

ANALISIS PENGURANGAN DERAU PADA SINYAL *LOUDSPEAKER* MENGGUNAKAN FILTER ADAPTIF KALMAN

Fitriani Christhien Simbolon, Arman Sani

Konsentrasi Teknik Telekomunikasi, Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara (USU)
Jl. Almamater, Kampus USU Medan 20155 INDONESIA
e-mail: fitrianchristhiens@yahoo.co.id

Abstrak

Derau acak pada *loudspeaker* dapat menyebabkan suara yang terdengar tidak jernih. Untuk itu diperlukan suatu metode supaya pola derau yang acak dapat dikenali dan ditekan seminimal mungkin. Metode yang digunakan pada *paper* adalah metode penapisan derau pada sinyal *loudspeaker* menggunakan filter adaptif Kalman. Sinyal *loudspeaker* yang mengandung derau diumpamakan dengan sinyal suara rusak yang diperoleh dari penambahan derau Gaussian acak dengan sinyal suara murni hasil rekaman. Pada *paper* dibahas analisis pengaruh variasi nilai parameter filter adaptif Kalman, yaitu orde filter, kovarians derau proses (Q), dan kovarians derau pengukuran (R) terhadap nilai *Mean Square Error* (MSE) dan nilai *Signal to Noise Ratio* (SNR) output. Dengan diperolehnya nilai MSE yang minimum dan nilai SNR output yang maksimal dari simulasi Matlab menunjukkan bahwa filter adaptif Kalman mampu bekerja optimum untuk mengenali dan menekan derau pada sinyal suara yang rusak. Sampel sinyal suara yang ditapis adalah pengucapan kata “makan” dan “Jakarta”. Dari percobaan kata “makan” diperoleh bahwa filter bekerja optimal dengan $Q=0.00001$ dan $R=0.1$ pada orde 2 dengan hasil $MSE=7.4352 \times 10^{-5}$ dan SNR output= 25.8916 dB. Dari percobaan kata “Jakarta” diperoleh bahwa filter bekerja optimal dengan $Q=0.00001$ dan $R=0.1$ pada orde 1 dengan hasil $MSE=2.8164 \times 10^{-5}$ dan SNR output=27.2114 dB. Dari percobaan penapisan dengan amplitudo derau Gaussian yang semakin besar diperoleh bahwa semakin besar amplitudo derau Gaussian maka semakin sulit filter adaptif Kalman mengenali dan menekan derau tersebut.

Kata Kunci: filter adaptif Kalman, sinyal *loudspeaker*

1. Pendahuluan

Loudspeaker berfungsi sebagai *transduser* untuk mengubah sinyal listrik menjadi sinyal suara[1]. Ketika *loudspeaker* mengubah sinyal listrik ke sinyal suara, ada derau (*noise*) yang mengganggu sinyal suara yang dihasilkan *loudspeaker*, sehingga suara yang terdengar dari *loudspeaker* tidak jernih (kualitas suara berkurang). Pola derau yang muncul pada sinyal *loudspeaker* selalu berubah-ubah sepanjang waktu (bersifat acak), sehingga diperlukan suatu metode yang mampu beradaptasi untuk mengenali dan menekan derau yang bersifat acak tersebut yaitu proses penapisan adaptif[2].

Penapisan adaptif adalah penapisan yang parameter filternya diatur sendiri oleh filter berdasarkan karakteristik sinyal yang diterimanya, sehingga filter hanya akan meloloskan atau tidak meloloskan sinyal sesuai dengan kriteria yang diinginkan[3]. Algoritma

filter adaptif yang digunakan adalah filter adaptif Kalman yang terkenal karena kinerjanya sangat baik untuk mengenali derau. Oleh karena itu, pada *paper* ini dibahas analisis terhadap hasil simulasi Matlab dari filter adaptif Kalman dalam mengidentifikasi dan mengurangi derau pada sinyal *loudspeaker*.

2. Filter Adaptif Kalman

Derau merupakan sinyal yang tidak diinginkan yang dapat menyebabkan *error* transmisi dan mengganggu proses komunikasi [1,4]. Keberhasilan dari suatu metode pemrosesan derau tergantung pada kemampuannya untuk mengenal karakteristik dan model proses derau, dan menggunakan karakteristik derau tersebut untuk membedakan sinyal dari derau[5].

Salah satu metode pemrosesan derau adalah penapisan. Penapisan sinyal diperlukan untuk memisahkan sinyal yang dikehendaki dari sinyal

lain yang tidak dikehendaki (derau) dan juga untuk memperkecil pengaruh derau atau interferensi pada sinyal yang dikehendaki tersebut[1]. Metode penapisan yang lebih efisien digunakan adalah filter adaptif[2]. Filter adaptif menanggapi dengan mengubah parameter di dalamnya. Perlakuan ini mengarah kepada koefisien filter adaptif yang berubah-ubah setiap waktu dan diperbaharui secara otomatis oleh algoritma adaptif[3].

Algoritma filter adaptif yang digunakan adalah algoritma filter adaptif Kalman. Filter adaptif Kalman terkenal karena kinerjanya optimal dalam mengidentifikasi dan meminimalkan derau. Sifat *rekursif* merupakan salah satu fitur yang sangat menarik dari filter Kalman, ini membuat implementasi yang dirancang beroperasi langsung pada semua data untuk setiap prediksi[6].

Ringkasan algoritma filter adaptif Kalman ditunjukkan dalam persamaan berikut ini[7]:

Nilai yang diberikan:

$x[n]$: vektor keadaan pada waktu n

$y[n]$: vektor pengamatan pada waktu n

$w[n]$: vektor derau proses

$Q_w(n)$: $Q(n)$ atau matriks kovarians dari vektor derau proses

$v[n]$: vektor derau pengukuran

$Q_v(n)$: $R(n)$ atau matriks kovarians dari vektor derau pengukuran

$A(n-1,n)$: matriks transisi keadaan dari waktu $n-1$ sampai n

$C(n)$: matriks pengukuran pada waktu n

Persamaan keadaan:

$$x[n]=A(n-1,n)x[n-1]+w[n] \quad (1)$$

Persamaan pengamatan :

$$y[n]=C(n)x[n]+v[n] \quad (2)$$

Proses inisialisasi:

Perkiraan inisial :

$$\hat{x}[0|0]=E\{x[0]\}$$

Matriks kovarians error untuk perkiraan

$\hat{x}[0|0]$:

$$P(0|0)=E\{x[0]x^H[0]\}$$

Perhitungan:

Untuk $n = 1, 2, \dots$, menghitung semua persamaan secara berurutan, yaitu:

$$\hat{x}[n|n-1]=A(n-1,n)\hat{x}[n-1|n-1] \quad (3)$$

$$P(n|n-1)=A(n-1,n)P(n-1|n-1)A^H(n-1,n)+Q_w(n) \quad (4)$$

Gain filter :

$$K(n)=P(n|n-1)C^H(n)[C(n)P(n|n-1)+C^H(n)+Q_v(n)]^{-1} \quad (5)$$

Untuk *estimator*:

perkiraan terbaik pada waktu n adalah dengan mengadakan semua pengamatan sampai pada waktu $n-1$ dengan persamaan sebagai berikut:

$$\hat{x}[n|n]=\hat{x}[n|n-1]+K(n)[y[n]-C(n)\hat{x}[n|n-1]] \quad (6)$$

Matriks kovarians error :

$$P(n|n)=[I-K(n)C(n)]P(n|n-1) \quad (7)$$

Keberhasilan suatu proses pengurangan derau menggunakan filter adaptif Kalman dapat ditentukan berdasarkan kualitas suara yang dihasilkan, *Mean Square Error* (SNR), dan *Signal to Noise Ratio* (SNR) output.

Mean Square Error (MSE) merupakan rata-rata kuadrat dari perbedaan antara sinyal asli (d) dengan sinyal yang dihasilkan setelah proses pengurangan derau menggunakan filter adaptif Kalman dilakukan (y). Filter adaptif Kalman bertujuan untuk meminimalisasikan nilai MSE[2]. Untuk menentukan nilai MSE digunakan persamaan 8[2]:

$$MSE=E\left[\sum_m(d-y)^2\right] \quad (8)$$

Signal to Noise Ratio (SNR) merupakan perbandingan antara daya sinyal asli dan daya derau. Filter adaptif Kalman bertujuan untuk memaksimalkan nilai SNR output. Secara matematis dapat dinyatakan dalam persamaan 9 dan 10[4]:

$$SNR_{input}(dB)=10*\log_{10}\left(\frac{\text{daya sinyal input}}{\text{daya noise input}}\right)^2 \quad (9)$$

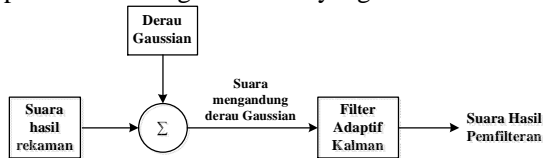
$$SNR_{output}(dB)=10*\log_{10}\left(\frac{\text{daya sinyal output}}{\text{daya noise output}}\right)^2 \quad (10)$$

Beberapa parameter dari filter adaptif Kalman yang mempengaruhi nilai MSE dan SNR pada proses pengurangan derau menggunakan filter adaptif Kalman, yaitu orde filter, kovarians derau proses (Q), dan kovarians derau pengukuran (R). Penambahan orde dari sistem adaptif akan mempengaruhi sistem untuk menghasilkan MSE minimum dan SNR output semakin besar. Pemilihan nilai Q sebaiknya bernilai sangat kecil sedangkan pemilihan nilai R sebaiknya bernilai lebih besar, dengan tujuan agar pengukuran lebih adaptif untuk menghasilkan nilai MSE minimum dan nilai SNR output yang semakin besar dibandingkan nilai SNR input. Hal inilah yang menunjukkan bahwa filter adaptif Kalman bekerja dengan optimal dalam proses pengurangan derau[6].

3. Metode Penelitian

Gambaran umum atau model dari sistem penapisan sinyal suara rusak yang digunakan

dalam simulasi ditunjukkan Gambar 1. Suara hasil rekaman dirusak dengan penambahan derau Gaussian sehingga diperoleh sinyal suara yang rusak (suara yang mengandung derau Gaussian). Sinyal suara yang rusak ini dijadikan sebagai input filter adaptif Kalman. Filter adaptif Kalman akan menapis derau Gaussian dari sinyal suara yang rusak sehingga diperoleh sinyal suara hasil pemfilteran dengan kualitas yang lebih baik.

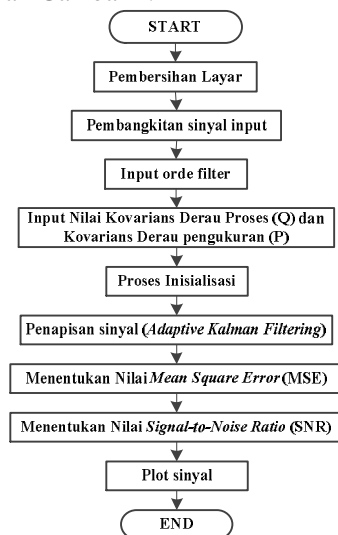


Gambar 1. Model sistem penapisan.

Kriteria untuk perencanaan simulasi filter adaptif Kalman adalah sebagai berikut:

- Program dirancang dengan menggunakan *software* Matlab 7.13 (release 2011b).
- Sinyal input filter adalah sinyal rusak yang diperoleh dari sinyal suara yang direkam (pengucapan kata “makan” dan kata “Jakarta”) dan dengan sengaja dirusak menggunakan penambahan derau Gaussian dengan amplitudo yang di-set secara acak.
- Jenis file suara adalah bentuk file *.wav.
- Orde filter diatur mulai orde 1 sampai 10.
- Nilai Q dan R divariasikan mulai dari 0.1; 0.01; 0.001; 0.0001; dan 0.00001.
- Parameter yang akan dianalisa dari hasil penapisan adalah nilai MSE dan SNR output.

Diagram alir untuk simulasi pengurangan derau menggunakan filter adaptif Kalman ditunjukkan Gambar 2.



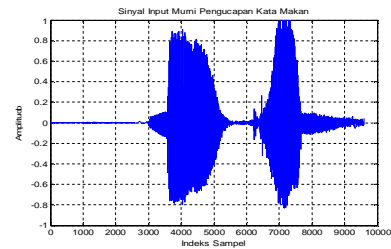
Gambar 2. Diagram alir proses pengurangan derau menggunakan filter adaptif Kalman.

4. Hasil dan Analisis

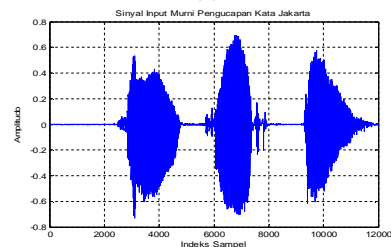
Dari hasil proses perekaman suara dan simulasi pemfilteran sinyal suara rusak menggunakan filter adaptif Kalman dilakukan analisis terhadap nilai MSE dan SNR output.

4.1 Grafik Sinyal Input

Dari proses perekaman suara yang dilakukan menggunakan program Matlab diperoleh grafik dari sinyal suara murni yang ditunjukkan Gambar 4. Sinyal suara murni ini merupakan sinyal suara hasil perekaman suara pada frekuensi sampling 8000 Hz, yaitu pengucapan kata “makan” berdurasi 1,2 detik (Gambar 4(a)) dan pengucapan kata “Jakarta” berdurasi 1,5 detik (Gambar 4(b)) yang sudah ditampilkan ulang untuk masing-masing titik sampel. Sinyal suara murni ini yang akan sengaja dirusak dengan penambahan sinyal derau acak Gaussian.

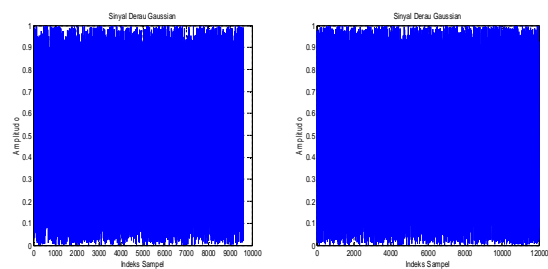


(a)



(b)

Gambar 4. Grafik sinyal suara murni untuk: (a) kata “makan” dan (b) kata “Jakarta”.



(a)

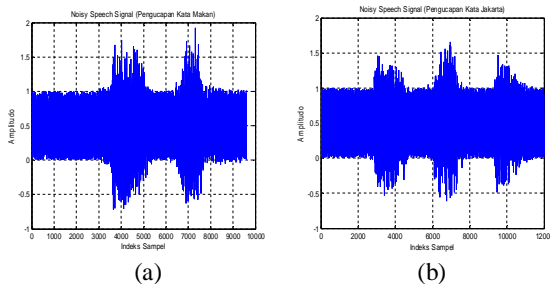
(b)

Gambar 5. Grafik sinyal derau acak Gaussian untuk (a) kata “makan”, dan (b) kata “Jakarta”.

Tampilan grafik pada Gambar 5 merupakan grafik dari sinyal derau acak Gaussian yang

sengaja ditambahkan ke sinyal suara murni pengucapan kata “makan” (Gambar 5(a)) dan kata ”Jakarta” (Gambar 5(b)). Sinyal derau acak Gaussian ini dianggap sebagai sinyal derau yang terdapat pada *loudspeaker*.

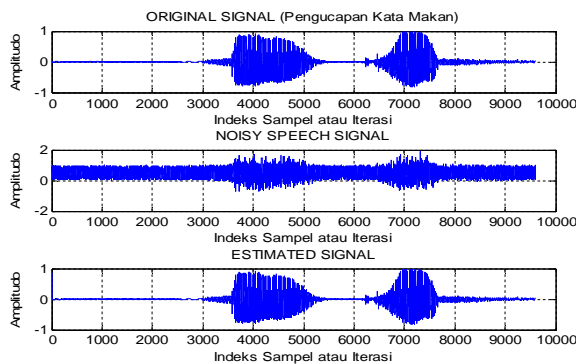
Grafik dari sinyal suara murni yang sengaja dirusak dengan penambahan sinyal derau acak Gaussian ditunjukkan pada Gambar 6. Sinyal ini disebut dengan sinyal suara pengucapan kata “makan” (Gambar 6(a)) dan kata “Jakarta” (Gambar 6(b)) yang mengandung derau (*noisy speech signal*) yang merupakan sinyal input untuk filter adaptif Kalman yang akan mengalami proses pengurangan derau.



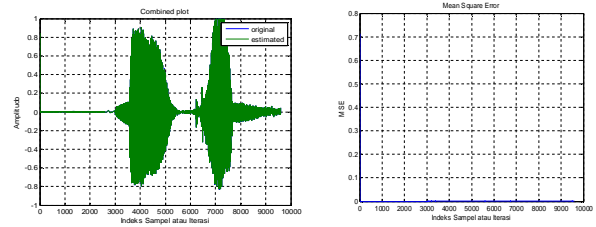
Gambar 6. Grafik sinyal suara yang mengandung derau (a) kata “makan”, dan (b) kata “Jakarta”.

4.2 Grafik Hasil Pemfilteran

Dari proses simulasi pengurangan derau menggunakan filter adaptif Kalman dengan orde filter 1, nilai Q dan R yang bervariasi mulai dari 0.1, 0.001, 0.0001, 0.00001 diperoleh grafik pemfilteran yang bervariasi, untuk itu dipilih beberapa tampilan grafik sebagai perwakilan. Grafik yang dipilih untuk mewakili hasil pengurangan derau menggunakan filter adaptif Kalman dengan nilai $Q = 0.00001$ dan $R = 0.1$ untuk kata “makan” pada orde 2 ditunjukkan Gambar 7 dan untuk kata “Jakarta” pada orde 1 ditunjukkan Gambar 8.

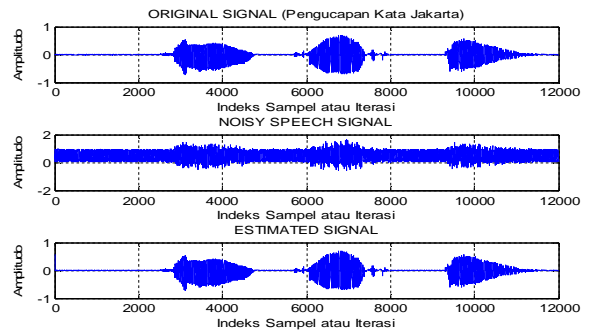


(a)

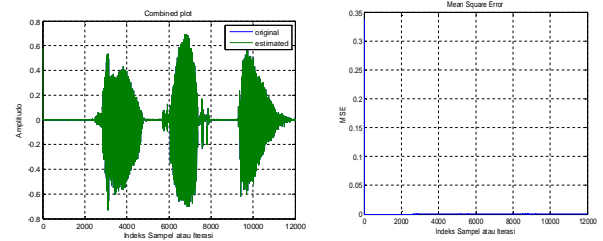


(b) (c)

Gambar 7. Hasil simulasi. (a) Sinyal suara murni, sinyal input filter yang mengandung derau, dan sinyal output dari kata ”makan”. (b) Perbandingan kurva sinyal suara murni dengan kurva sinyal output. (c) Kurva MSE.



(a)



(b) (c)

Gambar 8. Hasil simulasi. (a) Sinyal suara murni, sinyal input filter yang mengandung derau, dan sinyal output dari kata”Jakarta”. (b) Perbandingan kurva sinyal suara murni dengan kurva sinyal output. (c) Kurva MSE.

Dari hasil simulasi dapat dianalisis beberapa hal sebagai berikut :

- a. Dari tampilan grafik-grafik tersebut diperoleh bahwa pada orde 1 filter adaptif Kalman sudah mampu dengan optimal menapis derau dari sinyal suara rusak.
- b. Dari grafik-grafik perbandingan sinyal suara murni dan sinyal output filter diperoleh bahwa apabila nilai Q yang ditentukan semakin kecil dan nilai R yang ditentukan semakin besar, maka grafik sinyal output filter (*estimated signal*) hampir menyerupai

bentuk grafik sinyal suara murni (*original signal*).

- c. Dari grafik-grafik MSE diperoleh bahwa apabila nilai Q yang ditentukan semakin kecil dan nilai R yang ditentukan semakin besar, maka nilai MSE yang dihasilkan semakin kecil.

4.3 Nilai MSE dan SNR

Dari proses simulasi pengurangan derau dari pengucapan kata "makan" dan kata "Jakarta" menggunakan filter adaptif Kalman dengan orde filter mulai dari orde 1 sampai 10, nilai Q dan R yang bervariasi mulai dari 0.1, 0.001, 0.0001, 0.00001 dapat diketahui hubungan antara orde filter, nilai Q dan R terhadap hasil pengurangan derau (ditinjau dari nilai MSE dan SNR). Dari hasil simulasi, nilai MSE minimum dan nilai SNR output maksimum diperoleh dari filter dengan nilai Q=0.00001 dan R=0.1. Hasil ini ditunjukkan dalam tabel nilai MSE dan SNR untuk pengucapan kata "makan" pada Tabel 1 dan kata "Jakarta" pada Tabel 2. Dengan keterangan bahwa e-005 artinya dikali 10⁻⁵.

Tabel 1. Nilai MSE dan SNR (kata "makan")

Q	R	Orde filter	MSE	SNR input (dB)	SNR output (dB)
0.00001	0.1	1	7.4353e-005	-10.6520	25.8915
		2	7.4352e-005	-10.6520	25.8916
		3	7.4379e-005	-10.6520	25.8899
		4	7.4461e-005	-10.6520	25.8852
		5	7.4481e-005	-10.6520	25.8840
		6	7.4484e-005	-10.6520	25.8838
		7	7.4506e-005	-10.6520	25.8826
		8	7.4517e-005	-10.6520	25.8819
		9	7.4519e-005	-10.6520	25.8818
		10	7.4519e-005	-10.6520	25.8818

Tabel 2. Nilai MSE dan SNR (kata "Jakarta")

Q	R	Orde filter	MSE	SNR input (dB)	SNR output (dB)
0.00001	0.1	1	2.8164e-005	-13.5203	27.2114
		2	2.8172e-005	-13.5203	27.2101
		3	2.8171e-005	-13.5203	27.2103
		4	2.8176e-005	-13.5203	27.2094
		5	2.8188e-005	-13.5203	27.2077
		6	2.8197e-005	-13.5203	27.2062
		7	2.8202e-005	-13.5203	27.2056
		8	2.8203e-005	-13.5203	27.2054
		9	2.8204e-005	-13.5203	27.2052
		10	2.8205e-005	-13.5203	27.2051

Dari hasil simulasi dapat dianalisis beberapa hal sebagai berikut:

- a. Semakin kecil nilai Q dan semakin besar nilai R yang digunakan, maka diperoleh nilai MSE semakin kecil dan nilai SNR output semakin besar (jika dibandingkan dengan nilai SNR

input). Hal ini berarti bahwa filter adaptif Kalman semakin optimal mengidentifikasi dan mengurangi derau Gaussian dari sinyal suara rusak.

- b. Dari Tabel 1 diperoleh bahwa semakin besar orde filter dengan Q dan R yang sama, maka nilai MSE yang dihasilkan semakin besar dan nilai SNR output yang dihasilkan semakin kecil, kecuali untuk orde 2. Hal ini berbeda dengan teori bahwa semakin besar orde filter, maka nilai MSE semakin kecil dan semakin besar orde filter, maka nilai SNR semakin besar. Oleh karena itu, filter adaptif Kalman bekerja optimal pada orde 2 dengan nilai Q=0.00001 dan R=0.1, dimana diperoleh nilai MSE=7.4352x10⁻⁵ dan SNR output= 25.8916 dB..
- c. Dari Tabel 2 diperoleh bahwa semakin besar orde filter dengan Q dan R yang sama, maka nilai MSE yang dihasilkan semakin besar dan nilai SNR output yang dihasilkan semakin kecil. Hal ini berbeda dengan teori bahwa semakin besar orde filter, maka nilai MSE semakin kecil dan semakin besar orde filter, maka nilai SNR semakin besar. Oleh karena itu, filter adaptif Kalman bekerja optimal pada orde 1 dengan nilai Q=0.00001 dan R=0.1, dimana diperoleh nilai MSE= 2.8164x10⁻⁵ dan SNR output= 27.2114 dB.

Pengujian dilakukan kembali untuk pemfilteran sinyal suara pengucapan kata "makan" dan kata "Jakarta" yang sengaja dirusak dengan penambahan derau Gaussian yang amplitudo deraunya semakin besar. Hasil nilai MSE dan SNR dari pemfilteran sinyal suara kata "makan" menggunakan filter adaptif Kalman pada orde 2 dengan nilai Q=0.00001, nilai R=0.1, dan amplitudo deraunya semakin besar ditunjukkan pada Tabel 3. Hasil nilai MSE dan SNR dari pemfilteran sinyal suara kata "Jakarta" menggunakan filter adaptif Kalman pada orde 1 dengan nilai Q=0.00001, nilai R=0.1, dan amplitudo deraunya semakin besar ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 3. Nilai MSE dan SNR dengan amplitudo derau yang berubah (kata "makan")

Q	R	Orde Filter	Amplitudo Derau Gaussian	MSE	SNR input (dB)	SNR output (dB)
0.00001	0.1	2	rand(N)	7.4352e-005	-10.6520	25.8916
			2*rand(N)	3.1168e-006	-16.6076	39.6674
			3*rand(N)	2.9579e-004	-20.1321	19.8946
			4*rand(N)	4.2478e-005	-22.6343	28.3228
			5*rand(N)	0.0016	-24.6144	12.5962

Tabel 4. Nilai MSE dan SNR dengan amplitudo derau yang berubah (kata "Jakarta")

Q	R	Orde Filter	Amplitudo Derau Gaussian	MSE	SNR input (dB)	SNR output (dB)
0.00001	0.1	1	rand(N)	2.8164e-005	-13.5203	27.2114
			2*rand(N)	7.3217e-008	-19.5884	53.0622
			3*rand(N)	7.2273e-004	-23.1046	13.1186
			4*rand(N)	9.6448e-005	-25.5699	21.8654
			5*rand(N)	3.9178e-005	-27.4989	25.7778

Dari hasil simulasi dapat dianalisis beberapa hal sebagai berikut:

- Filter adaptif Kalman masih tetap dapat bekerja dengan optimal untuk mengidentifikasi dan mengenali derau walaupun amplitudo derau Gaussian yang digunakan semakin besar.
- Dari Tabel 3 diperoleh bahwa filter adaptif Kalman bekerja dengan optimal untuk amplitudo derau Gaussian yang dinaikkan dua kali amplitudo derau Gaussian acak, dimana diperoleh $MSE=3.1168 \times 10^{-6}$ dan $SNR\ output=39.6674\ dB$.
- Dari Tabel diperoleh bahwa filter adaptif Kalman bekerja dengan optimal untuk amplitudo derau Gaussian yang dinaikkan dua kali amplitudo derau Gaussian acak, dimana diperoleh $MSE=7.3217 \times 10^{-8}$ dan $SNR\ output=53.0622\ dB$.

5. Kesimpulan

Dari hasil analisis simulasi pengurangan derau pada sinyal suara yang rusak (mewakili sinyal *loudspeaker* yang mengandung derau) menggunakan filter adaptif Kalman ini, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

- Filter adaptif Kalman dapat dipakai dan mampu bekerja optimal untuk mengurangi derau pada sinyal suara yang rusak (mewakili sinyal *loudspeaker* yang mengandung derau).
- Filter adaptif sangat berguna dalam kasus di mana karakteristik derau (*noise*) yang akan difilter tidak diketahui. Hal ini adalah andalan utama filter adaptif Kalman dengan kemampuannya beradaptasi memperbaharui koefisiennya.
- Semakin tinggi orde filter maka semakin cepat filter adaptif Kalman mendapatkan titik optimalnya.
- Variasi nilai dari nilai Q dan R yang digunakan pada simulasi ini mewakili bahwa pada kenyataannya nilai Q dan R berubah-

ubah sesuai dengan hasil pengukuran yang dilakukan di lapangan.

- Semakin kecil Q dan semakin besar R yang digunakan dalam simulasi maka semakin kecil nilai MSE.
- Semakin kecil Q dan semakin besar R yang digunakan dalam simulasi maka semakin besar nilai SNR output (jika dibandingkan dengan nilai SNR input).
- Semakin besar amplitudo derau Gaussian maka semakin sulit filter adaptif Kalman mengenali dan menekan derau tersebut.

6. Ucapan Terimakasih

Terimakasih kepada orangtua tercinta Bapak Sudung Simbolon dan Ibu Rosmawati Sinurat, dosen pembimbing Bapak Ir.Arman Sani,MT., dan dosen penguji Bapak Rahmad Fauzi,ST.,MT. dan Bapak Maksum Pinem,ST.,MT. yang sudah membantu dan memberi dukungan dalam penyelesaian *paper*.

7. Referensi

- Roddy, Dennis, Kamal Idris, dan John Coolen. 1993. *Komunikasi Elektronika*, edisi ketiga. Penerbit Erlangga. Halaman 104, 119, 55.
- Haykin, Simon. 1996. *Adaptive Filter Theory*, edisi ketiga. Prentice Hall International Editions : United State of America. Halaman 2-3, 302, 201-202.
- Morales, L.G. 2011. *Adaptive Filtering Applications*. InTech. Hal 50.
- Hsu, Hwei P. 2006. *Komunikasi Analog dan Digital*, edisi kedua. Penerbit Erlangga. Halaman 164, 165.
- Vaseghi, Saeed V. 2000. *Advanced Digital signal Processing and Noise Reduction*, edisi kedua. New York: John Wiley & Sonds, Ltd. Halaman 29-30.
- Welch, G. dan Bishop, G. 2001. *An Introduction to the Kalman Filter*. ACM, Inc. Hal 24, 20-24.
- Zaknich, A. 2005. *Principles of Adaptive Filters and Self-learning Systems*. Springer. Halaman 179-180.