Estimasi Konduktivitas Hidraulik Rekahan Batuan Menggunakan ANFIS : Perbandingan dengan *HC-System*

Hazmanu Hermawan YOSANDIAN¹, Lilik Eko WIDODO², Tedy Agung CAHYADI²

¹ Program Magister Teknik Airtanah, Institut Teknologi Bandung
Jalan Ganesha 10, Bandung, 40132, Indonesia

² Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung
Jalan Ganesha 10, Bandung, 40132, Indonesia
Email : yosandian@gmail.com

ABSTRAK

Intensitas rekahan batuan yang tinggi pada proyek geoteknik seperti terowongan, lereng, dan pembangunan bendungan sangat dipengaruhi oleh kehadiran airtanah. Aliran airtanah media rekahan lebih sulit diprediksi daripada aliran media berpori. Konduktivitas pada media rekahan lebih umum diukur dengan *packer test*. Karena adanya batasan finansial dan waktu, pengukuran dapat digantikan menggunakan korelasi dengan parameter atau indeks yang lebih mudah didapatkan untuk mengestimasi dan memodelkan nilai konduktivitas yang sebenarnya. Salah satu sistem korelasi indeks yang umum yang digunakan yaitu *HC-system*. Sistem tersebut terdiri dari 4 indeks yaitu RQD, kedalaman, isian, dan permeabilitas pori batuan. Nilai *HC-system* berkorelasi sebesar $R^2 = 0,85$ dengan hasil *packer test* dari metode regresi. Prediksi konduktivitas hidraulik dapat ditingkatkan dengan metode ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*). Metode alternatif ini dapat menghasilkan korelasi keempat indeks dengan hasil *packer test* sebesar $R^2 = 0.96$.

Kata kunci : rekahan, konduktivitas hidraulik, *HC-system*, ANFIS

ABSTRACT

High intensity rock fractures in geotechnical projects such as tunnels, slopes, and the construction of dams is strongly influenced by the presence of groundwater. Groundwater flow fracture media is more difficult to predict than the porous media flow. The conductivity of the media is more common fracture is measured by packer test. Due to financial and time constraints, measurements can be replaced using the correlation with the parameter or index is more easily available to estimate and model the actual conductivity value. One correlation system commonly used indices, namely *HC-system*. The system consists of four indices namely RQD, Depth Index, Gouge Content Index, and Lithology Permeability Index . The *HC system* value of $R^2 = 0.85$ correlated with packer test results of the regression method. Prediction hydraulic conductivity can be increased by using ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*). This alternative method can produce a fourth correlation with the index packer test results of $R^2 = 0.96$.

Keywords: fracture, hydraulic conductivity, *HC-system*, ANFIS

PENDAHULUAN (INTRODUCTION)

Tingginya frekuensi rekahan pada batuan sulit untuk dihindari akibat tingginya tegangan in-situ (Hudson & Harrison, 1997). Media rekahan yang berfrekuensi tinggi biasanya membuat masalah pada kegiatan rekayasa batuan seperti penggalan

terowongan, lereng, dan pembangunan bendungan. Selain sebagai bidang lemah pada batuan, rekahan pada batuan mengalirkan airtanah yang merupakan salah satu masalah utama. Hal ini disebabkan karena kestabilan batuan tergantung kuat geser yang dipengaruhi

tekanan pori pada media rekahan (Brady & Brown, 2005).

Konduktivitas hidrolik pada media rekahan umumnya diukur menggunakan *packer test*. Namun, biaya yang diperlukan cukup tinggi. Oleh karena itu, banyak peneliti yang telah mengestimasi konduktivitas hidrolik dari parameter atau indeks rekahan dengan metode regresi. Salah satu bentuknya yaitu korelasi dengan kedalaman. Selain itu, banyak faktor lain yang mempengaruhi aliran airtanah pada media rekahan membuat konduktivitas hidrolik sulit untuk diprediksi. Salah satu sistem yang memprediksi adalah *HC-system*, yang terdiri dari 4 indeks yaitu RQD, kedalaman, isian, dan permeabilitas pori batuan (Ku dkk, 2009). Dari keempat indeks tersebut, didapatkan nilai indeks HC yang kemudian digunakan untuk mengestimasi konduktivitas hidrolik. Penyelesaian metode numerik yang dikembangkan oleh *HC-System* (Ku dkk, 2009) ini menggunakan pendekatan regresi yaitu membandingkan komponen HC yang terdiri dari *Rock Quality Designation*, *Lithology Permeability Index*, *Gouge Content Designation*, dan *Depth Index* dengan data packer di lapangan. Pendekatan lain yang akan diusulkan dalam tulisan adalah pendugaan nilai konduktivitas hidrolik dengan menggunakan variabel *HC-System* sebagai data pembelajaran dan data logika dengan target data observasi packer test. Cara ini lebih dikenal dengan metode *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS). Studi kasus yang digunakan dalam penerapan metode ANFIS untuk menduga nilai konduktivitas hidrolik menggunakan data yang telah dipublikasikan oleh Ku dkk, 2009.

METODE (METHODS)

HC-System

Seperti yang telah dijelaskan pada pendahuluan, *HC-system* adalah metode estimasi yang bersifat empiris untuk memprediksi nilai konduktivitas hidrolik berdasarkan 4 indeks yaitu RQD, isian rekahan (GCD), kedalaman (DI), dan jenis litologi (LPI). Sistem ini terlebih dahulu menjumlahkan keempat indeks tersebut untuk menghasilkan nilai indeks HC, yang kemudian dikorelasikan dengan data pengukuran yang sebenarnya menghasilkan hubungan atau

persamaan model konduktivitas hidrolik. Berikut adalah persamaan sistem ini yang menghasilkan nilai indeks HC :

$$HC = \left(1 - \frac{RQD}{100}\right) \cdot (DI) \cdot (1 - GCD) \cdot (LPI) \dots (1)$$

Dimana :

HC = nilai indeks HC

RQD = *Rock Quality Designation*

DI = *Depth Index*

GCD = *Gouge Content Designation*

LPI = *Lithology Permeability Index*

RQD adalah salah satu indeks atau parameter yang menyatakan kualitas massa batuan dari frekuensi rekahan yang ada. Nilai RQD didapatkan dari penjumlahan total panjang bagian inti batuan (*core*) yang lebih panjang dari 100 mm (R_s) yang kemudian dibagi oleh panjang keseluruhan inti batuan (R_T). Indeks ini mencerminkan konduktivitas hidrolik karena menyatakan frekuensi rekahan pada batuan yang merupakan salah satu media utama aliran airtanah. Berikut adalah persamaan perhitungan RQD :

$$RQD = \frac{\sum R_s}{R_T} \times 100\% \dots (2)$$

Nilai RQD dapat dipengaruhi oleh adanya mineral yang mengisi rekahan pada massa batuan. Tentunya isian tersebut menghalangi aliran airtanah yang seharusnya dapat melewati rekahan. Hal ini dinyatakan dalam indeks GCD (*Gouge Content Designation*), dengan persamaan :

$$GCD = \frac{R_G}{R_T - R_S} \dots (3)$$

Dimana R_G adalah panjang isian rekahan pada inti batuan. Selain itu, massa batuan juga dipengaruhi oleh pembebanan (*overburden*) batuan di atasnya. Hal ini mempengaruhi bukaan dari rekahan, dimana jika semakin besar beban, maka kemungkinan bukaan rekahan semakin kecil yang mengakibatkan berkurangnya aliran airtanah. Pembebanan ini dinyatakan dalam indeks kedalaman atau *Depth Index* (DI) dengan persamaan :

$$DI = 1 - \frac{L_c}{L_T} \dots (4)$$

Dimana L_c adalah kedalaman di tengah packer test dan L_T adalah panjang total lubang bor. Kemudian faktor yang menentukan konduktivitas hidrolik dalam batuan yaitu porositas batuan. Hal ini dinyatakan dengan

Lithology Permeability Index (LPI) yang merupakan kemungkinan batuan mengalirkan

airtanah selain melalui media rekahan, yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Rating LPI masing-masing batuan (dikutip dari Kuddik, 2009)

Lithology	Hydraulic conductivity (m/s)				Range of rating	Suggested Rating
	Reference ¹	Reference ²	Reference ³	K _{average}		
Sandstone	10 ⁻⁶ ~10 ⁻⁹	10 ⁻⁷ ~10 ⁻⁹	10 ⁻⁷ ~10 ⁻⁹	10 ^{-7.5}	0.8-1.0	1.00
Silty Sandstone	—	—	—	—	0.9-1.0	0.95
Argillaceous Sandstone	—	—	—	—	0.8-0.9	0.85
S.S. interbedded with some Sh.	—	—	—	—	0.7-0.8	0.75
Alternations of S.S & Sh.	—	—	—	—	0.6-0.7	0.65
Sh. interbedded with some S.S.	—	—	—	—	0.5-0.7	0.60
Alternations of S.S & Mudstone	—	—	—	—	0.5-0.6	0.55
Dolomite	10 ⁻⁶ ~10 ^{-10.5}	10 ⁻⁷ ~10 ^{-10.5}	10 ⁻⁹ ~10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁸	0.6-0.8	0.70
Limestone	10 ⁻⁶ ~10 ^{-10.5}	10 ⁻⁷ ~10 ⁻⁹	10 ⁻⁹ ~10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁸	0.6-0.8	0.70
Shale	10 ⁻¹⁰ ~10 ⁻¹²	10 ⁻¹⁰ ~10 ⁻¹³	—	10 ^{-10.5}	0.4-0.6	0.50
Sandy Shale	—	—	—	—	0.5-0.6	0.60
Siltstone	10 ⁻¹⁰ ~10 ⁻¹²	—	—	10 ⁻¹¹	0.2-0.4	0.30
Sandy Siltstone	—	—	—	—	0.3-0.4	0.40
Argillaceous Siltstone	—	—	—	—	0.2-0.3	0.20
Claystone	—	10 ⁻⁹ ~10 ⁻¹³	—	10 ⁻¹¹	0.2-0.4	0.30
Mudstone	—	—	—	—	0.2-0.4	0.20
Sandy Mudstone	—	—	—	—	0.3-0.4	0.40
Silty Mudstone	—	—	—	—	0.2-0.3	0.30
Granite	—	—	10 ⁻¹¹ ~10 ⁻¹²	10 ^{-11.5}	0.1-0.2	0.15
Basalt	10 ⁻⁶ ~10 ^{-10.5}	10 ⁻¹⁰ ~10 ⁻¹³	—	10 ^{-11.5}	0.1-0.2	0.15

¹B.B.S. Singhal & R.P. Gupta (1999) ; ²Karlheinz Spitz & Joanna Moreno (1996) ; ³Bear(1972)

ANFIS

Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) adalah gabungan dari metode pemodelan *soft-computing Artificial Neural Network* (ANN) dan *Fuzzy Logic* (FL). ANN adalah pemodelan yang meniru cara kerja dan struktur jaringan sel otak manusia (neuron) yang terdiri dari input data yang kemudian yang diproses dalam lapisan (*layer*) yang terdiri dari beberapa neuron (sel otak) yang kemudian dihasilkan output data hasil pembelajaran atau training. Proses tersebut dilakukan secara berulang (iterasi), yaitu hasil output dikembalikan lagi menjadi input sampai error output yang dihasilkan paling kecil. Berbeda dengan ANN, FL mengandalkan penilaian ahli di bidang data yang akan diolah untuk menentukan rentang atau range tingkat bobot dari suatu data menjadi *membership*

function (MF). Proses dari FL ini menggunakan aturan Jika-Maka (IF-THEN) yang kemudian hasil kombinasi proses ini menghasilkan output yang diinginkan. ANFIS mengkombinasikan kelebihan ANN berupa pembelajaran (*training*) dan FL berupa fleksibilitas penilaian ahli untuk menghasilkan model paling optimal. ANFIS merupakan sistem inferensi *fuzzy* yang diterapkan dalam jaringan *Neural Network* (jaringan saraf tiruan). ANFIS menggunakan data *input* atau *output* yang diatur untuk membangun sistem inferensi *fuzzy* dengan keanggotaan fungsinya telah disesuaikan menggunakan algoritma pembelajaran dan didasarkan pada Takagi and Sugeno (1985).

HASIL DAN PEMBAHASAN (RESULT AND DISCUSSIONS)

HC-system (Ku dkk, 2009) memodelkan nilai konduktivitas hidraulik dari 4 indeks yang kemudian dihitung yang menghasilkan nilai indeks HC. Nilai indeks HC tersebut akan dikonversi menjadi nilai konduktivitas

hidraulik pemodelan melalui hasil regresi dengan hasil pengukuran *packer test* (Gambar 1). Hasil regresi tersebut yang berupa sebuah persamaan akan digunakan untuk memprediksi nilai konduktivitas hidraulik di lubang bor yang tidak dilakukan *packer test* (Gambar 2).

Gambar 1. Hasil regresi indeks HC dengan pengukuran *packer test* (dikutip dari Ku dkk, 2009)

Gambar 2. Hasil prediksi *HC-system* dengan korelasinya dengan hasil pengukuran (dikutip dari Ku dkk, 2009)

Berbeda dengan *HC-System*, makalah ini memodelkan 4 indeks rekahan langsung menghasilkan nilai prediksi konduktivitas hidraulik tanpa menghasilkan nilai indeks HC

terlebih dahulu. Gambar 3 menunjukkan *membership function* ANFIS yang digunakan sebagai input.

Gambar 3. Membership function data input

Variabel RQD dibagi menjadi 4 klasifikasi yaitu intact, tinggi, sedang, dan rendah. Variabel GCD dibagi menjadi 3 yaitu tertutup, terisi, dan kosong. Variabel LPI dibagi menjadi impermeable, semi impermeable, low permeable, medium permeable, dan high permeable. Variabel Depth Index dibagi menjadi sangat dalam,

dalam, dan dangkal. Kemudian input tersebut diproses menggunakan aturan “jika-maka” atau “IF-THEN” (Gambar 4) yang kemudian menghasilkan nilai output konduktivitas hidraulik model dengan membership function tersendiri (Gambar 5). Secara keseluruhan, struktur ANFIS yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 6.

```

1. If ((1-RQD)/100 is Intact) and (DI is Sangat_Dalam) and (1-GCD is Tertutup) and (LPI is Impermeabel) then (K is Sangat_Lambat) (1)
2. If ((1-RQD)/100 is Rendah) and (DI is Dangkal) and (1-GCD is Kosong) and (LPI is High_Permieabel) then (K is Sangat_Cepat) (1)
3. If ((1-RQD)/100 is Tinggi) and (DI is Dalam) and (1-GCD is Terisi) and (LPI is Semi_Impermeabel) then (K is Lambat) (1)
4. If ((1-RQD)/100 is Tinggi) and (DI is Dalam) and (1-GCD is Terisi) and (LPI is Low_Permieabel) then (K is Sedang) (1)
5. If ((1-RQD)/100 is Sedang) and (DI is Dangkal) and (1-GCD is Kosong) and (LPI is Medium_Permieabel) then (K is Cepat) (1)

```

Gambar 4. Aturan ANFIS

Gambar 5. Membership function data output

Gambar 6. Struktur ANFIS yang digunakan

Gambar 7. Hasil prediksi ANFIS dengan korelasinya dengan hasil pengukuran

Proses hubungan antara data input dan output tersebut dihubungkan dalam kotak *black box* dimana system struktur pembelajaran data input output terbentuk. Hasil proses pembelajaran dan penggunaan logika tersebut kemudian dipakai untuk menduga suatu variable RQD, LPI, GCD, DI yang tidak dimasukkan ke dalam system pembelajaran dan logika berpikir. Dalam kasus ini dicoba dengan menggunakan 4 data dalam menguji hasil prediksi dengan menggunakan ANFIS. Hasil output yang didapatkan diuji dengan data pengukuran insitu dengan nilai $R^2 = 0.96$ (Gambar 7), lebih tinggi daripada hasil korelasi memakai indeks HC, yaitu $R^2 = 0.85$ (Gambar 2).

KESIMPULAN (CONCLUSION)

Dari 4 parameter indeks rekahan, tanpa melalui indeks HC, nilai konduktivitas hidraulik dapat dimodelkan dengan korelasi yang lebih baik. Dari perbandingan korelasi nilai log K model dengan log K hasil pengukuran insitu, pemodelan ANFIS menghasilkan korelasi nilai $R^2 = 0.96$, sementara dari korelasi indeks HC, hanya dihasilkan $R^2 = 0.85$.

DAFTAR PUSTAKA (REFERENCES)

Bear, J., 1972. *Dynamics of Fluids in Porous*

Media, American Elsevier Publication Co., New York

Brady, B. dan Brown, E., 2005. *Rock Mechanics for Underground Mining*. New York : Kluwer Academic Publishers.

Hudson, J.A. dan Harrison, J.P., 1997. *Engineering Rock Mechanics : An Introduction to the Principles*. Oxford : Elsevier Science Ltd.

Ku C.Y., Hsu M.H., Chiou L.B., dan Lin G.F., 2009. *An empirical model for estimating hydraulic conductivity of highly disturbed clastic sedimentary rocks in Taiwan*, Engineering Geology 109, hal. 213–223.

Singhal B.B.S., Gupta, R.P., 1999. *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 400 p. Spitz, K., and Moreno, J. 1996. *A practical guide to groundwater and solute transport modeling*. John Wiley, New York, 480 p.

Takagi, T., Sugeno, M., 1985. *Fuzzy Identification Of Systems And Its Applications To Modeling And Control*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 15 (1), 116–132.