

## ESTIMASI KANAL MIMO 2x2 DAN 2x3 MENGUNAKAN FILTER ADAPTIF KALMAN

Imelda Uli Vistalina Simanjuntak<sup>1</sup>

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana Jakarta

Email: imelda.simanjuntak0110@gmail.com;

**Abstrak** -- Penggunaan *multiple* antena pada *transmitter* dan *receiver* dikenal dengan teknik *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) yang diyakini bisa meningkatkan performansi sistem komunikasi *wireless* dengan meningkatkan kapasitas dan memperoleh *gain* diversitas. Pada perkembangannya, ada begitu banyak teknik MIMO yang dikembangkan. Antara lain, dengan menggunakan prinsip kanal, informasi yang telah dikirimkan telah diketahui oleh *receiver*. Dengan diketahuinya informasi kanal oleh *transmitter* dan *receiver* tentunya akan memiliki kualitas yang lebih baik dibandingkan tidak diketahuinya informasi kanal. Ketika *receiver* mengetahui kondisi kanal, maka pengetahuan tersebut bisa digunakan untuk meningkatkan performansi sistem MIMO. Salah satu teknik untuk meningkatkan performansi sistem MIMO adalah dengan menggunakan estimator kanal yang bersifat adaptif.

Dalam penelitian ini digunakan estimator kanal dengan metode *Kalman*. Dan menganalisa pengaruh nilai delta ( $\delta$ ), panjang pilot, dan waktu konvergensi terhadap performansi estimator kanal pada sistem MIMO dengan tiga pengelompokan kecepatan user yaitu  $v = 0$  km/jam, 5-10 km/jam, dan 80 km/jam. Simulasi sistem diuji pada kanal *multipath rayleigh fading* ditambah dengan *noise gaussian*. Hasil simulasi menunjukkan nilai delta ( $\delta$ ), panjang pilot, dan waktu konvergensi yang berbeda – beda pada tiap kanal. Metode *Kalman* sebagai estimator adaptif memberikan hasil bahwa semakin besar nilai delta ( $\delta$ ) maka laju konvergensinya juga akan semakin cepat dan *error* yang dihasilkan semakin besar pula. Akan tetapi, semakin besar nilai delta ( $\delta$ ) maka panjang pilot yang dibutuhkan untuk mencapai konvergensi tidak banyak dan pengaruh terhadap besar *error* (%) akan semakin kecil. Sehingga, waktu konvergensi tidak akan semakin lama.

**Kata kunci** : MIMO dan adaptif Kalman.

### PENDAHULUAN

*Multiple Input Multiple Output* (MIMO) merupakan teknik penggunaan banyak antena baik pada pengirim maupun penerima yang bertujuan untuk mengantisipasi terjadinya efek *multipath fading*.

Akan tetapi, penerapan sistem MIMO belum cukup untuk menangani masalah respon dari kanal *wireless* yang berubah-ubah terhadap waktu, berkaitan dengan terjadinya *multipath fading* dan perubahan macam-macam interferensi pada kanal. Untuk itu diperlukan estimasi kanal *adaptif* pada sistem, estimasi kanal *adaptif* ini bekerja dengan mengatur nilai pembobot hingga dicapai nilai optimum yang dapat meminimalisasi nilai *error*. Dengan adanya estimasi kanal *adaptif*, informasi kanal bisa diketahui demi

pencapaian *rate* transmisi dan kualitas sinyal yang bagus.

### Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah mengestimasi kanal untuk perbaikan kualitas sinyal terima yang didasarkan pada parameter tertentu dengan filter adaptif Kalman.

### Batasan Masalah

Fokus penelitian adalah dimensi sistem MIMO 2x2 dan 2x3 dengan skema STBC menggunakan metode estimasi adaptif Kalman. Tanpa memperhitungkan link budget, tipe antena (ideal) dan kanal transmisi yang bersifat *multipath* berdistribusi *rayleigh* dan AWGN

### Tujuan Penelitian

Merancang sistem MIMO 2x2 dan 2x3 sebagai sarana pendukung pengujian simulasi metode estimasi kanal yang

dipakai dan menganalisa perubahan parameter tersebut terhadap kinerja estimasi kanal.

**LANDASAN TEORI**

**Mapper QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)**

Pada QPSK *bit stream* data akan dikelompokkan dalam dua bit yang kemudian akan memodulasi 4 fasa dari sinyal *carrier*. Persamaan sinyal QPSK, sebagai berikut [2] :

$$S_{\text{QPSK}}(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos \left[ 2\pi f_c + (i - 1) \frac{\pi}{2} \right];$$

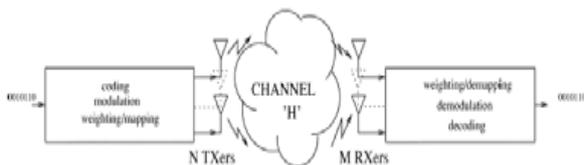
Dengan nilai  $t = 0 \leq t \leq T_s$  ; dan  $i = 1, 2, 3, 4$ .

$E_s$  = energi persymbol modulasi

$T_s$  = durasi symbol modulasi

**MIMO**

MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) merupakan sistem yang terbentuk oleh penggunaan *multiple* antena baik di sisi pengirim maupun penerima.



Gambar 1. Representasi fisik sistem MIMO

Tiap antena *transmitter* mengirimkan sinyal informasi yang nantinya akan diterima oleh semua antena *receiver*. Dan unit pengolah sinyal dua dimensi di balik deretan antena *array* pada penerima akan mampu memilih kembali sinyal yang berasal dari antena pemancar yang berbeda. Dengan adanya teknologi MIMO, yang menggunakan *diversity gain* dan *multiplexing gain*, maka akurasi penerima akan semakin baik.

**STBC (Space Time Blok Code)**

*Space Time Block Codes* adalah skema yang membuat sinyal yang ditransmisikan orthogonal satu dengan yang lainnya dengan menggeser kekompleksitasannya tergantung pada jumlah antena pemancar. Gagasan utama STBC dikemukakan oleh Alamouti dan Tarokh pada sistem *uncorrelated wireless*. Skema transmisinya, seperti berikut:

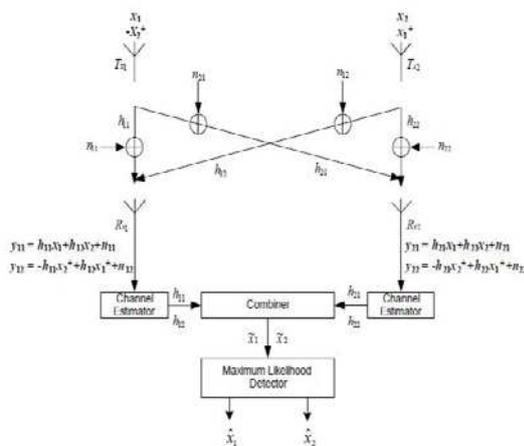
$$\begin{matrix} & \text{tx1} & \text{tx2} \\ t & \begin{bmatrix} x_0 & x_1 \end{bmatrix} \\ t+T & \begin{bmatrix} -x_1^* & x_0^* \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Gambar 2. Skema Transmisi Alamouti [10] Pada saat  $t$ , tx1 memancarkan sinyal  $x_0$  dan tx2 memancarkan sinyal  $x_1$ , kemudian saat  $t+T$ , tx1 memancarkan sinyal  $-x_1^*$  dan tx2 memancarkan sinyal  $x_0^*$ . Tanda \* merupakan operasi konjugat dari persamaan sinyal yang dimaksud. Dari gambar 2 terlihat bahwa pada antena  $R_{x1}$  persamaan sinyal yang diterima adalah [10]. Secara umum, persamaan dapat dinyatakan:

$$y_{i1} = h_{i1} \cdot x_0 + h_{i2} \cdot x_1 + n_{i1} \dots \dots \dots (1)$$

$$y_{i2} = -h_{i1} \cdot x_1^* + h_{i2} \cdot x_0^* + n_{i2} \dots \dots \dots (2)$$

di mana  $i = 1, \dots, q$  dan  $q$  merupakan jumlah antena penerima.



Gambar 3. STBC dengan dua buah antena receiver [1]

Pada kasus ini jumlah antena *receiver* sebanyak 2 buah. Pada blok *combiner*, sinyal-sinyal yang diterima akan dikombinasikan untuk memisahkan sinyal yang ditransmisikan,  $x_1$  dan  $x_2$ , dari sinyal-sinyal  $y_{11}$ ,  $y_{12}$ ,  $y_{21}$  dan  $y_{22}$ . Bentuk umum dengan  $q$  buah *receiver* menjadi:

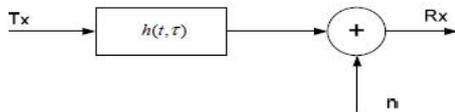
$$\hat{x}_1 = \sum_{i=1}^q [(|h_{i1}|^2 + |h_{i2}|^2)x_1 + \bar{h}_{i1} \cdot n_{i1} + h_{i2} \cdot \bar{n}_{i2}] \dots (3)$$

$$\hat{x}_2 = \sum_{i=1}^q [(|h_{i1}|^2 + |h_{i2}|^2)x_2 + \bar{h}_{i2} \cdot n_{i1} - h_{i1} \cdot \bar{n}_{i2}] \dots (4)$$

combiner kemudian dilewatkan ke *maximum likelihood detector* yang terlihat pada gambar 3.

**Pemodelan Kanal Transmisi**

Pemodelan kanal transmisi sebagai berikut :



Gambar 4. Model kanal secara umum  $h(t,\tau)$  adalah respon impuls kanal berubah terhadap waktu dan  $N$  adalah jumlah path propagasi.

**Estimasi Kanal**

Penggunaan adaptif filter dalam proses estimasi kanal pada intinya adalah berusaha mencari nilai pembobotan yang optimal dari filter agar menghasilkan nilai error yang paling minimum.

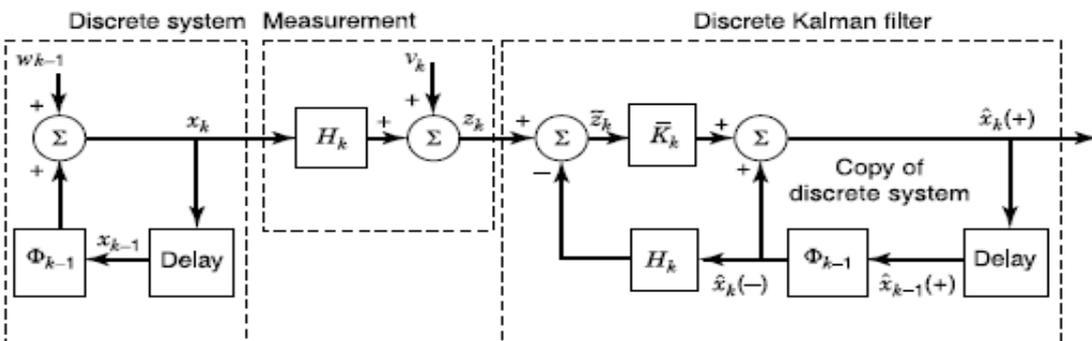
**Algoritma Kalman**

Filter Kalman merupakan persamaan matematika yang memiliki dua tahapan metode stokastik, yaitu tahap prediksi (-) dan koreksi atau *update* (+), sehingga mampu meminimalisasi kovarian *error*.

$$\vec{K}_k = \vec{P}_k (-) H_k^T [\vec{K}_k (H_k P_k (-) H_k^T + R_k)^T] \dots \dots \dots (9)$$

Proses algoritma kalman adalah sebagai berikut:

1. Perhitungkan nilai  $\vec{P}_k (-)$  menggunakan  $P_{k-1}(+)$ ,  $\Phi_{k-1}$ , dan  $Q_{k-1}$ . Sesuai persamaan 6.
2. Perhitungkan nilai  $\vec{K}_k$  menggunakan  $\vec{P}_k (-)$ ,  $H_k$ , dan  $R_k$ . Sesuai persamaan 9.
3. Perhitungkan nilai  $\vec{P}_k (+)$  menggunakan  $\vec{K}_k$  dan  $\vec{P}_k (-)$ . Sesuai persamaan 8
4. Perhitungkan nilai  $\vec{X}_k (+)$  berturut-turut secara berulang menggunakan nilai  $\vec{K}_k$ , inisial estimasi  $\vec{X}_k (-)$ , dan input data  $Z_k$ . Tertera pada persamaan 7.
5. Setelah langkah 4 kemudian di ulang kembali ke langkah 1 sampai ke langkah 4 kembali hingga  $\vec{P}_k (+)$  mencapai nilai jenuh (*steady state covariance*).



Gambar 5. Struktur komponen filter transversal

**Prediksi State Estimate :**

$$\vec{X}_k (-) = \Phi_{k-1} \cdot \vec{X}_{k-1} (+) \dots \dots \dots (5)$$

**Prediksi Error Covariance :**

$$\vec{P}_k (-) = \Phi_{k-1} P_{k-1} (+) \Phi_{k-1}^T + Q_k \dots \dots \dots (6)$$

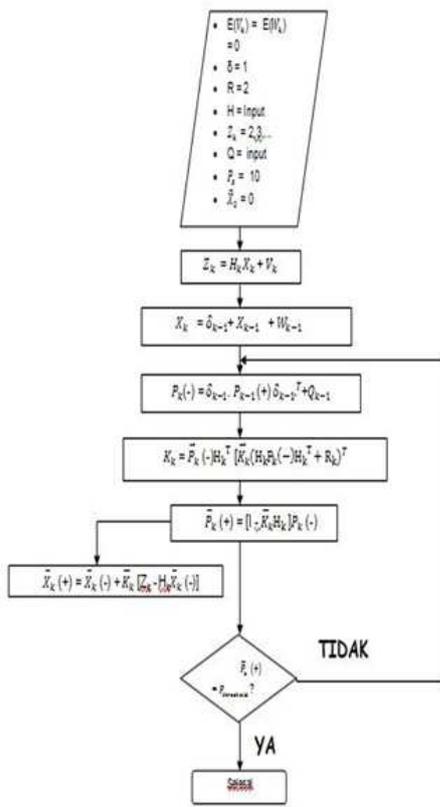
**Update State Estimate :**

$$\vec{X}_k (+) = \vec{X}_k (-) + \vec{K}_k [Z_k - H_k \vec{X}_k (-)] \dots \dots \dots (7)$$

**Update Error Covariance :**

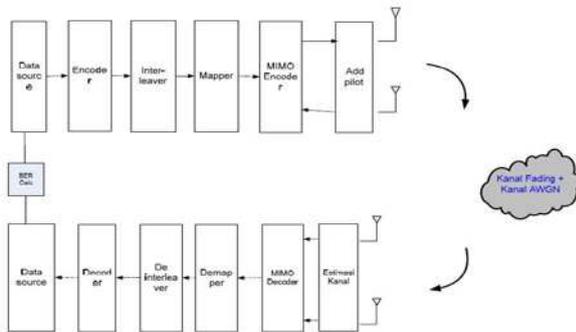
$$\vec{P}_k (+) = [I - \vec{K}_k H_k] P_k (-) \dots \dots \dots (8)$$

**Matrix Gain Kalman :**



Gambar 6. Diagram Alir Simulasi Estimasi Adaptive Kalman

**PEMODELAN SISTEM MIMO**



Gambar 7. Pemodelan Sistem MIMO

Tahapan yang dilakukan meliputi:

- 1) Merealisasikan pemodelan sistem kemudian melakukan simulasi
- 2) Mengubah parameter pada pengirim, kanal, atau penerima untuk mengetahui pengaruhnya terhadap performasi sistem.

- 3) Melakukan pengamatan dan analisa dari hasil simulasi yang berupa data, grafik dan tabel.
- 4) Output yang diharapkan adalah nilai error (%),  $P_k$  (+) dan panjang pilot yang optimal.

**HASIL SIMULASI**

Dalam Penelitian ini, kasus kanal dibagi dalam 3 kecepatan yaitu  $v = 0$  km/jam,  $v = 5 - 10$  km/jam, dan  $v = 80$  km/jam. Hal-hal yang dianalisis:

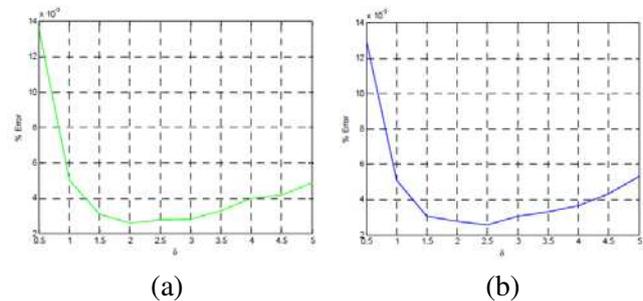
1. Nilai delta ( $\delta$ ) terhadap besar error (%)
2. Panjang pilot terhadap besar error (%)
3. Waktu konvergensi

**Analisis Nilai delta ( $\delta$ ) Terhadap Besar Error (%)**

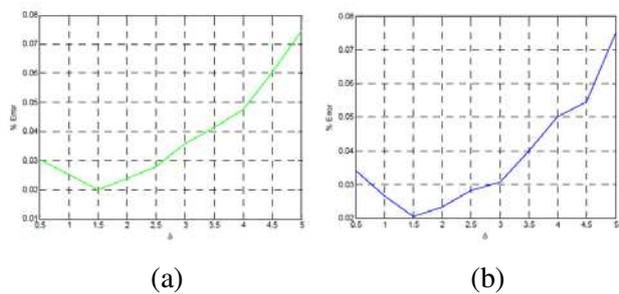
**MIMO 2x2**

Parameter estimator sebagai berikut:

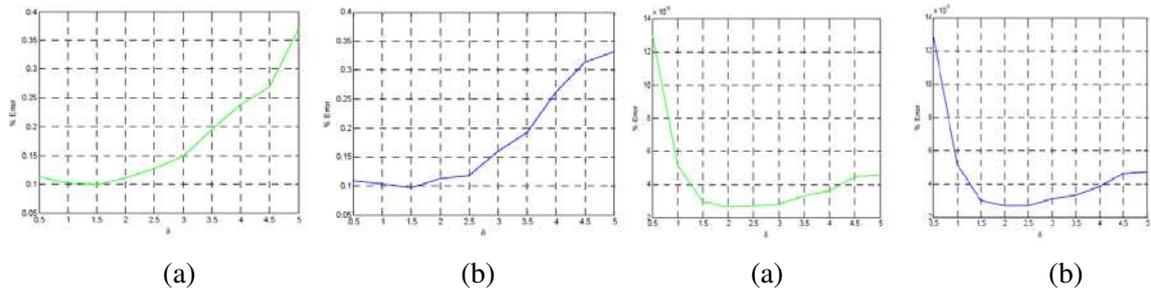
- $\delta = 0.5$  untuk  $v = (0, 5-10, \text{ dan } 80$  km/jam)
- Panjang pilot yang dikirim = 128 simbol
- Orde = 0 dan tap = 1



Gambar 8. Pengaruh delta ( $\delta$ ) terhadap error pada (a) koefisien kanal  $h_{11}$  dan (b) kanal  $h_{21}$  ( $v = 0$  km/jam)



Gambar 9. Pengaruh delta ( $\delta$ ) terhadap error pada (a) koefisien kanal  $h_{11}$  dan (b) kanal  $h_{21}$  ( $v = 5 - 10$  km/jam)



(a) (b)  
 Gambar 10. Pengaruh delta ( $\delta$ ) terhadap *error* pada (a) koefisien kanal  $h_{11}$  dan (b) kanal  $h_{21}$  ( $v = 80$  km/jam)

Tabel 1. Pengaruh delta ( $\delta$ ) optimum pada koefisien kanal  $h_{11}$  dan  $h_{21}$

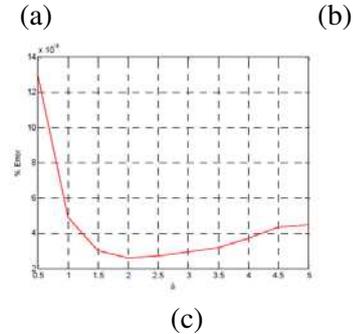
MIMO 2X2	Delta ( $\delta$ )		Error (%)	
	$h_{11}$	$h_{21}$	$h_{11}$	$h_{21}$
$V = 0$ km/jam	2	2.5	$\pm 2.57 \times 10^{-3}$	$\pm 2.56 \times 10^{-3}$
$V = 5-10$ km/jam	1.5	1.5	$\pm 2 \times 10^{-2}$	$\pm 2 \times 10^{-2}$
$V = 80$ km/jam	1.5	1.5	$\pm 1 \times 10^{-1}$	$\pm 1 \times 10^{-1}$

Berdasarkan gambar 8 - 10 dan tabel 1, disimpulkan bahwa delta ( $\delta$ ) dengan laju konvergensi yang paling cepat dan minim adalah yang paling optimal.

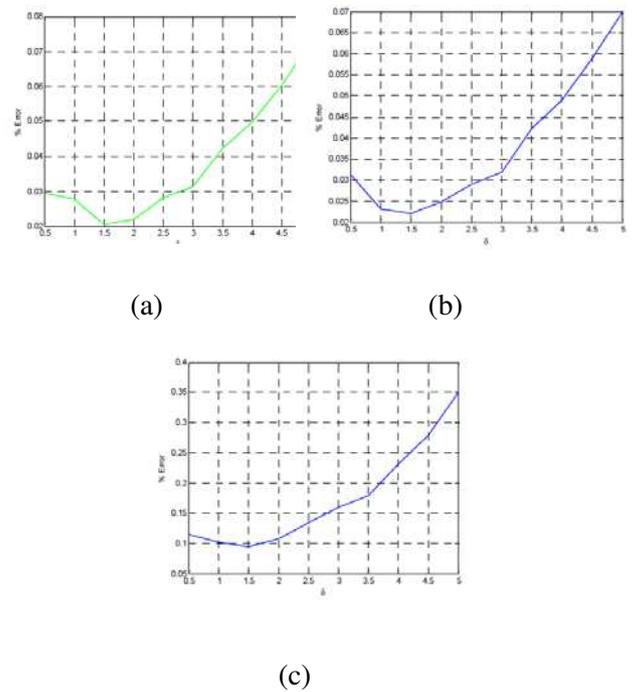
**MIMO 2x3**

Parameter estimator sebagai berikut:

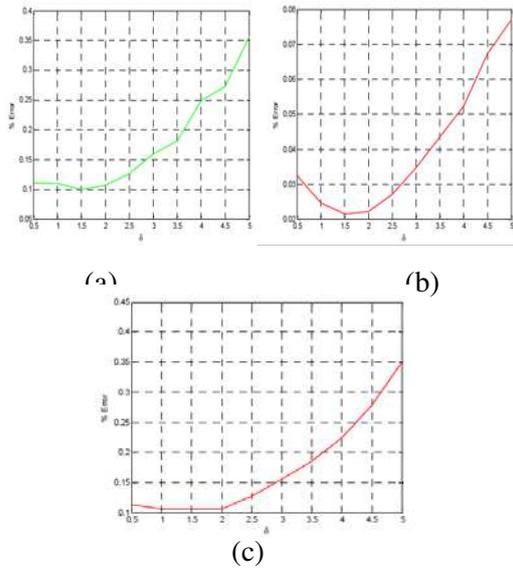
- $\delta = 0-5$  untuk  $v = (0, 5-10, \text{ dan } 80$  km/jam)
- Panjang pilot yang dikirim = 128 simbol
- Orde = 0 dan tap = 1



(a) (b) (c)  
 Gambar 11. Pengaruh delta ( $\delta$ ) terhadap *error* pada (a) koefisien kanal  $h_{11}$ , (b) kanal  $h_{21}$  dan (c) kanal  $h_{31}$  ( $v = 0$  km/jam)



(a) (b) (c)  
 Gambar 12. Pengaruh delta ( $\delta$ ) terhadap *error* pada (a) koefisien kanal  $h_{11}$ , (b) kanal  $h_{21}$  dan (c) kanal  $h_{31}$  ( $v = 5 - 10$  km/jam)



Gambar 13. Pengaruh delta ( $\delta$ ) terhadap *error* pada (a) koefisien kanal  $h_{11}$ , (b) kanal  $h_{21}$  dan (c) kanal  $h_{31}$  ( $v = 80$  km/jam)

Tabel 2. Pengaruh delta ( $\delta$ ) optimum pada koefisien kanal  $h_{11}$ ,  $h_{21}$ , dan  $h_{31}$

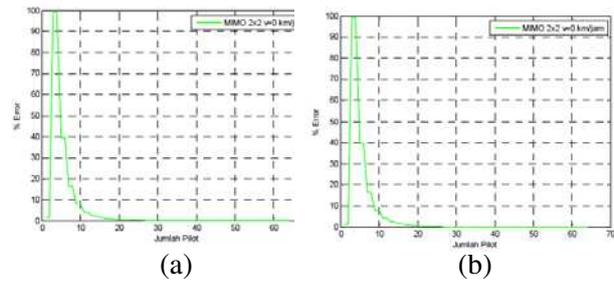
MIMO 2x3	Delta ( $\delta$ )			Error (%)		
	$h_{11}$	$h_{21}$	$h_{31}$	$h_{11}$	$h_{21}$	$h_{31}$
V = 0 km/jam	2	2	2	$\pm 2.61 \times 10^{-3}$	$\pm 2.67 \times 10^{-3}$	$\pm 2.5 \times 10^{-3}$
V = 5 - 10 km/jam	1.5	1.5	1.5	$\pm 2 \times 10^{-2}$	$\pm 2 \times 10^{-2}$	$\pm 2 \times 10^{-2}$
V = 80 km/jam	1.5	1.5	1	$\pm 1 \times 10^{-1}$	$\pm 1 \times 10^{-1}$	$\pm 1 \times 10^{-1}$

Berdasarkan gambar 11 - 13 dan tabel 2 didapatkan bahwa delta ( $\delta$ ) yang paling optimum adalah  $\delta$  dengan laju konvergensi yang paling cepat dan minimum.

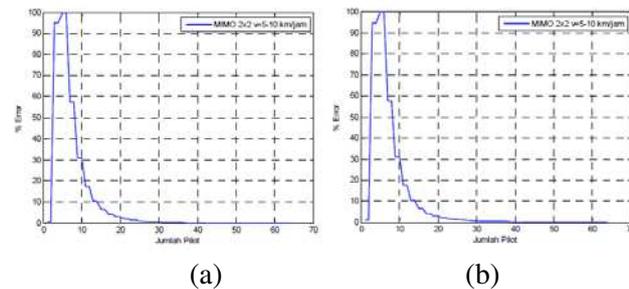
**Panjang pilot terhadap besar *error* (%) MIMO 2x2**

Parameter estimator sebagai berikut:

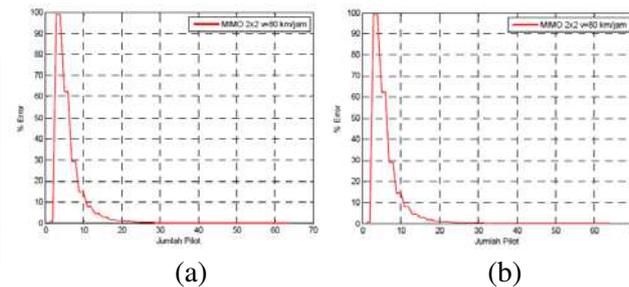
- $\delta = 2$  dan  $2.5$  ( $v = 0$  km/jam),  $1.5$  ( $v = 5-10$  km/jam), dan  $1.5$  ( $v = 80$  km/jam)
- Panjang pilot yang dikirim = 64 simbol
- Orde = 0 dan tap = 1
- 



Gambar 14. Pengaruh panjang pilot terhadap *error* pada (a) koefisien kanal  $h_{11}$  dan (b) kanal  $h_{21}$  ( $v = 0$  km/jam)



Gambar 15. Pengaruh panjang pilot terhadap *error* pada (a) koefisien kanal  $h_{11}$  dan (b) kanal  $h_{21}$  ( $v = 5 - 10$  km/jam)



Gambar 16. Pengaruh panjang pilot terhadap *error* pada (a) koefisien kanal  $h_{11}$  dan (b) kanal  $h_{21}$  ( $v = 80$  km/jam)

Tabel 3. Pengaruh panjang pilot pada koefisien kanal  $h_{11}$  dan  $h_{21}$

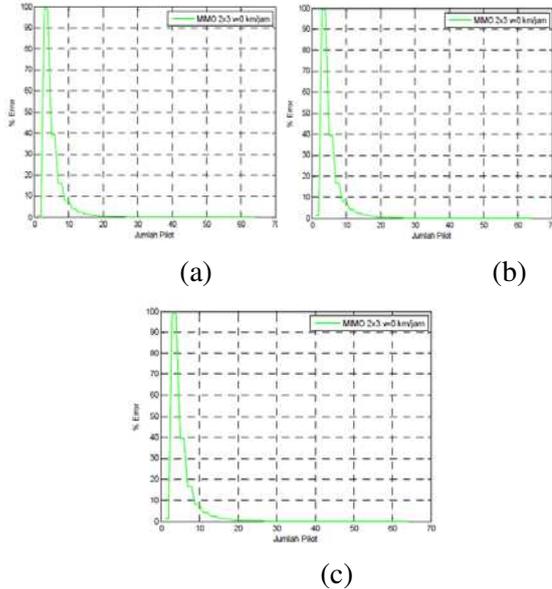
MIMO 2x2	Panjang Pilot	Error (%)	
		$h_{11}$	$h_{21}$
V = 0 km/jam	$\delta = 2$ & $2.5$	$\leq 1$	$\leq 1$
V = 5 - 10 km/jam	$\delta = 1.5$	$\leq 1$	$\leq 1$
V = 80 km/jam	$\delta = 1.5$	$\leq 1$	$\leq 1$

Berdasarkan pada gambar 14 - 16 dan tabel 3 ternyata untuk mencapai konvergensi membutuhkan panjang pilot yang semakin banyak.

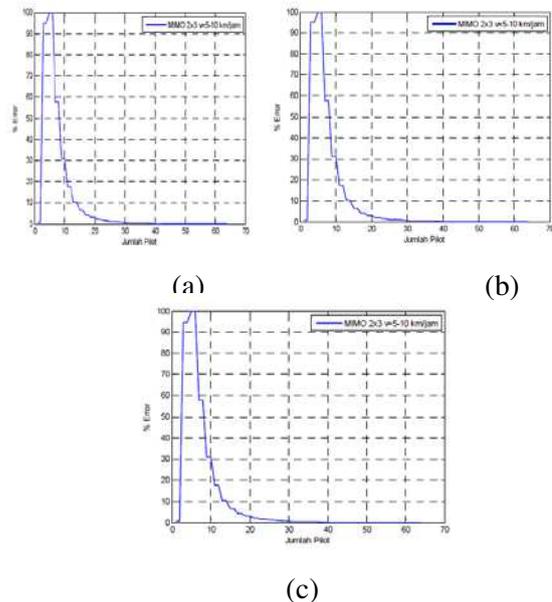
**MIMO 2x3**

Parameter estimator sebagai berikut:

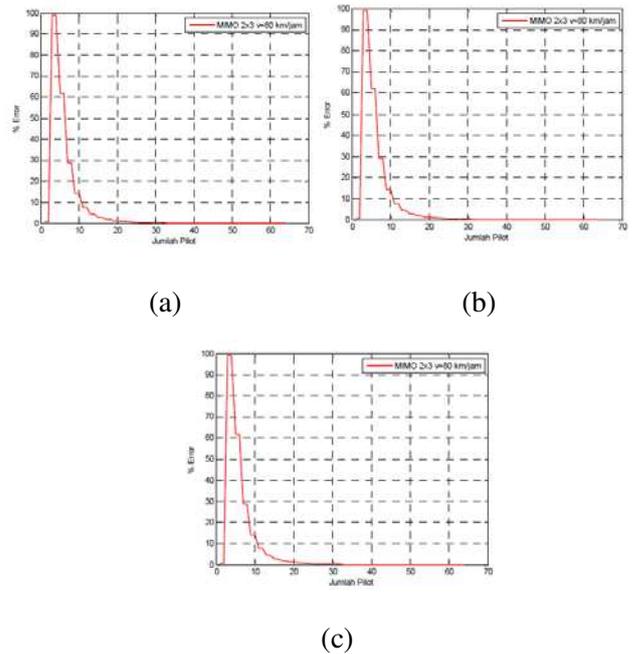
- $\delta = 2$  dan  $2.5$  ( $v = 0$  km/jam),  $1.5$  ( $v = 5 - 10$  km/jam), &  $1$  dan  $1.5$  ( $v = 80$  km/jam)
- Panjang pilot yang dikirim = 64 simbol
- Orde = 0 dan tap = 1



Gambar 17. Pengaruh panjang pilot terhadap *error* pada (a) koefisien kanal  $h_{11}$ , (b) kanal  $h_{21}$  dan (c) kanal  $h_{31}$  ( $v = 0$  km/jam)



Gambar 18. Pengaruh panjang pilot terhadap *error* pada (a) koefisien kanal  $h_{11}$ , (b) kanal  $h_{21}$  dan (c) kanal  $h_{31}$  ( $v = 5 - 10$  km/jam)



Gambar 19. Pengaruh panjang pilot terhadap *error* pada (a) koefisien kanal  $h_{11}$ , (b) kanal  $h_{21}$  dan (c) kanal  $h_{31}$  ( $v = 80$  km/jam)

Tabel 4. Pengaruh panjang pilot pada koefisien kanal  $h_{11}$ ,  $h_{21}$ , dan  $h_{31}$

MIMO 2x3		Panjang Pilot			Error (%)		
		$h_{11}$	$h_{21}$	$h_{31}$	$h_{11}$	$h_{21}$	$h_{31}$
$v = 0$ km/jam	$\delta = 2 \text{ \& } 2.5$	17	17	19	$\leq 1$	$\leq 1$	$\leq 1$
$v = 5 - 10$ km/jam	$\delta = 1$	20	19	20	$\leq 1$	$\leq 1$	$\leq 1$
$v = 80$ km/jam	$\delta = 1 \text{ \& } 1.5$	21	21	27	$\leq 1$	$\leq 1$	$\leq 1$

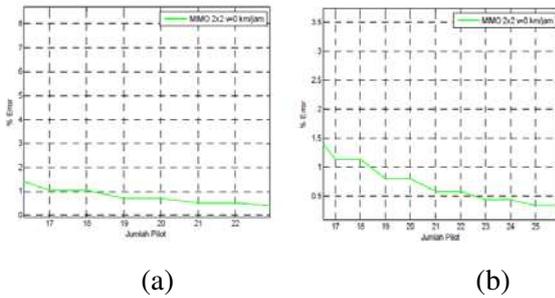
Pada gambar 17 - 19 dan table 4 dinyatakan bahwa semakin banyak panjang pilot, maka *error* (%) juga semakin kecil.

**Analisis waktu konvergensi terhadap *error* (%)**

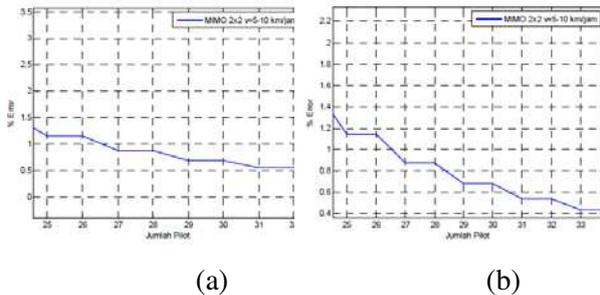
**MIMO 2x2**

Parameter estimator sebagai berikut :

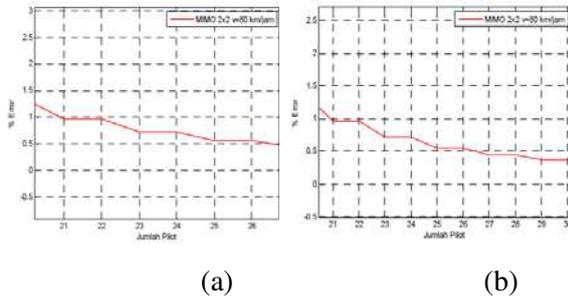
- $\delta = 2$  dan  $2.5$  ( $v = 0$  km/jam),  $1.5$  ( $v = 5 - 10$  km/jam), &  $1.5$  ( $v = 80$  km/jam)
- Panjang pilot yang dikirim = 64 simbol
- Orde = 0 dan tap =1



Gambar 20. Jumlah pilot konvergen terhadap *error* pada (a) koefisien kanal  $h_{11}$  dan (b) kanal  $h_{21}$  ( $v = 0$  km/jam)



Gambar 21. Jumlah pilot konvergen terhadap *error* pada (a) koefisien kanal  $h_{11}$  dan (b) kanal  $h_{21}$  ( $v = 5 - 10$  km/jam)



Gambar 22. Jumlah pilot konvergen terhadap *error* pada (a) koefisien kanal  $h_{11}$  dan (b) kanal  $h_{21}$  ( $v = 80$  km/jam)

Tabel 5. Waktu konvergensi pada koefisien kanal  $h_{11}$  dan  $h_{21}$

MIMO 2X2	Waktu Konversi ( $N_{LS}$ )		Error (%)	
	$h_{11}$	$h_{21}$	$h_{11}$	$h_{21}$
V = 0 km/jam	76	72	$\leq 1$	$\leq 1$
V = 5 - 10 km/jam	84	80	$\leq 1$	$\leq 1$
V = 80 km/jam	84	84	$\leq 1$	$\leq 1$

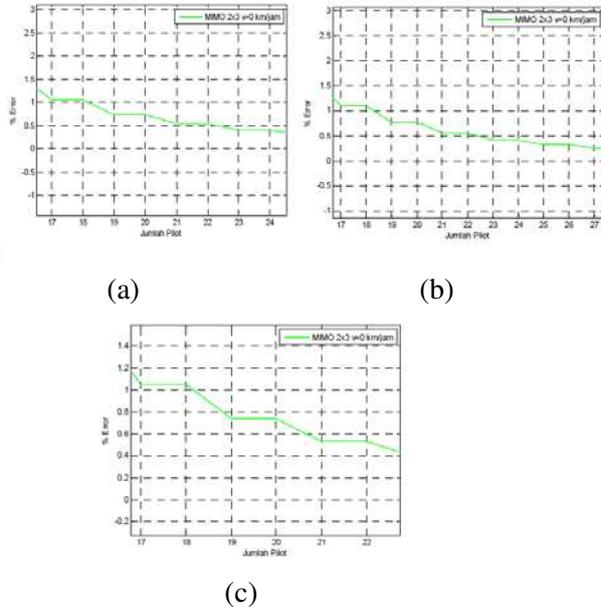
Berdasarkan pada gambar 20 - 22 dan tabel 5 dengan menggunakan masing-masing periode  $\delta$  dan panjang pilot yang

konvergen, didapatkan waktu konvergensi yang semakin lama.

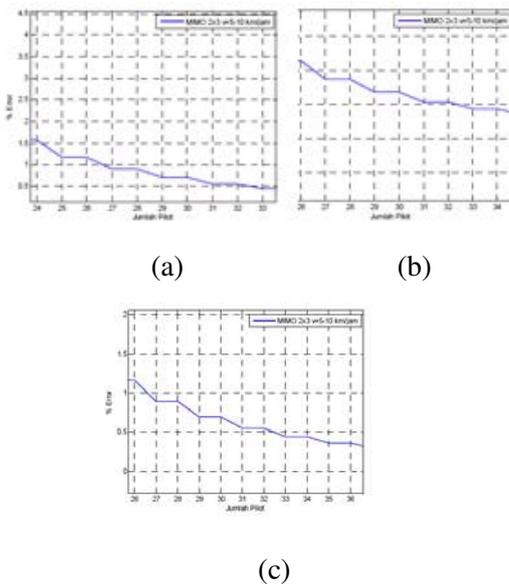
**MIMO 2x3**

Parameter estimator sebagai berikut :

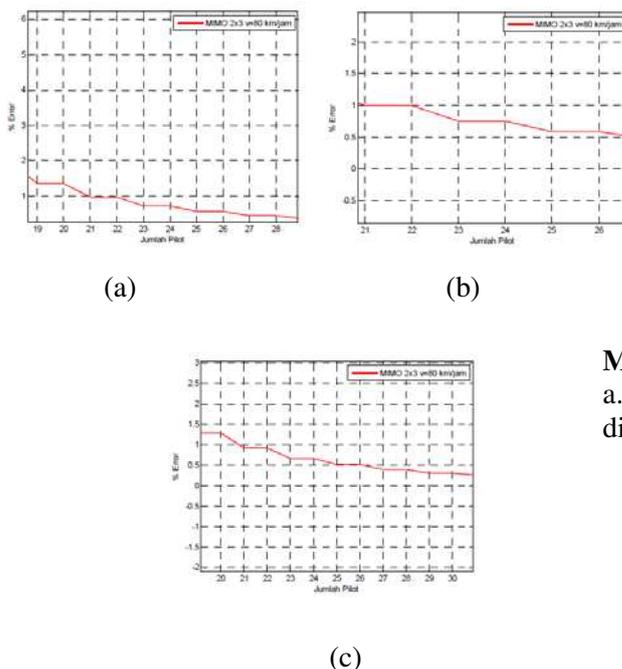
- $\delta = 2$  dan  $2.5$  ( $v = 0$  km/jam),  $1.5$  ( $v = 5 - 10$  km/jam), &  $1$  dan  $1.5$  ( $v = 80$  km/jam)
- Panjang pilot yang dikirim =  $64$  simbol
- Orde =  $0$  dan  $\text{tap} = 1$



Gambar 23. Jumlah pilot konvergen terhadap *error* pada (a) koefisien kanal  $h_{11}$ , (b) kanal  $h_{21}$  dan (c) kanal  $h_{31}$  ( $v = 0$  km/jam)



Gambar 24. Jumlah pilot konvergen terhadap error pada (a) koefisien kanal  $h_{11}$ , (b) kanal  $h_{21}$  dan (c) kanal  $h_{31}$  ( $v = 5 - 10$  km/jam)



Gambar 25. Jumlah pilot konvergen terhadap error pada (a) koefisien kanal  $h_{11}$ , (b) kanal  $h_{21}$  dan (c) kanal  $h_{31}$  ( $v = 80$  km/jam)

Tabel 6. Pengaruh panjang pilot dan delta ( $\delta$ ) optimum pada koefisien kanal  $h_{11}$ ,  $h_{21}$ , dan  $h_{31}$

MIMO 2x3	Waktu Konversi ( $\mu s$ )			Error (%)		
	$h_{11}$	$h_{21}$	$h_{31}$	$h_{11}$	$h_{21}$	$h_{31}$
$V = 0$ km/jam	68	68	76	$\leq 1$	$\leq 1$	$\leq 1$
$V = 5 - 10$ km/jam	80	76	80	$\leq 1$	$\leq 1$	$\leq 1$
$V = 80$ km/jam	84	84	108	$\leq 1$	$\leq 1$	$\leq 1$

Hasil grafik gambar 23 - 25 dan tabel 6 dengan menggunakan masing-masing periode  $\delta$  dan panjang pilot yang konvergen, didapatkan juga waktu konvergensi yang semakin lama.

**KESIMPULAN**

Dari hasil penelitian, disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

**MIMO 2x2:**

Untuk koefisien kanal  $h_{11}$  dan  $h_{21}$  didapatkan:

- Pada kanal dengan  $v = 0$  km/jam didapatkan nilai  $\delta$  sebesar 2 dan 2.5; panjang pilot sebanyak 19 dan 18 simbol; dan waktu konvergensi selama  $76\mu s$  dan  $72\mu s$
- Pada kanal dengan  $v = 5 - 10$  km/jam didapatkan nilai  $\delta$  sebesar 1.5 dan 1.5; panjang pilot sebanyak 21 dan 20 simbol ; dan waktu konvergensi selama  $84\mu s$  dan  $80\mu s$
- Pada kanal dengan  $v = 80$  km/jam didapatkan nilai  $\delta$  sebesar 1.5 dan 1.5 ; panjang pilot sebanyak 21 dan 21 simbol ; dan waktu konvergensi selama  $84\mu s$  dan  $84\mu s$

**MIMO 2x3:**

a. Untuk koefisien kanal  $h_{11}$ ,  $h_{21}$ , dan  $h_{31}$  didapatkan:

- Pada kanal dengan  $v = 0$  km/jam didapatkan nilai  $\delta$  sebesar 2, 2, dan 2; panjang pilot sebanyak 17, 17, dan 19 simbol; dan waktu konvergensi selama  $68\mu s$ ,  $68\mu s$ , dan  $76\mu s$
- Pada kanal dengan  $v = 5-10$  km/jam didapatkan nilai  $\delta$  sebesar 1.5, 1.5, dan 1.5; panjang pilot sebanyak 20, 19, dan 20 simbol ; dan waktu konvergensi selama  $80\mu s$ ,  $76\mu s$ , dan  $80\mu s$
- Pada kanal dengan  $v = 80$  km/jam didapatkan nilai  $\delta$  sebesar 1.5, 1.5, dan 1; panjang pilot sebanyak 21, 21, dan 27 simbol; dan waktu

konvergensi selama 84 $\mu$ s, 84 $\mu$ s, dan 108 $\mu$ s

Dari hasil simulasi, dapat disimpulkan bahwa semakin besar nilai delta ( $\delta$ ) maka laju konvergensinya juga akan semakin cepat dan *error* yang dihasilkan semakin besar pula. Akan tetapi, semakin besar nilai delta ( $\delta$ ) maka panjang pilot yang dibutuhkan untuk mencapai konvergensi tidak banyak dan pengaruh terhadap besar *error* (%) akan semakin kecil. Sehingga, waktu konvergensi tidak semakin lama. Oleh karena itu, dibutuhkan keserasian antara nilai delta ( $\delta$ ) dan panjang pilot terhadap besar *error* (%) yang diijinkan.

#### Saran

1. Metode Kalman didapati memiliki kelemahan yaitu pemborosan pada penggunaan jumlah pilot. Sebaiknya dicoba Kalman filter versi lain, untuk mengetahui versi Kalman mana yang efisien.
2. Estimasi kanal dengan menggunakan pilot sudah cukup banyak diteliti, disarankan selanjutnya meneliti estimasi kanal tanpa menggunakan pilot.
3. Perlu dianalisa lebih lanjut dengan jumlah antena yang lebih banyak tidak hanya terbatas pada MIMO 2x2 dan 2x3 saja.
4. Jumlah antena yang ganjil pada sisi pengirim dapat di jadikan bahan penelitian selanjutnya.
5. Proses pemerataan data sekiranya dapat dilakukan lebih dari 50 kali percobaan untuk mendapatkan data statistik yang akurat.
6. Jumlah Orde estimator yang digunakan juga sebaiknya lebih besar dari nol.
7. Jumlah Tap estimator sebaiknya lebih besar dari satu (1), sehingga hasil estimasi kanal benar-benar *real*

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Alamouti SM, "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communication", IEEE Journal on Selected Areas in Communication, vol 16 No.8, October 1998.

[2] Haykin, Simon, Adaptive Filter Theory. Prentice-Hall International, Inc. New Jersey. 1996.

[3] Haykin, Simon, "Communication Systems, USA :Wiley, 2001.

[4] Jafarkhani, Hamid, "Space-Time Block Coding for MIMO Channels", Department of Electrical Engineering & Computer Science, University of California, Irvine, CA 92697.

[5] J. Proakis, "Digital Communications", McGraw Hill, 3rd., 1995.

[6] Liang, Luo, Huang, "RLS Channel estimation with adaptive forgetting factor in space-time coded MIMO-OFDM system", journal of Zhejiang University, China, 2006.

[7] Jiun Siew, Robert Piechocki, Andrew Nix, and Simon Armour, "A Channel Estimation Method for MIMO-OFDM Systems", Centre for Communications Research, University of Bristol.

[8] Tarokh, Vahid et.al, "Space-Time Block Codes from Orthogonal Designs", IEEE Transactions On Information Theory, Vol. 45, No. 5, July 1999.

[9] Theodore S. Rappaport, "Wireless Communications", Prentice Hall, 2002.

[10] Tjondronegoro, Suhartono, "Pengolahan Sinyal Dijital Lanjut dan Aplikasi, Diktat Program Magister Teknik Telekomunikasi, 2005.