

KERANGKA PEMETAAN KEBENCANAAN GEOTEKNIS PADA SUBGRADE JALAN TANAH EKSPANSIF DENGAN GIS-AHP DAN FUZZY LOGIC

Wahniar¹, L. Samang², T. Harianto³ dan A. R. Djameluddin⁴

¹Mahasiswa Program Studi S3 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin,
Email: wahniar_niar@yahoo.co.id

²Professor, Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin,
Email: samang.l@yahoo.com

³Asosiasi Professor, Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin,
Email: triharianto@hotmail.com

⁴Asosiasi Professor, Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin,
Email: jamaluddin_abdulrahman@yahoo.co.id

ABSTRAK

Infrastruktur jalan mempunyai peran yang sangat penting untuk menunjang pertumbuhan ekonomi masyarakat khususnya pendistribusian barang maupun jasa. Karena pentingnya peranan jalan, maka kondisi jalan yang baik sangat mempengaruhi kelancaran dan kenyamanan pengguna, dan pada jangka panjang akan membantu percepatan distribusi barang dan jasa, serta menunjang pertumbuhan ekonomi daerah. Namun demikian, pembangunan infrastruktur jalan dihadapkan pada sulitnya mencapai kemantapan karena faktor-faktor kondisi tanah dasarnya, pengaruh topografi, dan cuaca. Pada beberapa daerah dengan kondisi geologi yang khas sangat mempengaruhi kemantapan jalan. Deposisi tanah ekspansif pada lapisan subrage jalan menyebabkan deformasi badan jalan seperti *rutting*, retak (*cracking*) bahkan penurunan sebagian (*differential settlement*) badan jalan. Penelitian ini mengusulkan memetakan bahaya tanah ekspansif pada area jalan dengan menggunakan sistem index data base berbasis data pengukuran langsung dengan menggunakan manajemen database dan visualisasi geografis dengan SIG dimana model prediksi sebaran data menggunakan metode AHP dan fuzzy logic.

Kata kunci : Subgrade jalan, Tanah ekspansif, GIS-AHP, Fuzzy logic

1. PENDAHULUAN

Infrastruktur jalan mempunyai peran yang sangat penting untuk menunjang pertumbuhan ekonomi masyarakat khususnya pendistribusian barang maupun jasa. Namun demikian, pembangunan infrastruktur jalan dihadapkan pada sulitnya mencapai kemantapan karena faktor-faktor kondisi tanah dasarnya, pengaruh topografi, dan cuaca. Pada beberapa daerah dengan kondisi geologi yang khas sangat mempengaruhi kemantapan jalan. Deposisi tanah ekspansif pada lapisan subrage jalan menyebabkan deformasi badan jalan seperti *rutting*, retak (*cracking*) bahkan penurunan sebagian (*differential settlement*) badan jalan. Jalan yang rusak karena deposisi tanah ekspansif berada di beberapa daerah di Sulawesi Selatan, seperti Jalan Nasional Poros Takalar – Jeneponto dan Poros Tarumpakkae – Batas Luwu.

Tanah ekspansif memiliki sifat volumenya yang mudah berubah disebabkan perubahan kandungan kadar airnya (Donaldson, 1969 [7]; Katti, 1979 [11]; Chen, 1988 [4]; Petry dan Little, 2002 [18]; Vu dan Fredlund; 2004 [26]). Oleh sebab itu, tanah ekspansif ini memiliki potensi pengembangan volume (*swelling*) dan potensi penyusutan volume (*shrinkage*). Potensi kembang ini dipengaruhi oleh sifat absorpsi air dari mineralogi penyusun struktur tanah dan fraksi ukuran lempung dari tanah (Rich dan Kunze; 1964 [21]; Ravina; 1973 [20]; Sankoran dan Venkateshwar, 1974 [22]; Lucian, 2008 [15]). Metode pengukuran langsung dan tidak langsung untuk klasifikasi tingkat ekspansif tanah dari perubahan volumenya telah dikembangkan. Metode tidak langsung dilakukan dengan pengujian batas atterberg, kadar koloid dan aktifitas lempung (Altmeyer, 1955 [2]). Metode langsung seperti uji oedometer juga banyak dilakukan untuk mengukur potensi kembang dan tekanan pengembangan (Jennings, 1961 [9]; Knott dkk. 1973 [12]; Novais-Ferreira dkk., 1973 [17]), dan metode analisis kimia dan mineralogi (Cockca, 1991 [27]; Kacker and Gupta, 1966 [10]).

Pengujian tanah ekspansif tidaklah mudah karena umumnya sampel tanah yang diambil dari lapangan dalam kondisi *disturbed*, terganggu (Holtz and Gibbs, 1956 [8]; Ladd, 1960 [14]; Seed dkk., 1962 [23]; Sowers dan Kennedy, 1960 [28]; Nalezny dan Li, 1967 [16]). Oleh sebab itu karakteristik perilaku kembang tanah didapatkan dari korelasi empirik dari sifat fisik tanah yang mudah diukur pada sampel tanah terganggu seperti batas atterberg dan kadar lempung (Komornic dan David, 1969 [13]).

Dari korelasi empiris ini, dapat dilakukan identifikasi tingkat aktifitas tanah pada area jalan yang ditinjau. Volume data borelog dan sifat fisik-mekanik tanah harus dapat disimpan, diatur dan divisualisasikan dengan Sistem informasi Geografis (SIG) sebagai framework geografis yang terintegrasi (Labib dan Nashed, 2013). Metode serupa dilakukan oleh Badan Survey Geologi Inggris membuat data *base property* geoteknik (Self dkk, 2008 [3]) yang berisi data indeks. Data indeks ini menggunakan data base 8000 data bor, 320000 data lab dengan 10000 data plastisitas tanah. BGS (British Geological Survey) memberikan informasi geologi mengenai potensi pergerakan atau subsidence termasuk database potensi kembang/susut (Booth dkk., 2011 [5]).

Hanya saja validitas peta yang dibuat akan sulit ditingkatkan jika pemetaan dibuat berdasarkan data hasil korelasi empirik seperti yang dilakukan oleh Labib and Nashed (2013) [1] dan Turkoz dan Tosun (2011) [25], dan bukan data pengujian langsung seperti pengujian oedometer, CBR rendaman dan analisis mineralogi. Tingkat keterbatasan data juga mempengaruhi tingkat akurasi peta karena pada daerah yang tidak terdapat data, estimasi model harus dilakukan dengan menggunakan model frequency ratio, fuzzy logic, dan multivariate regression. Model ini digunakan oleh Pradhan and Youssef (2010) [6] untuk obyek pemetaan bahaya longsor dan Sun (2010) [24] untuk pemetaan bahaya gempa. Model estimasi ini masih sangat kurang digunakan pada pemetaan bahaya tanah ekspansif yang perilaku dan distribusi datanya sangat berbeda dengan longsor dan gempa.

Oleh sebab itu, usulan penelitian ini akan memetakan bahaya tanah ekspansif pada area jalan dengan menggunakan sistem index database berbasis data pengukuran langsung dengan menggunakan manajemen database dan visualisasi geografis dengan SIG dimana model prediksi sebaran data menggunakan metode AHP dan fuzzy logic. Adapun tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mendapatkan informasi mengenai profil stratigrafi dan karakteristik tanah yang memiliki sifat ekspansif pada ruas jalan nasional dengan menggunakan sistem informasi geografis.
2. Merumuskan indeks kebencanaan yang dapat digunakan dalam pemetaan kerawanan tanah ekspansif dengan menggunakan metode GIS-AHP dan Fuzzy Logic.
3. Mendapatkan model penanganan perbaikan instabilitas struktur geoteknik pada jalan nasional tanah ekspansif dengan pengarus lalu lintas dan banjir.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penentuan Tingkat Potensi Pengembangan (Ekspansif)

Dalam menentukan tingkat potensi pengembangan diperlukan identifikasi dan klasifikasi tanah *ekspansif* secara empiris yang dilakukan dengan menggunakan parameter-parameter hasil uji indeks. Uji indeks yang diperlukan adalah kadar air (SNI 03-1965-1990), batas cair (SNI 03-1967-1990), batas plastis (SNI 03-1966-1990), batas susut (SNI 03-3422-1994), dan analisis hidrometer (SNI 03-3423-1994). Selain itu, identifikasi dan klasifikasi tanah *ekspansif* juga secara sederhana dapat dilakukan dengan menghitung nilai tingkat keaktifan (*activity*) dan potensi pengembangan (*swelling potensial*) berdasarkan nilai-nilai batas *atterberg* dan/atau presentase kandungan lempung. Berikut identifikasi dan klasifikasi tanah ekspansif :

1. Nilai indeks plastisitas (PI) dan batas susut (SI)

Identifikasi tanah ekspansif secara tidak langsung dapat menggunakan nilai indeks plastisitas (PI) dan nilai indeks susut (SI) seperti yang diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kolerasi plastisitas, indeks susut dengan tingkat pengembangan (Chen, Raman, 1967 [4])

PI(%)	SI (%)	Tingkat Pengembangan
< 12	< 15	Rendah
12 – 23	13 – 30	Sedang
23 – 32	30 – 40	Tinggi
> 32	> 40	Sangat Tinggi

2. Tingkat keaktifan (*activity*)

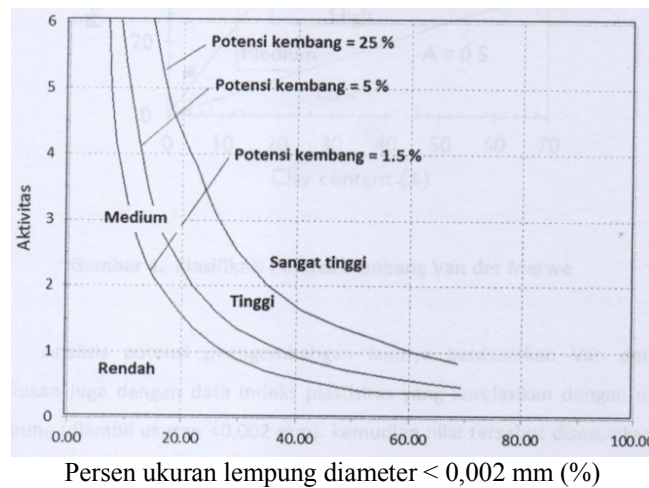
Batas *atterberg* dan fraksi lempung dapat dikombinasikan menjadi satu parameter yang dinamakan tingkat keaktifan (*activity*). Pada umumnya, tanah dengan indeks plastisitas (PI) kurang dari 15% tidak akan memperlihatkan perilaku pengembangan. Untuk tanah dengan PI besar dari 15 %, kadar lempung dan batas *atterberg*-nya harus diuji. Fraksi lempung yang dimaksud berdasarkan presentase partikel dengan diameter ekuivalen 0,002 mm yang didapat dari tes hidrometer (SNI-03-3423-1994). Nilai ini harus dikurangi sebesar 5% apabila nilainya kurang dari 40%. Jika dikolerasikan dengan potensi pengembangan, maka tanah lempung dibagi menjadi kelas berdasarkan tingkat keaktifannya, seperti yang diperlihatkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kolerasi tingkat keaktifan dengan potensi pengembangan (Petry, 2002 [18])

Tingkat Keaktifan	Potensi Pengembangan
< 0,75	Tidak Aktif
0,75 – 1,25	Normal
> 1,25	Aktif

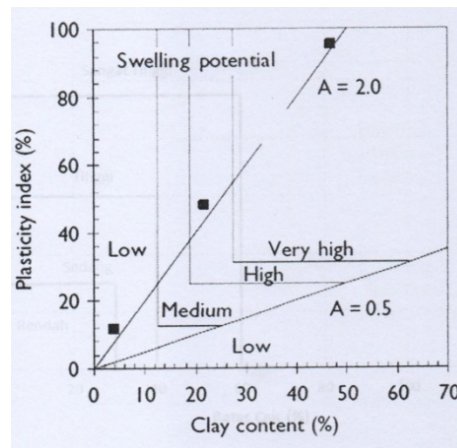
3. Potensi pengembangan (*swelling potential*)

Studi literatur terhadap penentuan potensi pengembangan secara empiris menghasilkan banyak kriteria. Untuk mengetahui klasifikasi pengembangan (*low, medium, high, dan very high*) maka nilai *activity* (sebagai ordinat) dikolerasikan dengan persen lempung (sebagai absis). Seperti pada Gambar 1.



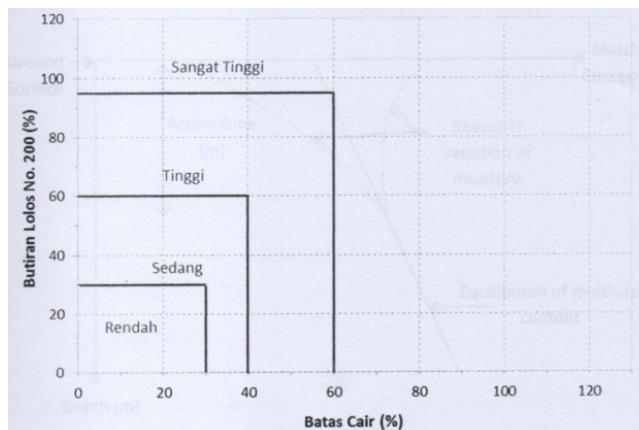
Gambar 1. Klasifikasi potensi kembang seed 1962

Analisis potensi pengembangan lainnya berdasarkan Van der Merwe dilakukan juga dengan data indeks plastisitas yang korelasikan dengan prestasi lempung (diambil ukuran <0.002 mm). Kemudian nilai tersebut disesuaikan dengan Gambar 2.



Gambar 2. Klasifikasi potensi kembang Van der Merwe

Potensi Pengembangan juga dapat diketahui berdasarkan nilai indeks plastisitas pada masing-masing kedalaman contoh tanah. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



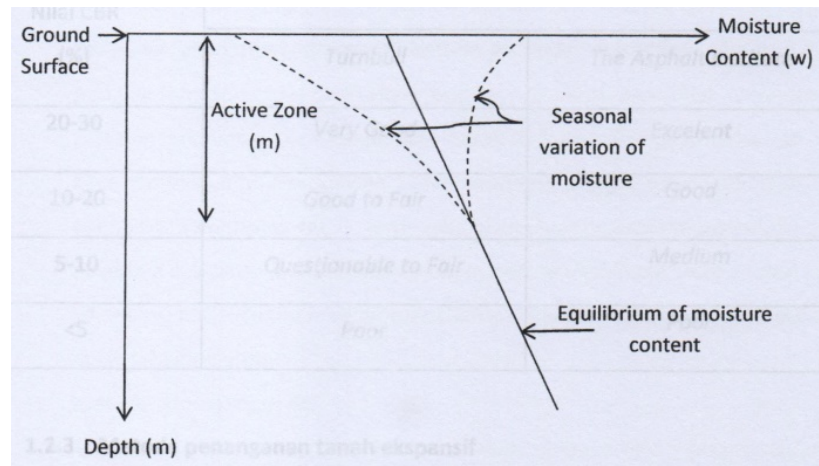
Gambar 3. Klasifikasi potensi kembang Chen

Mineral lempung merupakan faktor utama yang mengontrol perilaku tanah ekspansif. Tabel 3 memperlihatkan hubungan antara jenis mineral dengan tingkat keaktifan. Dari tabel tersebut terlihat bahwa apabila suatu lempung memiliki kandungan mineral montmorillonite maka tanah tersebut merupakan tanah ekspansif. Metode *X-ray Diffraction* merupakan metode yang di rekomendasikan untuk dipakai diantara metode-metode lainnya.

Tabel 3. Hubungan aktifitas dan kandungan mineral tanah (Skempton, 1953)

Mineral	Keaktifan
Kaolinite	0,33 – 0,46
Illite	0,90
Montmorilnite (Ca)	1,5
Montmorilnite (Na)	7,2

Zona aktif dapat ditentukan dengan menetapkan nilai kadar air (w) terhadap kedalaman (D) dari contoh tanah yang di ambil selama musim basah dan musim kering. Kedalaman pada saat kadar air hampir konstan adalah batasan zona aktif atau disebut juga tebal perubahan kadar air musiman seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Metode penentuan zona aktif dari fluktuasi kadar air musiman

2.2. Kriteria Subgrade Jalan

Lapisan *subgrade* jalan merupakan tanah dasar dan lapisan penopang (*capping*) yang dibutuhkan untuk memberikan landasan pendukung struktur perkerasan lentur dan perkerasan kaku agar dapat dilalui lalu lintas konstruksi pada kondisi musim hujan. Evaluasi tanah dasar atau lapisan *subgrade* pada jalan sangat berpengaruh pada desain pondasi jalan tepat merupakan persyaratan utama untuk mendapatkan kinerja perkerasan yang baik. Hal ini penting terutama pada daerah dengan tanah dasar yang lemah. Untuk itu tanah dasar dibawah jalan pada kedalaman -1.00 meter diuji nilai CBR-nya di Laboratorium pada kondisi tidak direndam (*Unsoaked*) dan pada kondisi terendam (*Soaked*). Berdasarkan Turnbull (1968) maupun *The Asphalt Institute* (1970) diketahui kriteria umum batasan nilai CBR untuk material subgrade yaitu pada Tabel 4.

Tabel 4. Kriteria umum CBR untuk material *subgrade*

Nilai CBR (%)	Kriteria material <i>Subgrade</i>	
	Turnbull	The Asphalt Institute
20-30	Very Good	Excelent
10-20	Good to fair	Good
5-10	Quitstionable to Fair	Medium
< 5	Poor	Poor

2.3. Tanah Ekspansif

Tanah ekspansif merupakan tanah atau batuan yang memiliki potensi untuk mengembang dan menyusut akibat perubahan kondisi airnya. Walaupun defenisi ini terlihat sederhana, tetapi sebenarnya fenomena kembang susut dari tanah ekspansif memiliki kinerja yang rumit dan kompleks. Dari beberapa studi yang telah dilakukan, didapati kenyataan bahwa fenomena kembang susut (*shrink-swell phenomena*) dalam tanah tergantung banyak faktor, termasuk kondisi hubungan makro-mikro yang tergantung di dalam suatu mineral lempung. Segala sesuatu bentuk yang terjadi di permukaan tanah, terbukti berasal dari perubahan mikroorganisasi di dalam suatu partikel lempung (Pedoman Konstruksi dan Bangunan 2005).

2.4. Konsep Analisa Hierarcy Process

Menurut Thomas. L. Saaty (2005) dalam Dewa Ayu (2011) menyatakan bahwa teknik Analytical Hierarcy Process (AHP) tergantung pada input utamanya yaitu persepsi seorang ahli atau pakar sehingga melibatkan faktor subyektifitas para ahli atau pakar tersebut. Sehingga model atau hasil akhirnya akan menjadi tidak berarti jika para ahli atau pakar tersebut keliru dalam memberikan penilaian dalam penggunaannya merupakan teknik untuk mengukur, memformulasikan serta menganalisis keputusan. Analysis Herarchy Process (AHP) digunakan dalam pengamatan tentang sifat manusia, analisis pemikiran dan pengukuran yang berguna untuk memecahkan persoalan kualitatif maupun kuantitatif. Pengambilan keputusan dalam AHP dikonstruksikan

sebagai diagram bertingkat diawali dengan menyusun struktur masalah diikuti dengan penilaian kriteria dan sub kriteria yang dibandingkan secara berpasangan kemudian penentuan rasio konsistensi, penilaian tiap kriteria dan sub kriteria dan penetapan alternatif.

2.5. Konsep Fuzzy Logic

Zimmerman (1996) memperkenalkan kombinasi fuzzy dengan 5 operator (Bonham-Carter, 1994) yakni fuzzy OR, fuzzy AND, fuzzy produk aljabar, fuzzy aljabar total, dan fuzzy operator gamma. Rasio frekuensi dihitung sebagai faktor-faktor kontributor tanah ekspansif. Hubungan spasial antara lokasi tanah ekspansif dan faktor-faktor kontributor tanah ekspansif dianalisis menggunakan model frekuensi rasion. Rasio frekuensi merupakan rasio keterjadian dan ketidakjadian tanah ekspansif pada setiap pixel, dimana faktor-faktor kontributor tanah ekspansif.

3. METODE PENELITIAN

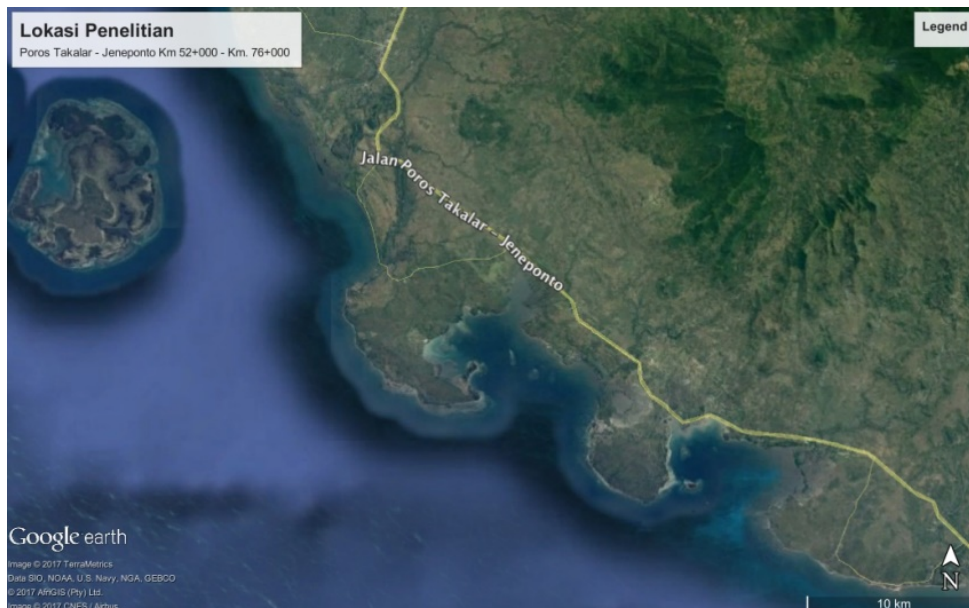
3.1. Rancangan Penelitian

Kegiatan penelitian dibuat dalam bentuk diagram kerja yang disusun untuk memudahkan di dalam melakukan penelitian, dan dapat dilaksanakan dengan efektif dan efisien. Tahapan dari kegiatan penelitian ini, yaitu :

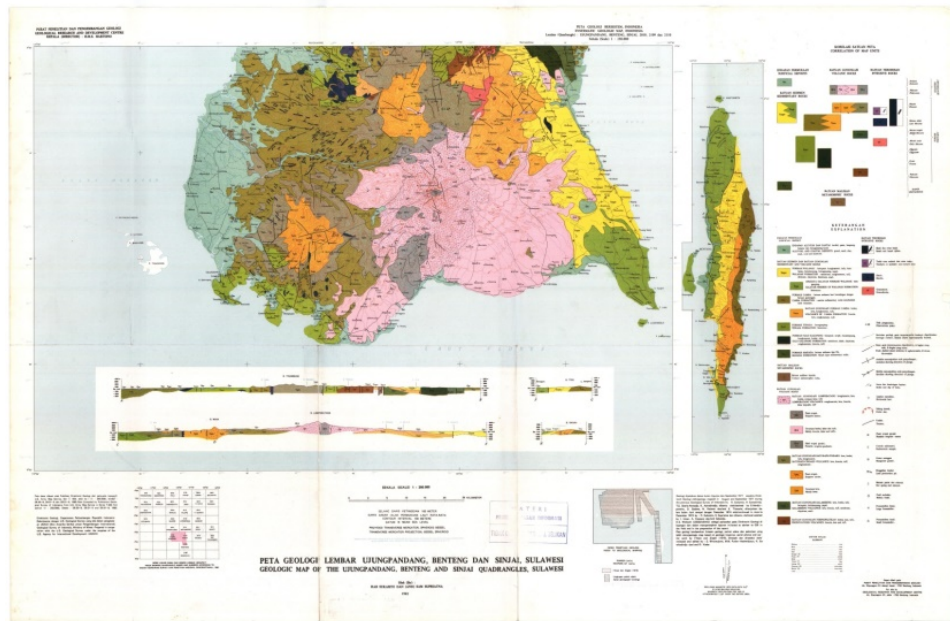
1. Studi pendahuluan
2. Persiapan peralatan dan bahan
3. Pengambilan data primer dan data sekunder
4. Tabulasi dan ompilasi data
5. Persiapan data masukan metode pemetaan
6. Metode pemetaan berbasis sistem geografi (GIS)
7. Analisis hasil metode

3.2. Lokasi dan Waktu Penelitian

Lokasi penelitian ruas Jalan Takalar – Jeneponto, KM. 52+000 – 76+000 yang diperlihatkan pada Gambar 5 dan Gambar 6. Waktu penelitian dilakukan selama 6 (enam) bulan.



Gambar 5. Lokasi penelitian



Gambar 6. Kondisi geologi regional lokasi penelitian

3.3. Analisis Data

Kegiatan analisis data hasil survei yang dilakukan meliputi hal-hal yaitu :

1. Tabulasi dan kompilasi data

Pada tahapan ini, kegiatan yang dilakukan adalah mentabulasi dan mengkompilasi semua data yang telah diperoleh dari hasil survei, baik survei primer maupun survei sekunder. Adapun jenis data utama yang ditabulasi dan dikompilasi tersebut adalah :

- a. Data pengujian lapangan perlapisan tanah
 - b. Data pengujian laboratorium sifat fisik tanah lempung
2. Persiapan data masukan pemetaan.

Pada tahapan ini, kegiatan yang dilakukan adalah mempersiapkan semua data masukan yang dibutuhkan untuk kegiatan estimasi parameter metode pemetaan.

3. Metode pemetaan berbasis sistem geografi (GIS)

Pada tahapan ini, kegiatan yang dilakukan adalah pemetaan. Perangkat komputer yang digunakan untuk mengestimasi adalah komputer dengan menggunakan aplikasi program yang dirakit sesuai dengan sistem geografi (GIS).

4. Analisis hasil metode pemetaan

Analisis hasil Metode pemetaan yang telah diperoleh dari sistem geografi (GIS). Metode yang dipakai meliputi AHP dan Fuzzy Logic.

4. EKSPEKTASI HASIL PENELITIAN

Pengembangan metode identifikasi tingkat kebencanaan infrastruktur jalan pada daerah tanah ekspansif dengan database data geologi-geoteknik disertai pemetaan berbasis sistem geografi (GIS) dengan analisis parameter berbasis statistik.

DAFTAR PUSTAKA

Altmeyer WT (1955). "Discussion of engineering properties of expansive clays", *Proceedings, American Society of Civil Engineers*, vol. 81, Separate No. 658. p 218–34.

- Booth., dkk. (2011). "GIS-based virtual geotechnical database for the St. Louis metro area", *Environ Eng Geosci* 2010, 16(2), 143–62.
- Chen FH. (1988). "Foundations on expansive soils. Amsterdam – Oxford – New York", *Elsevier Scientific Publishing Company*.
- Cokca E. (1991). "Swelling potential of expansive soils with a critical appraisal of the identification of swelling of Ankara soils by methylene blue tests", Ph.D. Thesis Middle East Technical University, Civil Engineering Department, 325 p.
- Donaldson GW. (1969). "The occurrence of problems of heave and the factors affecting its nature", *Proceedings of the 2nd international research and engineering conference on expansive clay soils*, College Station, TX; p. 25–36.
- Holtz WG, Gibbs HJ. Engineering properties of expansive clays. *Trans ASCE* 1956;121:641–77.
- Jennings JE. (1961). "A comparison between laboratory prediction and field observation of heave of buildings on desiccated subsoils", *Proceedings, fifth international conference on soil mechanics and foundation engineering, Paris*, vol. 1; p 689–92.
- Kacker KP, Gupta DP. (1966). "Prediction of swelling potential and compression index of soils by dye absorption", *J Indian Soc Soil Sci* 1966;14(3):151–9.
- Katti RK. (1979). "Search for solutions to problems in black cotton soils. First IGS annual lecture", *Indian Geotech J* 1979;9:1–80.
- Knott RA, Vispi MA, Farrell WJ. (1973). "Material property investigation for project middle gust, Events IV and V; subsurface exploration and laboratory test results", *Technical report S-73-11, report 1, US Army Engineering Waterways Experiment Station*; October 1973.
- Komornic A, David D. (1969). "Prediction of swelling pressure of clays", *J ASCE, Soil Mech Found Div* 1969:209–25, SM No. 1.
- Labib dan Nashed. (1967) "Study of the behavior of isolated footing on expansive soils", *Eleventh int. conf. on soil mechanics and foundation engineering*, 965 (7).
- Ladd CC. (1960). "Mechanism of swelling by compacted clay", *Bull. Highway Res. Board No. 245; 1960. p. 10–26*.
- Lucian C. (2008). *Geotechnical aspects of building on expansive soils in Kibaha, Tanzania*, Doctoral thesis for the partial fulfillment of doctor degree, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Nalezny CL, Li Mo Co. (1967). "Effect of soil structure and thixotropic hardening on the swelling behavior of compacted clay soils", *High way Res. Rec. No. 209; 1967. p. 1–20*.
- Novais-Ferreira H, Horta da Silva JA. (1973). "Luanda expansive clays and laboratory appreciation criteria", *Proceedings, third international research and engineering conference on expansive clay soils, Haifai, Israel*, August 1973. P. 53–9.
- Petry TM, Little DN. (2002). "Review of stabilization of clays and expansive soils in pavements and lightly loaded structures history, practice and future", *Journal of Materials in Civil Engineering Conference on Expansive Clay Soils, ASCE*, 14, No. 6; 2002. p. 447–60.
- Pradhan B. (2010). "Landslide susceptibility mapping of a catchment area using frequency ratio, fuzzy logic and multivariate logistic regression approaches", *J Indian Soc Remote Sens* 2010;38(2):301–20.
- Pradhan dan Yossef. (2010). "Swelling potential of expansive soils with a critical appraisal of the identification of swelling of Ankara soils by methylene blue tests", *Ph.D. Thesis Middle East Technical University, Civil Engineering Department*; 2010. 325 p.
- Ravina I. (1973). "Swelling of clays, mineralogical composition, and microstructure", *Proceedings, third international research and engineering conference on expansive clay soils, Haifi, Israel*; P. 61–3.
- Rich CI, Kunze GW, editors. (1964). *Soil clay mineralogy. Raleigh*: University North Carolina Press.
- Sankoran KS, Venkateshwar, Rao. (1974). "A microscopic model of expansive clay", *Proceedings, third international research conference*
- Seed HB, Woodward RJ, Lundgren R. (1962). "Prediction of swelling potential for compacted clays", *J. ASCE, Soil Mech Found Div* 1962;88(SM-3, Part 1):53–87.
- Self. (2008). "Foundations on expansive soils. Amsterdam – Oxford – New York", *Elsevier Scientific Publishing Company*

- Sowers GF, Kennedy CM. (1967). "High volume change clays of southeastern coastal plain", *Proc. 3rd pan. am. conf. soil mechanics foundation engng. Caracas, Venezuela*; p. 99–120.
- Sun C-G. (2010). "Methodical assessment of geotechnical characteristics related to earthquake motion in a small urban area using a GISbased tool", *Recent advances in urban planning, cultural sustainability and green dev. – international conference on urban sustainability, cultural sustainability, green dev. green structures and clean cars, USCUDAR 2010*. p. 31–7.
- Turkoz M, Tosun H. (2011) "The use of methylene blue test for predicting swell parameters of natural clay soils", *J Sci Res Essays 2011*, 6(8), 1780–92.
- Vu HQ, Fredlund DG. (2004). "The prediction of one, two, and three-dimensional heave in expansive soils", *Can Geotechn J 2004*, 41(4), 713–37.

