

MODEL HIDROLOGI RUNTUN WAKTU UNTUK ANALISIS HUJAN-ALIRAN MENGUNAKAN METODE GABUNGAN TRANSFORMASI WAVELET- IHACRES

(Studi Kasus: Sub DAS Lubuk Bendahara)

Ardi Wahyudi¹⁾, Imam Suprayogi²⁾, Manyuk Fauzi²⁾

¹⁾Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

²⁾Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

Kampus Bina Widya Jln. HR Soebrantas KM 12.5 Pekanbaru, Kode Pos 28293

Email: ardiwahyudi1337@gmail.com

ABSTRACT

IHACRES model is one of the well known rainfall-runoff model and have been successful in investigating the hydrology response of the various watersheds, espescially in indonesia. Previous research in the Rokan Sub-watershed, station AWLR Lubuk Bendahara, Riau Province. The results showed yhat the model IHACRES can be said is still not reliable enough or has not met since the value of R^2 generated at simulation stage at 0,341. It is necessary to further develop an approach using the combined model of wavelet transform – IHACRES with the aim to improve the performance rainfall-runoff model. The results showed that the best scheme in the calibration phase is scheme 1 (3 years calibration) a significant increase in overall input data is filtered in the form of rain data, climatology and streamflow using wavelet transform wherein R^2 value of 0,369. While the results of statistical tests of corelation coefficient (R) indicates that the Haar wavelet model of level 2 increased by 0,03 compared to the original data without filtering by value respectively 0,645 and 0,642. This value is considered a strong correlation. The results showed the use of wavelet transform – IHACRES proviede enhanced performance rainfall-runoff model.

Keyword : wavelet haar, wavelet transform, rainfall- runoff, IHACRES model

A. PENDAHULUAN

Model hidrologi merupakan gambaran sederhana dari suatu sistem hidrologi yang aktual (Brook *et al*, 1991), untuk keperluan analisis tentang keberadaan air menurut aspek jumlah, waktu, tempat, probabilitas dan runtun waktu (*time series*). Model hidrologi memiliki banyak manfaat, salah satunya dapat digunakan untuk prediksi debit. Prediksi debit dari model hidrologi pada suatu Daerah Aliran Sungai (DAS) dapat dimanfaatkan untuk menjadi Sistem Peringatan Dini (*Early Warning System*) terhadap kejadian banjir.

Salah satu model hujan aliran yang cukup dikenal dan banyak diaplikasikan di beberapa Negara oleh para praktisi dan peneliti adalah model IHACRES. Model IHACRES (*Identification of Unit Hydrograph and Component Flow from*

Rainfall, Evaporation and Stream Flow Data) dikembangkan di Inggris, dengan mendeskripsikan hujan aliran menjadi dua sub proses yakni sub proses vertikal yang digambarkan oleh *Non Linear Loss Module* dan sub proses lateral yang diimplementasikan melalui *Linear Unit Hydrograph Module* (Indarto, 2010).

Model IHACRES telah berhasil diterapkan untuk menyelidiki respon hidrologi di berbagai Sub-DAS khususnya di Indonesia seperti di Sub-DAS Klopo Sawit dan Rawatamtu (Adriani dan Novita, 2008), Bedadung (Indarto, 2006), Siak Hulu (Mashuri, 2014), dan Indragiri (Ryan, 2013). Pada penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Reza (2014) dalam rangka mengkalibrasi model IHACRES untuk simulasi neraca air harian di Sub-

DAS Lubuk Bandahara, Rokan Hulu. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa Model IHACRES dapat dikatakan masih kurang handal atau belum memenuhi karena nilai R^2 yang dihasilkan pada tahap simulasi sebesar 0,341.

Keunggulan transformasi *wavelet* dalam penelitian ini melakukan proses dekomposisi dan rekonstruksi pada data yang masih tersembunyi yang dipengaruhi oleh variabel waktu. Tujuan pengguna transformasi *wavelet* agar dapat meningkatkan kinerja performa model IHACRES pada model hujan-aliran (*rainfall-runoff*).

Merujuk pada penelitian sebelumnya, bagaimana cara meningkatkan performa model IHACRES pada Stasiun AWLR Lubuk Bandahara. Maka perlu dikembangkan lagi suatu pendekatan dengan menggunakan model gabungan transformasi *wavelet* –IHACRES.

1. Transformasi Wavelet

Kata *wavelet* dikemukakan oleh Morlet dan Grossmann pada awal tahun 1980, yang berarti gelombang kecil. Transformasi *wavelet* merupakan suatu transformasi linier yang hampir mirip dengan transformasi Fourier, dengan satu perbedaan penting. Transformasi *wavelet* membolehkan penempatan waktu dan komponen-komponen frekuensi yang berbeda dari sinyal yang diberikan. Transformasi *wavelet* memiliki beberapa keistimewaan unik yang membuatnya sangat cocok untuk aplikasi khusus ini. Tidak seperti fungsi-fungsi dasar yang digunakan dalam analisa fourier, *wavelet* tidak hanya dibatasi pada frekuensi tapi juga pada waktu. Pembatasan atau penempatan ini memperhitungkan deteksi waktu dari kejadian gangguan-gangguan yang terjadi secara tiba-tiba, seperti gangguan transien. Transformasi *wavelet* dibagi menjadi dua bagian besar, yaitu transformasi *wavelet* kontinu (TWK) dan transformasi *wavelet* diskrit (TWD). Transformasi *Wavelet* Kontinu (TWK) mempunyai cara kerja dengan menghitung konvolusi sebuah sinyal dengan sebuah

jendela modulasi pada setiap waktu dengan setiap skala yang diinginkan. Jendela modulasi yang mempunyai skala fleksibel inilah yang biasa disebut induk *wavelet* atau fungsi dasar *wavelet*. Menurut Reza (2013), dibandingkan dengan TWK, Transformasi *Wavelet* Diskrit (TWD) dianggap relatif lebih mudah dalam pengimplementasiannya. Prinsip dasar dari TWD adalah bagaimana cara mendapatkan representasi waktu dan skala dari sebuah sinyal menggunakan teknik pemfilteran digital dan operasi *sub-sampling*. Bentuk dari TWD dapat dilihat pada persamaan berikut :

$$TWD(m,n) = \sum (a_0^m)^{-0.5} f(k) \left[\frac{\psi(n - ka_0^m)}{a_0^m} \right]$$

dengan :

- $\psi(k)$ = fungsi *wavelet* (*wavelet* induk),
- $f(k)$ = sinyal asli,
- a_0^m = konstanta skala,
- ka_0^m = konstanta translasi,
- k,m = variabel integer.

Sutarno (2010) dan Listyaningrum (2007) menjelaskan, pada proses *sub-sampling* sinyal pertama-tama dilewatkan pada rangkaian filter *high-pass* dan *low-pass*, kemudian setengah dari masing-masing keluaran diambil sebagai sample melalui operasi *sub-sampling*. Proses ini disebut sebagai proses dekomposisi satu tingkat. Keluaran dari filter *low-pass* digunakan sebagai masukan di proses dekomposisi tingkat berikutnya. Proses ini diulang sampai tingkat proses dekomposisi yang diinginkan. Gabungan dari keluaran-keluaran filter *high-pass* dan satu keluaran filter *low-pass* yang terakhir, disebut sebagai koefisien *wavelet*, yang berisi informasi sinyal hasil transformasi yang telah terkompresi. Pasangan filter *high-pass* dan *low-pass* yang digunakan harus memenuhi persamaan berikut:

$$h(L - 1 - n) = (-1)^n \cdot g(n)$$

Dengan :

$h[n]$ = filter high-pass,
 $g[n]$ = filter low-pass,
 L = panjang masing-masing filter.

Teknik pemfilteran TWD memiliki persamaan dengan pendekatan klasik untuk *denoising time series* yang berasal dari analisis Fourier yang mengasumsikan bahwa *noise* merupakan bentuk lain dari getaran pada frekuensi tinggi (Irwandinata, 2010). Dengan pemikiran ini, suatu *time series* pada dasarnya dapat didekomposisi kedalam bentuk gelombang sinus dari frekuensi berbeda dan apabila dilakukan proses penghilangan *noise*, maka hanya data frekuensi rendah yang akan ditinggalkan dalam pola *time series*. Transformasi Wavelet untuk penghilangan *noise* (*denoising*) mengasumsikan bahwa analisis *time series* pada resolusi yang berbeda mungkin dapat memisahkan antara bentuk sinyal asli (pola data sebenarnya) dengan *noise*-nya. Proses penghilangan *noise* (*denoised*) pada Transformasi Wavelet dapat dilakukan dengan cara menggunakan nilai *threshol*d tertentu untuk melakukan filter terhadap data koefisien detail kemudian direkonstruksi kembali menjadi bentuk awal (polanya).

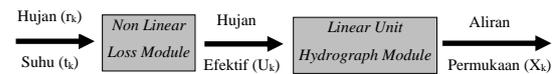
Ada beberapa keluarga dari Transformasi Wavelet Diskrit diantaranya adalah Haar, Daubechies, Symlets, Coiflets. Wavelet Daubechies merupakan salah satu jenis Transformasi Wavelet Diskrit yang paling terkenal dan banyak dipergunakan dalam bidang citra digital, audio, kelistrikan dan hal-hal lain yang berhubungan dengan penggunaan sinyal.

Wavelet Haar adalah *Wavelet* yang paling tua dan sederhana. *Wavelet Haar* sama dengan *Wavelet Db1* (*Daubechies* orde 1). Panjang tapis *Wavelet Haar* adalah $2N$. *Wavelet Haar* memiliki level dalam tingkatan dekomposisinya. Angka level dari wavelet Haar menunjukkan berapa kali sinyal akan melakukan proses dekomposisi.

2. Model IHACRES

Model IHACRES (*Identification of Unit Hydrograph and Component Flows from Rainfall, Evaporation and Stream*

Flow Data) menurut Croke dan Jakeman (Wheater, *et al*, 2008) merupakan gabungan dari model konseptual dan model matrik dengan melakukan penyederhanaan terhadap model matrik untuk mengurangi ketidakpastian parameter yang melekat dalam model hidrologi, sementara pada saat yang sama berusaha mewakili proses internal lebih detail dibandingkan dengan model matrik. Proses hidrologi menurut konsep IHACRES disederhanakan sebagai berikut:



Gambar 1. Deskripsi Proses Hujan Aliran Menurut IHACRES

(Sumber: Indarto, 2010)

Berdasarkan Gambar 1, siklus hidrologi menurut IHACRES dibedakan menjadi dua. Sub proses vertikal yang digambarkan oleh *Non Linear Loss Module* dan sub proses lateral yang diimplementasikan melalui *Linear Unit Hydrograph Module*. *Non linear loss module* berfungsi untuk mengkonversi hujan menjadi hujan efektif.

Proses *non linear loss module* merupakan proses perubahan hujan menjadi aliran permukaan pada skala DAS diasumsikan bersifat *non linear*. Kinerja *non linear loss module* ditentukan oleh kondisi DAS atau kadar air pada permukaan tanah. Perhitungan curah hujan efektif (u_k) menurut Ye *et al* dalam Sriwongsitanon dan Taesombat (2011) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned}
 u_k &= [c(\phi_k - l)]^p r_k \\
 \phi_k &= r_k + \left(1 - \frac{1}{\tau_k}\right) \phi_{k-1} \\
 \tau_k &= \tau_w e^{(0,062 f (t_r - t_k))}
 \end{aligned}$$

Dengan u_k adalah curah hujan efektif (mm), r_k adalah curah hujan terukur (mm), c adalah keseimbangan massa (mm^{-1}), l adalah indeks ambang batas kelembaban tanah untuk menghasilkan aliran, p adalah respon jangka waktu *non linear*. Parameter

l dan p hanya digunakan untuk DAS yang bersifat sementara (*ephemeral*), ϕ_k adalah kelembaban tanah (mm), τ_k adalah laju pengeringan, t_k adalah temperatur terukur ($^{\circ}\text{C}$), τ_w adalah laju pengeringan pada saat suhu referensi. Parameter ini mempengaruhi variasi drainase tanah dan laju infiltrasi, f adalah modulasi temperatur ($^{\circ}\text{C}^{-1}$). Parameter ini berkaitan dengan variasi evapotranspirasi musiman yang dipengaruhi oleh iklim, tata guna lahan dan penutup lahan, dan t_r adalah temperatur referensi ($^{\circ}\text{C}$).

Dalam modul linear, curah hujan efektif diubah menjadi limpasan menggunakan hubungan linear. Ada dua komponen yang berpengaruh di dalam aliran yakni aliran cepat (*quick flow*) dan aliran lambat (*slow flow*). Kedua komponen tersebut dapat dihubungkan baik secara paralel maupun seri. Konfigurasi paralel dari kedua komponen dalam kondisi waktu k untuk aliran cepat ($x_k^{(q)}$) dan aliran lambat ($x_k^{(s)}$) yang dikombinasikan untuk menghasilkan limpasan (x_k) disajikan dalam rumusan berikut (Sriwongsitanon dan Taesombat, 2011) :

$$x_k = x_k^{(q)} + x_k^{(s)}$$

$$x_k^{(q)} = -\alpha_q x_{k-1}^{(q)} + \beta_q u_k$$

$$x_k^{(s)} = -\alpha_s x_{k-1}^{(s)} + \beta_s u_k$$

dengan x_k adalah limpasan atau debit (mm), $x_k^{(q)}$ adalah aliran cepat (mm), $x_k^{(s)}$ adalah aliran lambat (mm), α_q adalah angka resesi untuk aliran cepat, α_s adalah angka resesi untuk aliran lambat, β_q adalah respon puncak untuk aliran cepat, dan β_s adalah respon puncak untuk aliran lambat.

Karakteristik respon dinamis (*Dynamic Response Characteristics, DRCs*) merupakan ukuran numerik yang berasal dari curah hujan, evapotranspirasi (ataupun suhu) dan debit sungai dari serangkaian DAS. Adapun karakteristik respon dinamis untuk aliran cepat dan lambat dapat dihitung menggunakan rumus berikut ini menurut (Sriwongsitanon dan Taesombat, 2011):

$$\tau_q = \frac{-\Delta}{\ln(-\alpha_q)}$$

$$\tau_s = \frac{-\Delta}{\ln(-\alpha_s)}$$

Dengan Δ adalah kurun waktu, τ_q adalah konstanta waktu respon cepat (hari) dan τ_s adalah konstanta waktu respon lambat (hari).

Volume perbandingan untuk aliran cepat dan aliran yang lambat dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$v_q = \frac{\beta_q}{1 + \alpha_q} = 1 - v_s = 1 - \frac{\beta_s}{1 + \alpha_s}$$

Dengan v_q adalah volume perbandingan untuk aliran cepat dan v_s adalah volume perbandingan untuk aliran lambat. Model IHACRES memiliki enam parameter model tiga diantaranya berkaitan dengan *non linear loss module* yaitu τ_w , f dan c serta tiga parameter berikutnya berkaitan dengan *linear unit hydrograph module* yaitu τ_q , τ_s dan v_s . Keenam parameter model tersebut dianggap sebagai upaya karakterisasi yang unik dan efisien dari proses hidrologi pada sebuah DAS.

3. Kalibrasi Model

Kalibrasi (*calibration atau calage*) terhadap satu model adalah Tahap kalibrasi merupakan tahap yang digunakan untuk menentukan nilai parameter DAS yang belum diketahui. Dalam proses kalibrasi, nilai-nilai awalnya dianggap berlaku untuk semua parameter dan periode alirannya disimulasikan serta dibandingkan dengan debit-debit terukur.

ini, pada tahap kalibrasi dilakukan pemilihan periode kalibrasi dan periode *warm up*. Menurut Littlewood, *et al* (1999), *Warm up* adalah periode untuk inisiasi dan dicari dengan coba-coba, pemilihan periode *warm up* bertujuan untuk mengisi kondisi awal DAS. Pemilihan periode kalibrasi berdasarkan skema, tahap kalibrasi menggunakan 3 tahun data (2003 - 2005), kemudian sisa panjang data (2006) digunakan pada tahap verifikasi.

Selama proses kalibrasi dilakukan, perlu adanya pengecekan kriteria statistik yaitu R^2 dan bias sebagai indikator bagus atau tidaknya hasil kalibrasi yang dihasilkan. Selain melihat nilai R^2 dan bias, untuk mengontrol nilai parameter yang dihasilkan pada tahap kalibrasi, maka parameter yang dihasilkan disesuaikan *rangeny* berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Sriwongsitanon dan Taesombat (2011). Adapun *range* parameter tersebut dapat dilihat pada Tabel 1 seperti di bawah ini:

Tabel 1. *Range* Parameter Model IHACRES

Parameter Model	<i>Range</i> Parameter Model
Keseimbangan massa (c)	0,003 – 0,011
Modulasi temperatur (f)	1 – 9
Laju pengeringan pada saat suhu referensi (τ_w)	1 – 9
Konstanta waktu respon cepat (τ_q)	0,5 – 15
konstanta waktu respon lambat (τ_s)	2 – 200
Volume perbandingan untuk aliran lambat (v_s)	0,02 – 0,95

(Sumber: Sriwongsitanon dan Taesombat, 2011)

4. Verifikasi Model

Verifikasi model menurut Pechlivanidis, *et al* (2011) merupakan suatu proses setelah tahap kalibrasi selesai dilakukan yang berfungsi untuk menguji kinerja model pada data diluar periode kalibrasi.

Kinerja model biasanya lebih baik selama periode kalibrasi dibandingkan dengan verifikasi, fenomena seperti ini disebut dengan divergensi model.

5. Simulasi Model

Simulasi model menurut Refsgaard (2000) merupakan upaya memvalidasi penggunaan model untuk memperoleh pengetahuan atau wawasan dari suatu realita dan untuk memperoleh perkiraan yang dapat digunakan oleh para pengelola sumberdaya air. Tahap simulasi merupakan proses terakhir setelah proses kalibrasi dan

verifikasi dilaksanakan. Dalam tahap ini keseluruhan data hujan dan temperatur digunakan sebagai data masukan untuk menghitung aliran.

6. Evaluasi Ketelitian Model

Evaluasi ketelitian model IHACRES dalam Croke *et al* (2004) menggunakan fungsi objektif yang terdiri dari:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Q_o - Q_m)^2}{\sum(Q_o - \bar{Q}_o)^2}$$

$$Bias = \frac{\sum(Q_o - Q_m)}{n}$$

Dengan Q_o adalah debit terukur ($m^3/detik$), Q_m adalah debit terhitung ($m^3/detik$) dan n adalah jumlah sampel.

Dalam penelitian ini, indikator statistik yang paling utama dalam menentukan keandalan model adalah R^2 dan bias. Kedua indikator statistik tersebut dirasa cukup dalam mengevaluasi kinerja model dalam hal membandingkan antara hasil model dengan data yang diamati. Nilai optimal untuk R^2 mendekati satu dan bias mendekati nol. Perumusan persamaan R^2 didasarkan pada indikator efisiensi model Nash-Sutcliffe (Croke, *et al*, 2005). NSE memiliki *range* antara $-\infty$ sampai dengan 1. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Motovilov *et al* (1999), NSE memiliki beberapa kriteria seperti yang diperlihatkan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Kriteria Nilai Nash-Sutcliffe *Efficiency* (NSE)

Nilai NSE	Interpretasi
$NSE > 0,75$	Baik
$0,36 < NSE < 0,75$	Memenuhi
$NSE < 0,36$	Tidak memenuhi

(Sumber: Motovilov, *et al*, 1999)

Selain evaluasi ketelitian model R^2 dan Bias pada penelitian ini menggunakan evaluasi ketelitian model tambahan, yakni koefisien korelasi (R), selisih volume (VE) dan koefisien efisiensi (CE). Koefisien korelasi (R) adalah nilai yang menunjukkan

besarnya keterkaitan antara nilai debit terukur dengan debit model.

$$R = \frac{\sum (Q_{m_i} - \bar{Q}_m)(Q_{o_i} - \bar{Q}_o)}{\sqrt{\sum (Q_{m_i} - \bar{Q}_m)^2 \times \sum (Q_{o_i} - \bar{Q}_o)^2}}$$

Dengan \bar{Q}_o adalah rerata debit terukur ($m^3/detik$) dan \bar{Q}_m adalah rerata debit dihitung ($m^3/detik$).

Koefisien korelasi (R) memiliki beberapa kriteria seperti pada Tabel 3 berikut ini:

Tabel 3. Kriteria Nilai Koefisien Korelasi

Nilai Koefisien Korelasi (R)	Interpretasi
0 - 0,19	Sangat Rendah
0,20 - 0,39	Rendah
0,40 - 0,59	Sedang
0,60 - 0,79	Kuat
0,80 - 1	Sangat Kuat

Sumber : Sugiyono (2003:216)

Selisih volume atau *volume error* (VE) aliran adalah nilai yang menunjukkan perbedaan volume perhitungan dan volume terukur selama proses simulasi. Selisih volume (VE) aliran dikatakan baik apabila dapat menunjukkan angka tidak lebih dari 5%. Perhitungan selisih volume (VE) dirumuskan sebagai berikut:

$$VE = \left| \frac{\sum_{i=1}^N Q_{o_i} - \sum_{i=1}^N Q_{m_i}}{\sum_{i=1}^N Q_{o_i}} \right| \times 100\%$$

Koefisien Efisiensi (CE) adalah nilai yang menunjukkan efisiensi model terhadap debit terukur. Perhitungan Koefisien Efisiensi (CE) dirumuskan sebagai berikut:

$$CE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{o_i} - Q_{m_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{o_i} - \bar{Q}_o)^2} \right]$$

Koefisien efisiensi memiliki beberapa kriteria seperti terlihat pada Tabel. 4 berikut:

Tabel 4. Kriteria Nilai Koefisien Efisiensi

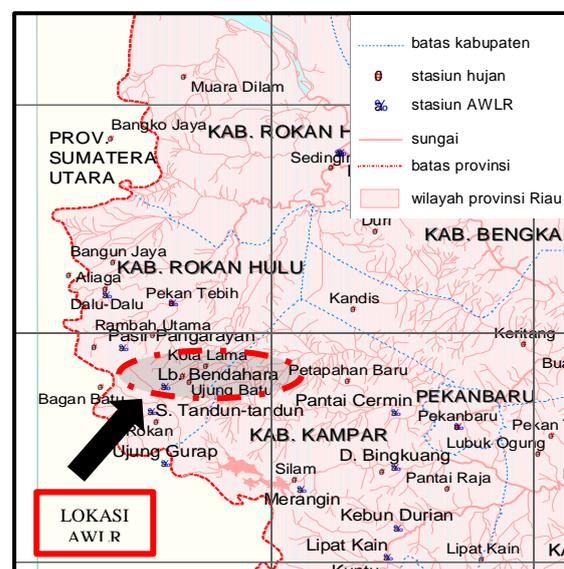
Nilai Koefisien Efisiensi (CE)	Interpretasi
CE > 0,75	Optimasi sangat efisien
0,36 < CE < 0,75	Optimasi cukup efisien
CE < 0,36	Optimasi tidak efisien

(Sumber: Hambali, 2008)

B. METODOLOGI PENELITIAN

1. Lokasi Penelitian

Lokasi pada penelitian ini adalah Sungai Rokan Sub-DAS Rokan Hulu Stasiun Lubuk Bendahara, Kecamatan Rokan IV Koto, Kabupaten Rokan Hulu, Provinsi Riau ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Peta Lokasi Penelitian Sumber: Anonim, 2008

2. Pengumpulan dan Pengelompokan Data

Pengumpulan data pada penelitian ini didapat dari Balai Wilayah Sungai Sumatera III (BWSS III) Provinsi Riau Bagian Hidrologi di Kota Pekanbaru. Data yang diperoleh antara lain:

1. Data curah hujan harian stasiun hujan Lubuk Bendahara tahun 2003, 2004, 2005 dan 2006.
2. Data kilmatologi stasiun hujan Lubuk Bendahara tahun 2003, 2004, 2005 dan 2006.
3. Data debit harian dari AWLR stasiun Lubuk Bendahara DAS Rokan tahun 2003, 2004, 2005 dan 2006.

3. Pra-proses Pembangunan Model (Transformasi Wavelet)

Model yang dibangun adalah gabungan dari transformasi *wavelet* dan IHACRES. Model transformasi *wavelet* variabel input diubah terlebih dahulu dengan menggunakan *wavelet*, baik itu berupa data hujan, data klimatologi ataupun data debit. Dimana tujuan dari *wavelet* ini untuk menghaluskan, merapatkan serta mengkompres data *inputan*. Transformasi *wavelet* dapat membuat data menjadi lebih sederhana tanpa mengubah bentuk pola awal dan menghilangkan noise (*denoise*) pada data dengan menggunakan nilai *threshold*.

Setelah nilai *threshold* ditentukan, selanjutnya data akan dibangun kembali seperti pola awalnya (rekonstruksi). Diharapkan penggunaannya dapat membuat model menjadi lebih baik dari pada yang tidak menggunakannya. Setelah data dimodifikasi oleh transformasi *wavelet*, data yang dihasilkannya digunakan sebagai *input* dan target pada model IHACRES.

4. Tahapan Analisa

Tahapan analisis hujan debit menggunakan Model IHACRES yang dilakukan adalah sebagai berikut :

- a. Menentukan skema yang berkaitan dengan pemilihan persentase panjang data yang digunakan dalam tahap kalibrasi, verifikasi dan simulasi. Adapun skema yang digunakan diperlihatkan pada Tabel 5.
- b. Melakukan *input* data ke program IHACRES v.2.1.2 dilakukan pengisian periode kalibrasi dan durasi *warm up*. Pengisian periode kalibrasi disesuaikan

- dengan skema yang telah disusun sedangkan durasi *warm up* diisi secara bertingkat dengan kelipatan 100, untuk selanjutnya dilakukan proses kalibrasi.
- c. Melakukan keseluruhan proses kalibrasi untuk skema 1 dan *warm up* percobaan pertama (durasi 100) hingga diperoleh parameter dengan nilai R^2 dan bias yang paling optimal. Nilai optimal untuk R^2 mendekati satu dan bias mendekati nol.
- d. Mengulangi keseluruhan proses kalibrasi skema 1 untuk durasi *warm up* berikutnya (200, 300, 400,.. dst). Proses ini berakhir apabila nilai R^2 yang dihasilkan telah mengalami penurunan dibandingkan dengan durasi *warm up* sebelumnya.
- e. Mengulangi langkah nomor 5 hingga nomor 7 untuk skema 2 hingga 8.
- f. Verifikasi, yaitu suatu proses untuk menguji kinerja model pada data diluar periode kalibrasi. Proses verifikasi dilakukan dengan menggunakan variabel dan parameter yang memberikan nilai R^2 yang tertinggi dalam tahap kalibrasi untuk masing – masing skema.
- g. Simulasi, yaitu proses terakhir setelah proses kalibrasi dan verifikasi dilaksanakan. Proses simulasi dilakukan dengan menggunakan variabel dan parameter yang sama yang digunakan dalam tahap verifikasi dan dihitung untuk masing – masing skema namun menggunakan keseluruhan data yang ada. Selanjutnya hasil simulasi masing – masing skema dihitung nilai R, VE dan CE.
- h. Hasil dan pembahasan, yaitu membahas tentang hasil analisis data.

Tabel 5. Skema Persentase Panjang Data Tahap Kalibrasi, Verifikasi dan Simulasi Stasiun Duga Air Lubuk Bendahara

Skema	Kalibrasi	Verifikasi	Simulasi
1	(1-1-2003 – 31-12-2005)	(1-1-2006 – 31-12-2006)	
2	(1-1-2003 – 31-12-2004)	(1-1-2005 – 31-12-2006)	(1-1-2003 – 31-12-2006)
3	(1-1-2003 – 31-12-2003)	(1-1-2004 – 31-12-2006)	

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Pembangunan Model

Model yang dibangun pada penelitian ini adalah model gabungan (*hybrid model*) dari transformasi *wavelet*-IHACRES. Model transformasi *wavelet* dikerjakan terlebih dahulu karena hasil data yang dikeluarkannya digunakan untuk model IHACRES.

Dalam pemilihan model gabungan, model yang dibangun diharapkan dapat meningkatkan kinerja performa dari model hujan-aliran (*rainfall-runoff*). *Input* utama model yang akan dibangun diambil dari pra-proses pembangunan model transformasi *wavelet*. Jenis model transformasi *wavelet* yang digunakan pada penelitian ini adalah *wavelet* Haar. Dari jenis model transformasi *wavelet* diatas, maka dapat dilakukan perbandingan setiap modelnya agar didapatkan model transformasi *wavelet* yang menghasilkan nilai regresi (R) yang lebih baik untuk model hujan-aliran.

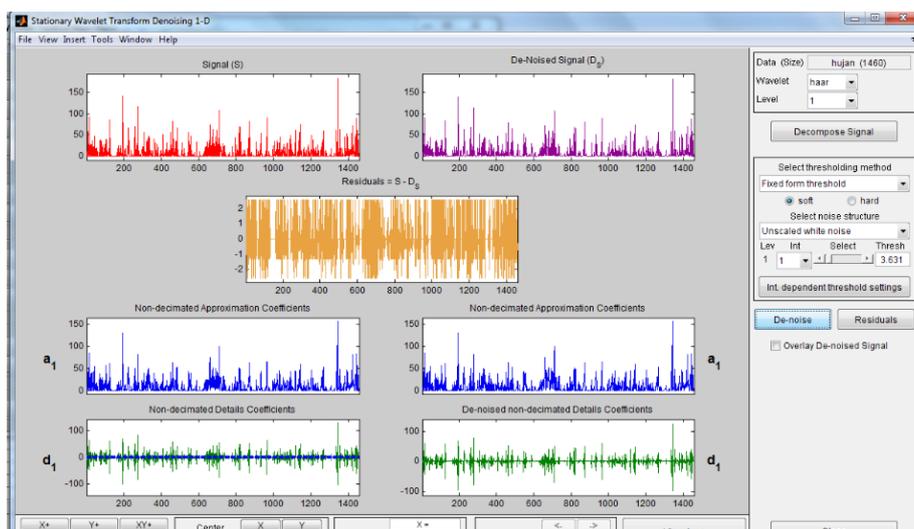
2. Pra-proses Pembangunan Model (Transformasi Wavelet)

Sebelum menggunakan model IHACRES, terlebih dahulu melakukan

proses dekomposisi dan rekonstruksi pada model transformasi *wavelet* dengan menggunakan data curah hujan, klimatologi dan debit. Adapun penggunaan proses dekomposisi dan rekonstruksi tersebut diharapkan dapat membangun model yang lebih baik. Transformasi *wavelet* dapat memodifikasi data menjadi bentuk yang lebih sederhana dengan cara menghilangkan *noise* (*denoise*) pada data kemudian membangun kembali menjadi bentuk semula (pola data sebenarnya).

Metode transformasi *wavelet* yang digunakan yaitu transformasi *wavelet* Haar. Transformasi *wavelet* Haar ini terdiri dari beberapa level dimana pada setiap level menggunakan tahapan penyederhanaan sesuai dengan levelnya. Penentuan level dekomposisi merupakan tahap awal untuk mendapatkan hasil terbaik. Secara umum, semakin tinggi level dekomposisinya maka akan menghasilkan *signal-to-noise ratio* (SNR) yang semakin baik.

Proses transformasi *wavelet* menggunakan software Matlab. Berikut ini adalah contoh hasil dari transformasi *wavelet* Haar level 1 dengan menggunakan data input curah hujan tahun 2003 – 2006 pada gambar dibawah ini:



Gambar 3 Hasil Transformasi Wavelet Haar Level 1

Pada Gambar 3 di atas menunjukkan data yang mengalami proses dekomposisi dengan model transformasi *wavelet* Haar level 1 menggunakan *software* Matlab.

Grafik warna merah menunjukkan data asli dan proses penyederhanaan (*dekomposisi*) ditunjukkan pada garfik d1 (kiri) dilakukan satu kali, karena level yang digunakan

adalah level satu. Setelah nilai *dekomposisi* ditentukan, data akan dibangun kembali (*rekonstruksi*) yang ditunjukkan pada grafik a1 (kiri). Pada proses *denoise* data menggunakan nilai *threshold* tertentu. Proses ini menggunakan nilai *threshold default* dari Matlab dengan level satu sebesar 3,631. Selanjutnya data tersebut dilakukan *rekonstruksi* yang ditunjukkan pada grafik a1 (kanan). Data pada grafik a1 (kanan) inilah yang akan digunakan pada *input* model IHACRES. Adapun data hasil transformasi *wavelet Haar* untuk level 1 dan 2 dapat dilihat pada Lampiran.

3. Proses Pemodelan Hidrologi dengan Metode IHACRES

Pada penelitian ini, proses kalibrasi dilakukan dengan program aplikasi

IHACRES v.2.1 untuk mendapatkan parameter dan variabel yang akan digunakan pada tahap selanjutnya yaitu verifikasi dan simulasi. Proses verifikasi dan simulasi menggunakan bantuan aplikasi *Microsoft Excel*. Adapun proses kalibrasi, verifikasi dan simulasi adalah sebagai berikut:

1. Kalibrasi Model Transformasi Wavelet – IHACRES Input Data Curah Hujan.

Pada skema 1 ini menggunakan data yang akan dilakukan *dekomposisi* dan *rekonstruksi* dengan transformasi *wavelet* yaitu data curah hujan. Hasil nilai R^2 dan bias pada tahap kalibrasi dengan variasi *warm up* untuk skema 1 dengan *wavelet Haar* level 1 dan level 2 ditunjukkan pada Tabel 6 berikut:

Tabel 6 Nilai R^2 dan Bias dengan Variasi *Warm Up* Skema 1 untuk Input Data Curah Hujan

Wavelet	Warm Up	100	200	300	400	500	600
HAAR 1	Skema 1						
	R^2	0.454	0.503	0.528	0.559	0.616	0.597
	Bias	85.882	81.129	87.705	157.585	133.537	157.523
HAAR 2	Skema 1						
	R^2	0.453	0.503	0.527	0.556	0.615	0.596
	Bias	87.754	81.504	85.534	24.398	136.057	159.855

Sumber : Hasil Perhitungan (2015)

Pada Tabel 6 terlihat bahwa *warm up* dengan durasi 500 dengan jenis *wavelet Haar* level 1 dan level 2 memberikan nilai R^2 sebesar 0,616 dan 0,615 artinya nilai tersebut lebih optimal dibandingkan dengan durasi lainnya untuk *input* data curah hujan. Penentuan hasil kalibrasi pada tahap verifikasi dan simulasi yang digunakan nilai

R^2 yang optimal diantara jenis *wavelet* tersebut. Sehingga parameter dan variabel hasil kalibrasi *wavelet Haar* level 1 yang digunakan dalam perhitungan debit harian dengan metode IHACRES. Parameter dan variabel ditampilkan pada tabel 7 dan 8 berikut ini:

Tabel 7 Parameter Hasil Kalibrasi Skema 1 Pada Wavelet Haar 1

Parameter Hasil Kalibrasi	500	Range Parameter
<i>Non Linear Module</i>		
Keseimbangan massa (c)	0,004723	0,003 - 0,011
Laju pengeringan pada saat suhu referensi (τ_w)	8,000	1 - 9
Modulasi temperatur (f)	1,000	1 - 9
<i>Linear Module</i>		
Konstanta waktu respon lambat ($\tau^{(s)}$)	27,846	2 - 200
Konstanta waktu respon cepat ($\tau^{(q)}$)	1,952	0,5 - 15
Volume perbandingan untuk aliran lambat ($v^{(s)}$)	0,832	0,02 - 0,95

Tabel 8 Variabel Skema 1 Pada Wavelet Haar 1

Variabel	500
Temperatur referensi (t_r)	32,000
Indeks ambang batas kelembaban tanah untuk menghasilkan aliran (l)	0,000
Respon jangka waktu non linear (p)	1,000
Angka resesi untuk aliran lambat ($\alpha^{(s)}$)	-0,965
Angka resesi untuk aliran cepat ($\alpha^{(q)}$)	-0,599
Respon puncak untuk aliran lambat ($\beta^{(s)}$)	0,029
Respon puncak untuk aliran cepat ($\beta^{(q)}$)	0,068
Volume perbandingan untuk aliran cepat ($v^{(q)}$)	0,168

Sumber : Hasil Perhitungan (2015)

Setelah parameter dan variabel kalibrasi diperoleh, selanjutnya dilakukan verifikasi model dengan menghitung debit harian dengan metode IHACRES. Adapun panjang data yang digunakan dalam tahap ini, disesuaikan dengan persentase panjang data pada tahap verifikasi. Tahap akhir dilakukan simulasi model, parameter dan variabel yang digunakan dalam perhitungan sama dengan parameter dan variabel pada tahap verifikasi. Namun dalam perhitungan menggunakan keseluruhan data yang ada tahun 2003-2006.

4. Hasil Uji Statistik

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Reza (2014) dilokasi yang

sama yaitu di Sub-DAS Rokan Stasiun AWLR Lubuk Bendahara dengan menggunakan model IHACRES. Dilakukan sebuah penelitian ulang pada data *input* setelah *difilter* menggunakan *wavelet*, yang bertujuan dapat meningkatkan kinerja model hujan aliran tersebut. Hasil nilai R^2 dan bias pada tahap kalibrasi dengan variasi *warm up* untuk masing – masing kombinasi input data *wavelet* ditunjukkan pada Tabel 9 Adapun hasil dari keseluruhan uji statistik untuk masing – masing tahap (kalibrasi, verifikasi dan simulasi) dengan menggunakan gabungan transformasi *wavelet* - IHACRES pada data yang sama diperlihatkan pada Tabel 10 berikut :

Tabel 9 Hasil Kalibrasi Gabungan Transformasi Wavelet-IHACRES

Input	Wavelet	Warm up	100	200	300	400	500	600
Curah Hujan	Haar 1	R^2	0.454	0.503	0.528	0.559	0.616	0.597
		Bias	85.882	81.129	87.705	157.585	133.537	157.523
	Haar 2	R^2	0.453	0.503	0.527	0.556	0.615	0.596
		Bias	87.754	81.504	85.534	24.398	136.057	159.855
Curah Hujan-Suhu	Haar 1	R^2	0.454	0.503	0.527	0.572	0.616	0.596
		Bias	84.268	81.035	63.197	39.452	133.72	157.733
	Haar 2	R^2	0.454	0.502	0.526	0.559	0.615	0.596
		Bias	85.659	81.386	85.286	142.026	136.154	159.962
Curah Hujan-Suhu-Debit	Haar 1	R^2	0.455	0.504	0.528	0.561	0.617	0.598
		Bias	83.399	80.853	92.979	103.031	133.935	157.915
	Haar 2	R^2	0.456	0.505	0.527	0.573	0.617	0.598
		Bias	83.846	81.007	95.000	82.263	136.596	160.386

Sumber : Hasil Perhitungan 2015

Berdasarkan Tabel 9 dari hasil perhitungan di atas, menunjukkan bahwa pada skema kombinasi *wavelet input* data

curah hujan, klimatologi dan debit yang menghasilkan nilai R^2 paling optimal adalah *wavelet* Haar. Nilai R^2 yang

dihasilkan yaitu sebesar 0,617 dengan durasi *warm up* 500. Parameter hasil kalibrasi dan variabel *wavelet* Haar untuk

input data curah hujan, klimatologi dan debit yang akan digunakan untuk tahap verifikasi dan simulasi.

Tabel 10 Hasil Uji Statistik Skema 1 Transformasi Wavelet-IHACRES

Input	Wavelet	Skema	Kalibrasi			Verifikasi			Simulasi		
			R2	R	Bias (mm/tahun)	R2	R	Bias (mm/tahun)	R2	R	Bias (mm/tahun)
Data Asli		skema 1	0,617	0,646	128,640	0,243	0,630	143,185	0,341	0,642	258,427
Curah Hujan	Haar 1	Skema 1	0.616	0.645	133.537	0.255	0.631	154.514	0.366	0.643	265.034
	Haar2	Skema 1	0.615	0.645	136.057	0.250	0.631	154.439	0.364	0.642	265.788
Curah Hujan-Suhu	Haar 1	Skema 1	0.616	0.645	133.72	0.259	0.631	158.713	0.367	0.643	268.316
	Haar 2	Skema 1	0.615	0.645	136.154	0.251	0.631	154.888	0.364	0.642	265.494
Curah Hujan-Suhu-Debit	Haar 1	Skema 1	0.617	0.647	133.935	0.259	0.632	157.088	0.369	0.644	266.897
	Haar 2	Skema 1	0.617	0.648	136.596	0.254	0.633	156.596	0.368	0.645	267.058

Sumber : Hasil Perhitungan 2015

Berdasarkan Tabel 10 dari hasil perhitungan diatas dapat disimpulkan bahwa performa yang memberikan estimasi terbaik dalam memodelkan hujan aliran di Sub-DAS Rokan, Stasiun AWLR Lubuk Bendahara, mengalami peningkatan yang cukup *signifikan* terhadap peforma kinerja model IHACRES setelah data *input difilter* menggunakan *wavelet* daripada menggunakan data asli yang telah dilakukan oleh Reza (2014).

Pada tahap kalibrasi, verifikasi dan simulasi yang memberikan nilai R^2 terbaik menggunakan transformasi *wavelet* jika dibandingkan dengan data asli dengan nilai masing-masing 0,617, 0,259 dan 0,369. Pada nilai koefisien korelasi (R) tertinggi terdapat pada jenis *wavelet Haar* level 2 dibandingkan dengan *wavelet Haar* level 1 dengan nilai kalibrasi 0,648 sedangkan verifikasi sebesar 0,633 dan simulasi 0,645. Adapun data *input* yang dilakukan *dekomposisi* dan *rekonstruksi* pada transformasi *wavelet* dengan menggunakan seluruh data yaitu data curah hujan, data klimatologi dan data debit *observasi*. Dari hasil menunjukkan kinerja model yang memenuhi batasan ($0,4 < R < 0,75$) dalam memodelkan hujan aliran pada Stasiun Lubuk Bendahara, nilai – nilai tersebut termasuk dalam kategori korelasi memenuhi dan kuat. Perbedaan antara hasil pemodelan dengan hasil pengukuran mungkin dapat disebabkan oleh kesalahn

acak baik yang berasal dari data masukan ataupun data pengukuran serta dalam penentuan nilai paramater.

5. Keandalan Model Hujan-Aliran

Hasil perbandingan evaluasi simulasi pemodelan hujan-aliran dengan program IHACRES dengan data setelah *difilter* menggunakan transformasi *wavelet* dengan data asli pada penelitian sebelumnya Reza (2014) ditampilkan pada Tabel 11 terlihat bahwa nilai koefisien korelasi (R) pada simulasi menggunakan transformasi *wavelet Haar* level 2 menunjukkan nilai yang lebih baik pada *input* data keseluruhan yaitu data curah hujan, klimatologi dan debit *observasi* yang dikategorikan korelasi kuat.

Nilai selisih volume (VE) berdasarkan Tabel 11 hasil evaluasi simulasi model tidak optimal karena nilai VE belum bisa dikatakan baik karena besar dari 5%. Hal tersebut menunjukkan perbedaan volume perhitungan dan volume terukur selama proses simulasi.

Sedangkan nilai koefisien efisiensi (CE) dikategorikan cukup efisien, jika menggunakan gabungan transformasi *wavelet-IHACRES* lebih unggul daripada menggunakan data asli tanpa *difilter* sebesar 0,662 dan 0,659. Nilai CE menunjukkan efisiensi model terhadap debit terukur, merupakan cara objektif yang paling baik dalam mencerminkan

kecocokan hidrograf secara keseluruhan. Sehingga efisiensi model simulasi terhadap debit terukur yang cukup efisien dan memiliki kecocokan hidrograf secara keseluruhan yang cukup baik.

Berdasarkan Tabel 11 disimpulkan bahwa pemodelan hujan aliran dengan menggunakan transformasi *wavelet* terjadi peningkatan efektifitas model curah hujan lapangan. Bisa dilihat dari ke-3 parameter evaluasi dimana terjadi peningkatan efektifitas pada 2 parameter evaluasi yaitu nilai R dan CE, dimana nilai R memiliki kenaikan peningkatan nilai koefisien korelasi. Sedangkan nilai CE juga terjadi

peningkatan dimana yang hanya memenuhi batasan cukup efisien.

Pada simulasi menggunakan parameter kalibrasi yang hasilnya optimal, namun parameter tersebut tidak pasti karena hanya mendapatkan hasil yang kurang optimal, maka perlu dikalibrasi kembali jika diterapkan pada Sub-DAS yang sama. Dapat disimpulkan juga bahwa pemodelan hujan-aliran dengan program IHACRES perlu berhati-hati dalam proses kalibrasi dan menggunakan data yang lebih panjang untuk mendapatkan hasil yang lebih efektif pada saat penentuan parameter kalibrasi.

Tabel 11 Hasil Evaluasi Simulasi Pemodelan Hujan-Aliran Transformasi *wavelet*-IHACRES dan Data Asli Lapangan

Data Input	Pemodelan Hujan-Aliran	Parameter Evaluasi			Penjelasan
		Korelasi (R)	Selisih Volume	Koefisien Efisiensi	
DATA HUJAN LAPANGAN Skema 1	IHACRES	0.642	16.630%	0.659	Kurang optimal karena nilai R dikategorikan kuat, nilai VE > 5% dan CE dikategorikan cukup efisien
INPUT DATA CURAH HUJAN Haar level 1	TRANSFORMASI WAVELET-IHACRES	0.643	17.060%	0.660	Kurang optimal karena nilai R dikategorikan kuat, nilai VE > 5% dan CE dikategorikan cukup efisien
INPUT DATA CURAH HUJAN Haar level 2	TRANSFORMASI WAVELET-IHACRES	0.642	17.109%	0.662	Kurang optimal karena nilai R dikategorikan kuat, nilai VE > 5% dan CE dikategorikan cukup efisien
INPUT DATA CURAH HUJAN-KLIMATOLOGI Haar level 1	TRANSFORMASI WAVELET-IHACRES	0.643	17.271%	0.659	Kurang optimal karena nilai R dikategorikan kuat, nilai VE > 5% dan CE dikategorikan cukup efisien
INPUT DATA CURAH HUJAN-KLIMATOLOGI Haar level 2	TRANSFORMASI WAVELET-IHACRES	0.642	17.090%	0.662	Kurang optimal karena nilai R dikategorikan kuat, nilai VE > 5% dan CE dikategorikan cukup efisien
INPUT DATA CURAH HUJAN-KLIMATOLOGI-Haar level 1	TRANSFORMASI WAVELET-IHACRES	0.644	17.180%	0.658	Kurang optimal karena nilai R dikategorikan kuat, nilai VE > 5% dan CE dikategorikan cukup efisien
INPUT DATA CURAH HUJAN-KLIMATOLOGI-Haar level 2	TRANSFORMASI WAVELET-IHACRES	0.645	17.190%	0.660	Kurang optimal karena nilai R dikategorikan kuat, nilai VE > 5% dan CE dikategorikan cukup efisien

(Sumber: Hasil Perhitungan, 2015 dan Reza, 2014)

C. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis dan pembahasan hasil penelitian yang berjudul Model Hidrologi Runtun Waktu Untuk Analisis Hujan Aliran Menggunakan Transformasi *Wavelet*-IHACRES (Studi Kasus Sub-DAS Lubuk Bendahara), maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Model IHACRES pada skema 1 setelah data *input* difilterkan menggunakan transformasi *wavelet* menghasilkan peningkatan performa kinerja yang cukup

signifikan dibandingkan dengan data asli tanpa menggunakan *wavelet*.

2. Pada tahap kalibrasi, verifikasi dan simulasi dengan menggunakan data *input* curah hujan, klimatologi dan debit *observasi* pada model gabungan transformasi *wavelet*-IHACRES, dengan jenis *wavelet* Haar level 2 menunjukkan peningkatan koefisien korelasi (R) sebesar 0,648. Sedangkan tahap verifikasi 0,633 dan simulasi sebesar 0,645. Hasil tersebut dikategorikan korelasi kuat.

D. SARAN

Saran yang dapat diberikan berdasarkan hasil perhitungan dan analisis pada pengerjaan tugas akhir ini sebagai berikut:

1. Diperlukan penelitian yang berkelanjutan dalam model transformasi wavelet tanpa menggunakan nilai *threshold default* sehingga menghasilkan nilai *signal-to-noise ratio* (SNR) terbaik terhadap model hujan aliran.
2. Dalam penentuan nilai parameter kalibrasi IHACRES harus lebih teliti dan menggunakan data yang lebih panjang untuk hasil yang diperoleh lebih efektif.

E. DAFTAR PUSTAKA

- Listyaningrum, R. 2007. Analisis Tekstur Menggunakan Metode Transformasi Paket Wavelet. *Makalah Seminar Tugas Akhir*. Semarang, Januari 2007
- Friendly. 2010. Availabel at: <<URL: <http://id.m.wikipedia.org/Wavelet.html>>>[Accessed 21 Oktober 2015].
- Reza, C. 2013. Teknik Potensi Diferensial pada Transformator Daya Tiga Fasa dengan Menggunakan Transformasi Wavelet. Skripsi. Bandung: Universitas Pendidikan Indonesia.
- Adiman, Edi Yusuf. 2015. *Model Hidrologi Runtun Waktu Untuk Peramalan Debit Sungai Menggunakan Metode Gabungan Transformasi Wavelet – Artificial Neural Network (Studi Kasus : Sub DAS Siak Hulu)*. Tugas Akhir Teknik Sipil Universitas Riau.
- Harto, S. 1993. *Analisis Hidrologi*. Jakarta : PT. Gramedia Pustaka Utama.
- Marta, J. dan Adidarma, W. 1997. *Mengenal Dasar-dasar Hidrologi*. Bandung: Nova.
- Indarto. 2006. *Kalibrasi Model IHACRES untuk Simulasi Neraca Air Harian di DAS Bedadung, Jawa Timur, Indonesia. Media Teknik Sipil*. Juli 2006 : 111-122.
- Indarto. 2010. *Hidrologi Dasar Teori dan Contoh Aplikasi Model Hidrologi*. Jakarta : Bumi Aksara
- Wibowo, Ryan Ardhi. 2013. *Analisa Hujan Aliran Menggunakan Model Ihacres (Studi Kasus Das Indragiri)*. Tugas Akhir Teknik Sipil Universitas Riau.
- Fadhli, Reza Ahmad. 2014. *Perbandingan Penggunaan Data Hujan Lapangan Dan Data Hujan Satelit Untuk Analisa Hujan Aliran Menggunakan Model Ihacres (Studi Kasus Das Lubuk Bendahara)*. Tugas Akhir Teknik Sipil Universitas Riau.
- Triatmodjo, B. 2010. *Hidrologi Terapan*. Yogyakarta : Beta Offset.
- Refsgaard, J.C. 2000. Towards a Formal Approach to Calibration and Validation of Models Using Spatial Data, Dalam R. Grayson & G. Blöschl. *Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modelling*. Cambridge University Press, Cambridge, 329 – 354.
- Hambali, R. 2008. *Analisis Ketersediaan Air dengan Model Mock*. Bahan Ajar. Yogyakarta : Universitas Gadjah Mada.
- Pechlivanidis, I.G., Jackson, B.M., McIntyre, N.R., & Wheeler, H.S. 2011. Catchment Scale Hydrological Modelling : A Review of Model Types, Calibration Approaches and Uncertainty Analysis Methods in the Context Of Recent Developments in Technology and Applications. *Global Nest Journal*. 13: 193–214.
- Sriwongsitanon, N. & Taesombat, W. 2011. Estimation of the IHACRES Model Parameters for Flood Estimation of Ungauged in the Upper Ping River Basin. *Kasetsart J (Nat. Sci.)* 45. Juni 2011 : 917-931.