

Pengembangan Algoritma Pembelajaran untuk Jaringan Syaraf Tiruan *Diagonal Recurrent* dalam Sistem Kendali Derau Akustik Secara Aktif

Bomo Wibowo Sanjaya¹⁾, Redi Ratiandi Yacoub²⁾

Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura
Email: bomowibowo@yahoo.com¹⁾, rediry@yahoo.com²⁾

ABSTRAK

Sistem kendali derau aktif lebih menitikberatkan pada penggunaan algoritma adaptasi dan struktur kendali adaptif. Dalam penelitian ini ditampilkan hasil percobaan sistem kendali derau aktif pada ruang terbuka menggunakan struktur kendali Jaringan Syaraf Tiruan *Diagonal Recurrent* (JSTDR). Pengembangan algoritma *Extended Kalman Filter* (EKF) untuk struktur kendali JSTDR, yang kemudian dinamakan sebagai algoritma *Extended Kalman Filter Diagonal Recurrent* (EKFDR) merupakan tujuan dari penelitian ini. Masalah nonlinieritas jalur sekunder dalam sistem kendali derau aktif dapat mempersulit proses pengendalian. Dari hasil percobaan terlihat bahwa jumlah neuron dalam JST dapat dikurangi dengan menggunakan JSTDR, tanpa mengurangi kinerja sistem kendali. JSTDR dengan algoritma EKFDR juga menunjukkan kinerja yang baik dalam mengkompensasi nonlinieritas jalur sekunder jika dibandingkan dengan pengendali linier.

Kata kunci: derau aktif, jaringan syaraf tiruan, diagonal recurrent, extended kalman filter diagonal recurrent, nonlinieritas jalur sekunder.

ABSTRACT

Active Noise Control (ANC) system emphasizes at usage of adaptation algorithm and adaptive control structure. In this research is presented experimental result of active noise control system at free space using Diagonal Recurrent Artificial Neural Network control structure. The objective of this research is to develop an Extended Kalman Filter (EKF) algorithm for Diagonal Recurrent Artificial Neural Network control structure, named as Extended Kalman Filter Diagonal Recurrent (EKFDR) algorithm. Experimental result shows that amount of neuron in artificial neural network can be reduced by using diagonal recurrent artificial neural network, without lessening control system performance. Nonlinearity of secondary path in active noise control system can complicate control process. Experimental result shows that diagonal recurrent artificial neural network with EKFDR algorithm produced a better performance than linear controller in compensating of secondary path nonlinearity.

Keywords: active noise, neural network, diagonal recurrent, extended kalman filter diagonal recurrent, secondary path nonlinearity.

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Pendekatan tradisional untuk meredam derau akustik dilakukan dengan menggunakan material-material peredam tertentu, seperti dinding pemisah (*enclosure*), penghalang (*barrier*), maupun penyerap suara (*silencers*). Bahan atau material tersebut ditempatkan di sekitar sumber derau atau di ruang yang intensitas deraunya hendak dikurangi. Teknik peredaman seperti ini dikenal sebagai kendali derau dengan teknik pasif. Teknik pasif pada umumnya efektif untuk derau berfrekuensi tinggi. Peredam pasif menghasilkan peredaman yang kecil ketika panjang gelombang akustiknya cukup besar dibandingkan

dengan dimensi peredam, seperti panjang atau ketebalan dinding, dan seringkali menimbulkan tekanan balik. Untuk meredam derau berfrekuensi rendah akan dibutuhkan bahan peredam yang tebal, berat, dan dengan harga yang relatif mahal. Sehingga teknik pasif tidak efektif untuk derau berfrekuensi rendah. Derau frekuensi rendah diketahui tidak hanya mengganggu untuk jangka waktu panjang, namun juga menimbulkan kelelahan dan hilangnya konsentrasi manusia, yang mengakibatkan berkurangnya produktivitas. Untuk memecahkan masalah ini maka digunakan sistem kendali derau dengan teknik aktif, atau lebih dikenal dengan sistem kendali derau aktif (*Active Noise Control*, ANC). Sistem ANC menggunakan sumber sekunder untuk menghilangkan derau dari sumber primer.

Catatan: Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Juni 2007. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Elektro volume 7, nomor 1, September 2007.

Sistem ANC secara efisien meredam derau frekuensi rendah dimana pada jangkauan ini metoda pasif sudah tidak efektif. ANC menjanjikan peningkatan dalam

kualitas kendali derau, baik keuntungan potensial dari segi ukuran, berat, volume maupun biaya [1]. ANC sejak lama didemonstrasikan di laboratorium riset, tetapi sekarang telah dikembangkan dalam banyak aplikasi industri komersil. Situasi berubah dengan cepat, ANC mempunyai dampak yang besar dalam mengurangi derau, terutama menjadi semakin ekonomis dan efektif untuk mengurangi derau frekuensi rendah. Sistem ANC lebih menitikberatkan dalam penggunaan algoritma adaptasi dan struktur pengolahan sinyal secara adaptif berdasarkan masukan-masukan dari sensor-sensor yang digunakan, yang bertujuan untuk meminimumkan suatu kriteria tertentu.

Akhir-akhir ini banyak implementasi ANC menggunakan teknik pemfilteran linier adaptif. Bentuk yang paling banyak dikenal dari kombinasi arsitektur/algoritma adaptif berdasarkan pendekatan linier adalah pengendali berbasis filter transversal, seperti Filter FIR (*Finite Impulse Response*) atau Filter IIR (*Infinite Impulse Response*) yang diadaptasi dengan memakai algoritma Filtered-X Least-Mean-Squares (FX-LMS) [2].

Pengendali digital linier ini belum memberikan kinerja yang baik, terutama pada kasus dimana ketaklinearan ditemukan dalam sistem ANC. Sumber ketaklinearan yang umum adalah aktuator. Suatu aktuator secara khas mempunyai tanggapan nonlinear ketika beroperasi dengan suatu sinyal masukan yang mempunyai amplitudo mendekati atau di atas nilai sinyal masukan nominal, atau ketika beroperasi pada suatu frekuensi di luar rentang frekuensi nominal. Perilaku nonlinear dapat juga terjadi ketika dinamika sistem yang akan dikendalikan nonlinear [2].

Penggunaan struktur kendali Jaringan Syaraf Tiruan (JST) dengan algoritma nonlinear adaptif merupakan salah satu solusi untuk mengatasi masalah ini.

Perumusan Permasalahan

Dalam implementasi dengan menggunakan struktur kendali Jaringan Syaraf Tiruan (JST) dengan algoritma nonlinear adaptif sering ditemui masalah komputasi. Komputasi yang terlalu berat dapat menyebabkan masalah *real-time*. Untuk itu diperlukan struktur JST *diagonal recurrent* yang dapat mengurangi jumlah layer yang digunakan sehingga mengurangi waktu komputasi.

Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan mendapatkan algoritma pembelajaran nonlinear adaptif untuk jaringan syaraf

tiruan *diagonal recurrent* dalam sistem kendali derau akustik secara aktif sehingga dapat mengkompensasi non-linieritas sistem dan dapat mengurangi beban komputasi selama proses kendali berlangsung.

Manfaat Penelitian

Penelitian ini merupakan penyempurnaan dari hasil penelitian di bidang ANC yang telah dilakukan sebelumnya. Hasil penelitian menunjukkan sistem kendali derau akustik secara aktif dengan algoritma pembelajaran nonlinear adaptif untuk jaringan syaraf tiruan *diagonal recurrent* dapat mengkompensasi non-linieritas sistem dan dapat mengurangi beban komputasi selama proses kendali sehingga dapat digunakan sebagai pengendali derau akustik yang menggunakan peralatan yang lebih sederhana. Selain itu juga dimungkinkan untuk digunakan pada sistem multi kanal yang mempunyai beban komputasi yang lebih berat.

TINJAUAN PUSTAKA

Konsep Fisik Peredaman Derau Secara Aktif

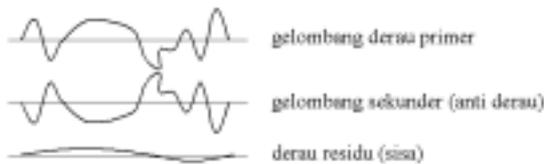
Peredaman derau secara aktif mengacu pada prinsip superposisi destruktif. Suatu sinyal anti derau (dengan amplitudo yang sama dan fasa yang berlawanan dengan sinyal derau primer) dibangkitkan dan dikombinasikan dengan sinyal derau primer, yang kemudian menghasilkan efek saling menghilangkan pada kedua sinyal tersebut. Tingkat penghilangan sinyal derau primer tergantung pada akurasi amplitudo dan fasa dari sinyal anti derau yang dibangkitkan [1]. Konsep fisik dari peredaman sinyal derau secara aktif diilustrasikan dalam Gambar 1.

Ditinjau dari daerah jangkauan frekuensinya, derau dapat dikelompokkan [1]

a. Derau pita lebar (*broadband noise*).

Derau pita lebar ditandai dengan tersebarnya energi akustik di banyak tempat dalam daerah frekuensi. Salah satu sebab derau jenis ini adalah gejala turbulensi yang bersifat acak, misalnya bunyi frekuensi rendah pesawat jet dan impuls ledakan. Untuk peredaman derau pita lebar, sinyal masukan referensi harus memberikan petunjuk pendahulu yang cukup tentang derau. Ini berarti sinyal acuan harus menyerupai sinyal derau utama. Salah satu caranya adalah dengan menempatkan *sensor* acuan sedekat mungkin dengan sumber derau. Dengan demikian sinyal acuan yang berkorelasi dengan derau utama dapat diperoleh, dan digunakan untuk membangkitkan sinyal anti derau yang dapat meredam derau di sekitar sumber sekunder.

- b. Derau pita sempit (*narrowband noise*).
 Derau pita sempit hanya memperlihatkan konsentrasi energi di tempat tertentu saja dalam daerah frekuensi. Derau jenis ini dapat berasal dari gejala mekanik yang berulang, seperti halnya putaran *as* dari mesin yang frekuensinya hampir periodik. Mesin *internal combustion*, turbin dan *compressor* adalah contoh sumber derau pita sempit.



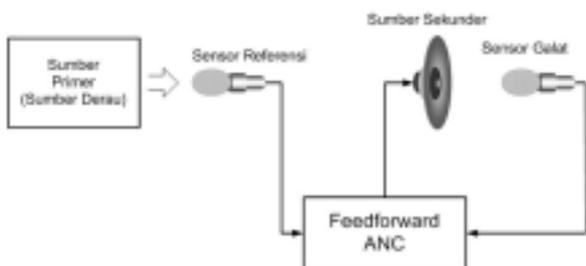
Gambar 1. Konsep Fisik dari Peredaman Sinyal Derau Secara Aktif.

Tinjauan Umum Sistem Kendali Derau aktif.

Ditinjau dari penempatan sensor referensi, sistem kendali derau aktif diklasifikasikan ke dalam dua struktur [1]

- Struktur umpanmaju, dimana pengukuran sinyal derau pada posisi sangat dekat dengan sumber derau.
- Struktur umpanbalik, dimana pengukuran sinyal derau pada posisi setelah sumber sekunder.

Sistem kendali derau aktif umpanmaju (*feedforward ANC systems*) menggunakan sinyal referensi untuk membangkitkan sinyal kendali. Kemudian sinyal kendali disalurkan ke aktuator (*loudspeaker*) untuk menghasilkan sinyal anti derau (dengan amplitudo yang sama dan fasa yang berlawanan dengan sinyal derau primer) dalam ruang akustik, sehingga sinyal anti derau dapat meredam sinyal derau primer yang tidak diinginkan. Struktur sistem kendali derau aktif umpanmaju dalam ruang terbuka diperlihatkan dalam Gambar 2.



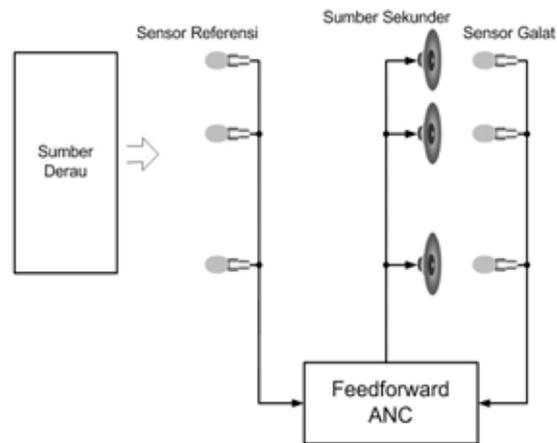
Gambar 2. Sistem ANC umpanmaju.

Sensor referensi (*reference microphone*) yang dekat dengan sumber derau, menangkap sinyal derau primer yang tidak diinginkan. Sensor galat (*error*

microphone) menangkap sisa derau primer (sinyal residu) yang akan diminimisasi dan digunakan untuk mengadaptasi bobot-bobot dari pengendali.

Ditinjau dari jumlah kanal kendali yang tersedia, sistem kendali derau aktif diklasifikasikan [1]

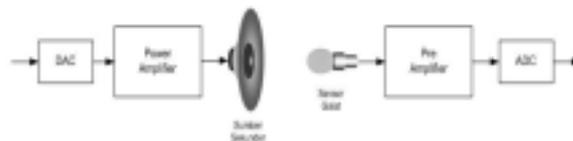
- Sistem kanal tunggal (*single-channel ANC*)
 Sistem kanal tunggal dibentuk oleh satu sensor acuan, satu sumber sekunder, dan satu sensor galat. Meski sederhana, sistem ini cukup efektif untuk mengurangi bising dalam media satu dimensi, seperti halnya bising dalam saluran udara.
- Sistem multi kanal (*multi-channel ANC*)
 Sistem multi kanal terdiri dari sejumlah sensor acuan, sumber sekunder dan sensor galat, yang diatur dalam susunan tertentu. Sistem kendali derau aktif umpan maju multi kanal diperlihatkan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Sistem ANC umpan maju multi kanal

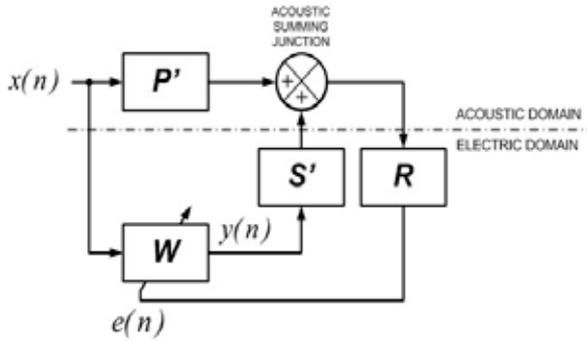
Efek Jalur Sekunder

Jalur sekunder dalam sistem kendali derau aktif diperlihatkan dalam Gambar 4.



Gambar 4. Jalur sekunder dalam sistem ANC.

Sinyal sisa derau elektrik diperoleh dari sinyal sisa derau akustik dengan menggunakan sensor galat (*error microphone*). Sinyal kendali atau sinyal anti derau diperoleh dari sinyal keluaran elektrik yang melalui aktuator sumber sekunder (*canceling loudspeaker*). Oleh karena itu, sejumlah fungsi alih harus dimasukkan untuk mengkompensasi hal-hal tersebut [1].

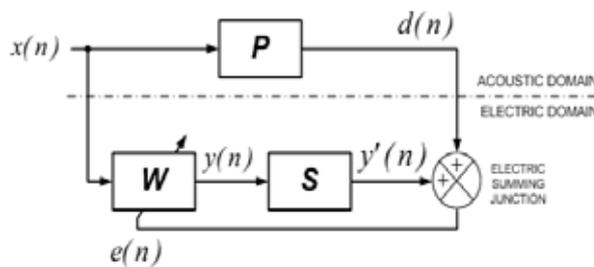


Gambar 5. Blok diagram efek jalur sekunder dalam sistem ANC.

Blok diagram efek jalur sekunder dalam implementasi sistem ANC diperlihatkan dalam Gambar 5. Pada Gambar 5, *Acoustic summing junction* merepresentasikan superposisi akustik dari keluaran aktuator sumber sekunder dan sinyal derau primer yang diterima oleh sensor galat.

Fungsi alih jalur primer P dari *reference microphone* ke *error microphone* dapat juga dipisahkan sebagai $P=P'.R$. Dimana P' merepresentasikan fungsi alih dari sistem akustik yang tidak diketahui (dari *reference microphone* ke *junction* penjumlah akustik).

Fungsi alih jalur sekunder S dapat dipisahkan ke dalam fungsi alih dua kaskade, yaitu: $S=S'.R$. S' merepresentasikan sistem DAC, *power amplifier*, *loudspeaker*, dan jalur akustik antara *loudspeaker* ke *junction* penjumlah. R merepresentasikan fungsi alih dari sistem *error microphone*, *pre-amplifier*, dan ADC. Identifikasi jalur sekunder, dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan model jalur sekunder S yang representatif, kemudian model jalur sekunder S diikutsertakan dalam penurunan algoritma adaptasi untuk pengendali (untuk propaasi balik sinyal residu ke jaringan pengendali). Blok diagram efek jalur sekunder yg disederhanakan diperlihatkan dalam Gambar 6.



Gambar 6. Blok diagram efek jalur sekunder yang disederhanakan.

Komputasi Maju JST Dalam Sistem ANC.

Persamaan komputasi maju untuk JST umpan maju dari jaringan pengendali dirumuskan dalam Persamaan (1)-(3)[2][3].

Jika sensor referensi sebanyak i dan $x_i(n-l)$ sinyal yang ditangkap oleh sensor referensi ke- i pada saat $n-l$, maka masukan JST umpan maju dirumuskan

$$y_i^0(n) = x_i(n-l) \quad 0 \leq l \leq L_1, \quad 0 \leq i \leq I-1 \quad (1)$$

dimana, L_1 menyatakan jumlah elemen dalam vektor masukan ke- i .

Untuk *layer* ke- m yang mempunyai neuron sebanyak j , matrik bobot masukan pada saat n dinyatakan sebagai $w_{ij}^m(n)$, maka nilai neuron ke- j dalam *layer* ke- m dirumuskan

$$s_j^m(n) = \sum_i w_{ij}^m(n) y_i^{m-1}(n) \quad (2)$$

Tiap-tiap neuron dalam *layer* ke- m mempunyai fungsi alih nonlinier. Keluaran dari *layer* ke- m pada saat n dirumuskan

$$y_j^m(n) = f(s_j^m(n)), \quad \leq m \leq M+1 \quad (3)$$

Persamaan komputasi maju untuk JST umpan maju dari jaringan model jalur sekunder dirumuskan dalam Persamaan (4)-(7).

Jika pengendali mempunyai keluaran sebanyak i dan $y_i(n-l)$ adalah sinyal kendali yang akan dikirim melalui jalur sekunder untuk menghasilkan sinyal anti derau, maka nilai neuron ke- j dalam *layer* pertama dari jaringan model jalur sekunder dirumuskan

$$t_j^1(n) = \sum_{i=0}^{L_2} h_{i,j,1}^1 y_i(n-l) \quad (4)$$

dengan $h_{i,j,1}^1$ nilai bobot neuron ke- j dalam *layer* pertama dari jaringan model jalur sekunder. Nilai bobot ini sudah diperoleh sebelumnya (hasil identifikasi jalur sekunder).

Keluaran *layer* pertama dari jaringan model jalur sekunder pada saat n dirumuskan

$$z_j^1(n) = f(t_j^1(n)) \quad (5)$$

nilai neuron ke- j dalam *layer* ke- p dari jaringan model jalur sekunder dirumuskan

$$t_j^p(n) = \sum_i h_{ij}^p(n) z_i^{p-1}(n-l) \quad (6)$$

dengan $h_{ij}^p(n)$ nilai bobot neuron ke- j dalam *layer* ke- p dari jaringan model jalur sekunder. Nilai bobot ini sudah diperoleh sebelumnya (hasil identifikasi jalur sekunder).

Keluaran dari *layer* ke- p dari jaringan model jalur sekunder pada saat n dirumuskan:

$$z_j^p(n) = f_j^p(t_j^p(n)), \quad 2 \leq p \leq P+1 \quad (7)$$

Dalam *junction* penjumlahan akustik, terjadi superposisi antara sinyal derau dengan sinyal anti derau yang dihasilkan oleh sumber sekunder, sehingga terjadi efek saling meniadakan. Sinyal derau hasil superposisi kedua sinyal tersebut dinamakan sinyal residu. Persamaan sinyal residu dirumuskan

$$e_k(n) = d_k(n) + z_k^{p+1}(n) \quad (8)$$

Struktur JST Diagonal Recurrent

Jaringan syaraf tiruan (JST) *recurrent* secara umum merupakan JST dua *layer* dengan umpan balik dari keluaran *layer* pertama ke masukan *layer* pertama. *Layer* pertama adalah *hidden (recurent) layer* yang tersusun atas neuron-neuron dengan fungsi alih nonlinier. *Layer* kedua adalah *output-layer* yang tersusun atas neuron-neuron dengan fungsi alih linier. *Delay* dalam koneksi *recurent* menyimpan nilai-nilai (informasi) dari step waktu sebelumnya, yang dapat digunakan pada step waktu sekarang. Hal ini menyebabkan JST *recurrent* mampu untuk mempelajari pola *temporal*. JST *recurrent* tidak memerlukan umpan balik eksternal yang melalui *tapped-delay-line*.

Neuron *self-recurrent* adalah neuron yang mempunyai umpan balik dari keluaran neuron itu sendiri. JST *recurrent* yang tersusun atas neuron-neuron *self-recurrent*, dinamakan sebagai JST *diagonal recurrent* (JSTDR). Jika dibandingkan dengan JST *fully-connected recurrent*, struktur JST DR lebih sederhana dan jumlah bobot yang digunakan lebih sedikit, sehingga beban komputasi menjadi lebih ringan.

Struktur JSTDR secara umum terdiri dari dua *layer*. *Layer* pertama adalah *hidden (recurent) layer*, yang mempunyai neuron-neuron dengan fungsi alih nonlinier. *Layer* kedua adalah *output layer*, yang mempunyai neuron-neuron dengan fungsi alih linier. Struktur JSTDR diperlihatkan dalam Gambar 7.

Jika sensor referensi sebanyak i dan $x_i(n)$ sinyal yang ditangkap oleh sensor referensi ke- i pada saat n , maka masukan JSTDR dirumuskan

$$y_i(n) = x_i(n-l_i), \quad 0 \leq l_i \leq L_i \quad (9)$$

dimana, L_i menyatakan jumlah elemen dalam vektor masukan ke- i .

Untuk *hidden layer* yang mempunyai neuron sebanyak j , matrik bobot masukan dan matrik bobot *recurrent* pada saat n masing-masing dinyatakan

sebagai $w_{ijl_1}(n)$ dan $w_j(n)$, maka nilai neuron ke- j dirumuskan:

$$s_j(n) = \left(\sum_i \sum_{l_1=0}^{L_i} w_{ijl_1}(n) y_i(n) \right) + w_j(n) y_j(n-1) \quad (10)$$

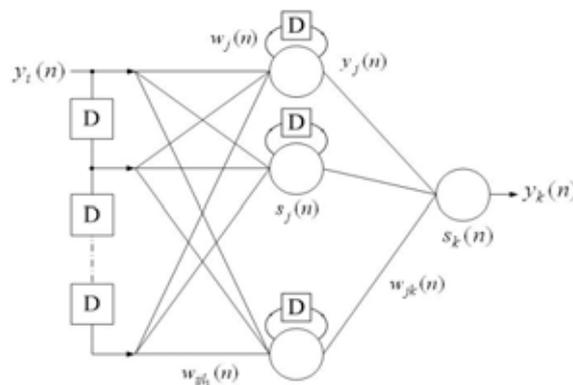
dimana $y_j(n-1)$ menyatakan koneksi *recurrent* dari neuron ke- j dalam *hidden layer*, dan $y_j(0)=0$.

Tiap-tiap neuron dalam *hidden layer* mempunyai fungsi alih nonlinier. Keluaran dari *hidden layer* pada saat n dirumuskan

$$y_j(n) = f(s_j(n)) \quad (11)$$

Untuk *output layer* yang mempunyai neuron sebanyak k dengan fungsi alih linier, matrik bobot keluaran $w_{jk}(n)$, maka keluaran dari *output layer* dirumuskan

$$y_k(n) = \sum_j w_{jk}(n) y_j(n) \quad (12)$$



Gambar 7. Struktur JST DR

METODE PENELITIAN

Metoda penelitian yang dilakukan pada penelitian ini adalah:

- o Studi literatur yang berhubungan dengan sistem kendali derau akustik secara aktif (Active Noise Control, ANC) dan sistem cerdas.
- o Pengembangan algoritma sistem kendali. Algoritma-algoritma yang dibahas meliputi: FIR (FX LMS mewakili sistem linier) dan JST *Diagonal recurrent* (algoritma non-linier)
- o Pembuatan program untuk pengambilan data (data primer dan data sekunder)
- o Pengambilan data yang dilakukan di Lab. ANC departemen Teknik Elektro ITB.
- o Pembuatan program simulasi untuk sistem kendali dan jalur sekunder.
- o Analisis hasil simulasi
- o Implementasi pada DSP 320C6701 EVM dan perangkat akuisisi data yang tersedia di laboratorium ANC LSKK (Laboratorium Sistem Kendali dan Komputer) ITB.
- o Analisis hasil percobaan.

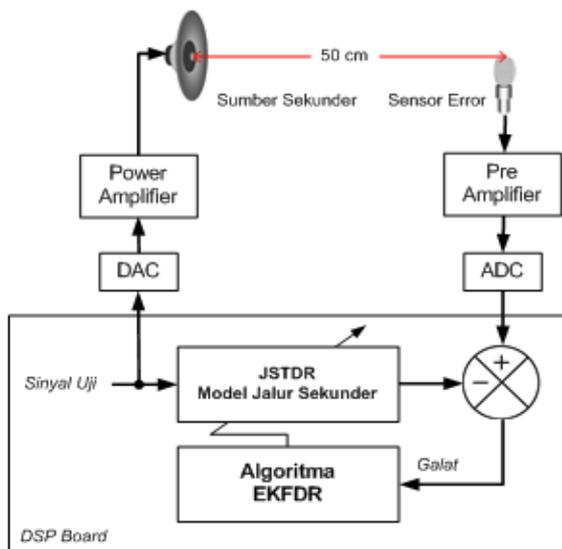
- o Membandingkan kinerja dari masing-masing algoritma.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Implementasi sistem kendali derau aktif dapat dibagi menjadi dua tahap utama, yaitu: proses identifikasi jalur sekunder dan proses pengendalian derau secara aktif.

Dalam penelitian ini, struktur yang digunakan baik untuk mengidentifikasi jalur sekunder maupun sebagai pengendali adalah Jaringan Syaraf Tiruan *Diagonal Recurrent* (JSTDR). Untuk mengestimasi bobot-bobot JSTDR digunakan algoritma *Extended Kalman Filter Diagonal Recurrent* (EKFDR).

Tolok ukur kinerja proses identifikasi adalah nilai *mean square error* (mse) kecil, dan *Signal to Error Ratio* (SER) besar. Tolok ukur kinerja proses kendali derau aktif adalah besarnya redaman pada frekuensi derau dan kemampuan untuk mengkompensasi nonlinieritas jalur sekunder pada saat proses kendali (redaman pada frekuensi harmonisa).



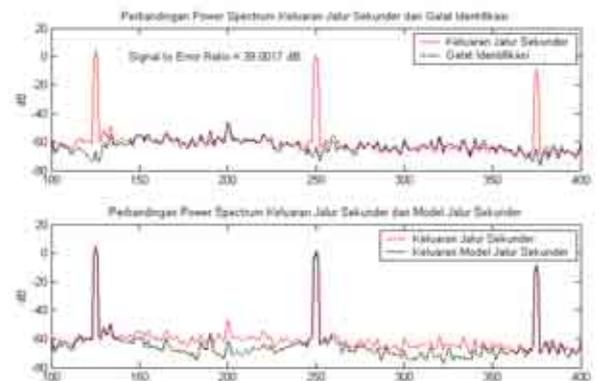
Gambar 8. Konfigurasi percobaan identifikasi jalur sekunder.

Untuk menguji kinerja dari struktur JSTDR (algoritma EKFDR), struktur yang digunakan sebagai pembandingan adalah JST umpan maju (algoritma EKF) dan struktur FIR (algoritma LMS). Perbandingan antara JSTDR (algoritma EKFDR) dengan struktur JST umpan maju (algoritma EKF), ditinjau dari banyaknya jumlah neuron yang digunakan dalam proses identifikasi jalur sekunder. **M** menyatakan jumlah *input neuron*, **N** menyatakan jumlah *hidden neuron*, dan **O** menyatakan jumlah *output neuron*.

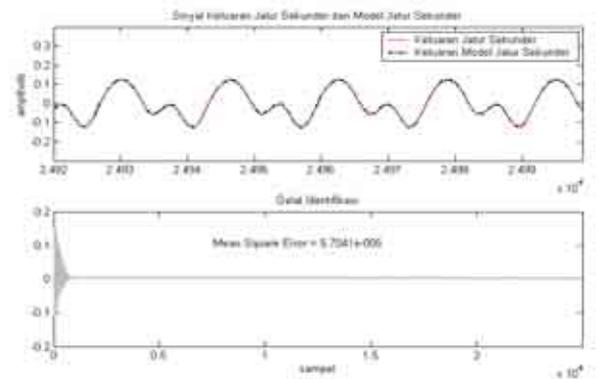
Perbandingan antara struktur JSTDR (algoritma EKFDR) dengan struktur FIR (algoritma LMS), ditinjau dari kemampuan untuk mengkompensasi nonlinieritas jalur sekunder pada saat proses kendali. Dalam percobaan ini, frekuensi sinyal eksitasi pada saat proses identifikasi adalah frekuensi derau (125 Hz), dan harmonisnya (250 Hz dan 375 Hz), dengan frekuensi sampling 2030 Hz. Perangkat yang digunakan dalam implementasi adalah DSP 320C6701 EVM dan perangkat akuisisi data yang tersedia di laboratorium ANC LSKK (Laboratorium Sistem Kendali dan Komputer) ITB.

Identifikasi Jalur Sekunder

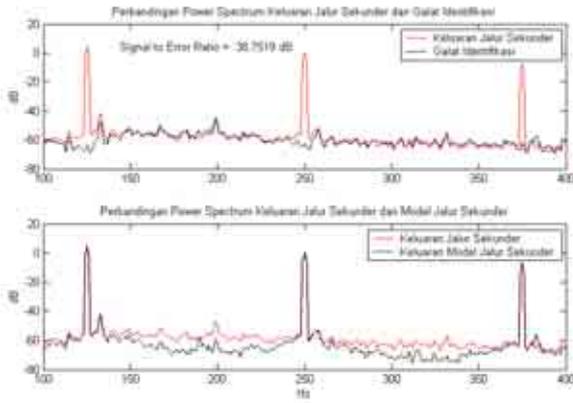
Identifikasi jalur sekunder dilakukan untuk mengkompensasi fungsi transfer dari peralatan-peralatan elektronik yang digunakan dan jalur akustik yang dilewati oleh sinyal derau. Dari hasil identifikasi diperoleh model jalur sekunder yang merupakan media propagasi balik sinyal residu ke jaringan pengendali. Sinyal eksitasi (sinyal uji) yang digunakan adalah sinyal sinusoidal 125 Hz (frekuensi sinyal derau primer yang akan diredam pada sistem kendali), beserta harmonisnya (250 Hz dan 375 Hz).



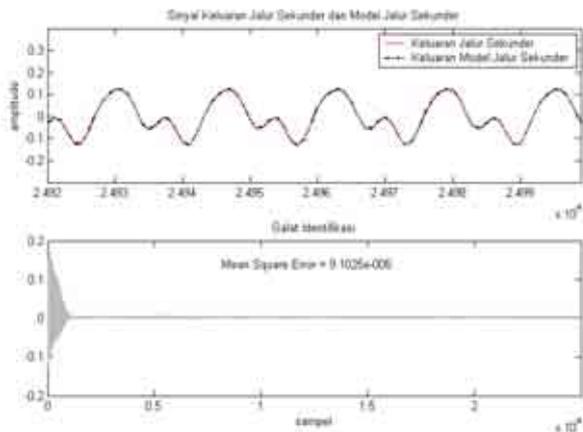
Gambar 9a. Plot power spectrum hasil identifikasi jalur sekunder menggunakan JST umpan maju (M=10, N=6, O=1).



Gambar 9b. Perkembangan sinyal hasil identifikasi jalur sekunder menggunakan JST umpan maju (M=10, N=6, O=1).



Gambar 10a. Plot power spectrum hasil identifikasi jalur sekunder menggunakan JSTDR (M=10, N=2, O=1).



Gambar 10b. Perkembangan sinyal hasil identifikasi jalur sekunder menggunakan JSTDR (M=10, N=2, O=1).

Tabel 1. Identifikasi jalur sekunder menggunakan JST umpan maju.

JST Umpan Maju (EKF)				
Konfigurasi Neuron			Signal to Error Ratio	Mean Square Error
M	N	O		
7	6	1	17.957 dB	0.0072
8	6	1	23.256 dB	0.0077
9	6	1	32.760 dB	9.6595e-005
10	6	1	39.002 dB	5.7041e-005

Tolok ukur keberhasilan identifikasi jalur sekunder ditunjukkan dengan menghitung *Signal to Error Ratio* (SER), yaitu dengan menganggap sinyal keluaran jalur sekunder sebagai sinyal yang diinginkan dan galat identifikasi pada saat *steady state* (tunak) sebagai sinyal *error*. *Signal to Error Ratio* (SER) dirumuskan

$$SER = 10(\log_{10}(\text{var}(s(n))) - \log_{10}(\text{var}(e(n)))) \quad (9)$$

dimana:

$s(n)$ = sinyal yang diinginkan.
 $e(n)$ = sinyal *error*.

Konfigurasi percobaan untuk identifikasi jalur sekunder diperlihatkan dalam Gambar 8.

Identifikasi Jalur Sekunder Menggunakan JST Umpan Maju

Salah satu plot data hasil percobaan identifikasi jalur sekunder menggunakan JST umpan maju (algoritma EKF), diperlihatkan pada Gambar 9.a dan 9.b. Data hasil percobaan identifikasi jalur sekunder menggunakan JST umpan maju (algoritma EKF) dirangkum dalam Tabel 1.

Identifikasi Jalur Sekunder Menggunakan JSTDR

Salah satu plot data hasil percobaan identifikasi jalur sekunder menggunakan JST DR (algoritma EKFD), diperlihatkan pada Gambar 10.a dan 10.b. Data hasil percobaan identifikasi jalur sekunder menggunakan JST umpan maju (algoritma EKF) dan JSTDR (algoritma EKFD) dirangkum dalam Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan antara JST umpan maju dan JSTDR dalam identifikasi jalur sekunder.

JST Umpan Maju (EKF)				
Konfigurasi Neuron			Signal to Error Ratio	Mean Square Error
M	N	O		
7	6	1	17.9574 dB	0.0072
8	6	1	23.2565 dB	0.0077
9	6	1	32.7605 dB	9.6595e-005
10	6	1	39.0017 dB	5.7041e-005
JST Diagonal Recurrent (EKFD)				
8	2	1	33.3415 dB	2.8098e-004
9	2	1	37.6240 dB	1.5541e-004
10	2	1	38.7519 dB	9.1025e-005

Dari Tabel 2, dengan tinjauan konfigurasi neuron, terlihat bahwa untuk mencapai nilai *Signal to Error* dan *Mean Square Error* yang sebanding, JST umpan maju (algoritma EKF) memerlukan jumlah neuron yang lebih banyak jika dibandingkan dengan JSTDR (algoritma EKFD).

Dapat disimpulkan bahwa dengan menggunakan JSTDR, jumlah neuron yang digunakan menjadi lebih sedikit. Sehingga diharapkan dapat mengurangi beban komputasi.

Sistem Kendali Derau Aktif

Sinyal derau yang digunakan mempunyai frekuensi 125 Hz. Frekuensi sampling yang digunakan adalah 2030 Hz. Kinerja pengendali dalam meredam sinyal derau, dilihat dari peredaman yang diperoleh pada frekuensi sinyal derau (125 Hz). Dengan menganggap bahwa sinyal *disturbance* sebagai sinyal derau dan

sinyal *error* sebagai sinyal residu, redaman dirumuskan:

$$\text{Redaman} = 10(\log_{10}(\text{var}(d(n))) - \log_{10}(\text{var}(e(n))))$$

dimana:

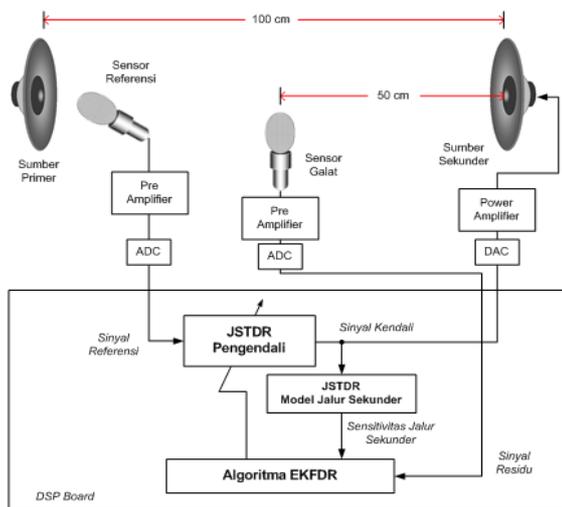
$d(n)$ = sinyal *disturbance*, dan

$e(n)$ = sinyal *error*.

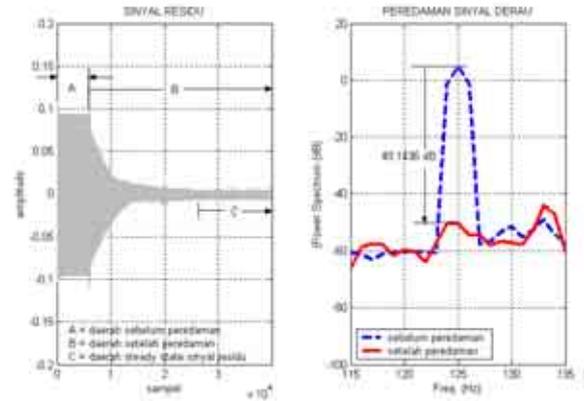
Kinerja pengendali dalam mengkompensasi nonlinieritas jalur sekunder, dilihat dari peredaman yang diperoleh pada frekuensi harmonisa yang dihasilkan oleh sumber sekunder (250 Hz dan 375 Hz). Nonlinieritas jalur sekunder (media yang dilewati oleh sinyal derau) ditandai dengan timbulnya frekuensi harmonisa pada sinyal keluaran jalur sekunder.

Sistem kendali derau aktif menggunakan JSTDR

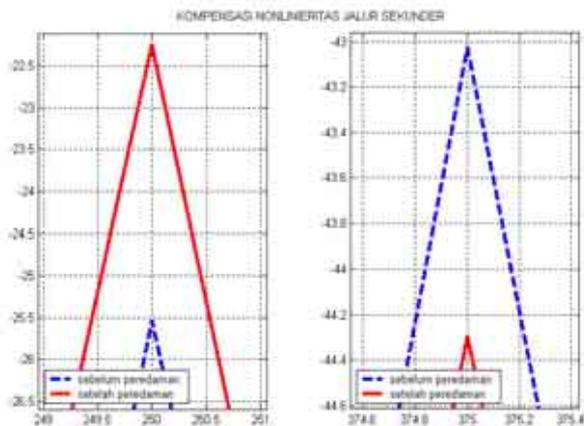
Konfigurasi percobaan untuk sistem kendali derau aktif diperlihatkan dalam Gambar 11.



Gambar 11. Konfigurasi percobaan sistem kendali derau aktif.



Gambar 12b. Perkembangan dan plot power spectrum sinyal residu (M=6, N=4, O=1).

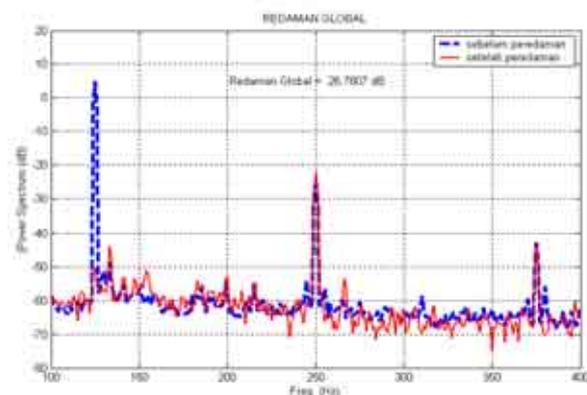


Gambar 12c. Plot power spectrum sinyal residu pada frek. harmonisa (M=6, N=4, O=1).

Salah satu plot data hasil percobaan sistem kendali derau aktif menggunakan JSTDR dengan algoritma EKFRD (konfigurasi neuron: M=6, N=4, O=1), diperlihatkan pada Gambar 12.a. - 12.c.

JSTDR (konfigurasi neuron: M=6, N=4, O=1), berhasil meredam sinyal derau (pada frekuensi 125 Hz) sebesar 49.1436 dB. Kompensasi terhadap nonlinieritas jalur sekunder; pada frekuensi harmonisa 250 Hz *power spectrum* sinyal residu mengalami peningkatan sebesar 3.5049 dB, pada frekuensi harmonisa 375 Hz terjadi peredaman sebesar 0.8319 dB, dan redaman global sebesar 26.7807 dB. Rangkuman data hasil percobaan implementasi sistem kendali derau aktif menggunakan pengendali JSTDR (algoritma FX-EKFRD) pada ruang terbuka disusun dalam Tabel 3.

Dari tabel 3. secara umum dapat disimpulkan bahwa dengan menambah jumlah neuron, dapat meningkatkan kinerja pengendali JSTDR, baik dalam meredam derau maupun mengkompensasi nonlinieritas jalur sekunder. Penambahan *input neuron*,



Gambar 12a. Plot power spectrum sinyal residu (M=6, N=4, O=1).

berdampak pada peningkatan kemampuan pengendali dalam meredam derau. Penambahan *hidden neuron*, berdampak pada peningkatan kemampuan pengendali dalam mengkompensasi nonlinieritas jalur sekunder.

Tabel 3. Rangkuman Data Hasil Percobaan Implementasi Sistem ANC menggunakan JSTDR (algoritma EKFDNR).

JSTDR (algoritma EKFDNR)							
Konfigurasi Neuron			REDAMAN (dB)				
M	N	O	125 Hz	250 Hz	375 Hz	GLOBAL	
2	12	1	20.0599	4.7414	0.2015	16.6802	
4	12	1	31.5207	5.7817	0.5906	19.9718	
6	4	1	49.1436	-3.5049	0.8319	26.7807	
6	6	1	50.6110	-2.8119	1.6977	27.1518	
6	8	1	53.3589	-2.6567	3.2630	27.5703	
8	4	1	49.4639	-3.1603	4.9296	27.4074	
8	6	1	52.6825	-2.7709	5.4035	27.2758	
8	8	1	53.8102	-2.6506	2.5662	27.3794	
10	4	1	55.6969	-2.9851	3.2684	27.3603	
10	6	1	55.8448	-2.8379	2.5983	27.3254	
10	8	1	56.7602	-2.7525	3.2055	27.2251	

Perbandingan Kinerja Filter FIR dan JSTDR

Pengendali linier yang digunakan sebagai pembanding dalam mengkompensasi nonlinieritas jalur sekunder adalah filter FIR (algoritma FX-LMS), dengan jumlah koefisien sebanyak 80. Dalam penelitian ini tidak dibahas mengenai filter FIR dan algoritma FX-LMS. Untuk pengambilan data pembanding, digunakan filter FIR dan algoritma FX-LMS dari dokumentasi yang sudah tersedia di laboratorium ANC LSKK ITB. Dari hasil percobaan menggunakan filter FIR (algoritma FX-LMS) diambil data yang dianggap paling baik, dengan tinjauan redaman pada frekuensi derau dan pada frekuensi harmonisa.

Filter FIR (jumlah koefisien = 80) dengan algoritma FX-LMS, berhasil meredam sinyal derau (125 Hz) sebesar 53.6824 dB. Kompensasi terhadap nonlinieritas jalur sekunder pada frekuensi harmonisa 250 Hz *power spectrum* sinyal residu mengalami peningkatan sebesar 8.8551 dB, pada frekuensi harmonisa 375 Hz mengalami peningkatan sebesar 3.891 dB, dan redaman global sebesar 24.5821 dB.

Dari semua data hasil percobaan terlihat bahwa baik pengendali FIR (algoritma FX-LMS) maupun JSTDR (algoritma FX-EKFDNR) dapat meredam sinyal derau secara signifikan.

Nonlinieritas sumber sekunder yang ditandai dengan munculnya harmonisa pada 250 Hz dan 375 Hz, pengendali JSTDR menunjukkan kinerja yang lebih baik dari Filter FIR (dengan peningkatan redaman berkisar antara 5,3502 dB sampai 14,6369 dB pada frekuensi 250 Hz, dan 4.0910 dB sampai 9.2945 dB pada frekuensi 375 Hz).

Tabel 4. Rangkuman Data Hasil Percobaan Implementasi Sistem ANC menggunakan Filter FIR (algoritma FX-LMS).

Filter FIR (algoritma FX-LMS)						
Koefisien Filter		REDAMAN (dB)				
Delay	Output	125 Hz	250 Hz	375 Hz	GLOBAL	
Tapped						
Input						
80	1	53.6824	-8.8551	-3.891	24.5821	

KESIMPULAN

Berdasarkan data hasil percobaan implementasi sistem kendali derau aktif pada ruang terbuka menggunakan JSTDR (algoritma EKFDNR), dapat disusun kesimpulan sebagai berikut:

1. Penggunaan struktur JSTDR dapat mengurangi jumlah neuron dalam struktur JST.
2. Penambahan *input neuron* berdampak pada peningkatan kinerja dalam hal pencapaian redaman pada frekuensi derau.
3. Penambahan *hidden neuron* berdampak pada peningkatan kinerja dalam hal mengkompensasi nonlinieritas jalur sekunder.
4. Pengendali JSTDR (algoritma EKFDNR), memperlihatkan kinerja yang lebih baik dalam mengkompensasi nonlinieritas jalur sekunder jika dibandingkan dengan pengendali linier.

DAFTAR PUSTKA

[1] S. M. Kuo and D. R. Morgan, *Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations*. New York: Wiley, 1996.

[2] M. Bouchard, B. Paillard, and C. T. Le Dinh, "Improved Training of Neural Networks for Nonlinear Active Control of Noise and Vibration", *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 10, 1999, pp. 391-401

[3] M. Bouchard, "New Recursive-Least-Squares Algorithms for Nonlinear Active Control of Sound and Vibration using Neural Networks", *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 12, 2001, pp. 135-147

[4] S. J. Elliot, *Signal Processing for Active Control*. Academic Press, 2001.

- [5] S. M. Kuo and D. R. Morgan, "Active Noise Control Systems: A Tutorial Review". *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 87, 1999, pp. 943-971.
- [6] C. C. Ku and K. Y. Lee, "Diagonal Recurrent Neural Networks for Dynamic Systems Control", *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 6, 1995, pp. 144-155.
- [7] S. D. Snyder and N. Tanaka, "Active Control of Vibration using a Neural Network", *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 6, 1995, pp. 819-830.
- [8] Simon Haykin, *Neural Networks*, Prentice Hall, New Jersey, 1999.
- [9] Jang, J.-S. R., C.-T. Sun, and E Mizutami. *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*. Prentice Hall Inc., 1997.
- [10] Jang, J.-S. R. and C.-T. Sun. "Neuro-Fuzzy Modeling and Control". *Proceedings of the IEEE*, March 1995.