

# PEMODELAN DERET WAKTU MULTIVARIATE CURAH HUJAN DI INDONESIA MENGGUNAKAN VECTOR-AR DENGAN UJI KAUSALITAS UNTUK APLIKASI KOMUNIKASI RADIO GELOMBANG MILIMETER

**Sis Soesetijo**

Jurusan Teknik Elektro

Universitas Surabaya

Jl. Raya Kalirungkut, Surabaya 60293

Telp/Fax: +62 31 2981157 / 2981151

email: ssoesetijo@ubaya.ac.id

## **Abstract**

*Site diversity is one of the Fade Mitigation Techniques on the millimeter wave radio system which is a base system design on the nature of rain rate that change to the time and space. However, to get appropriate site diversity need deep knowledges about rain rate dynamic and statistical characteristic. In this research, rain rate multivariate time series modeling in 4 rain gauges sites studied by using Vector AR (VAR) model with Granger Causality test. To validate VAR model, it used qqplot method. The result showed that VAR model is correct and appropriate model for rain rate multivariate time series modeling in 4 rain gauges sites. These VAR models have good accuracy with RMSE Spatial Mean between 0.273 – 0.763. Granger Causality test is used to find causality interrelationship between variables in one location to another rain gauge sites. From Causality test showed that rain cell dimension is obtained. And from 65 rain events which were collected from January 2008 to February 2009 can be concluded that rain cell dimension between 1000 – 1500 m in Surabaya have percentage 88.88%. In site diversity application, rain cell dimension means minimum separation distance among sites.*

**Keywords:** Vector AR, Granger Causality, Rain Cell, Rain Gauge, Site Diversity

## **Abstrak**

*Salah satu teknik untuk mengatasi redaman hujan pada gelombang milimeter adalah site diversity. Namun untuk mendapatkan teknik site diversity yang tepat membutuhkan pengetahuan dasar tentang karakteristik statistik hujan yang bervariasi terhadap ruang dan waktu. Pada penelitian ini dibahas pemodelan deret waktu multivariate curah hujan dari 4 lokasi pengukuran hujan dengan menggunakan Vector AR (VAR). Validasi model VAR menggunakan metode qqplot. Hasil validasi menunjukkan bahwa model VAR sesuai dan tepat untuk pemodelan deret waktu multivariate curah hujan untuk 4 lokasi. Perhitungan nilai rata-rata spasial RMSE pada setiap model event hujan mendapatkan akurasi model yang baik dengan rentang 0,273 – 0,763. Uji Granger Causality mendapatkan dimensi sel hujan pada masing-masing event hujan. Hasil penelitian terhadap 65 event hujan sepanjang Januari 2008 dan Februari 2009 menunjukkan bahwa diameter sel hujan antara 1000 – 1550 m mempunyai prosentasi 88,88%. Diameter sel hujan ini dalam aplikasi site diversity berarti jarak minimum antar site adalah 1000 – 1500 m.*

**Kata kunci:** Vector AR, Granger Causality, Sel Hujan, Rain Gauge, Site Diversity

## **1. PENDAHULUAN**

*Fade Mitigation Techniques (FMT), merupakan suatu teknik yang dapat melakukan kompensasi pengaruh efek redaman akibat hujan pada sistem komunikasi radio di atas 10*

GHz. *Site diversity* yang merupakan salah satu dari teknik FMT adalah teknik yang mendasarkan rancangan sistem komunikasinya pada sifat curah hujan yang berubah terhadap waktu dan lokasi [1]. Oleh karena itu agar dapat mengevaluasi dan mengendalikan FMT secara efektif, dibutuhkan pengetahuan yang lengkap dan akurat tentang karakteristik statistik dan dinamis dari curah dan redaman hujan, yang merupakan sumber utama dari gangguan kanal di atas frekuensi 10 GHz [2]. Dalam sistem komunikasi gelombang milimeter, baik pada sistem komunikasi terestrial maupun satelit, pengaruh redaman yang diakibatkan oleh hujan memberikan kontribusi yang sangat buruk pada kinerja sistem. Penelitian [3] menjelaskan bahwa sistem komunikasi radio pada frekuensi 30 GHz yang melalui lintasan sepanjang 5 km di Surabaya mengalami redaman hujan mencapai 80 dB.

Beberapa penelitian yang terkait dengan pemodelan curah hujan di Indonesia telah banyak dilakukan namun masih menggunakan model berbasis deret waktu variabel tunggal (*univariate*) saja. Model curah hujan tersebut berbasis pada proses *auto-regressive* (AR) mengasumsikan kondisi hujan yang stasioner padahal hujan merupakan proses yang tidak stasioner [4][5]. Penelitian selanjutnya memodelkan curah hujan sebagai proses *auto-regressive moving-average* (ARMA) [6]. Dalam model ini curah hujan diasumsikan sebagai proses yang stasioner dan berdistribusi lognormal. Metode ini masih belum sesuai dengan sifat curah hujan yang tidak stasioner. Untuk memperbaiki model ARMA, maka dilakukan penelitian selanjutnya yang memodelkan curah hujan sebagai proses *auto-regressive integrated moving-average* (ARIMA). Dalam model ini curah hujan sudah dianggap sebagai proses yang tidak stasioner. Kelemahan model ini adalah curah hujan yang tidak stasioner harus diubah dahulu ke dalam bentuk yang stasioner. Pada model *fuzzy* ARMA [7], setiap *event* curah hujan dimodelkan sebagai variabel *fuzzy*. Bila variabel *fuzzy* ini diurutkan berdasarkan waktu, maka akan membentuk deret waktu dengan data *fuzzy*. Deret waktu *fuzzy* dari curah hujan ini yang akan dimodelkan sebagai proses *fuzzy* ARMA. Jadi dengan model *fuzzy* ARMA dimungkinkan melakukan satu pemodelan untuk seluruh *event* hujan. Selain itu pada model *fuzzy* ARMA, curah hujan dapat diasumsikan sebagai proses yang stasioner atau tidak stasioner. Dari penelitian [4]-[7] di atas pemodelan curah hujan di Surabaya masih sebatas fungsi deret waktu *univariate* tanpa melibatkan fungsi lokasi dari curah hujan dengan data curah hujan hanya diambil dari satu tempat saja.

Sedangkan penelitian yang memodelkan curah hujan sebagai fungsi *spatio-temporal multivariate* juga telah banyak dilakukan. Penelitian dengan model *spatio-temporal multivariate* adalah penelitian yang sesuai dengan sifat dinamis curah hujan yang berubah terhadap waktu dan lokasi. Salahsatunya adalah yang telah dilakukan oleh [8], di mana mereka mengasumsikan kedatangan curah hujan sebagai fungsi *Poisson* yang akan berubah sebagai fungsi ruang dan waktu. Penelitian [9] mereka melakukan pemodelan pada fungsi spasial dan fungsi deret waktu kemudian diintegrasikan menjadi satu pada model *spatial temporal* serta data curah hujan diambil dari data satelit. Penelitian [10] menggunakan model *Boolean* pada curah hujan yang berubah sebagai fungsi ruang dan waktu. Kelemahan ketiga penelitian di atas adalah hanya memodelkannya tanpa melibatkan fungsi deret waktu.

Penerapan Vector ARMA (VARMA) pada pemodelan deret waktu multivariate curah hujan pada saat ini belum ditemukan, namun banyak dilakukan pada bidang *econometric*. Beberapa penelitian penting menyebutkan bahwa model *Spatio-Temporal* ARMA (STARMA) merupakan kasus khusus pada model Vector ARMA (VARMA). Hal ini sudah dilakukan dan dibuktikan oleh penelitian[11]-[13]. Pada ketiga penelitian tersebut menyatakan bahwa lebih banyak data di fungsi waktu dari pada di fungsi ruang, maka model STARMA sama dengan VARMA. Penelitian [11] dan [12] mengambil data dari 4 tempat dan penelitian [13] mengambil data dari 10 stasiun saja. Kondisi ini sama dengan kondisi yang dilakukan penelitian oleh penulis yaitu 4 lokasi pengambilan data.

Pada penelitian ini dilakukan pemodelan *multivariate time series* terhadap data curah hujan yang diambil dari 4 lokasi pengukurun (lokasi *rain gauge*). Pemodelan *multivariate time series* yang tepat pada kasus demikian adalah model Vector AR atau Vector ARMA [14]. Untuk alasan empiris dan praktis maka dalam penelitian ini digunakan pemodelan VAR [15] dan dalam makalah [16][17] menyatakan bahwa pemodelan VARMA yang melibatkan koefisien MA terdapat kesulitan dalam estimasi non-linier yang rumit sehingga cenderung menjadi tidak praktis.

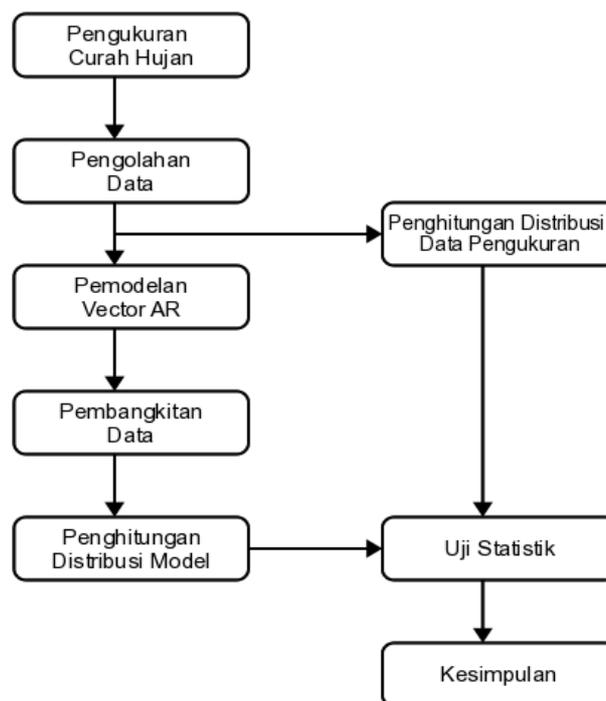
Untuk mengetahui hubungan variabel antar lokasi *rain gauge* maka digunakan uji *Granger Causality*. Uji ini untuk mencari hubungan timbal balik antara variabel pada satu lokasi dengan lokasi yang lain. Apakah masing-masing variabel berpengaruh signifikan atau tidak terhadap variabel di lokasi yang lain, atau hanya berpengaruh pada dirinya sendiri saja. Dari uji *Granger Causality* didapatkan dimensi sel hujan pada setiap *event* hujan. Dengan model VAR yang diperoleh, langsung dapat diuji *Granger Causality* sehingga memudahkan dalam perhitungan untuk memperoleh hubungan antar variabelnya [18].

Untuk melakukan validasi model VAR digunakan metode qqplot yaitu membandingkan distribusi data pengukuran dan data pembangkitan model apakah kedua distribusinya mengikuti garis referesensi 45 derajat atau tidak. Dengan kata lain uji qqplot ini akan membuktikan apakah distribusi data pengukuran dan distribusi data pembangkitan model VAR berasal dari distribusi yang sama atau tidak.

Pada penelitian ini digunakan data *event* hujan sebanyak 65 *event* hujan yaitu *event* hujan selama 5 bulan pada tahun 2008 (Januari, Februari, Maret, April dan Desember) dan 2 bulan di tahun 2009 (Januari dan Februari). *Event* hujan mempunyai makna bahwa data curah hujan diambil dari awal mulai hujan dan sampai berakhirnya hujan tersebut

## 2. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini dibagi atas beberapa tahap seperti yang terlihat pada diagram alir metode penelitian pada gambar 2.1 di bawah ini. Langkah awal pada metoda penelitian adalah pengukuran curah hujan pada 4 lokasi *rain gauge* di kampus ITS Surabaya. Untuk mendapatkan data curah hujan harus dilakukan pengolahan data dari *rain gauge*. Setelah diperoleh data curah hujan dalam mm/jam, data kemudian dikelompokkan menjadi *event* hujan yang diambil ketika awal hujan mulai sampai berakhir. Sebelum dilakukan pemodelan VAR terhadap data curah hujan pada 4 lokasi hujan harus dilognaturalkan terlebih dahulu. Langkah ini harus dilakukan untuk menghindari *hetero-skedasticity* (variansi tidak konstan) [19].

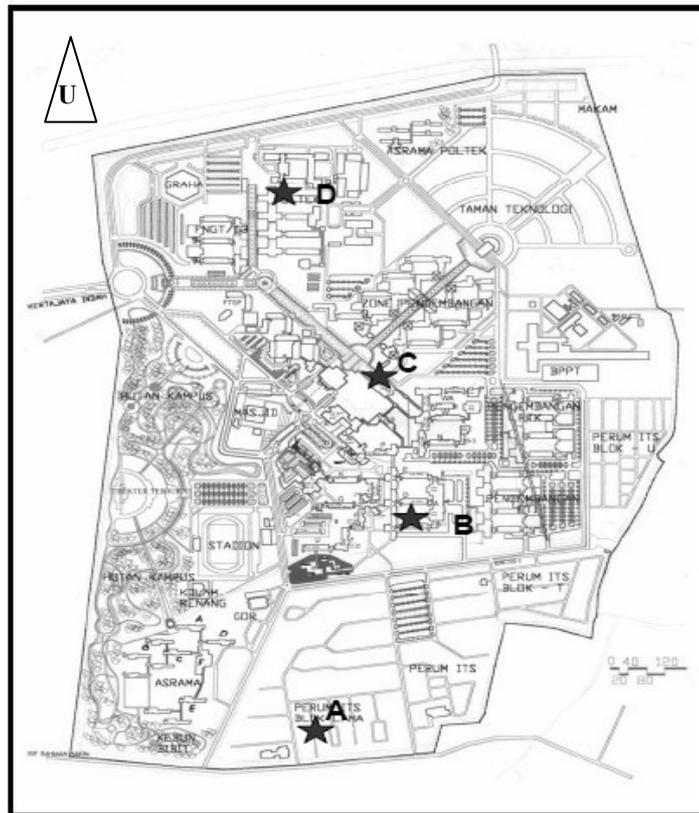


Gambar 2.1. Diagram Alir Metode Penelitian

### 2.1. Sistem Pengukuran

Pada penelitian ini menggunakan rain gauge dengan tipe 8" Tipping bucket model 260-2501. Lokasi pengukuran curah hujan adalah di kota Surabaya, Jawa timur. Kota Surabaya berada pada  $07^{\circ} 21'$  Lintang Selatan dan  $112^{\circ} 36' - 112^{\circ} 54'$  Bujur Timur. Surabaya memiliki dua daerah yaitu dataran rendah dengan ketinggian 3-6 meter (dpl) dan dataran tinggi pada 25-50 meter (dpl). Lokasi yang diambil untuk penempatan *rain gauge* pada penelitian tampak pada gambar 2.2 berikut yaitu gedung PENS (D), gedung perpustakaan (C), gedung Elektro (B) dan gedung Medical Center (A) [20].

Jarak antar lokasi *rain gauge* ditunjukkan pada tabel 2.1. Data pengukuran curah hujan yang tercatat pada *rain gauge* adalah txt, berupa kumpulan tips dari *bucket* yang terisi air hujan. Untuk mendapatkan nilai curah hujan dalam mm/jam perlu dikonversikan dari data txt dengan periode sampling 60 detik.



Gambar 2.2. Lokasi Pengukuran Curah Hujan

Tabel 2.1. Jarak Antar Rain Gauge

Lokasi	Jarak (m)
A - D	1550
A - C	1000
B - D	950
A - B	700
C - D	550
B - C	400

Pada penelitian ini digunakan data *event* hujan sebanyak 65 *event* hujan seperti ditampilkan pada tabel 2.2 yaitu *event* hujan selama 5 bulan pada tahun 2008 (Januari, Februari, Maret, April dan Desember) dan 2 bulan di tahun 2009 (Januari dan Februari). *Event* hujan mempunyai makna bahwa data curah hujan diambil dari awal mulai hujan dan sampai berakhirnya hujan tersebut

Tabel 2.2. Jumlah Event Hujan

Bulan	Jumlah <i>Event</i> Hujan
Januari 2008	6
Februari 2008	12
Maret 2008	13
April 2008	10
Desember 2008	3
Januari 2009	18
Februari 2009	3
<i>Total Event</i>	65

## 2.2. Model Vector AR (VAR)

Bentuk dasar dari VAR terdiri dari K variabel  $y_t = (y_{1t}, \dots, y_{kt}, \dots, y_{Kt})$  untuk  $k = 1 \dots K$ . Proses VAR( $p$ ) didefinisikan sebagai :

$$y_t = A_1 y_{t-1} + \dots + A_p y_{t-p} + CD_t + u_t \quad (2.1)$$

di mana  $A_i$  adalah matrik koefisien ( $K \times K$ ) untuk  $i = 1, \dots, p$  dan  $u_t$  merupakan dimensi K dari proses *white noise* yang mempunyai matrik kovarian  $\sum_u$ . Matrik C adalah matrik koefisien yang berdimensi ( $K \times M$ ) dan  $Dt$  merupakan matrik ( $M \times 1$ ) yang berisi konstanta [20].

Persamaan (2.1) dapat ditulis dalam bentuk polinomial lag  $A(L) = (I_K - A_1 - \dots - A_p)$  sebagai berikut :

$$A(L) y_t = CD_t + u_t \quad (2.2)$$

Salahsatu karakteristik dari proses VAR( $p$ ) adalah stabilitasnya. Artinya bahwa prosesnya menghasilkan deret waktu yang stasioner dengan rata-rata yang tidak berubah pada fungsi waktu.

Stabilitas dari proses VAR( $p$ ) secara empiris dapat dianalisis dengan memperhitungkan *eigenvalues* dari matrik koefisien. Proses VAR( $p$ ) dapat dituliskan sebagai proses VAR(1) sebagai berikut :

$$\xi_t = A\xi_{t-1} + v_t \quad (2.3)$$

dengan

$$\xi_t = \begin{bmatrix} y_t \\ \vdots \\ y_{t-p+1} \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & \dots & A_{p-1} & A_p \\ I & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & I & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & I & 0 \end{bmatrix}, v_t = \begin{bmatrix} u_t \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

di mana dimensi dari vector  $\xi_t$  dan  $v_t$  adalah ( $K_p \times 1$ ) dan matrik A adalah ( $K_p \times K_p$ ). Apabila modulus *eigenvalues* dari A kurang dari 1 maka proses VAR( $p$ ) adalah stabil [21]. Dengan sampel variabel  $y_1, \dots, y_T$  dan nilai pre-sampel  $y_{-p+1}, \dots, y_0$ , koefisien dari proses VAR( $p$ ) dapat diestimasi dengan menggunakan *least-squares* yang diterapkan pada masing-masing persamaan.

## 2.3. Granger Causality

Tujuan dari uji *Granger Causality* adalah mendeteksi ada tidaknya hubungan sebab-akibat (*causalities*) antar variabelnya. Variabel  $y_{1t}$  dikatakan "*granger-causes*" variabel  $y_{2t}$ , apabila variabel  $y_{1t}$  membantu memprediksi variable  $y_{2t}$ . [21].

Untuk melakukan kedua uji tersebut, vector dari variabel  $y_t$  dibagi 2 subvektor  $y_{1t}$  dan  $y_{2t}$  dengan dimensi ( $K_1 \times 1$ ) dan ( $K_2 \times 1$ ) dengan  $K = K_1 + K_2$ . Proses VAR ( $p$ ) dapat dituliskan kembali dalam bentuk persamaan :

$$\begin{bmatrix} y_{1t} \\ y_{2t} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^p \begin{bmatrix} \alpha_{11,i} & \alpha_{12,i} \\ \alpha_{21,i} & \alpha_{22,i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{1,t-i} \\ y_{2,t-i} \end{bmatrix} + CD_t + \begin{bmatrix} u_{1t} \\ u_{2t} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Subvektor  $y_{1t}$  tidak "*granger-cause*"  $y_{2t}$  apabila  $\alpha_{21,t} = 0$  untuk  $i = 1, 2, \dots, p$  dan sebaliknya Subvektor  $y_{1t}$  "*granger-cause*"  $y_{2t}$  apabila  $\alpha_{21,t} \neq 0$  untuk  $i = 1, 2, \dots, p$ . Dengan demikian uji *Granger Causality* ini akan menguji apakah sebuah variabel dapat membantu memprediksi variabel yang lain [21].

Analisis *Granger Causality* ini banyak digunakan untuk mendeteksi adanya kausalitas antar variabel dalam ilmu ekonometrik. Disebut *Granger Causality*, karena konsep pertama kausalitas ini diperkenalkan oleh Granger, dengan gagasan bahwa akibat datang setelah adanya penyebab, sehingga apabila variabel x (penyebab) mempengaruhi variabel z (akibat), maka variabel x seharusnya membantu prediksi variabel z.

Untuk merealisasikan gagasan ini, anggaplah  $\Omega_t$  merupakan himpunan informasi yang mengandung semua informasi yang tersedia di alam semesta selama periode  $t$ . Misalkan  $z_t(h|\Omega_t)$  merupakan optimal *h-step predictor* (minimum MSE) dari proses  $z_t$  pada titik awal  $t$ , berdasarkan informasi dalam  $\Omega_t$ . MSE *forecast* dapat dinyatakan dalam  $\sum_z(h|\Omega_t)$ , proses  $x_t$  dikatakan penyebab  $z_t$  pada kasus Granger apabila

$$\sum_z(h|\Omega_t) < \sum_z(h|\Omega_t \setminus \{x_s | s \leq t\}) \quad (2.5)$$

Dengan kata lain,  $z_t$  dapat diprediksi lebih efisien apabila informasi pada proses  $x_t$  diikutkan dalam penambahan terhadap semua informasi lain di alam semesta, maka  $x_t$  merupakan granger cause  $z_t$ .

Namun secara umum dapat dikatakan bahwa *Granger Causality* tidak sesuai untuk pengujian hubungan kausalitas dalam konteks *strict-sense* [21]. Persamaan (2.4) menunjukkan bahwa uji *Granger Causality* dapat dilakukan dengan mendapatkan dahulu model VAR-nya. Kemudian dilakukan penghitungan untuk mendapat nilai  $\alpha$  dalam mencari kausalitas antar variabelnya.

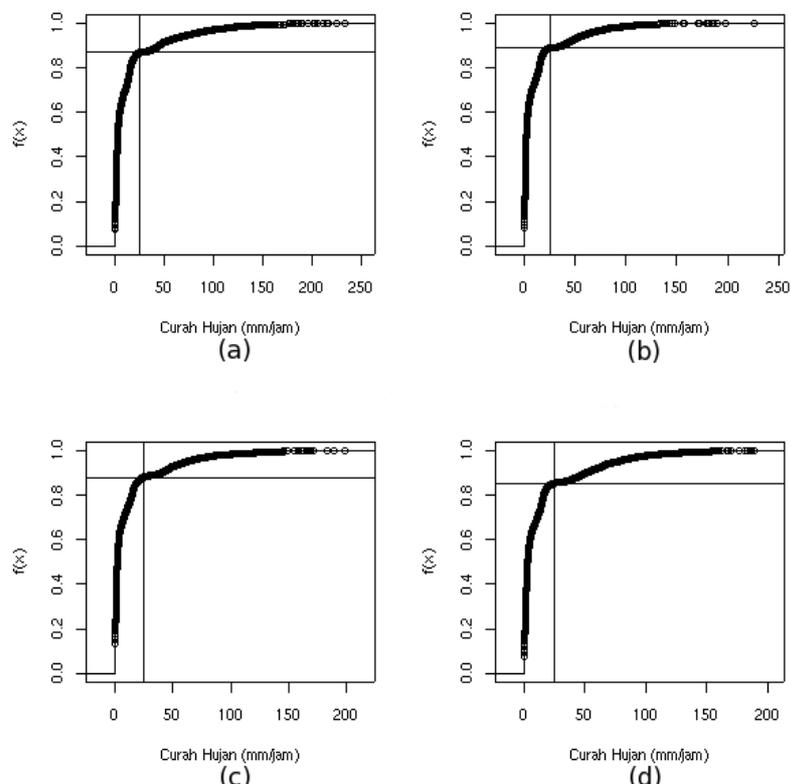
### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini terdapat 3 hasil dan pembahasan tentang pemodelan curah hujan selama 1 tahun pengukuran dari Januari 2008 – Februari 2009 yaitu distribusi hujan (Cumulative Distribution Function, CDF), pemodelan VAR curah hujan dan uji Granger Causality dengan kaitan terhadap aplikasi komunikasi radio gelombang milimeter.

#### 3.1. Distribusi Hujan

Pengukuran curah hujan selama periode Januari 2008 – Februari 2009 terdapat 65 event hujan. Grafik CDF hujan ini merupakan grafik distribusi *marginal* dari masing-masing lokasi curah hujan. Grafik distribusi ditampilkan pada gambar 3.1 berikut dengan (a) menunjukkan distribusi hujan pada rain gauge A, (b) menunjukkan distribusi hujan pada rain gauge B, (c) menunjukkan distribusi hujan pada rain gauge C dan (d) menunjukkan distribusi hujan pada rain gauge D. Berdasarkan grafik distribusi hujan tersebut dapat disimpulkan bahwa hujan di Indonesia tergolong hujan stratiform dengan curah hujan di bawah 25 mm/jam mempunyai prosentase rata-rata 87,25% [20].

Salah parameter yang paling penting dalam analisis redaman hujan adalah  $R_{0.01}$  yaitu parameter probabilitas terjadinya curah hujan selama 0.01% dari waktu pengukuran [22]. Nilai  $R_{0.01}$  ditunjukkan pada tabel 3.1 dengan masing-masing lokasi rain gauge. Nilai rata-rata  $R_{0.01}$  pada semua lokasi pengukuran menunjukkan 124,32 mm/jam. Apabila dibandingkan dengan hasil penelitian distribusi hujan di Malaysia di mana nilainya  $R_{0.01}$  sebesar 118,5 mm/jam [23] sehingga terdapat selisih 4,9% saja. Sedangkan nilai  $R_{0.01}$  menurut standar ITU-R untuk negara-negara tropis adalah 120 mm/jam [22], apabila nilai ini dibandingkan dengan hasil di Indonesia mempunyai selisih 3,6% saja.



Gambar 3.1. Distribusi Hujan (a) Distribusi Hujan Rain gauge A (b) Distribusi Hujan Rain gauge B (c) Distribusi Hujan Rain gauge C dan (d) Distribusi Hujan Rain gauge D

Tabel 3.1. Nilai  $R_{0.01}$  dari Semua Lokasi Hujan

Lokasi Rain Gauge	$R_{0.01}$ (mm/jsm)
Lokasi A	140.59
Lokasi B	108.35
Lokasi C	120.68
Lokasi D	127.65
<i>Nilai Rata-rata</i>	124.32
<i>Malaysia (rata-rata)</i>	118.5

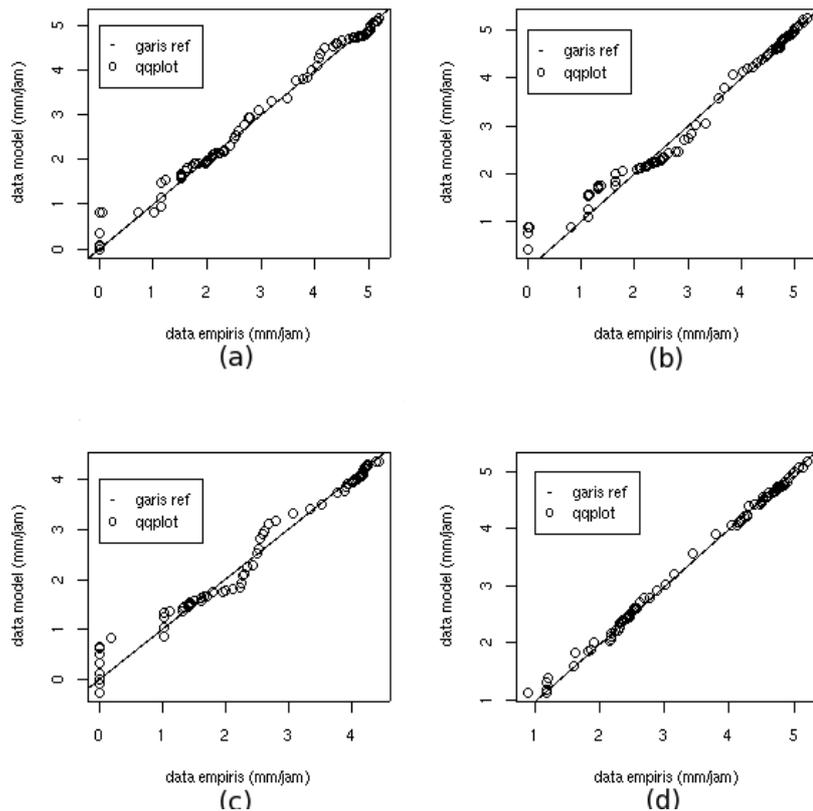
### 3.2. Model VAR

Pada pemodelan VAR ini menggunakan 65 *event* hujan yang diambil dari 7 bulan pengukuran hujan selama pengukuran Januari 2008 – Februari 2009 yaitu 5 bulan di tahun 2008 (Januari, Februari, Maret, April dan Desember) dan 2 bulan di tahun 2009 (Januari dan Februari). Untuk pembahasan digunakan satu *event* hujan saja yaitu *event* hujan tanggal 28 Februari 2008. Karakteristik hujan pada *event* ini ditunjukkan pada tabel 3.2. Pada *event* hujan ini diperoleh model VAR(1) dengan orde *lag*  $p=1$  yang diperoleh dengan menggunakan estimasi *Akaike Information Criterion* (AIC). Pada model VAR(1) *event* hujan ini mempunyai rata-rata spasial RMSE sebesar 0.373. Disebut rata-rata spasial karena masing-masing model data lokasi raingauge mempunyai nilai RMSE sehingga nilainya harus di rata-rata berdasar lokasi raingauge-nya. Secara keseluruhan nilai rata-rata spasial RMSE untuk semua model VAR pada semua *event* hujan berkisar pada rentang antara 0,273 – 0,763. Proses pemodelan VAR untuk keseluruhan *event* hujan menggunakan perangkat lunak statistik open source R versi 2.8.1 yang diinstal pada sistem operasi Mandriva Linux 2008 dengan kernel 2.6.28.4 [20].

Validasi terhadap model VAR(1) tersebut harus dilakukan untuk mengetahui apakah model yang dihasilkan sudah tepat atau belum. Metoda yang digunakan yaitu metode perbandingan distribusi dengan qqplot. Metoda validasi qqplot adalah membandingkan distribusi data pengukuran dan data pembangkitan model apakah kedua distribusinya mengikuti garis referensi 45 derajat atau tidak. Dengan kata lain uji qqplot ini akan membuktikan apakah distribusi data pengukuran dan distribusi data pembangkitan model VAR berasal dari distribusi yang sama atau tidak [20]. Uji akan dilakukan dengan distribusi *marginal* dan distribusi gabungan. Uji qqplot untuk distribusi *marginal* ditunjukkan pada gambar 3.2 berikut ini. Secara keseluruhan uji qqplot untuk distribusi *marginal* menunjukkan bahwa grafik qqplot sudah mengikuti garis referensi 45 derajat. Hal ini menunjukkan bahwa bahwa distribusi *marginal* data pengukuran dan data pembangkitan model berasal dari distribusi yang sama.

Tabel 3.2. Karakteristik Event Hujan 28 Februari 2008

Lokasi	R-max (mm/jam)	Rata-rata (mm/jam)
A	176.78	50.03
B	186.06	55.9
C	83.61	24.9
D	181.49	53.43



Gambar 3.2. Validasi Model VAR(1) dengan Metode QQPlot Untuk Event Hujan 28 Februari 2008 Pada Distribusi Marginal

Validasi model VAR menggunakan metode qqplot di atas membuktikan bahwa model VAR(1) yang dihasilkan merupakan model VAR yang tepat dan sesuai untuk data pengukuran event hujan 28 Februari 2008. Selanjutnya dilakukan langkah-langkah pemodelan VAR dan validasi yang sama untuk semua event hujan (64 event hujan yang lain) selama periode Januari 2008 – Februari 2009. Hasil pemodelan VAR untuk semua event hujan ditunjukkan pada tabel 3.3. berikut. Dari tabel tersebut dapat disimpulkan bahwa model VAR(1) mempunyai prosentase paling besar yaitu sebesar 41.54%. Secara keseluruhan model VAR(1) dapat mewakili semua model VAR yang lain apabila digunakan untuk pembangkitan data hujan selama periode satu tahun pengamatan.

Tabel 3.3. Hasil Pemodelan VAR(p) Untuk Semua Event Hujan

VAR(p)	Jumlah event	Prosentase (%)
VAR(1)	27	41.54
VAR(2)	14	21.54
VAR(3)	8	12.3
VAR(4)	8	12.3
VAR(6)	5	7.7
VAR(7)	1	1.54
VAR(8)	2	3.08
<i>Total Event</i>	<i>65</i>	<i>100</i>

### 3.3. Uji Granger Causality dan Aplikasinya

Uji ini untuk mencari hubungan timbal balik (*interrelationship*) antara variabel pada satu lokasi dengan lokasi *rain gauges* yang lain. Apakah masing-masing variabel berpengaruh

signifikan atau tidak terhadap variabel di lokasi yang lain, atau hanya berpengaruh pada dirinya sendiri saja. Uji ini akan diterapkan pada masing-masing event hujan dengan menggunakan hasil *orde p*. Hasil uji untuk event hujan 28 Februari 2008 dengan model VAR(1) ditunjukkan pada tabel 3.4 di bawah ini. Seperti terlihat tabel 3.4 dengan *confidence interval* 95%, (pemilihan CI=95% mengacu pada [18]) menunjukkan bahwa pada event ini terjadi *unidirectional granger cause* pada B→A (hujan di lokasi B mempengaruhi hujan di lokasi A namun tidak sebaliknya), D→A (hujan di lokasi D mempengaruhi hujan di lokasi A namun tidak sebaliknya), B→C (hujan di lokasi B mempengaruhi hujan di lokasi C namun tidak sebaliknya) dan D→C (hujan di lokasi D mempengaruhi hujan di lokasi C namun tidak sebaliknya).

*Bidirectional granger cause* pada A↔C artinya variabel pada model lokasi A dan lokasi C saling mempengaruhi dan B↔D artinya variabel pada model lokasi B dan lokasi D saling mempengaruhi. Dari kasus kedua *bidirectional granger cause* di atas membuktikan bahwa sel hujan tersebut bergerak atau berpindah-pindah, hal ini disebabkan sel hujan tidak hanya berdiam di suatu tempat tetapi berjalan dan setiap hujan yang terbentuk mempunyai diameter dan curah hujan yang berbeda-beda.

Dari hasil uji *Granger Causality* pada tabel 3.4 dapat diketahui dimensi sel hujan maksimum yaitu jarak terjauh di mana terjadi *granger-cause* yaitu D→A dengan jarak 1550 m. Dalam dimensi sel hujan 1550 m ini terbentuk beberapa dimensi sel hujan yang lebih kecil pada event hujan yang sama. Pada tabel 3.5 berikut memuat diameter sel hujan yang terjadi akibat *granger cause* untuk event hujan ini. Pemilihan dimensi sel hujan menggunakan dimensi sel hujan yang paling besar yang ditandai dengan jarak *granger cause* terjauh. Sifat *granger cause* tidak berpengaruh apakah *unidirectional* atau *bidirectional* karena sifat ini diduga adanya pengaruh arah angin pada saat event hujan terjadi. Sedangkan pengaruh arah angin ini belum dapat dianalisis karena data angin yang ada merupakan data angin rata-rata harian dari BMKG Juanda Surabaya.

Tabel 3.4. Uji Granger Causality Untuk Event Hujan 28 Februari 2008

Lokasi	<i>p-value</i>	<i>Granger Cause</i>
B→A	1.57E-5	YA
C→A	1.96E-4	YA
D→A	2.80E-8	YA
A→B	2.57E-1	TIDAK
C→B	6.90E-2	TIDAK
D→B	2.67E-12	YA
A→C	4.58E-3	YA
B→C	1.29E-7	YA
D→C	2.09E-8	YA
A→D	2.15E-1	TIDAK
B→D	1.33E-2	YA
C→D	3.02E-1	TIDAK

Tabel 3.5. Granger Causality dan Diameter Sel Hujan Pada Event Hujan 28 Februari 2008

<i>Granger Cause</i>	Arah	Diameter Sel Hujan (m)
B →A	<i>Unidirectional</i>	700
B →C		400
D →C		550
D →A		1550
A ↔C	<i>Bidirectional</i>	1000

B ↔ D		950
-------	--	-----

Pengujian *Granger Causality* pada 65 *event* hujan, diperoleh hasil 63 *event* hujan saja yang terdapat kasus *granger cause*. Sedangkan 2 *event* hujan yang tidak mempunyai kasus *granger cause* adalah *event* hujan 8 April 2008 dan 28 Januari 2009. *Granger-cause* tidak terjadi apabila hujan bersifat lokal dan tidak merata sepanjang *event* hujannya seperti ditunjukkan pada kedua *event* hujan di atas.

Dari hasil uji *Granger Causality* ini diperoleh prosentase dimensi sel hujan untuk 63 *event* hujan seperti ditunjukkan pada tabel 3.6 berikut di mana D merupakan dimensi sel hujan. Tabel 3.6 menunjukkan bahwa prosentase dimensi sel hujan antara 1000 – 1550 m ( $1000 \leq D \leq 1550$  m) dan lebih dari dan sama dengan 1550 m adalah 88,88 %. Prosentase ini merupakan penjumlahan antara 61,9% untuk  $D \geq 1550$  m dan 26,98% untuk  $1000 \leq D < 1550$  m. Hasil ini sesuai dengan penelitian sel hujan menggunakan radar cuaca di Malaysia tahun 2005 yang terdapat pada makalah [23] yaitu sel hujan di Malaysia yang berdiameter antara 1000 – 2000 m mempunyai prosentase 85,22 %. Sedangkan penelitian kedua di Malaysia pada tahun 1999 menggunakan 4 buah *rain gauge* memperoleh dimensi sel hujan antara 1200 – 1500 m [24]. Kedua hasil penelitian dimensi sel hujan di Malaysia ini sesuai dan tidak berbeda dengan hasil penelitian sel hujan di Surabaya.

Dengan merujuk pada makalah [25], apabila diimplementasikan pada aplikasi *site diversity* pada komunikasi radio gelombang milimeter maka diameter sel hujan antara 1000 – 1500 m merupakan jarak minimum antara 2 *site diversity* yang membentuk sudut 180 derajat. Diameter sel hujan tersebut lebih banyak disebabkan oleh curah hujan lebih kecil dari 25 mm/jam (dengan prosentase 87,25%) atau hujan *stratiform*.

Tabel 3.6. Distribusi Dimensi Sel Hujan

Dimensi Sel Hujan (m)	Jumlah <i>Event</i>	Prosentase (%)
$D \geq 1550$	39	61.9
$1000 \leq D < 1550$	17	26.98
$950 \leq D < 1000$	3	4.76
$700 \leq D < 950$	3	4.76
$550 \leq D < 700$	1	1.60
<i>Total Event</i>	63	100

#### 4. SIMPULAN

Pemodelan VAR menggunakan data curah hujan yang diukur menggunakan *raingauge* pada 4 lokasi pengukuran yang berbeda dengan rentang jarak antara 400 m sampai 1550 m selama periode pengukuran dari Januari 2008 – Februari 2009 menunjukkan bahwa model VAR sudah tepat dan valid untuk pemodelan curah hujan tersebut dengan menggunakan metode validasi *qqplot*. Akurasi model untuk semua model VAR memiliki akurasi yang baik dengan rentang nilai rata-rata spasial RMSE antara 0,273 – 0,763.

Distribusi hujan selama periode pengukuran termasuk kategori hujan *stratiform* dengan prosentase 87,25% untuk curah hujan di bawah 25 mm/jam. Nilai  $R_{0.01}$  untuk periode pengukuran curah hujan pada penelitian ini adalah 124,32 mm/jam, nilai ini mempunyai perbedaan yang tidak signifikan terhadap hasil yang dicapai Malaysia dan ITU-R.

Uji *Granger Causality* terhadap 65 model VAR yang telah diperoleh, kemudian ditarik hubungannya dengan dimensi sel hujan menunjukkan bahwa dimensi sel hujan di Indonesia untuk jarak lebih dari dan sama dengan 1550 m mempunyai prosentase 61,9% dan jarak antara 1000 – 1550 m mempunyai prosentase 26,98%. Secara keseluruhan dimensi sel hujan antara 1000 – 1550 m dan lebih dari dan sama dengan 1550 m adalah 88,88%. Hasil perhitungan dimensi sel hujan ini dibandingkan dengan hasil di Malaysia menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan yang signifikan.

Dalam aplikasi *site diversity* pada sistem komunikasi radio gelombang milimeter besaran dimensi sel hujan ini sama dengan jarak minimum antara 2 *site diversity* yang membentuk garis lurus dengan besaran sudut 180°.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] S.A. Callagan. *Rain field for fixed radio systems using fade mitigation Techniques*. URSIGA 2008. Chicago USA. 2008
- [2] B.C. Gremont, M. Filip. Spatio-temporal Rain Attenuation Model for Application to Fade Mitigation Techniques. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Vol. 52 No.5. 2004.*
- [3] M. Salehudin, B. Hanantasena, L. Wijedman. *Ka Band Line-of-Sight Radio Propagation Experiment in Surabaya Indonesia*. 5<sup>th</sup> Ka-Band Utilization Conference. Taormina Italy. 1999; 161-165.
- [4] G. Hendratoro, A. Mauludiyanto, P. Handayani. *An Autoregressive Model for Simulation of Time Varying Rain Rate*. 10<sup>th</sup> International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics and URSI Conference. Ottawa Canada. 2004.
- [5] G. Hendratoro, Indrabayu, T. Suryani, A. Mauludiyanto. A Multivariate Autoregressive Model for Rain Attenuation on Multiple Short Radio Link. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2006. Vol 5 ;54-57.*
- [6] M.S. Yadnya. Modelling Rain Rate Using ARMA in Surabaya. Tesis. Surabaya. ITS; 2008.
- [7] Rusdi M. Penerapan Model Fuzzy ARMA untuk Curah Hujan di Surabaya. Tesis. Surabaya. ITS; 2009.
- [8] D.R. Cox, V. Isham. *A Simple Spatio-Temporal Model of Rainfall*. Proceeding of The Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences. London. 1988.
- [9] K.S. Paulson. *The Spatial Temporal Statistic of Rain Rate Random Fields*. Radio Communication Research Unit. London. 2002.
- [10] Z. Zhanga and P. Switserb. *Stochastic Space-Time Regional Rainfall Modeling Adapted to Historical Rain Gauge Data*. Water Resources Research American Geophysical Union. USA. 2006.
- [11] Y. Kamarianakis, P. Prastacos. *Spatial-Time Series Modeling: A Review of The Proposed Methodologies*. Working Paper 0604, Department of Economics, University of Crete. Greece. 2006
- [12] X. De Luna, M.G. Genton. *Predictive Spatio-Temporal Models for Spatially Sparse Environmental Data*. Statistica Sinica. Spain. 2005; 15:547-658
- [13] C.A. Glasbey and D.J. Allcroft. *Spatiotemporal ARMA for Solar Radiation*. Applied Statistics. Scotland. 2008; 57:343-355
- [14] Suhartono. VARIMA and STAR Model Evaluation for Space-Time Series Forecasting. *Journal of Mathematica Alternative*. Bandung. 2004; Vol 3. No. 2
- [15] A. Alonso-Rodriguez. *VARMA Modeling of The Production Function*. International Advance in Economic Research. 2000; Vol. 6 No. 2
- [16] Vinod. Vector Models for Multivariate Problems. Hand on Intermediate Econometrics Using R. Fordham University USA. 2005.
- [17] G. Athanasopoulos, F. Vahid. *VARMA vs. VAR for Macroeconomic Forecasting*. Working Paper 4/06. Monash University. 2006
- [18] X. Zhang, Rui Gu, X. Zhao. *Electricity Consumption and Economic Activities in China*. Wireless Communications, Networking and Mobile Computing 4<sup>th</sup> International Conference. China. 2008.
- [19] C.H. Zhao, J. Yuan, J.G. Kang. *Oil Consumption and Economic Growth in China: a Multivariate Cointegration Analysis*. The International Conference on Risk Management & Engineering Management. 2008.
- [20] Sis Soesetijo. Penerapan Vector AR Dengan Uji Granger Causality Untuk Pemodelan Deret Ruang-Waktu Curah Hujan Di Surabaya. Tesis. Surabaya. ITS; 2010.
- [21] B. Pfaff. VAR, SVAR and SVEC Models: Implementation Within R Package vars. *Journal of Statistical Software*. 2008; Vol. 27. Issue 4.
- [22] Recommendation ITU-R P.837-2. 1999.
- [23] N.H.H Khamis, J. Din, T.A. Rahman. *Analysis of Rain Cell Size Distribution from Meteorological Radar Data for Rain Attenuation Studies*. Asia-Pasific Conference On Applied Electromagnetics Proceedings. Johor Bahru-Malaysia. 2005.
- [24] N.H.H Khamis, J. Din, T.A. Rahman. *Determination of Rain Cell Size Distribution for Microwave Link Design in Malaysia*. RF and Microwave Conference. Selangor-Malaysia. 2004.
- [25] S. Begum, C. Nagaraja, I. Otung . *Analysis of Rain Cell Size Distribution for Application in Site Diversity*. Proceeding of EuCAP 2006. Nice- France. 2006