* (Kuo, S.M., et al, 1999) sebagai pengendali derau secara adaptif karena kesederhanaannya. Algoritma *filtered-X* adalah suatu tapis adaptif yang parameter-parameter bobotnya dapat secara otomatis diperbaharui menggunakan algoritma LMS (*least mean square*). Pendekatan ini cukup efektif untuk mereduksi derau frekuensi rendah, namun kekurangan dari metode ini terdapat pada kecepatan konvergensinya yang lambat. Hal ini disebabkan algoritma *filtered-X* membutuhkan

ukuran langkah (*step size*) yang kecil untuk memperbaharui parameter-parameter bobotnya agar dapat menjaga kestabilan unjuk kerja sistem.

Perkembangan logika fuzi juga merambah penerapannya dalam bidang ini. Sistem ANC yang diusulkan oleh Kipersztok menggunakan logika fuzi yang digunakan untuk memperbaharui parameter bobot tapis FIR dalam mereduksi derau. Penentuan aturan fuzinya dilakukan dengan korelasi silang antara microphone awal dan microphone kontrol serta menggunakan SNR dari estimasi fungsi korelasi silangnya. Hasilnya dengan menggunakan algoritma yang diusulkan kendali fuzi jauh lebih tinggi tingkat pelemahan derau dibandingkan dengan unjuk kerja kendali tapis optimal linear. Dan kendali fuzi lebih mudah dalam implementasinya (Kipersztok, O., et al, 1995). Namun teknik logika fuzi menemui kesulitan dalam menentukan banyaknya aturan fuzi yang digunakan yang disebabkan oleh perubahan masukan (Vijila S.K.C., et al, 2003).

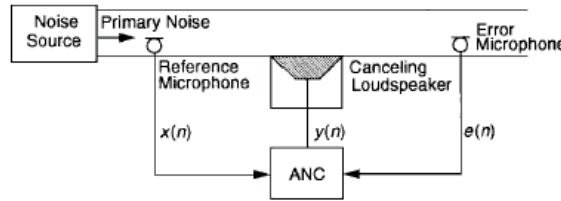
Kesulitan dalam menentukan banyaknya aturan fuzi dan besarnya parameter-parameter yang digunakan, oleh Chang diatasi dengan menerapkan algoritma FXLMS untuk memperbaharui parameter-parameter yang terdapat dalam kendali fuzi. Algoritma fuzi FXLMS telah diterapkan untuk mereduksi derau pada frekuensi pita-lebar dan berhasil dengan baik dibandingkan dengan tapis FIR FXLMS biasa (Chang C.Y., et al, 2000). Juga dalam penerapan yang sama, namun mengganti algoritma belajarnya menggunakan algoritma *Filtered-U* (Chang C.Y., et al, 2002). Disamping menerapkan algoritma fuzi FXLMS dalam meredam derau pada frekuensi pita-lebar, Chang juga menerapkannya dalam meredam derau pada frekuensi pita-sempit dan pada derau komposit pita-lebar dan pita-sempit (Chang C.Y., et al, 2003). Dengan menggunakan 21 masukan, 7 fungsi keanggotaan gaussian tiap masukan dan 7 aturan, terlihat bahwa kinerja fuzi FXLMS lebih baik, dibandingkan dengan algoritma FXLMS tapis FIR orde 21 dalam semua penerapan.

Meskipun lebih baik kinerjanya dibandingkan dengan tapis FIR FXLMS, namun parameter fuzi yang digunakan cukup besar yaitu 301 parameter yang terdiri dari 294 premis dan 7 konsekuen. Sedangkan parameter bobot yang digunakan tapis FIR FXLMS hanya 21 bobot. Untuk itu dengan mengacu dalam literatur (Chang C.Y., et al, 2003), dalam penelitian ini digunakan ANFIS dengan algoritma belajar propagasi balik yang dilakukan secara *on-line* dengan menggunakan total parameter tidak lebih banyak dari 21 parameter, seperti yang digunakan dalam tapis FIR FXLMS. Hasil kinerjanya akan dibandingkan dengan kinerja tapis FIR FXLMS yang telah ditentukan dalam literatur.

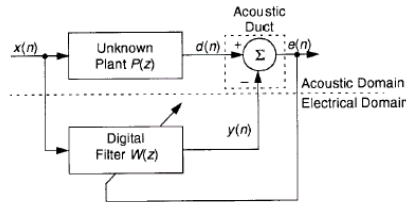
Permasalahan utama dalam penelitian ini adalah bagaimana caranya menerapkan ANFIS menggunakan algoritma belajar propagasi balik dan dilakukan secara *on-line* pada sistem ANC. Parameter-parameter yang digunakan dalam ANFIS baik premis maupun konsekuen tidak lebih banyak dari parameter-parameter bobot tapis (*taps filter*) dari algoritma ANC *Filtered-X LMS* biasa, yang digunakan sebagai pembanding. Kinerja sistem ini ditunjukkan dengan daya derau rerata (ANP, *average noise power*) dan SNR_{dB} (*Signal to Noise Ratio*) hasil penghapusan derau.

Manfaat yang diharapkan dari penerapan ANFIS pada sistem ANC adalah dalam bidang industri sering kali dalam lingkungan kerja terdapat suara bising atau derau yang cenderung mengurangi kenyamanan kerja yang ditimbulkan oleh mesin-mesin listrik yang terdapat dalam lingkungan industri tersebut. Sehingga sering kali digunakan sistem ANC ini untuk mengurangi bising atau derau tersebut.

2. Konsep Dasar Kendali Derau Secara Aktif



Gambar Sistem ANC bidang lebar kanal tunggal dalam suatu saluran (duct).

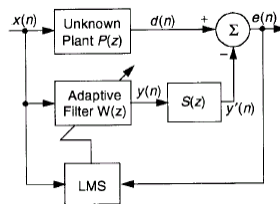


Gambar. Titik pandang identifikasi sistem dari ANC

Sistem dasar ANC bidang lebar (*broadband*) ditunjukkan dalam Gambar 1 dan digambarkan dalam kerangka sistem identifikasi adaptif dalam Gambar 2. Dalam Gambar 2 memperlihatkan suatu tapis adaptif $W(z)$ yang digunakan untuk mengestimasi plant yang tidak diketahui $P(z)$. Lintasan primer $P(z)$ terdiri dari tanggapan akustik dari referensi sensor ke sensor galat dimana pelemahan derau dilakukan. Jika plant adalah dinamis, algoritma adaptif kemudian bertugas secara kontinyu untuk mengestimasi plant dinamis tersebut selama waktu berjalan.

Tujuan tapis adaptif $W(z)$ adalah meminimisasi isyarat galat sisa $e(n)$. Dari Gambar 2, $E(z) = 0$ setelah tapis adaptif $W(z)$ konvergen. Kita kemudian mendapatkan $W(z) = P(z)$ untuk $X(z) \neq 0$, yang memperlihatkan bahwa $y(n) = d(n)$. Sehingga ketika $d(n)$ dan $y(n)$ digabungkan secara akustik maka galat sisa $e(n)$ adalah $e(n) = d(n) - y(n) = 0$, yang merupakan hasil dari penghapusan sempurna kedua suara didasarkan prinsip superposisi.

Pengaruh Lintasan Sekunder (*secondary-path*)



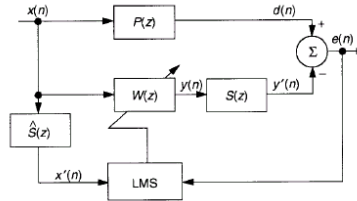
Gambar Penyederhanaan diagram blok ANC

Penggunaan tapis adaptif untuk penerapan ANC yang ditunjukkan dalam Gb. 1 adalah rumit, dengan suatu kenyataan bahwa simpul penjumlah (*summing junction*) dalam Gb. 2 mewakili superposisi akustik dalam suatu ruang dari *loudspeaker* penghapus ke *microphone* galat, dimana derau primer digabungkan dengan keluaran tapis adaptif. Sehingga diperlukan kompensasi untuk fungsi alih lintasan sekunder $S(z)$ dari $y(n)$ ke $e(n)$, yang mana biasanya berupa ADC, tapis rekonstruksi, penguat daya, *loudspeaker*, *microphone* dan lain-lain. Untuk tujuan analisis, akan

disajikan sistem aktual dalam Gambar 2 dengan blok diagram Gambar 3. Dari Gb. 3, alihragam z dari isyarat galat adalah

$$E(z) = [P(z) - S(z)W(z)]X(z) \tag{2-1}$$

Algoritma Filtered-X LMS (FXLMS)



Gambar Diagram blok sistem ANC menggunakan algoritma FXLMS

Penempatan fungsi alih lintasan sekunder kedalam suatu pengendali menggunakan standar algoritma LMS yang ditunjukkan dalam Gb 2-3 secara umum akan menyebabkan ketidakstabilan. Hal ini karena isyarat galat tidak secara tepat selaras dalam waktu dengan isyarat referensi, karena keberadaan $S(z)$. Ada dua pendekatan untuk mengatasi masalah tersebut, pertama menggunakan tapis inverse, $1/S(z)$, secara series terhadap $S(z)$ untuk menghilangkan pengaruhnya. Kedua meletakkan suatu tapis identik di lintasan isyarat referensi untuk memperbaharui bobot dengan algoritma LMS yang sering disebut algoritma FXLMS. Karena tapis inverse tidak selalu ada untuk $S(z)$, maka algoritma FXLMS secara umum lebih efektif. Gambar 2-4 memperlihatkan diagram blok algoritma FXLMS.

Penurunan algoritma FXLMS dapat dirunut dari Gb 2-3 dimana isyarat galatnya adalah

$$e(n) = d(n) - s(n) * \left[\mathbf{w}^T(n) \mathbf{x}(n) \right] \tag{2-2}$$

dimana n adalah index waktu, $s(n)$ adalah tanggapan *impulse* lintasan sekunder $S(z)$, dan tanda * melambangkan konvolusi linear, serta $\mathbf{w}(n) = [w_0(n) \ w_1(n) \ \dots \ w_{L-1}(n)]^T$ dan $\mathbf{x}(n) = [x(n) \ x(n-1) \ \dots \ x(n-L+1)]^T$ adalah vektor-vektor koefisien dan isyarat dari $W(z)$, dan L adalah orde tapis.

Anggaplah suatu fungsi terharap rerata kuadrat $\hat{\xi}(n) = E[e^2(n)]$, maka dengan menggunakan algoritma *steepest descent*, yang akan memperbaharui vektor koefisien didalam arah gradien negatif dengan ukuran langkah μ adalah

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - \frac{\mu}{2} \nabla \hat{\xi}(n) \tag{2-3}$$

dimana $\nabla \hat{\xi}(n)$ adalah estimasi gradien MSE pada waktu n . Dari pers. (2-2), dapat diperoleh $\nabla e(n) = -s(n) * \mathbf{x}(n) = -\mathbf{x}'(n)$, dimana $\mathbf{x}'(n) = [x'(n) \ x'(n-1) \ \dots \ x'(n-L+1)]^T$ dan $x'(n) = s(n) * x(n)$. Sehingga, estimasi gradiennya menjadi

$$\nabla \hat{\xi}(n) = -2\mathbf{x}'(n)e(n) \tag{2-4}$$

Mensubstitusikan pers. (2-3) dan (2-4), kita dapatkan algoritma FXLMS yaitu

$$\mathbf{w}(n+1) = \hat{s}(n) * \mathbf{x}(n) \tag{2-5}$$

Sedangkan untuk penerapan ANC, dengan menggunakan tapis tambahan $\hat{S}(n)$ untuk mengestimasi lintasan sekunder melalui isyarat referensi $\mathbf{x}(n)$ adalah sebagai berikut

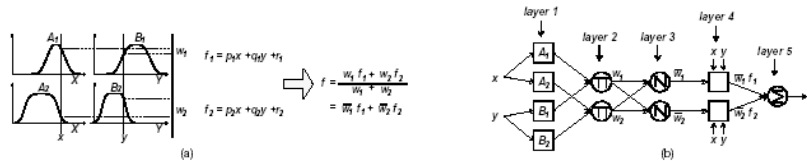
$$\mathbf{x}'(n) = \hat{S}(n) * \mathbf{x}(n) \tag{2-6}$$

dimana $\hat{S}(n)$ adalah estimasi tanggapan *impulse* dari tapis lintasan sekunder $\hat{S}(z)$.

ANFIS (Adaptive Neuro - Fuzzy Inference System)

Salah satu hal yang menentukan perilaku jaringan adalah arsitekturnya atau hubungan antar simpul-simpul dalam suatu sistem jaringan. Untuk ANFIS sendiri memiliki arsitektur yang tergantung dari jenis sistem inferensi yang akan diimplementasikan dalam jaringan tersebut. Sebagai contoh sistem inferensi logika fuzi orde pertama model Sugeno dengan dua masukan dan dua aturan sebagai berikut:

- Aturan 1: jika x adalah A_1 maka y adalah B_1 , maka $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$,
- Aturan 2: jika x adalah A_2 maka y adalah B_2 , maka $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$.



Gambar (a) Model fuzi Sugeno orde-satu dua masukan dengan dua aturan **(b)** Kesamaan arsitektur ANFIS-nya.

Sistem inferensi logika fuzi model Sugeno orde pertama dengan dua masukan dan dua aturan yang ditunjukkan dalam Gambar 5a bisa diimplementasikan pada sistem jaringan adaptif, seperti terlihat dalam Gambar 5b. Sistem inferensi fuzi model Sugeno dapat diimplementasikan dalam jaringan yang terdiri dari lima lapis yaitu:

Lapis 1 Setiap simpul i dalam lapis ini adalah simpul kotak dengan suatu fungsi simpul

$$O_i^1 = \mu A_i(x) \tag{2-7}$$

dimana x adalah masukan ke simpul i , dan A_i adalah label *linguistic* (*small, big, dll*). O_i^1 adalah fungsi keanggotaan A_i . Biasanya dipilih $\mu A_i(x)$ sebagai bentuk-*bell* dengan nilai maksimum 1 dan minimum 0, berikut ini fungsi *bell* tergeneralisasi

$$\mu A_i(x) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right]^b}, \tag{2-8}$$

atau fungsi Gaussian

$$\mu A_i(x) = \exp \left[- \left(\frac{x - c_1}{a_i} \right)^2 \right], \tag{2-9}$$

dimana $\{a_i, b_i, c_i\}$ dan $\{a_i, c_i\}$ adalah parameter-parameternya. Parameter-parameter didalam lapis ini disebut sebagai paramter premis.

Lapis 2 Setiap simpul didalam lapis ini adalah simpul lingkaran, dilambangkan oleh Π yang melakukan proses perkalian terhadap isyarat-isyarat datang dan mengirimkan hasilnya keluar. Jelasnya,

$$\varpi_i = \mu A_i(x) \times \mu B_i(y), \quad i = 1, 2. \tag{2-10}$$

Setiap keluaran simpul mewakili kuat penyulutan dari suatu aturan.

Lapis 3 Setiap simpul didalam lapis ini adalah simpul lingkaran, dilambangkan oleh N. Simpul ke-i menghitung rasio aturan kuat penyulutan dengan jumlah semua aturan kuat penyulutan:

$$\overline{\varpi}_i = \frac{\varpi_i}{\varpi_1 + \varpi_2}, \quad i = 1, 2. \tag{2-11}$$

Untuk mudahnya, keluaran-keluaran dari lapis ini selanjutnya akan disebut kuat penyulutan ternormalisasi (*normalized-firing strengths*).

Lapis 4 Setiap simpul tunggal didalam lapis ini merupakan simpul kotak dengan fungsi simpul

$$O_i^4 = \overline{\varpi}_i f_i = \overline{\varpi}_i (p_i x + q_i y + r_i), \tag{2-12}$$

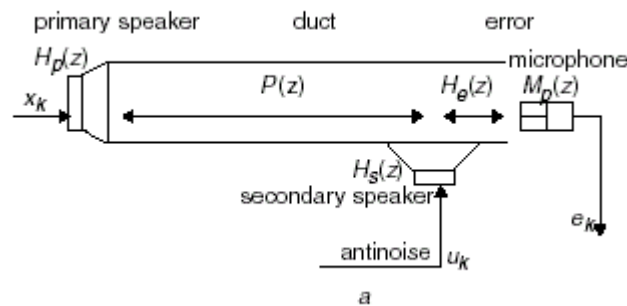
dimana $\overline{\varpi}_i$ adalah keluaran dari lapis 3, dan $\{p_i, q_i, r_i\}$ adalah himpunan parameter. Parameter-parameter didalam lapis ini selanjutnya akan disebut parameter-parameter konsekuen.

Lapis 5 Simpul tunggal didalam lapis ini adalah simpul lingkaran yang dilabelkan oleh Σ yang menghitung keseluruhan keluaran sebagai penjumlahan dari semua isyarat datang (*incoming signal*) yaitu

$$O_1^5 = \text{keseluruhan keluaran} = \sum_i \overline{\varpi}_i f_i = \frac{\sum_i \varpi_i f_i}{\sum_i \varpi_i} \tag{2-13}$$

3. RENCANA PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan mengacu pada model saluran (*duct*) yang terdapat dalam literatur (Chang, YC., et al, 2003). Sebelum melangkah lebih jauh dalam tahap-tahap penelitian ada baiknya ditampilkan diagram blok dari sistem ANC pada suatu saluran (*duct*) yang akan digunakan dalam penelitian ini (Chang, YC., et al, 2003).



Gambar Sistem ANC pada suatu saluran (*duct*)

Sistem ANC biasa kanal tunggal pada suatu saluran (*duct*), diperlihatkan dalam Gb. 1. Dimana dalam model plant, $H_p(z)$ mewakili *speaker* primer dan $P(z)$ melambangkan fungsi alih saluran akustik (*acoustic duct*), $x(k)$ mewakili sampel derau yang tidak diinginkan dan galat sisa (*residual error*) $e(k)$ merupakan galat yang akan memperbaharui parameter bobot tapis adaptif yang diukur oleh *microphone* galat. Isyarat keluaran algoritma FXLMS $u(k)$ menjalankan suatu *speaker* anti-derau dengan fungsi alih $H_s(z)$, dalam upaya menghapuskan derau yang tidak

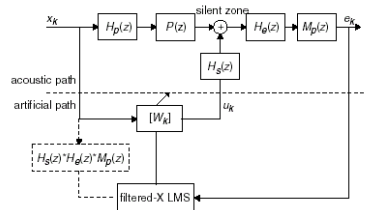
dinginkan yang terdapat dalam saluran. $H_e(z)$ mewakili fungsi alih lintasan galat yang merupakan jarak antara *speaker* sekunder dengan *microphone* galat.

Dari Gb. 1 beserta uraiannya dapat ditentukan secara umum tiga jalannya penelitian sebagai berikut:

1. Menentukan algoritma FXLMS konvensional (pada tapis FIR) untuk penghapusan derau secara aktif pada suatu saluran.
2. Menentukan arsitektur ANFIS untuk penghapusan derau secara aktif pada suatu saluran.

Algoritma FXLMS Untuk Sistem ANC.

Dari Gb 1. sistem ANC kanal tunggal dapat diturunkan kesepadanan diagram blok algoritma FXLMS-nya seperti terlihat dalam Gb. 2. Orde ke-(N+1) ANC adaptif dengan parameter-parameter bobot W_k akan diperbaharui dengan algoritma FXLMS. Sehingga, derau sisa e_k menjadi



Gambar Diagram blok sistem ANC tapis FIR FXLMS.

$$e_k = x_k H_p P H_e M_p + W_k^T X_k H_s H_e M_p \tag{3-3}$$

dimana parameter-parameter bobot dan runtun derau masukannya adalah

$$W_k = [w_{0k}, w_{1k}, \dots, w_{Nk}]^T \tag{3-4}$$

$$X_k = [x_k, x_{k-1}, \dots, x_{k-N}]^T. \tag{3-5}$$

Estimasi gradien yang sesuai dari sistem adaptif pada waktu sampel ke-k diberikan oleh persamaan berikut:

$$\hat{\nabla} = \frac{\partial e_k^2}{\partial W_k} = 2e_k (X_k H_s H_e M_p) \tag{3-6}$$

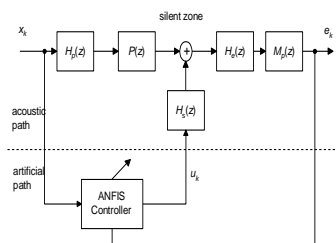
dimana parameter-parameter bobot yang diperbaharui dengan algoritma LMS menjadi

$$W_{k+1} = W_k - 2\mu e_k (X_k H_s H_e M_p). \tag{3-7}$$

Persamaan ini berbeda dari algoritma LMS yang biasa:

$$W_{k+1} = W_k - 2\mu e_k X_k \tag{3-8}$$

Algoritma ANFIS Untuk Sistem ANC.



Gambar Arsitektur sistem ANC menggunakan pengendali ANFIS

Berikut ini langkah-langkah perancangan pengendali ANFIS-nya:

Langkah 1 : Mengacu pada Gb. 3, hubungan masukan-keluaran pengendali ANFIS dapat dibuat seperti terlihat dalam Gambar 3-9. Keluaran tapis FIR orde $N + 1$ diperoleh dari proses rerata (*moving average*) $N + 1$ cuplikan (*sampling*) masukan isyarat derau, dari sini dapat digunakan masukan sebanyak $N + 1$ cuplikan yang telah lalu untuk merancang tapis ANFIS. Untuk tapis ANFIS orde $N + 1$, pada sistem ANC dapat didefinisikan himpunan fuzzy F_i^l sebanyak M untuk setiap cuplikan data masukan derau x_{k-i} dengan fungsi keanggotaan tipe Gaussian berikut ini :

$$\mu_{F_i^l}(X_{k-i}) = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x_{k-i} - \bar{x}_{i,k}^l}{\sigma_{x_i}^l} \right)^2 \right] \quad (3-9)$$

dengan $l = 1, 2, \dots, M$ dan $i = 0, 1, 2, \dots, N$, sedangkan k adalah nomer cuplikan. Pada persamaan tersebut, \bar{x}_i^l adalah pusat (*center*) dan $\sigma_{x_i}^l$ adalah standar deviasi dari fungsi Gaussian. Jika menurut literatur (Chang, YC., et al, 2003), pada pengendali fuzinya menggunakan $N=20$ dan $M=7$ yang artinya menggunakan total parameter yang harus diperbaharui sebanyak 301 parameter. Sedangkan untuk ANC tapis FIR FXLMS hanya menggunakan 21 bobot parameter yang merupakan orde tapis FIRnya.

Untuk itu dalam penelitian ini hanya menggunakan parameter sebanyak sekitar kurang dari parameter yang dimiliki oleh ANC biasa. Dengan menggunakan $N = 3$ dan $M = 2$ yang artinya menggunakan parameter total sebanyak 20 parameter terdiri dari 12 parameter premis dan 8 parameter konsekuen serta nilai awal standar deviasi sebesar 0,2. Sehingga setiap cuplik masukan x_{k-i} memiliki dua label linguistik (Negatif [N] dan Positif [P]) yang terdistribusi pada jangkauan masukan antara $[-1 \ 1]$ seperti yang terlihat dalam Gb 5.

Langkah 2 : Mendefinisikan M aturan fuzi IF-THEN dengan tipe Takagi-Sugeno (*Fuzzy Inference Engine*) seperti berikut:

$$\text{Rule}^l : \text{IF } x_k \text{ is } F_0^l \text{ and IF } x_{k-1} \text{ is } F_1^l \dots \text{and IF } x_{k-N} \text{ is } F_N^l \text{ THEN} \quad (3-10)$$

$$u_k^l = a_0^l + a_1^l x_k + a_2^l x_{k-1} + \dots + a_N^l x_{k-N-1}$$

dimana $l = 1, 2, \dots, M$. Nilai awal untuk parameter linearnya dapat dipilih nilai nol. Bagian premis dari aturan fuzi merupakan kuat penyulutan (*fire strength*) dari aturan fuzi yang dapat dirumuskan sebagai berikut,

$$w_k^l = \prod_{i=0}^N \mu_{F_i^l}(X_{k-i}). \quad (3-11)$$

Bagian keluaran dari pengendali ANFIS dapat disusun dari model inferensi fuzi Takagi-Sugeno, dengan menggunakan pers. (3-10)-(3-11) seperti terlihat dibawah ini,

$$u_k = \frac{\sum_{l=1}^M w_k^l u_k^l}{\sum_{l=1}^M w_k^l} = \sum_{l=1}^M \bar{w}_k^l u_k^l \quad (3-12)$$

dimana $l = 1, 2, 3, \dots, M$ adalah banyaknya aturan dan k adalah nomor cuplikan. Pers. (3-12) juga dapat disebut sebagai tapis FIR ANFIS, yang berlaku sebagai sebuah tapis anti-derau untuk meredam gangguan yang tidak diinginkan.

Langkah 3: Untuk meminimisasi daya isyarat derau sisa (*residual noise*) atau galat pada daerah tenang (*silent zone*), dapat dilakukan dengan mengurangi isyarat derau (sebagai target) dengan keluaran ANFIS (u_k). Kuadrat galat cuplikan ke- k dapat dinyatakan sebagai:

$$e_k = \frac{1}{2}(d_k - u_k)^2 \tag{3-13}$$

Berikut ini formula algoritma ANFIS untuk memperbarui bobot parameter $a_{0,k}^l, a_{i,k}^l, \bar{x}_{i,k}^l$, dan $\sigma_{xi,k}^l$ pada setiap waktu cuplikan ke- k :

$$a_{0,k+1} = a_{0,k} + \lambda e_k \frac{P_k^l}{q_k} \tag{3-14}$$

$$a_{i,k+1} = a_{i,k} + \lambda e_k \frac{P_k^l}{q_k} x_i \tag{3-15}$$

$$\bar{x}_{i,k+1}^l = \bar{x}_{i,k}^l + \lambda e_k \gamma_k^l \frac{(x_{k-i} - \bar{x}_{i,k}^l)}{(\sigma_{xi,k}^l)^2} \tag{3-16}$$

$$\sigma_{xi,k+1}^l = \sigma_{xi,k}^l + \lambda e_k \gamma_k^l \frac{(x_{k-i} - \bar{x}_{i,k}^l)^2}{(\sigma_{xi,k}^l)^3} \tag{3-17}$$

dimana,

$$P_k^l = w_k^l \tag{3-18}$$

$$q_k = \sum_{l=1}^7 p_k^l \tag{3-19}$$

$$\gamma_k^l = \frac{u_k^l + u_k}{q_k} p_k^l \tag{3-20}$$

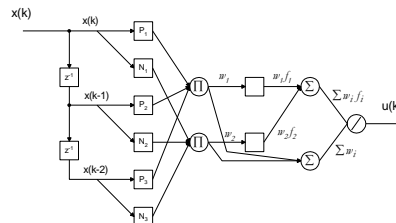
dan dimana λ adalah sebuah konstanta bilangan positif kecil, sedangkan $l = 1, 2, \dots, M$ dan $i = 1, 2, \dots, N$. Pers. (3-14)-(3-17) didapatkan dari gradien pers. (3-13) dengan mengacu pada masing-masing parameter yang terdapat pada pers. (3-9) dan (3-12).

Dalam penelitian ini, nilai awal ditentukan berdasarkan keluaran plant, dimana terdapat nilai tunda yang menyebabkan keluaran plant bernilai nol. Untuk itu dapat ditentukan nilai $\bar{x}_{i,0}^l$ dan $\sigma_{xi,0}^l$ seperti Langkah 1 dan memilih

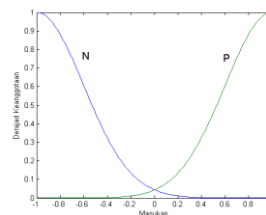
$$u_0^1 = -x_k \cdot \frac{H_p P}{H_s} \tag{3-21}$$

Karena keluaran plant tertunda maka semua parameter linear dipilih sama dengan nol yang menyebabkan keluaran ANFIS $u_k = u_0^l = 0$. Kemudian setelah *speaker* sekunder H_s aktif, maka anti-derau buatan akan menjadi $-x_k H_p P$, yang akan mengkompensasi derau yang tidak diinginkan pada daerah tenang (*silent zone*). Proses perbaharuan (*up date*) parameter dilakukan secara *on-line* dan dilakukan setelah waktu tunda dari plant.

Gambar arsitektur ANFIS yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat dibawah ini beserta peta aturannya.



Gambar Arsitektur ANFIS yang digunakan dalam penelitian



Gambar Fungsi keanggotaan untuk tiap masukan

Tabel 1. Peta aturan ANFIS yang digunakan.

Premis				Konsekuensi
	X_k	X_{k-1}	X_{k-2}	U_k
Rule 1	N_1	N_2	N_3	$f_1 = a_{01} + a_{11}x_k + a_{21}x_{k-1} + a_{31}x_{k-2}$
Rule 2	P_1	P_2	P_3	$f_2 = a_{02} + a_{12}x_k + a_{22}x_{k-1} + a_{32}x_{k-2}$

4. ANALISIS HASIL PERCOBAAN

Beberapa hasil percobaan akan disajikan disini untuk mendemonstrasikan kemampuan algoritma FXLMS biasa dan ANFIS untuk meredam atau mereduksi derau pada sistem ANC. Percobaan pertama (EXP1) menggunakan isyarat pita-sempit (*narrowband*) yaitu isyarat sinus periodis 250 Hz sebagai derau yang tidak diinginkan. Percobaan kedua (EXP2) menggunakan kombinasi isyarat sinus periodis dengan frekuensi yang berdekatan yaitu 240 Hz dan 250 Hz. Pada percobaan ketiga (EXP3) menggunakan isyarat pita-lebar (*broadband*) yaitu isyarat derau acak sebagai derau yang akan dilemahkan. Dan terakhir menggunakan kombinasi derau pita-sempit dan derau pita-lebar, yaitu derau isyarat sinus periodis dengan frekuensi 250 Hz dan derau acak pita-lebar.

Percobaan dilakukan dengan mencari ukuran langkah, μ pada sintem ANC FX-LMS biasa dan ukuran langkah, η pada masing-masing parameter ANFIS yang akan menghasilkan kinerja terbaik dengan cara coba dan galat (*try and error*) yang dilakukan selama 0.1 detik atau sebanyak 201 data untuk EXP1 serta EXP2 dan 1 detik atau sebanyak 1001 data untuk EXP3 dan EXP4 dengan frekuensi cuplik (*sampling frequency*) sebesar 2000 Hz. Kemudian hasilnya disajikan dalam bentuk tabel untuk masing-masing percobaan.

Hasil Percobaan EXP1

Dari hasil-hasil percobaan tapis FIR FXLMS dapat meredam derau dengan baik namun ANFIS menghasilkan kinerja yang lebih baik, pengaturan atau reduksi derau yang lebih cepat dan menghasilkan derau sisa yang lebih kecil dibanding sistem ANC FXLMS biasa. Ukuran langkah untuk tapis FIR FXLMS adalah $\mu = 0,02$. Dan untuk parameter-parameter akhir ANFIS hasil proses pentalaan dengan algoritma belajar propagasi balik dapat dilihat seperti berikut :

$$\text{center} = \begin{bmatrix} -1 & -0,6122 \\ -1 & 0,0556 \\ -1 & 0,7232 \end{bmatrix} \quad \text{sigma} = \begin{bmatrix} 0,01 & 12 \\ 0,01 & 4,922 \\ 0,01 & 0,6051 \end{bmatrix}$$

$$\text{linear} = \begin{bmatrix} -0,1348 & 2,334e-017 & 0,1348 & 0,0002723 \\ -0,8316 & -0,2384 & 0,1684 & -0,000276 \end{bmatrix}.$$

Hasil Percobaan EXP2

Pada Gambar 4-10 disajikan parameter-parameter bobot (*filter taps*) setelah proses pelemahan yang nilai awalnya nol dengan ukuran langkah $\mu = 0,02$. Dan untuk parameter-parameter akhir ANFIS hasil proses pentalaan dengan algoritma belajar propagasi balik dapat dilihat seperti berikut :

$$\text{center} = \begin{bmatrix} -1 & 0,9997 \\ -1 & 0,9997 \\ -1 & 0,9998 \end{bmatrix} \quad \text{sigma} = \begin{bmatrix} 0,1996 & 0,2019 \\ 0,1989 & 0,2011 \\ 0,1979 & 0,2005 \end{bmatrix}$$

$$\text{linear} = \begin{bmatrix} -0,7541 & -0,3536 & 0,2465 & 1,346e-005 \\ -0,8296 & -0,2458 & 0,1708 & 1,383e-005 \end{bmatrix}.$$

Hasil Percobaan EXP3

Pada percobaan kali ini gangguan pada daerah *broadband* frekuensi juga sulit diredam dengan algoritma FXLMS biasa sebaliknya dengan menggunakan ANFIS, mampu meredam *broadband random noise* hingga -40 dB. Terlihat dengan jelas bahwa ANFIS dapat mengendalikan *broadband noise* secara lebih baik, dibandingkan dengan menggunakan algoritma FXLMS biasa. Ukuran langkah tapis FIR FXLMS $\mu = 0,001$. Dan untuk parameter-parameter akhir ANFIS hasil proses pentalaan dengan algoritma belajar propagasi balik dapat dilihat seperti berikut :

$$\text{center} = \begin{bmatrix} -1 & 0,9713 \\ -1 & 0,9847 \\ -1 & 0,9842 \end{bmatrix} \quad \text{sigma} = \begin{bmatrix} 0,004488 & 0,5677 \\ 0,01 & 0,3102 \\ 0,001 & 0,3283 \end{bmatrix}$$

$$\text{linear} = \begin{bmatrix} -0,2315 & -0,0643 & -0,01564 & 0,01053 \\ -1 & -2,435e-005 & 2,068e-005 & -0,008609 \end{bmatrix}.$$

Hasil Percobaan EXP4

Contoh terakhir, menggunakan kombinasi *broadband noise* dan *narrowband noise* sebagai isyarat gangguan, tepatnya sinyal gangguan *narrowband* dengan frekuensi 250 Hz dicampur dengan derau acak. Kinerjanya dapat dibagi menjadi dua daerah, yaitu derau pada daerah *narrowband* yang

dapat diredam oleh kedua algoritma. Tetapi derau *broadband* hanya dapat diredam dengan sistem ANC ANFIS. Simulasi ini membuktikan bahwa kinerja sistem ANC ANFIS lebih baik dibandingkan sistem ANC FXLMS biasa. Ukuran langkah tapis FIR FXLMS $\mu = 0,001$. Dan untuk parameter-parameter akhir ANFIS hasil proses pentalaan dengan algoritma belajar propagasi balik dapat dilihat sebagai berikut :

$$\text{center} = \begin{bmatrix} -1 & 0,6704 \\ -1 & 0,7385 \\ -1 & 0,9804 \end{bmatrix} \quad \text{sigma} = \begin{bmatrix} 0,01 & 4,939 \\ 0,01 & 3,183 \\ 0,01 & 0,2176 \end{bmatrix}$$

$$\text{linear} = \begin{bmatrix} -0,007632 & -0,003416 & 0,01156 & 0,0004256 \\ -1 & -1,944e-006 & 1,879e007 & -0,0004406 \end{bmatrix}$$

Dari hasil simulasi di atas dapat dilihat bahwa algoritma FXLMS biasa dapat mengontrol derau pada frekuensi rendah, tetapi derau frekuensi tinggi hanya berkurang antra -3 dB sampai dengan -5 dB. Tetapi ANFIS dapat mengurangi derau frekuensi tinggi secara lebih baik. Pengurangan derau frekuensi rendah sampai -60 dB dan pengurangan frekuensi tinggi sampai dengan -40 dB. Jadi dapat dilihat bahwa tidak hanya kecepatan konvergensi saja yang meningkat tetapi juga derau sisa yang lebih kecil pada sistem ANC ANFIS. Jika dibandingkan dengan sistem ANC yang lain, sistem ANC ANFIS ini tidak memerlukan komputasi yang kompleks dan tidak perlu fungsi alih plant lintasan suara, dan kinerja peredaman derau juga meningkat.

Selanjutnya karena sistem ANC ANFIS ini dapat melakukan pengaturan bobot sendiri maka sistem ini dapat disusun secara lebih mudah pada saat awal dan derau sisa dapat diminimisasi dalam waktu kurang dari ratusan milidetik.

Berikut ini disajikan tabel dari kinerja sistem ANC FXLMS biasa dan ANFIS yang didapat dari percobaan:

Tabel 2. Hasil kinerja sistem ANC dari percobaan

EXP	ANC FXLMS		ANC ANFIS	
	ANP	SNR	ANP	SNR
1	0,0266	-12,7145	0,00626	-43,75
2	0,0827	-8,3055	0,02412	-31,44
3	0,9490	-0,3585	0,001281	-43,25
4	-1,0729	-1,5393	0,001181	-61,83

5. Kesimpulan

Pengendali ANFIS yang digunakan dalam penelitian ini hanya menggunakan tiga masukan, dua fungsi keanggotaan tiap masukan dan dua aturan sehingga total parameter yang digunakan adalah 20 parameter baik premis maupun konsekuennya. Sedangkan algoritma belajar yang digunakan untuk memperbaharui parameternya adalah propagasi balik yang dilakukan secara *on-line*. Dengan kesederhanaan arsitektur tersebut, pengendali ANFIS telah mampu membangkitkan suatu tapis ANC untuk meredam derau yang tidak diinginkan pada suatu saluran (*duct*). Dimana tidak diperlukan lagi fungsi alih sensor dan aktuator serta *plant* saluran dalam perancangan pengendalinya.

Hasil-hasil yang didapat dalam simulasi menunjukkan bahwa kendali ANFIS memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan tapis FIR FXLMS meskipun dengan parameter-parameter yang harus diperbaharui lebih sedikit.

Hasil pelemahan derau pada frekuensi pita-sempit yang menggunakan isyarat periodis sinus 250 Hz dan isyarat komposit sebagai isyarat deraunya, pada tapis FIR FXLMS memiliki daya derau rerata (*average noise power*, ANP) sebesar 0,0266 serta 0,0827 dan SNR sebesar -12,00626 dB dan

-8,3055 dB. Sedangkan dengan menggunakan kendali ANFIS didapatkan ANP sebesar 0,00626 dan SNR sebesar -43,75 dB serta -31,44 dB.

Hasil pelemahan derau pada frekuensi pita-lebar yang menggunakan isyarat derau acak dan kompositnya sebagai isyarat gangguanya, pada tapis FIR FXLMS memiliki daya derau rerata (*average noise power*, ANP) sebesar 0,9490 serta -1,0729 dan SNR sebesar -0,3585 dB serta -1,5393 dB. Sedangkan dengan menggunakan kendali ANFIS didapatkan ANP sebesar 0,001281 serta 0,001181 dan SNR sebesar -43,25 dB serta -61,83 dB.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Chang-Y. C., Kuo-K. S., dan Kuo, M.-C., 2000. *Self-tuning controller with fuzzy filtered-X algorithm, Circuits and Systems I: Electronics Letters*, Volume: 36, Issue: 2, 20 Jan. 2000. Hal:182 - 184.
- Chang-Y. C., Kuo-K. S., dan Kuo, M.-C., 2002. *Self-tuning controller with fuzzy filtered-U algorithm for The Application of Active Noise Cancellation*, IEEE, Trans. On Circuits and Systems I, Volume: 49, NO: 2, 9 September. 2002. Hal:1325 - 1333.
- Chang-Y. C., dan Kuo-K. S., 2003. *Active noise cancellation with fuzzy Adaptive filtered-X algorithm, Circuits, Devices and Systems, IEE Proceedings [see also IEE Proceedings G-Circuits, Devices and Systems]*, Volume: 150, Issue: 5, 6 Oct. 2003, Pages:416-22.
- Crawford, D.H., Stewart, R.W., Toma, E., 1997. *Digital signal processing strategies for active noise control, Electronics & Communication Engineering Journal*, Vol: 9, hal: 81 – 89.
- Elliott, S.J., Nelson, P.A. 1993, *Active noise control, Signal Processing Magazine*, IEEE, Volume: 10, hal:12 – 35.
- Jang, J.-S.Roger, 1993. ANFIS: *Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems*, IEEE, Trans. on Systems, Man and Cybernetics.
- Jang, J.-S.R., Chuen-Tsai Sun. 1995, *Neuro-fuzzy modeling and control*, Proceedings of the IEEE, Volume: 83, Issue: 3, Hal: 378 – 406.
- Jang, J.-S.R., Chuen-Tsai Sun dan Mizutani E., 1997, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing, Prentice-Hall International*, Inc, New Jersey.
- Kipersztok, O.; Hammond, R., 1995. *The use of fuzzy logic in active noise control, Proceedings of ISUMA - NAFIPS '95 The Third International Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis and Annual Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society*, hal: 577 – 582.
- Kuo, S.M., Morgan, D.R. 1999, *Active noise control: a tutorial review, Proceedings of the IEEE*, Volume: 87, hal: 943 – 975.
- Park, Hee-Kyoung, Seong-Gon Kong, 1999. *Neuro-fuzzy control system for adaptive noise cancellation, Fuzzy Systems Conference Proceedings*, 1999. FUZZ-IEEE '99. 1999 IEEE International, Vol. 3, 22-25 Aug. 1999, Hal: 1465 – 1469.
- Widrow, B., Stearns, S. D. 1985, *Adaptive Signal Processing*, Prentice Hall, New Jersey.
- Vijila, S.K.C, Renganathan, S. and Johnson S., 2003, *Suppression of maternal ECG from fetal ECG using neuro fuzzy logic technique Proceedings of the International Joint Conference on*, Volume: 2, 20-24 July 2003 Pages:1007 – 1012.