

Analisis Pengaruh Model Salinitas Air Tanah Menggunakan Finite Element Method (FEM) di Kalimantan Timur

Herman Santoso Pakpahan¹⁾, Hario Jati Setyadi²⁾, Yuniarta Basani³⁾

^{1,2}Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi, Universitas Mulawarman

³Program Studi D3 Teknik Informatika, Fakultas Teknik Informatika dan Elektro, Institut Teknologi Del

^{1,2}Jalan Panajam Kampus Gn. Kelua Universitas Mulawarman Samarinda, Kalimantan Timur

³Jalan Sisingamangaraja, Sitoluama, Laguboti, Toba Samosir

E-Mail : pakpahan.herman891@gmail.com¹⁾, hario.setyadi@fkti.unmul.ac.id²⁾, yuniarta.basani@del.ac.id³⁾

ABSTRAK

Penelitian ini menggunakan *Finite Element Method* (FEM) untuk menghitung perubahan salinitas air tanah berdasarkan nilai transmisivitas pada setiap lapisan air tanah. Perubahan Salinitas menggambarkan penurunan kuantitas dan kualitas air tanah akibat dari pembangunan yang merusak lingkungan terutama di daerah pesisir pantai. Pemodelan dan simulasi salinitas air tanah dengan FEM diperoleh head gradient terhadap posisi di titik domain masalah, selanjutnya menghitung perubahan transmisivitasnya. Sensivitas mesh dilakukan dengan mengubah edge dari elemen untuk memperoleh efektifitas dan fleksibilitas dari matriks FEM dua dimensi (2D). Sehingga edge terkecil yang digunakan sebesar 0.1 dan yang terbesar 1 dengan jumlah elemen 14694 dan 157. Transmisivitas dihitung berdasarkan jenis lapisan air tanah pada daerah penelitian, sehingga diperoleh perubahan salinitas sebesar 1.3 % dari salinitas awal.

Kata-kata kunci: *salinitas air tanah, transmisivitas, finite element method, edge elemen*

1. PENDAHULUAN

Perkembangan pembangunan, kebutuhan air untuk irigasi, dan pertumbuhan penduduk yang terus meningkat merupakan faktor-faktor yang menyebabkan terjadinya peningkatan kebutuhan air bersih, yang sebagian besar dipasok dari air tanah. Selain itu adanya penurunan kualitas dan kuantitas air tanah akibat dari pencemaran yang terjadi di daerah pesisir pantai. Di daerah tersebut sering terjadi intrusi air laut yang mengakibatkan kandungan air garam dalam air tanah tinggi (Anjam, 2015; Mondal, 2010). Oleh karena itu, dibutuhkan suatu penelitian untuk menyelesaikan masalah pencemaran tersebut. Usaha dalam bidang eksperimen yang dilakukan membutuhkan biaya yang besar, waktu yang lama dan sangat sulit untuk dilakukan (Mondal, 2010). Salah satunya dengan memodelkan dan mensimulasikan gambaran solusi masalah dengan menggunakan *Finite Element Method* (FEM).

FEM dalam penyelesaian masalah menggunakan pendekatan diskritisasi elemen mengacu pada metode matriks untuk analisisnya. Pemilihan bentuk elemen sesuai dengan filosofi metode elemen hingga yaitu menyederhanakan bentuk rumit daerah yang sedang ditinjau sehingga permasalahan dapat dipecahkan. Proses yang terlibat di dalam FEM adalah interpolasi, integrasi, dan pembobotan (Parsi, 2010; Rahayu, 2012). Adanya metode beda hingga atau *Finite Difference Method* (FDM) yang merupakan salah satu metode dalam penyelesaian masalah ini. Namun, untuk masalah dengan batas-batas yang tidak teratur (seperti media penelitian yang heterogen dan anisotropik) dan pemecahan masalah yang digabungkan (seperti transportasi kontaminan penggunaan dan pergerakan *water table*), FEM merupakan metode yang lebih

fleksibel (Reddy, 1985; Reitman, 2010). FEM merupakan metode pendekatan guna menyelesaikan nilai batas yang tidak banyak membutuhkan memori (Sharief, 2012; Suhartono, 2013).

Penelitian ini mengkaji model distribusi konsentrasi air tanah sekitar pesisir pantai dengan menghitung tingkat salinitasnya, sehingga kajian dari intrusi air laut memberikan gambaran tentang kondisi akuifer, dinamika potensi air tanah, dan penyebaran intrusi air laut. Secara prinsip air tanah dari darat mengalir ke laut melalui media akuifer, sedangkan air laut juga meresap ke darat karena tekanan hidrostatik air laut. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menyelesaikan model distribusi konsentrasi salinitas air tanah dengan parameter yang tidak konstan dan persamaan adveksi serta dispersi dalam dua dimensi.

Pemodelan air tanah digambarkan pada persamaan differensial parsial dalam dua dimensi dengan mengasumsikan bahwa aliran air di tanah tersebut dalam keadaan tunak (*steady state*), dengan lapisan yang homogen dan isotropik (Sutikno, 2003; Wang, 1982). Hal ini dapat dimodelkan dengan menggunakan persamaan Laplace dan persamaan Poisson. Parameter polutan yang digunakan yaitu salinitas air tanah, sehingga menghasilkan model distribusi yang menggambarkan model salinitas air tanah pada daerah penelitian.

2. TINJAUAN PUSAKA

A. Permodelan Air Tanah

Pola aliran air tanah sangat dipengaruhi oleh model konseptual. Model konseptual adalah representasi sederhana dari model alami atau perubahan dari sistem perilaku hidrogeologi suatu daerah. Model ini merupakan dasar dari model analitik

dan numerik yang diformulasikan untuk meniru kondisi asli di lapangan.

Faktor-faktor alami yang mempengaruhi perilaku hidrogeologi antara lain daerah imbuhan, luapan, presipitasi, dan evapotranspirasi pola aliran air (permukaan dan air tanah). Adapun faktor lain yang mengubah kondisi alami tersebut yaitu dampak aktivitas penambangan di sekitar area air tanah yang ingin diteliti (Cook, 1981; Freeze, 1979).

B. Persamaan Darcy

Generalisasi potensial menjadi sebuah fungsi dari koordinat ruang tiga dimensi, yaitu $h = h(x, y, z)$ dan dh/dl yang merupakan laju dari perubahan head (aliran air tanah) pada posisi tiga dimensi. Arah vertikal, $h = h(z)$ dipertimbangkan, dengan asumsi medium pori isotropik dan laju keluarnya Q tidak bergantung pada waktu. Pendefinisian $q = Q/A$ merupakan laju volume dari aliran per unit area. Kuantiti (q) disebut keluaran tertentu (*the specified discharge*).

$$q = -K \text{grad } h \quad (1)$$

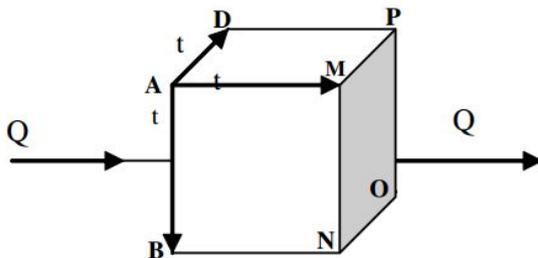
Karena $h_2 - h_1$ dan $l_2 - l_1$ intervalnya sangat kecil maka persamaan (1) dapat diterapkan dalam penyelesaian persamaan kuantiti (q) (Freeze, 1979; Gelhari, 1992).

C. Persamaan Kontinuitas untuk Aliran Tunak

Untuk kondisi keadaan tunak memerlukan kontinuitas sama dengan jumlah mengalirnya air yang keluar. Adanya kondisi keadaan tunak menyatakan secara tidak langsung bahwa head tidak bergantung waktu. Untuk itu dibuat asumsi yang sederhana, yaitu:

1. Air tidak dapat dimampatkan.
2. Tidak ada sumber masukan (*no source or sinks*) dan air yang keluar (sumur dan transpirasi) secara bersamaan pada volume elemental (volume pada tiap elemen).

Selanjutnya, analisis terhadap aliran masuk dan keluar dari sebuah kubus elemental yang mempunyai panjang sisi samping Δx , Δy , dan Δz , sehingga diperoleh volume kubus adalah $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$.



Gambar 1 Analisis dari aliran volum net per unit waktu (Rahayu, 2012; Worland, 2014)

Keluaran aliran yang melalui sisi kiri dan kanan merupakan hasil dari laju aliran per unit area waktu pada luasan $\Delta x \Delta z$ dari sisi yang dilalui aliran.

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} \Delta V + \frac{\partial q_y}{\partial y} \Delta V + \frac{\partial q_z}{\partial z} \Delta V \quad (2)$$

Persamaan (2) merupakan persamaan kontinuitas untuk aliran tunak pada domain penelitian.

D. Persamaan Laplace

Kombinasi Hukum Darcy dengan persamaan Laplace dan persamaan kontinuitas menghasilkan persamaan diferensial parsial orde-2, sehingga diperoleh persamaan Laplace seperti pada persamaan (3) berikut.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-K \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-K \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-K \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (4)$$

Persamaan (4) menggambarkan persamaan Laplace yang merupakan persamaan pengatur pada aliran air tanah dalam keadaan tunak, homogen, dan isotropik.

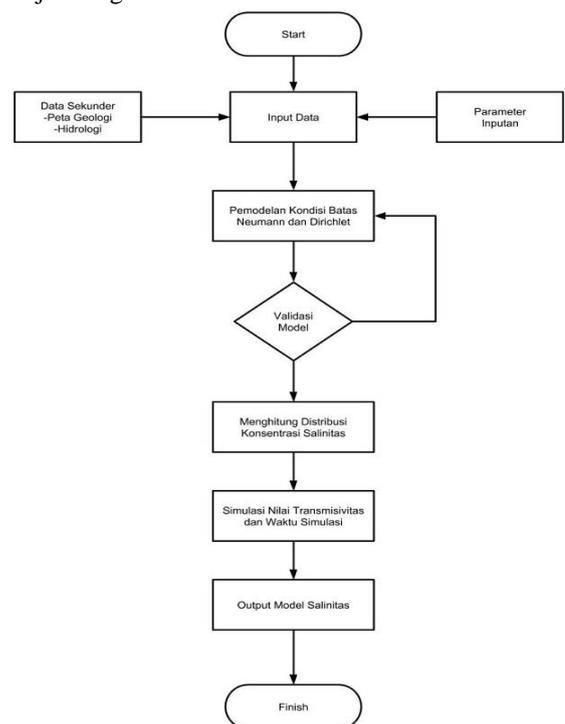
E. Persamaan Poisson

Persamaan Laplace belum bisa menyelesaikan masalah volume aliran air yang keluar, sehingga perlu menggunakan persamaan Poisson. Kondisi aliran tunak, laju volume pada aliran keluar harus sama dengan $R(x, y) \Delta x \Delta y$, yang dijabarkan pada persamaan (5).

$$\iint_D \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{R}{T} \right) N_L(x, y) dx dy = 0 \quad (5)$$

3. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, penerapan FEM dengan tahapan kerja sebagai berikut.



Gambar 2 Tahapan Kerja Penelitian

1. Menggambarkan bentuk pendekatan geometri daerah penelitian.
2. FEM menggunakan elemen segitiga dengan fungsi interpolasi linier, kemudian menentukan persamaan pengatur yang digunakan sebagai basis dalam sebuah aproksimasi fungsi pada persamaan diferensial.
3. Pemodelan ini menggunakan kondisi batas Neumann dalam menggambarkan *head* air tanah dan kondisi batas Dirichlet untuk menggambarkan arah vertikal resapan terhadap kecepatan konsentrasi salinitas.
4. Komputasi dengan beberapa parameter inputan berdasarkan data sekunder dari peta geologi dan hidrologi, serta beberapa nilai pendekatan yang menggambarkan kondisi daerah penelitian di Kalimantan Timur yaitu Balikpapan, Tenggarong, dan Bontang (Tabel 1).

Tabel 1 Parameter Inputan dalam Komputasi

Parameter	Nilai
Transmisivitas (T)	$1.2e-7$ $km^2/hari$ (pasir)
Recharge site (w)	8.852 km/hr
Dispersivitas (α)	0.5 km
Difusi molekuler (De)	$8.2e-9$ km^2/hr
Konsentrasi salinitas awal (c_0)	1 g/l
Waktu Simulasi ($tend$)	1, 5, 10, 15, 29 tahun
Time step (dt)	1 hari
Ketebalan akuifer (b)	0.03 km (pasir)

5. Menghitung distribusi konsentrasi salinitas berdasarkan model persamaan yang telah didiskritisasi dan kondisi batas yang telah ditentukan berdasarkan algoritma FEM.
6. Mensimulasikan ukuran segitiga (edge) untuk mencari sensitivitas mesh, sehingga diperoleh model yang tepat. Setelah mendapatkan model air tanah yang sesuai berdasarkan sensitivitas mesh, kemudian melakukan simulasi berdasarkan nilai transmisivitas dan waktu simulasi untuk memperoleh model salinitas di air tanah tersebut.
7. Outputnya berupa *head gradient* dan distribusi konsentrasi salinitas dengan parameter simulasi.

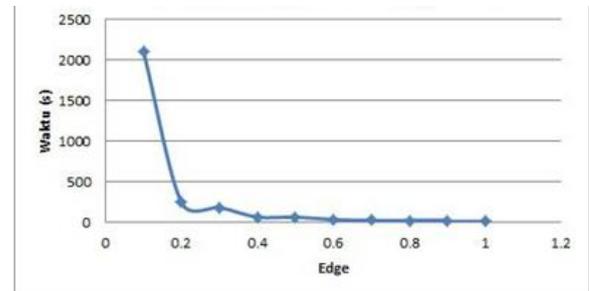
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Diskritisasi Domain Penelitian

Penelitian ini menggunakan data dari aliran resapan air tanah di wilayah Kalimantan Timur. Cakupan model sekitar 55 km x 29 km dengan ketebalan 0.6 km. Simulasi dilakukan pada lapisan homogen di akuifer bagian atas dengan ketebalan lapisan dominan pasir 0.06 km dan dominan lempung 0.055 km. Pendekatan geometri dilakukan pada daerah domain pemodelan. Sehingga dilakukan skala untuk menggambarkan keadaan real daerah pemodelan. Selain itu, pemodelan dilakukan dengan kondisi batas yang mendekati kondisi asli berdasarkan gambaran hidrologi dan geologi.

B. Pemodelan Air Tanah

Pemodelan air tanah berdasarkan elemen segitiga dengan fungsi interpolasi linier dengan menggunakan persamaan Laplace. Persamaan Laplace yang merupakan persamaan pengatur pada aliran air tanah menggambarkan suatu lapisan yang homogen dan aliran dalam keadaan tunak. Persamaan tersebut digambarkan dalam 2 dimensi untuk menunjukkan perubahan *head gradient* pada air tanah.



Gambar 3 Perbandingan Waktu Komputasi dengan Edge pada FEM

Tabel 2 Nilai Rata-rata *Head Gradient* (h)

Edge	n (Elemen)	h	Toleransi	Waktu
1	157	0.77749		6
0.9	192	0.773572	0.00392	10
0.8	239	0.772534	0.00104	10
0.7	313	0.772177	0.00036	20
0.6	416	0.777309	0.000862	30
0.5	599	0.776108	0.003068	60
0.4	932	0.771095	0.00501	60
0.3	1637	0.77038	0.00072	180
0.2	3679	0.769785	0.00059	240
0.1	14694	0.768956	0.00083	2100

Transmisivitas berdasarkan jenis penyusun lapisan akuifer (air tanah) dan ketebalan akuifer digambarkan pada persamaan di bawah ini:

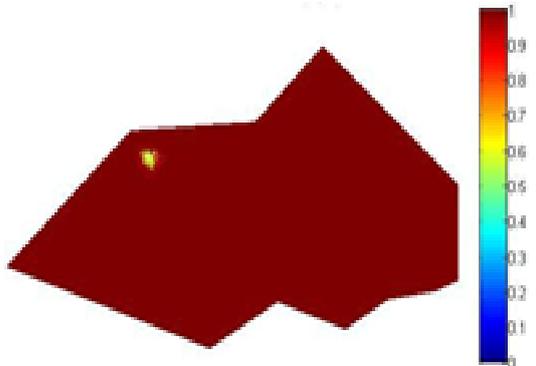
$$T = k \cdot b \quad (6)$$

dimana k merupakan konduktivitas akuifer, k adalah ketebalan lapisan (km). Simulasi dilakukan dengan dua skenario transmisivitas (T) yang berbeda, yaitu T lapisan dominan pasir sebesar 4×10^{-4} km dan T lapisan dominan lempung sebesar 4×10^{-8} km.

Perubahan salinitas awal dominasi pasir di ketebalan lapisan 0.06 km sekitar 1.015 g/L, sedangkan lapisan dominan lempung dengan ketebalan 0.055 km sekitar 1.000027 g/L. Sehingga diperoleh adanya peningkatan salinitas awal dari 1 g/L sebesar 1.6×10^{-2} g/L dan 2.7×10^{-3} g/L untuk masing-masing T dominan pasir dan T dominan lempung. Kenaikan salinitas tertinggi terjadi pada lapisan dominan lempung dibandingkan dominan pasir sebesar 1.3 %. Hal ini menggambarkan bahwa daerah penelitian tidak terjadi perubahan salinitas yang signifikan selama waktu simulasi 10 tahun.

C. Simulasi dari Model Salinitas Air Tanah berdasarkan Waktu

Salinitas air tanah diasumsikan seragam di setiap domain penelitian dengan lapisan homogen. Sehingga, salinitas berubah terhadap waktu ditentukan pada elemen yang ingin dihitung berdasarkan kondisi geologi dan hidrologi daerah penelitian. Oleh karena itu, simulasi dilakukan dengan T pada lapisan dominan pasir dengan ketebalan 0.06 m. Simulasi hanya dilakukan selama 1, 5, 15, dan 29 tahun.



Gambar 4 Perubahan distribusi salinitas T dominan

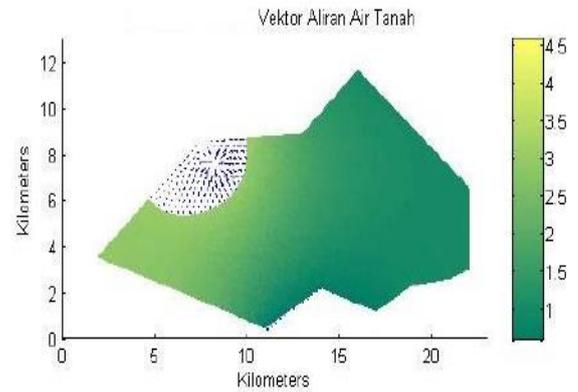
Gambar 4 menunjukkan bahwa distribusi salinitas berdasarkan waktu yang dimodelkan dari persamaan Poisson. Persamaan ini menunjukkan adanya perubahan distribusi konsentrasi terhadap waktu. Tabel 3 menunjukkan perubahan salinitas terhadap waktu dengan waktu simulasi terlama 15 tahun.

Tabel 3 Model salinitas air tanah berdasarkan waktu simulasi

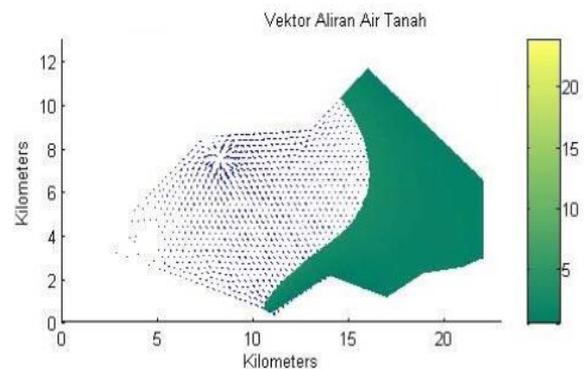
Waktu (Tahun)	Salinitas(g/L)
1	0.999177398
5	0.997001998
15	0.994731815
29	0.987011998

Hasil pada Tabel 3 menunjukkan adanya perubahan salinitas yang sangat kecil, karena salinitas awal sebesar 1 g/L. Sehingga pengaruh transmisivitas dan waktu simulasi sangat kecil. Walaupun ada penurunan tingkat salinitas sekitar 0.013 g/L dalam kurun waktu 29 tahun. Penurunan ini terjadi sebesar 1.3% dari salinitas awal.

Hal ini terjadi, karena adanya pengaruh resapan yang berasal dari imbuhan curah hujan selama kurun waktu yang lama dan dianggap konstan setiap tahunnya. Sehingga hasil ini membuktikan bahwa tingkat salinitas tidak mempengaruhi air tanah dalam domain pemodelan selama masukan dan keluaran aliran tidak terjadi perubahan yang besar.



Gambar 5 Vektor Aliran Air Tanah pada T Dominan Pasir



Gambar 6 Vektor Aliran Air Tanah pada T Dominan Lempung

Selain itu, perbedaan T yang diperoleh menyebabkan variasi spasial pada proses adveksi. Variasi spasial terbesar terjadi pada T dominan lempung (Gambar 6). Hal ini terjadi karena perbedaan nilai konduktivitas masing-masing lapisan.

5. KESIMPULAN

Kesimpulan yang didapatkan pada penelitian ini antara lain.

1. Simulasi dari model salinitas air tanah menggunakan *edge* 0.3 dengan 1637 elemen.
2. Simulasi dan pemodelan salinitas air tanah berdasarkan *head gradient* transmisivitas dan waktu lama distribusi konsentrasi.
3. Perbedaan transmisivitas (T) berdasarkan pada domain lapisan penyusun akuifer dan ketebalannya. Sehingga, ada dua skenario T yaitu domain pasir dengan ketebalan 0.06 km dan domain lempung dengan ketebalan 0.055 km. Perbedaan T menyebabkan perubahan salinitas terbesar pada lapisan dominan pasir sebesar 1.3% daripada lapisan dominan lempung.
4. Penelitian selanjutnya menghitung hasil simulasi dengan waktu yang lebih lama dengan lapisan heterogen sehingga dapat menggambarkan perubahan salinitas yang terjadi untuk melihat perubahan lingkungan di daerah penelitian akibat pembangunan.

5. Penelitian selanjutnya juga meninjau sensitivitas mesh berdasarkan edge dari elemen segitiga linier dalam 3 dimensi. Kemudian, menggambarkan keakuratan FEM segitiga linier dan FEM poligon pada model salinitas dari air tanah.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat, Direktorat Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan, Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi yang mendanai penelitian ini sesuai dengan Kontrak Penelitian Nomor : 105/UN17.41/KL/2018.

7. DAFTAR PUSTAKA

- Anjam, I., dkk. (2015). Fast MATLAB assembly of FEM matrices in 2D dan 3D. Edge elements. Departement of Mathematical Information Technology, University of Jyväskylä, Finland. published in Applied Mathematics and Computation
- Mondal, A., dkk (2010). Multiobjective Groundwater Remediation System Design Using Coupled Finite-Element Model and Nandominated Sorting Genetic Algorithm II. Journal Of Hydrologic Engineering. 15. 350-359.
- Parsi, K. J. M., dkk (2010). Optimal Groundwater Remediation Design of Pump and Treat System Via A Simulation-Optimization Approach And Firefly Algorithm. Taylor And Francis Group. Vol.47, No.1. 1-17.
- Rahayu, S. E., dkk (2012). Konvergensi Metode Elemen Hingga Polygonal Hibrid dalam Analisis Kristal Fotonik 2D. JNTETI. Vol. 2.1.
- Reddy, J., N.(1985). An Introduction To The Finite Element Method-International Student Edition, Chong Moh Offset Printing, Singapura, 64-170, 194-253
- Reitman, G., N. (2010).Groundwater Flow And Effect On Salt Dissolution In Gypsum Canyon Watershed, Paradox Basin, Southeast Utah. Master of Science, Departement Of Geological Sciences, University Of Colorado.
- Sharief, S.M.V., dkk (2012). Optimal groundwater Remediation by Pump and Treat Using FEM- and EGA-Based Simulation-Optimization Model.
- Suhartono, E., dkk , (2013). Kondisi Intrusi Air Laut Terhadap Air Tanah Pada Akuifer Di Kota Semarang. Prosiding Seminar Nasional Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan 2013. Journal Hazard. 16.106-117.
- Sutikno, S., dkk (2003). Metode Elemen Hingga Untuk Penyelesaian Persamaan Aliran Turbulen Aliran $k - \epsilon$. Jurnal Natur Indonesia. 6(1). 61-66.
- Wang, F., A., dan Anderson, M., P. (1982). Introduction to groundwater modeling. 33 finite difference and finite element methods, Academic Press, London, 1-17, 113-128.
- Cook, D., R., (1981). Concepts and applications of finite element analysis, John Wiley dan Sons, United State of America, 67-72
- Freeze, A., R. dan Cherry, J., A. (1979). Groundwater, Prentice Hall, United State of America, 76, 389.
- Tangguh Expansion Project Groundwater Study Groundwater Supply Modelling periode 16 April 2014, data diperoleh melalui situs internet. [http://www.jbic.go.jp/wpcontent/uploads/projects/2016/02/47452/LAMPIRAN ANDAL24072014 9.pdf](http://www.jbic.go.jp/wpcontent/uploads/projects/2016/02/47452/LAMPIRAN%20ANDAL24072014%209.pdf). Diunduh pada tanggal 1 November 2018.
- Gelhar, W., L., Welty., C., dan Rehfeldt, K. (1992). A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. Master of Science, Departement Of Geological Sciences, University Of Colorado. Water resources research. vol. 28. 1955-1974
- Worland, C., S. (2014). Source, Transport, And Evolution Of Saline Groundwater In A Shallow Holocene Aquifer On The Tidal Deltaplain Of Southwest Bangladesh. Master's Thesis, The Faculty Of The Graduate School Of Vanderbilt University.