DISERTASI

MODEL PRELOADING TANAH LUNAK DENGAN INKLUSI INDUKSI TERMAL TIPE VERTIKAL DAN MIRING

PRELOADING MODEL ON SOFT SOIL WITH INCLUSION THERMAL INDUCTION VERTICAL AND INCLINE TYPES

MARADEN PANJAITAN
P0800316002

PROGRAM STUDI DOKTOR TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2021

LEMBAR PENGESAHAN DISERTASI

MODEL PRELOADING TANAH LUNAK DENGAN INKLUSI INDUKSI TERMAL TIPE VERTIKAL DAN MIRING

Disusun dan diajukan oleh :

MARADEN PANJAITAN
P0800316002

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Doktor Program StudiTeknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 30 Juli 2021 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Promotor

Dr. Ir. Abdul Rachman Djamaluddin,. M.T
NIP. 19591010 198703 1 003

Co. Promotor

Dr. Eng.Ir.Tri Harianto,ST.,MT
NIP.19720309 200003 1 002

Co. Promotor

Ir. H. Achmad Bakri Muhiddin,.M.Sc,.Ph.D
NIP. 19600730 198603 1 003

Ketua Program Studi S3

Prof. Ir. Sakti Adji Adisasmita., M. Eng. Sc., Ph.D
NIP. 19640422 199303 1 001

Dekan Fakultas Teknik

Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha., MT
NIP. 1960123 1198609 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini;

Nama	:	Maraden Panjaitan
NIM	:	P0800316002
Program studi	:	Ilmu Teknik Sipil
Jenjang		S3

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

"Model Preloading Tanah Lunak Dengan Inklusi Induksi Termal Tipe Vertikal Dan Miring"

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilalihan tulisan orang lain dan bahwa disertasi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri. Apabila dikemudian hari terbukti atau dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan Disertasi ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, …Juli 2021

Yang menyatakan

Maraden Panjaitan

PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa dengan selesainya disertasi ini. Tidak lupa penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada dosen pembimbing yang telah memberikan banyak bimbingan serta masukan yang bermanfaat dalam proses penyusunan disertasi ini. Rasa terima kasih juga hendak kami ucapkan kepada rekan- rekan mahasiswa yang telah memberikan kontribusinya baik secara langsung maupun tidak langsung sehingga karya ilmiah ini bisa selesai pada waktu yang telah ditentukan. Banyak kendala yang dihadapi oleh penulis dalam rangka penyusunan disertasi ini, berkat bantuan berbagai pihak maka disertasi ini dapat selesai. Dalam kesempatan ini penulis dengan tulus menyampaikan terima kasih yang tak terhingga kepada Bapak Alm. Prof. Dr. Ir. H. Lawalenna Samang, MS., M.Eng. sebagai mantan Promotor dan Bapak Dr. Ir. Addul Rachman Djamaluddin, MT.,promotor pengganti serta Bapak Ir. H. Achmad Bakri Muhiddin, M.Sc., PhD. sebagai *Co-Promotor* serta Bapak Dr. Eng. Ir. Tri Harianto, ST. MT. sebagai *Co-Promotor* atas bantuan dan bimbingan yang telah diberikan, mulai dari pengembangan minat terhadap permasalahan penelitian ini, pelaksanaan penelitian sampai dengan penulisan disertasi ini.

Terima kasih juga penulis sampaikan kepada rekan-rekan mahasiswa Program Doktoral Teknik Sipil Konsentrasi Geoteknik

angkatan 2016. Rekan-rekan mahasiswa Program Doktoral Teknik Sipil angkatan 2016 yang telah banyak membantu dalam proses penelitian. Ucapan terimakasih secara khusus penulis sampaikan kepada orang tua tercinta, saudara-saudara penulis atas doa dan dorongan moril yang telah diberikan.

Terima kasih juga kami ucapkan kepada teman-teman yang telah berkontribusi dengan memberikan ide-idenya sehingga disertasi ini bisa disusun dengan baik dan rapi. Kami berharap semoga disertasi ini bisa menambah pengetahuan. Namun terlepas dari itu, penulis memahami bahwa disertasi ini masih jauh dari kata sempurna, sehingga penulis sangat mengharapkan kritik serta saran yang bersifat membangun demi terciptanya disertasi selanjutnya yang lebih baik lagi.

Makassar, Juni 2021

Maraden Panjaitan

ABSTRAK

MARADEN PANJAITAN, Model Preloading Tanah Lunak Dengan Inklusi Induksi Termal Tipe Vertikal Dan Miring. Dibimbing oleh Dr.Ir. Abdul Rachman Jamaluddin.MT. (Promotor), Dr.Eng.Ir.Tri Harianto,ST.MT. (Co-Promotor), dan Ir. H. Achmad Bakri Muhiddin, M.Sc., Ph.D (Co-Promotor).

Problem utama pembangunan infrastruktur pada tanah lempung lunak adalah daya dukung yang relatif rendah dan pemampatan tanah yang relatif besar serta berlangsung relatif lama. Untuk menanggulangi problem pembangunan infrastruktur pada tanah lempung lunak harus ditingkatkan atau ground improvement agar menjadi lebih kuat atau gain strength. Tanah yang digunakan berasal dari kabupaten Takalar, Sulawesi Selatan. Hasil uji karakteristik fisik menunjukkan bahwa klasifikasi tanah lempung lunak tergolong CH (Clay with High plasticity) atau lempung dengan plastisitas tinggi. Metode uji eksperimental penelitian dimulai dengan uji karakteristik fisik dan mekanik tanah serta kompisisi mineralogi tanah. Sampel tanah uji diletakkan pada bak uji berukuran 50 x 70 x 150 cm, kemudian dilakukan rekonstitusi dengan cara mengaduk dan pengendapan.Penetapan kadar air awal setiap siklus dengan buka tutup kran. Tiap satu siklus Preloading dan Induksi termal diberikan beban tetap sebesar 0,015 kg/cm². Induksi termal diberikan melalui heater berbentuk batang dengan variasi suhu 100° C, 200° C, 300° C, 400° C yang diInduksi secara vertikal dan miring. Observasi utama Efek Induksi termal pada radius 15 cm dari pusat titik heater baik fisik,mineralogi dan mekanis. Penurunan kadar air secara signifikan terjadi pada radius 0 sampai 15 cm dari heater dan menjadi titik pengamatan utama karena terjadi perubahan fisik, mekanis dan mineral. Semakin tinggi Induksi yang diberikan, maka kadar air akan makin menurun. Semakin jauh dari heater maka pengaruh suhu akan semakin kecil sehingga kadar air tidak berubah secara signifikan. Pada Induksi 400° C Inclined kadar air yang diperoleh pada radius 15 cm adalah 17,36 % dari kadar air semula, yakni 59,07 %. Sedangkan berdasarkan hasil pengujian geser langsung, terjadi peningkatan nilai parameter kuat geser dari kondisi awal tanah dengan 0,00 kN/m², temperatur 400° C model inclined kohesi tanah sebesar 21,75 kN/m². Hasil uji XRD,SEM,EDS sebelum proses heating menunjukkan mineralogi O 65,06 %, Ca 13,30%, Na 3,64%, Mg 2,15 %, Al 6,63%, Si 8,52 %, Sn 0,70 % dan tidak mengalami perubahan signifikan setelah heating suhu 400°
C. Adapun hasil setelah heating adalah O 58,39%, Ca 14,09%, Na 0,72 %, Mg 1,16 %, Al 6,63 %, Si 14,72 %, Sn 2,54 %. Hasil kombinasi Preloading dan termal dalam uji dimensi bak, cenderung menurun atau settlement sampai 5,13 cm.Hasil uji kuat tekan bebas juga menunjukkan peningkatan nilai dari kondisi tanah awal very soft sebesar 0,00 kN/m², pada suhu 400° C inclined nilai kuat tekan menjadi 67,72 kN/m² dan modulus elastisitas tertinggi sebesar 4593 kN/m2. Secara keseluruhan, dengan meningkatnya temperatur, maka semakin meningkatkan nilai mekanis tanah dari very soft menjadi medium.

Kata Kunci: Induksi Termal, Preloading, Tanah Lunak, Perbaikan Tanah, Mineralogi

ABSTRACT

MARADEN PANJAITAN, Preloading Model on Soft Soil With Inclusion Thermal Induction Vertical And Incline Types. Lead Advisor by Dr.Ir. Abdul Rachman Jamaluddin.MT. (Promoter), Dr. Eng. Ir. Tri Harianto, ST. MT. (Ass. Advisor), and Ir. H. Achmad Bakri Muhiddin, M.Sc., Ph.D (Ass. Advisor).

The main problems in infrastructure development on soft clay soils are the relatively low bearing capacity and relatively large soil compression and lasts a relatively long time. To overcome the problem of infrastructure development on soft clay soils must be increased or ground improvement to become stronger or gain strength. The land used is from Takalar district, South Sulawesi. The results of the physical characteristics test indicate that the classification of soft clay is classified as CH (Clay High plasticity) or clay with high plasticity. The experimental test method of the study began with testing the physical and mechanical characteristics of the soil and the mineralogical composition of the soil. The test soil sample was placed in a test bath measuring 50 x 70 x 150 cm, then reconstitution was carried out by stirring and settling. Determination of the initial water content of each cycle by opening the faucet. Each cycle of Preloading and Thermal Induction is given a constant load of 0.015 kg/cm². Thermal induction is given through a rod-shaped heater with temperature variations of 100° C, 200° C, 300° C, 400° C which are induced vertically and tilted. The main observations of the effect of thermal induction at a radius of 15 cm from the center of the heater point are physical, mineralogy and mechanical. A significant decrease in water content occurred at a radius of 0 to 15 cm from the heater and became the main observation point due to physical, mechanical and mineral changes. The higher the induction given, the water content will decrease. The further away from the heater, the smaller the effect of temperature so that the water content does not change significantly. At 400°C Inclined Induction, the moisture content obtained at a radius of 15 cm is 17.36% of the original water content, which is 59.07%. Meanwhile, based on the direct shear test results, there was an increase in the value of the shear strength parameter from the initial soil condition with 0.00 kN/m², a temperature of 400°C inclined soil cohesion model of 21.75 kN/m². XRD, SEM, EDS test results before the heating process showed mineralogy O 65.06%, Ca 13.30%, Na 3.64%, Mg 2.15%, Al 6.63%, Si 8.52%, Sn 0 0.70% and did not experience significant changes after heating at 400° C. The results after heating were O 58.39%, Ca 14.09%, Na 0.72%, Mg 1.16%, Al 6.63%, Si 14.72%, Sn 2.54%. The results of the combination of Preloading and thermal in the tub dimension test, tend to decrease or settlement up to 5.13 cm. The results of the free compressive strength test also show an increase in the value of the initial very soft soil condition of 0.00 kN/m², at a temperature of 400° C inclined the value compressive strength becomes 67.72 kN/m² and the highest modulus of elasticity is 4593 kN/m2. Overall, as the temperature increases, the mechanical value of the soil increases from very soft to medium.

Keywords: Thermal Induction, Preloading, Soft Soil, Soil Improvement, Mineralogy

DAFTAR ISI

Halaman Sampul ..... **i**

Halaman Pengesahan ..... **ii**

Surat pernyataan keaslian disertasi ..... **iii**

Prakata ..... **iv**

Abstrak ..... **v**

Abstract ..... **vi**

Daftar isi ..... **vii**

Daftar Gambar ..... **ix**

Daftar Tabel ..... **xv**

Daftar Simbol ..... **xvi**

Bab I. Pendahuluan 1

A. Latar Belakang 1

B. Rumusan Masalah 3

C. Tujuan Penelitian 3

D. Batasan Penelitian 4

E. Manfaat Penelitian 5

Bab II. Tinjauan Pustaka 6

A. Isu Strategis Perbaikan Tanah Lunak dengan Induksi Termal 6

B. Sejarah Penggunaan Induksi Termal pada Tanah 8

C. Pengaruh Induksi Termal pada Sifat Termo-Mekanik Tanah 10

D. Metode Perbaikan Tanah dengan Preloading 11
E. Pengaruh Heating pada Sifat Geoteknik Tanah 13
F. Koduktivitas Thermal pada Tanah 15
G. Matriks Stui Terdahulu 18
H. Kerangka Pikir Penelitian 24
Bab III. Metodologi Penelitian 27
A. Kerangka Prosedur Penelitian 27
B. Lokasi dan Deskripsi Wilayah Pengambilan Sampel 29
C. Pengujian dan Pengambilan Sampel Tanah 29
D. Pengujian Karakteristik Sifat Fisik Tanah 30
E. Pengujian Elemen 34
F. Pengujian Model 36
G. Radial Zone Observasi Nilai Fisik dan Mekanis 37
Bab IV. Hasil dan Pembahasan 40
A. Karakteristik Dasar dan Mekanik Tanah Lunak 40
B. Pengaruh Induksi Termal Terhadap Kadar Air dan Penurunan 52
C. Pengaruh Induksi Termal Terhadap Perubahan Nilai Mekanis Tanak Lunak pada Temperatur Sebelum Heating atau Initial Condition 76
D. Kumulatif Perubahan Nilai Mekanis Tertinggi dan Terendah Tanah lunak dengan Kombinasi Heating 94
E. Prediksi Penurunan Akhir Metode Asoka Akibat Preloading 104
F. Temuan Empirik Penelitian 107

Bab V. Kesimpulan dan Saran..... 108

A. Kesimpulan..... 108

B. Saran..... 109

DAFTAR PUSTAKA 110

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Penyebaran Tanah Lunak di Indonesia (Widodo, 2019) ……6

Gambar 2 Kerangka Pikir Penelitian 25

Gambar 3 Skema Pengujian Penelitian..... 28

Gambar 4 Lokasi Pengambilan Sampel 29

Gambar 5 Bak Uji Penelitian 34

Gambar 6 Induksi Termal Tipe Vertikal 35

Gambar 7 Daerah Observasi Penelitian pada R1, R2, R3, R4 dan R5 36

Gambar 8 Uji Model Tes Vertikal dan Miring 37

Gambar 9 Potongan Uji Model Tes Vertikal dan Miring..... 38

Gambar 10 Foto Uji Model Tes Tampak Depan dan Samping 38

Gambar 11 Diagram Plastisitas Klasifikasi Tanah Unified Soil Classification System (USCS).....41

Gambar 12 Klasifikasi Tanah Berdasarkan Unified Soil Classification System (USCS) 42

Gambar 13 Hasil X-RD, EDS, dan SEM Tanah Sebelum Heating 46

Gambar 14 Hasil X-RD, EDS dan SEM Tanah Setelah Heating 400 C..... 48

Gambar 15 Hasil SEM Tanah Sebelum Heating 50

Gambar 16 Hasil SEM Tanah Setelah Heating 400 C..... 50

Gambar 17 Hasil X-RD, EDS, Tanah Lunak Kategori Ilite-10A 51

Gambar 18 Konsistensi Termal pada Copper Bar dengan Induksi Termal 100° ……. 53

Gambar 19 Hubungan Antara Waktu dan Penurunan Tanah Lunak TerInduksi

Termal 100° C pada Semua Area Benda Uji 54

Gambar 20 Hubungan Antara Penurunan dan Perubahan Suhu pada Durasi Tertentu Dengan Induksi Termal 100° C pada semua Area Benda Uji..... 55

Gambar 21 Perubahan Kadar Air Akibat Induksi Termal 1000 C pada Radius dan Durasi Tertentu 56

Gambar 22 Hubungan Termal Copper Bar dan Kadar Air Arah Radial dengan Durasi 360 Menit pada Temperatur 100° C.....57

Gambar 23 Konsistensi Termal pada Copper Bar dengan Induksi Termal 200° C.....58

Gambar 24 Hubungan Antara Waktu dan Penurunan Tanah Lunak TerInduksi Termal 200° C pada semua Area Benda Uji 59

Gambar 25 Hubungan Antara Penurunan dan Perubahan Suhu pada Durasi Tertentu dengan Induksi Termal 200° C pada semua Area Benda Uji 60

Gambar 26 Perubahan Kadar Air Akibat Induksi Termal 200° C pada Radius dan Durasi Tertentu 61

Gambar 27 Perubahan Suhu Tanah pada Radius Tertentu dengan Induksi 300° C 62

Gambar 28 Hubungan Antara Waktu dan Penurunan Tanah Lunak TerInduksi Termal 300° C pada semua Area Benda Uji..... 63

Gambar 29 Hubungan Antara Penurunan dan Perubahan Suhu pada Durasi Tertentu dengan Induksi Termal 300° C pada semua Area Benda Uji 64

Gambar 30Perubahan Kadar Air Akibat Induksi Termal 3000C pada Radius dan Durasi Tertentu 65

Gambar 31Konsistensi Termal pada Cooper Bar dengan Induksi 400° C… .67

Gambar 32Hubungan Antara Waktu dan Penurunan Tanah Lunak

TerInduksi Termal 400° C pada semua Area Benda Uji..... 68

Gambar 33Hubungan Antara Penurunan dan Perubahan Suhu pada Durasi

Tertentu dengan Induksi Termal 400° C pada semua Area Benda Uji 69

Gambar 34Perubahan Kadar Air Akibat Induksi Termal 400° C

pada Radius Durasi Tertentu 70

Gambar 35 Kumulatif dan Rasio Konsistensi Termal pada Copper Bar 71

Gambar 36 Hubungan Antara Waktu dan Penurunan Tanah Lunak

dengan Variasi Suhu Induksi pada semua Area Benda Uji..... 73

Gambar 37 Kombinasi Hubungan Konsistensi Termal Copper Bar dengan

Penurunan dan Variasi Induksi Termal 74

Gambar 38 Kumulatif Perubahan Signifikan Kadar Air pada R0 dengan Variasi

Induksi Termal Copper Bar 75

Gambar 39Perilaku Tegangan-Regangan Spesimen Kuat Tekan Bebas

Tanah Lunak Induksi Termal 100° C 78

Gambar 40Penentuan Nilai Modulus Elastisitas Tanah Lunak Induksi Termal

100° C 79

Gambar 41 Hubungan Nilai UCT dan Kadar Air Induksi Termal 100° C ……79

Gambar 42 Perilaku Tegangan-Regangan Spesimen Kuat Tekan Bebas

Tanah Lunak Induksi Termal 2000 C ……80

Gambar 43Nilai Modulus Elastisitas Tanah Lunak Induksi Termal 200° C… 81

Gambar 44Hubungan Nilai UCT dan Kadar Air Induksi Termal 200°C 81

Gambar 45Perilaku Tegangan-Regangan Spesimen Kuat Tekan Bebas Tanah Lunak Induksi Termal 300° C ……82

Gambar 46Penentuan Nilai Modulus Elastisitas Tanah Lunak Induksi Termal 300° C 83

Gambar 47Hubungan Nilai UCT dan Kadar Air Induksi Termal 300° C 84

Gambar 48Perilaku Tegangan-Regangan Spesimen Kuat Tekan Bebas Tanah Lunak Induksi Termal 400° C ……84

Gambar 49Penentuan Nilai Modulus Elastisitas Tanah Lunak Induksi Termal 400° C 86

Gambar 50Hubungan Nilai UCT dan Kadar Air Induksi Termal 400° C 86

Gambar 51 Perilaku Tegangan-Regangan Spesimen Kuat Tekan Bebas Tanah Lunak Variasi Gabungan Temperatur 87

Gambar 52 Hubungan Antara Tegangan Geser dan Tegangan Normal Tanah pada Induksi Inclined 100° C..... 88

Gambar 53 Nilai Hubungan Antara Kohesi dan Kadar air pada Induksi 100° C.....89

Gambar 54 Hubungan Antara Tegangan Geser dan Tegangan Normal Tanah pada Induksi Inclined 200° C.....90

Gambar 55 Nilai Hubungan Antara Kohesi dan Kadar Air pada Induksi 200° C.....90

Gambar 56 Hubungan Antara Tegangan Geser dan Tegangan Normal Tanah pada Induksi Inclined 300° C..... 91

Gambar 57 Nilai Hubungan Antara Kohesi dan Kadar Air pada Induksi 300° C 92
Gambar 58Hubungan Antara Tegangan Geser dan Tegangan Normal Tanah pada Induksi 400° C Inclined 93
Gambar 59 Nilai Hubungan Antara Kohesi dan Kadar Air pada Induksi 400° C 93
Gambar 60Rekapitulasi Perilaku Tegangan-Regangan Spesimen Kuat Tekan Bebas Tanah Lunak Variasi Induksi Termal..... 95
Gambar 61Hubungan Tegangan Geser dan Tegangan Normal pada Uji Geser Langsung Tiap Variasi Suhu dan Tipe Induksi Termal (Inclined)..98
Gambar 62 Grafik Peningkatan Nilai UCS dan Cohesion Tanah Akibat Induksi Termal 99
Gambar 63Grafik Peningkatan Nilai UCS Tanah Akibat Induksi Termal..... 100
Gambar 64Grafik Peningkatan Nilai Kohesi Tanah Akibat Induksi Termal. …….....101
Gambar 65 Grafik Peningkatan Nilai Modulus Tanah Akibat Induksi Termal……..101
Gambar 66 Grafik Peningkatan Nilai Settlement Akibat Peningkatan Induksi Termal ...……..102
Gambar 67Grafik Penurunan Empiris dari Model Laboratorium..... 104
Gambar 68Grafik Asaoka Prediksi Penurunan Akhir Temperatur 100º..... 105
Gambar 69Grafik Asaoka Prediksi Penurunan Akhir Temperatur 200º..... 105
Gambar 70Grafik Asaoka Prediksi Penurunan Akhir Temperatur 300º..... 106
Gambar 71Grafik Asaoka Prediksi Penurunan Akhir Temperatur 400º..... 107

DAFTAR TABEL

Tabel 1. *Thermal Conductitvity of Common Minerals*..... 17

Tabel 2. Jenis Tanah Dan Konduktivitas Termal 18

Tabel 3. Matriks Penelitian Terdahulu 19

Tabel 4. Karakteristik Dasar Dan Mekanis Tanah Lunak Sebelum *Heating* .. 40

Tabel 5. Konsistensi Tanah Berdasarkan Nilai Kuat Tekan Bebas 44

Tabel 6. Nilai-Nilai Kohesi Pada Tanah Lempung Dan Lanau..... 45

Tabel 7. Nilai-Nilai Unsur Mineralogi Sebelum *Heating*.....47

Tabel 8. Nilai-Nilai Unsur Mineralogi Sesudah Heating.....49

Tabel 9. Hasil Pengujian Uji Geser Langsung Terhadap Variasi Suhu..... 94

Tabel 10. Kumulatif Perubahan Karakteristik Dasar Dan Mekanis Dasar Tanah Lunak Setelah *Heating* 400°C 103

Daftar Simbol

μ = *poisson's ratio*
ε = regangan normal
ε_v = regangan volumetrik *(volumetric strain)*
ϕ = Sudut Geser Dalam tanah
τ = tegangan geser
ϕ_d = sudut geser tanah lempung normal ter-drainase
γ = berat volume tanah
γ' = berat volume tanah efektif
γ_d = berat volume kering
σ = tegangan normal
σ' = tegangan normal efektif
γ_w = berat volume air (biasanya diambil γ_w = 1 t/m^3)
C_c = koefisien pemampatan
C_s = koefisien *swelling*
c = nilai kohesi tanah
D_w = kedalaman muka air tanah (m.a.t)
E = modulus elastisitas tanah
e_o = angka pori awal
q_u = *unconfined compressive strength test* (UCST)
S = *settlement*/penurunan
S_c = penurunan akibat konsolidasi tanah
S_{c2} = penurunan akibat konsolidasi sekunder
S_e = penurunan segera (elastis)
Sr = derajat kejenuhan
T_v = faktor waktu yang tergantung pada derajat konsolidasi
t = waktu
t_p = waktu yang diperlukan untuk proses konsolidasi primer.
U = derajat konsolidasi
u = tekanan air pori
w = kadar air

BAB I PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Problem utama pembangunan infrastruktur pada tanah lempung lunak (soft clay) adalah daya dukung tanah dasarnya yang relatif rendah dan pemampatan tanah dasarnya yang relatif besar serta berlangsung relatif lama. Dalam pembangunan infrastruktur, tanah lempung lunak termasuk tanah yang bermasalah (problematic soil) atau tanah yang sulit (difficult soil). Oleh karena itu, untuk menanggulangi problema pembangunan infrastruktur pada tanah lempung lunak, maka harus ditingkatkan daya dukungnya atau ground improvement.

Pada dasarnya, metode perbaikan tanah yang telah digunakan saat ini sudah sangat bervariasi seperti Preloading, prefabricated vertical drain (PVD), electro-osmosis, vacuum consolidation, lightweight fill, stone column, jet grouting, lime columns, fracture grouting, ground freezing, vitrification, electrokinetic treatment, electroheating, dan thermal induction. Namun, metode kombinasi Preloading dan thermal induction (Induksi Termal) menjadi metode perbaikan yang cukup menarik dan masih belum banyak diteliti di Indonesia saat ini. Padahal untuk perbaikan tanah lunak dengan metode tersebut dianggap sangat tepat dengan mempertimbangkan faktor bahwa tanah lunak mempunyai kadar air cukup tinggi, dengan adanya Induksi panas hal tersebut mampu mempercepat laju drainase pada air di tanah lunak. Sehingga kombinasi *Preloading* dan

Induksi Termal mampu mempercepat laju pemampatan tanah tersebut untuk keperluan pembangunan infrasktruktur.

Secara teoritis, Leroueil dan Marques (1996) menyebutkan bahwa Induksi Termal atau pemanasan pada tanah akan memiliki dua efek utama pada konsolidasi: pertama, akan meningkatkan konduktivitas hidrolik tanah lempung dan kenaikan tingkat konsolidasi; kedua, pemanasan sampel tanah selama konsolidasi dalam domain yang dikonsolidasikan secara normal meningkatkan deformasi. Namun metode gabungan tersebut masih harus diteliti lebih lanjut terutama pada daerah radius akibat Induksi termal. karena itu, tujuan dalam riset ini adalah untuk mengetahui pengaruh Induksi Termal dengan variasi inklusi tipe vertikal dan miring dengan pembebanan preloading pada tanah lunak pada radius dimana batang Induksi Termal ditancapkan.

Diharapkan dari hasil studi eksperimental ini akan diperoleh temuan empiris dan gambaran secara menyeluruh terhadap perilaku tanah lunak terutama pada pengaruh terhadap sifat-sifat mekanik tanah lunak, aspek mineralogi, termo-mekanikal tanah dll.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan permasalahan dan potensi yang ada dalam rangkaian penjelasan pada latar belakang, maka rumusan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh induksi termal dan preloading terhadap fisik tanah lunak pada radial zone;
2. Bagaimana pengaruh induksi termal dan preloading terhadap mineralogi atau kimia tanah lunak pada arah radial zone;
3. Bagaimana pengaruh Induksi termal dan preloading terhadap nilai mekanis tanah lunak pada arah radial zone;
4. Bagaimana pengaruh Induksi termal dengan preloading terhadap konsolidasi atau settlement.

C. Tujuan Penelitian

Secara umum penelitian ini bertujuan untuk memperkaya wawasan tentang metode perbaikan daya dukung tanah lunak, sehingga diharapkan mampu menjadi referensi dan solusi bagi masyarakat luas yang khususnya bergelut di bidang pembangunan infrastruktur. Secara khusus penelitian ini ditujukan untuk mengetahui bagaimana pengaruh preloading dan induksi termal pada perbaikan daya dukung tanah lunak. Secara rinci penelitian ini mempunyai tujuan sebagai berikut:

1. Mendapatkan nilai fisis dari pengaruh induksi termal dan preloading tanah lunak pada radial zone;

2. Mendapatkan nilai pengaruh Induksi termal dan preloading terhadap mineralogi tanah lunak pada arah radial zone;
3. Mendapatkan nilai pengaruh Induksi termal dan preloading terhadap nilai kekuatan mekanis tanah lunak pada arah radial zone;
4. Mendapatkan nilai pengaruh induksi termal dan preloading terhadap konsolidasi atau settlement.

D. Batasan Penelitian

Agar penelitian ini dapat dilaksanakan lebih fokus, sempurna dan mendalam maka penulis memandang permasalahan penelitian yang diangkat variabelnya perlu dibatasi. Oleh sebab itu penulis membatasi riset ini hanya berkaitan dengan:

1. Pemodelan pengujian dilakukan dengan skala uji laboratorium yakni uji eksperimental pada bak uji.
2. Material hanya pada tanah sangat lunak dan diberi beban preloading dengan induksi termal dengan variasi suhu 100° C, 200° C, 300° C dan 400° C;
3. Tipe induksi termal batang tembaga dengan kombinasi vertical dan miring.

E. Manfaat Penelitian

Pada riset ini, secara general penulis berharap aspek-aspek yang diteliti mampu memberi manfaat yang seluas-luasnya bagi ilmu

pendidikan, selain itu manfaat spesifik yang diharapkan adalah sebagai berikut:

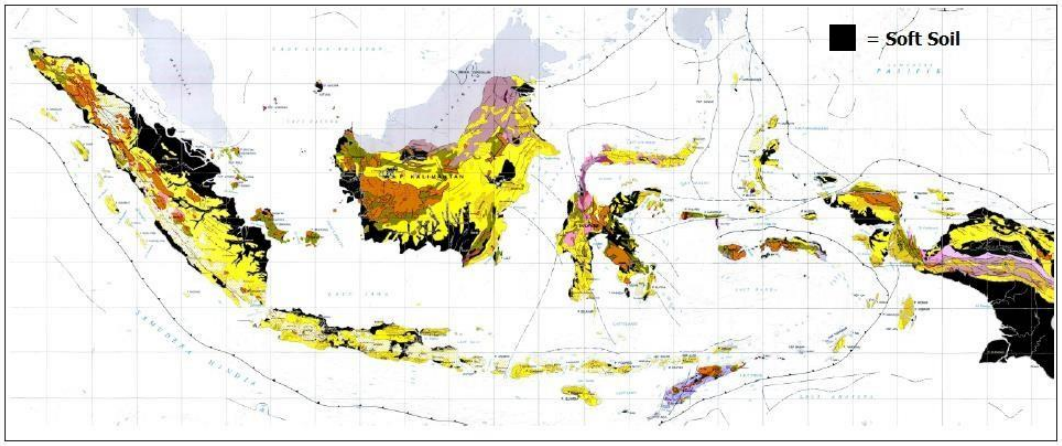
1. Menjadi referensi dalam isu global tentang problem tanah lunak pada daerah tropis seperti Indonesia, sehingga kendala dalam penanganan dan pengembangan infrastruktur dapat diatasi secara komprehensif;
2. Menjadi referensi ilmiah dalam dunia akademisi dan dunia praktisi dalam pekerjaan pekerjaan tanah lunak;
3. Mampu menjadi rujukan dalam penanganan tanah lunak yang murah dan efisien;
4. Memprediksi perilaku tanah lunak yang di-treatment dengan Preloading dan Induksi Termal.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Isu Strategis Perbaikan Tanah Lunak dengan Induksi Termal

Kebutuhan lahan untuk pembangunan infrastruktur terus bertambah, pembangunan baru terpaksa harus dilakukan di atas tanah yang secara daya dukungnya sangat rendah, yaitu antara lain di atas tanah lunak. Indonesia merupakan daerah yang memiliki tanah lunak yang cukup besar. Tanah jenis ini umumnya dapat ditemui di wilayah Sumatera, Kalimantan dan Irian Jaya. Ketebalan tanah lunak pada ketiga wilayah di atas dapat mencapai lebih dari 30 m. Selain ketiga wilayah yang telah disebutkan di atas, tanah lunak juga tersebar di kawasan Indonesia lainnya walaupun dalam jumlah yang relatif lebih sedikit. Adapun peta penyebaran tanah lunak di Indonesia dapat dilihat pada **Gambar 1** di bawah ini.



Gambar 1 Penyebaran Tanah Lunak di Indonesia (Widodo, 2019)

Tanah merupakan suatu materi multifase yang terdiri dari partikel tanah padat, air dan udara. Pemberian beban pada tanah akan menyebabkan meningkatnya tegangan yang bekerja pada tanah tersebut. Tegangan tambahan yang bekerja pada tanah pada awalnya akan dipikul oleh air pori karena bersifat *incompressible* air. Hal ini akan menyebabkan timbulnya tekanan ekses air pori. Tekanan ekses air pori ini akan ter-disipasi dengan mengalir keluarnya air pori tanah melalui pori-pori tanah, sementara tegangan tambahan yang awalnya dipikul air pori secara gradual ditransfer ke partikel tanah padat.

Jenis tanah ini merupakan jenis tanah yang memiliki sifat kurang menguntungkan secara teknis untuk mendukung suatu pekerjaan konstruksi karena plastisitasnya dan kembang susut yang tinggi serta daya dukung yang rendah. Tanah jenis ini juga memiliki kandungan air yang tinggi dan sulit ter-drainasi karena sifat *permeabilitas* tanahnya yang relatif rendah serta *kompresibilitas* yang besar yang menyebabkan tanah ini mengalami penurunan yang besar dan dalam waktu yang sangat lama. Hal tersebut sering menjadi kendala dalam pelaksanaan suatu pekerjaan konstruksi. Sehingga banyak kasus kegagalan bangunan atau kegagalan konstruksi yang terjadi saat pembangunan konstruksi di atas tanah lunak. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu perbaikan pada tanah lunak harus menggunakan metode yang tepat dan juga cepat untuk mengurangi biaya pengerjaan.

Pada dasarnya, metode perbaikan tanah sudah sangat bervariasi seperti *Preloading*, *Prefabricated Vertical Drain* (PVD), Electro-Osmosis, *Vacuum Consolidation*, *Lightweight Fill, Stone Column, Jet Grouting, Lime Columns, Fracture Grouting, Ground Freezing, Vitrification, Electrokinetic Treatment, Electroheating,* dan *Thermal Induction*. Namun, metode kombinasi *Preloading* dan *Thermal Induction* (Induksi Termal) mejadi metode perbaikan yang cukup menarik dan masih belum banyak diteliti di Indonesia saat ini. Padahal untuk perbaikan tanah lunak dengan metode tersebut dianggap sangat tepat dengan mempertimbangkan faktor bahwa tanah lunak mempunyai kadar air cukup tinggi. Sehingga kombinasi *Preloading* dan Induksi Termal mampu mempercepat laju pemampatan tanah tersebut untuk keperluan pembangunan infrasktruktur.

B. Sejarah Penggunaan Induksi Termal pada Tanah

Ketertarikan penelitian pada topik mengenai Induksi Termal ataupun mengenai efek temperatur pada tanah bermula sekitar tahun 1960-an, ketika konferensi pertama tentang pengaruh suhu dan panas pada perilaku rekayasa tanah diadakan di Washington D.C., AS pada tahun 1969. pada saat itu kisaran suhu yang digunakan dalam karya penelitian awal terbatas pada kisaran dari 10° C hingga 50° C. Keterbatasan ini dipahami, karena perhatian utama pada saat itu adalah untuk mempelajari pengaruh perubahan suhu pada parameter volumetrik dan kekuatan spesimen tanah selama pengambilan sampel dan transportasi ke

laboratorium. Namun, ketika studi penelitian diarahkan untuk merancang pembuangan radioaktif yang aman dalam formasi tanah lempung, pemahaman tentang perilaku termomekanis pada suhu hingga 100° C menjadi penting.

Pemahaman mengenai efek suhu pada tanah menjadi wajib pada berbagai aplikasi rekayasa teknik saat ini. Dalam perkembangannya, berbagai studi mengenai efek suhu/temperatur atau Induksi Termal pada tanah mulai berkembang ke berbagai sector. Seiring banyaknya aplikasi teknologi saat itu yang berkaitan dengan tanah. Dimulai dengan Pembangunan Pipa Minyak dan Gas (Slegel dan Davis, 1977), Pembangunan Fasilitas Pembuangan Limbah Nuklir/Radioaktif (Davies dan Banerjee, 1980), Pemasangan Kabel Listrik Tanam (Abdel-Hadi dan Mitchell 1981), dan Penyimpanan Energi Panas dalam Tanah (Moritz, 1995). Aplikasi teknologi pada tanah ini telah menyebabkan peningkatan studi mengenai efek suhu pada sifat tanah dan telah membuat perilaku termo-mekanis tanah sebagai salah satu masalah utama dalam mekanika tanah modern saat ini.

Khususnya pada pembangunan fasilitas pembuangan limbah nuklir/ radioaktif dalam tiga dekade terakhir, yang mana pembuangannya dibangun pada formasi tanah lempung, meningkatkan minat dalam memahami perilaku termo-mekanis pada suhu hingga 100° C.

Sebuah eksperimental yang luas juga telah dilakukan pada beberapa formasi geologi tanah lempung di Eropa untuk menyelidiki

respon tanah untuk pembuangan limbah radioaktif. Studi-studi ini secara meyakinkan menunjukkan bahwa peningkatan suhu pada tanah butiran halus hingga kurang dari titik didih air (100°C), akan mempengaruhi perilaku rekayasa tanah (*permeabilitas*, *kompresibilitas*, dan kekuatan geser).

C. Pengaruh Induksi Termal pada Sifat Termo-Mekanik Tanah

Penelitian sebelumnya dalam berbagai literatur menunjukkan bahwa tanah lunak yang pada umumnya berbutir halus dan jenuh jika diInduksi pada suhu kurang dari titik didih air, akan mengalami perubahan volumetrik dan kekuatan geser. Namun tidak adanya bukti signifikan mengenai perubahan mineralogi pada saat memanaskan tanah berbutir halus hingga 90° C (Graham et al. 2001).

Sridhan dan Venkatappa Rao (1973), Morgenstern dan Balasubramanian (1980), dan Mitchell (1993) menemukan bahwa perubahan dalam pori-pori tanah, konsentrasi, permitivitas dan suhu memiliki pengaruh yang signifikan pada kekuatan fisika-kimia antara partikel-partikel tanah lunak yang mengontrol perilaku mekanik dari tanah jenuh yang terdegradasi. Oleh karena itu, terbukti bahwa perubahan suhu, fluida dalam pori dapat mengubah perilaku kekuatan geser dan mengInduksi regangan volumetrik (Abuel-Naga, et al. 2005).

Selain itu, Laloui (2001) telah mempresentasikan sebuah tinjauan dari beberapa penelitian tentang perilaku termo-mekanis dari tanah lunak

atau tanah jenuh berbutir halus seperti dirangkum di bawah ini:

1. Perubahan volumetrik pada tanah yang diInduksi secara thermal tergantung pada kondisi *stress history* tanah tersebut (Baldi et al. 1988; Towhata et al. 1993). Terjadi kontraksi *irreversibel* untuk lempung yang *normally consolidated* sementara itu terjadi ekspansi *reversibel* untuk lempung yang *overconsolidation*.
2. Tanah lempung yang terkonsolidasi normal menunjukkan tekanan prakonsolidasi yang lebih tinggi setelah pemuaian kembali setelah mengalami siklus pendinginan-pemanasan (Towhata, dkk. 1993; Robinet dkk. 1996; Burghignoli dkk. 2000).
3. Jenis tanah lempung yang berbeda menunjukkan pengurangan domain elastis pada suhu tinggi (Cekerevac, dkk. 2002).
4. Permeabilitas hidrolik lempung meningkat dengan suhu (Towhata, dkk. 1993; Delage et al. 2000).
5. Pengaruh suhu pada kekuatan geser tergantung pada kondisi drainase pada pemanasan dan *stress history* (Graham, dkk. 2001).

D. Metode Perbaikan Tanah dengan *Preloading*

Metode *Preloading* adalah pembebanan awal atau perbaikan tanah dengan berat timbunan dan *eqiuvalens* sekitar berat struktur yang dipakai kemudian (Chu.et.al 2004). Kondisi tanah yang beragam dan tidak selalu sama pada masing-masing areal konstruksi, mengharuskan ketelitian dalam perencanaan dan pelaksanaan konstruksi itu sendiri. Untuk

mengatasi kondisi tanah yang tidak sesuai dengan yang diharapkan, maka ada beberapa teknik yang digunakan dalam rangka meningkatkan mutu tanah tertentu. Diantaranya adalah teknik *Preloading vertical drain*. *Preloading* dan *Vertical Drain* pada dasarnya bertujuan untuk meningkatkan kekuatan geser pada tanah, mengurangi kompresibilitas tanah dan mencegah penurunan (*settlement*) yang besar, serta kemungkinan kerusakan pada struktur bangunan. *Preloading* dan *Vertical Drain* umumnya digunakan pada tanah dengan daya dukung yang rendah, seperti pada tanah lempung lunak dan tanah organik. Kedua jenis tanah tersebut biasanya memiliki ciri seperti berikut: kadar air yang ekstrim, kompresibilitas yang besar dan koefisien permeabilitas yang kecil.

Pada prinsipnya, teknik *Preloading* menggunakan *Vertical Drains* merupakan metode perkuatan tanah dengan cara mengurangi kadar air dalam tanah (*dewatering*). Biasanya waktu konsolidasi yang dibutuhkan untuk jenis tanah seperti ini memakan waktu yang lama meski dengan menggunakan beban tambahan yang besar, sehingga teknik *Preloading* mungkin kurang cocok untuk jadwal kontruksi yang durasi waktunya pendek.

Saat ini, jenis *Vertikal Drain* yang sering digunakan adalah *Prefabricated Vertical Drain* (PVD). PVD adalah teknik perbaikan tanah yang sangat efektif dan ekonomis untuk mempercepat konsolidasi primer. Karena laju air keluar dalam tanah menjadi lebih cepat. *Prefabricated Vertical Drain (PVD)* dapat mengurangi waktu proses konsolidasi tanah

secara signifikan dari beberapa tahun ke hitungan bulan saja. Sebuah PVD yang dipasang di lapisan tanah yang tebal dan lunak berfungsi sebagai drainase saluran, yang berfungsi untuk memfasilitasi aliran air, sehingga mempercepat konsolidasi tanah. Namun demikian, terdapat beberapa kelemahan pada kinerja *prefabricated vertical drain*, diantaranya: tentang koefisien konsolidasi horizontal (Ch), *permeabilitas smear zone* (kh/ks) dan luas *smear zone* (ds/dm) yang diakibatkan oleh instalasi Mandrel yang dapat mempengaruhi penurunan konsolidasi pada tanah lunak dan proses aliran air yang melambat apabila rusak.

Oleh karena itu Bergado dkk (2006) memasang *path* pada PVD untuk menyalurkan "*heating*" agar efek dari daerah *smear zone* menjadi berkurang, sehingga lajur air bisa lebih cepat. Dengan fenomena tersebut, diketahui bahwa efek dari *heating* mampu mempercepat laju konsolidasi. Dengan demikian, *Preloading* dan Induksi Termal dianggap sebagai solusi alternatif selain pemasangan PVD.

E. Pengaruh *Heating* pada Sifat Geoteknik Tanah

Penelitian mengenai pengaruh *heating* pada sifat geoteknik tanah pernah dilakukan oleh Gadzama, dkk (2017). pada penelitian tersebut diselidiki pengaruh suhu pada sifat-sifat tanah, karakteristik pemadatan dan nilai CBR dari tanah yang diambil dari Borrow Pits di Numan Local Government Area of Adamawa State dan Biu Local Government Area of Borno State, Nigeria. Kedua jenis tanah tersebut yakni the *Numan black*

cotton soil and Biu black cotton soil.

Pada penelitian tersebut sampel tanah diberikan variasi suhu mulai dari 25, 50, 75, 100 dan 150 derajat Celsius masing-masing selama 240 menit. Hasil pengujian menunjukkan penurunan batas cair dan batas plastis dan peningkatan kepadatan kering maksimum *(Maximum Dry Density),* dengan penurunan yang sesuai dalam rasio CBR. Tidak ada kecenderungan yang ditetapkan untuk indeks plastisitas (PI) dan kadar air optimum *(Optimum Moisture Content).*

Hasil analisis menunjukkan kenaikan suhu secara positif meningkatkan sifat rekayasa dari sampel tanah yang dipilih. Suhu optimal 100° C direkomendasikan untuk meningkatkan sifat geoteknik tanah yang diolah.

Berdasarkan analisis regresi dan korelasi, direkomendasikan bahwa ukuran kontrol kualitas yang baik dari variabel-variabel ini (MDD, OMC, PI; dan TEMP) sangat penting selama pemadatan lapangan, spesifikasi dan kontrol untuk mencapai perkerasan jalan yang kuat dan tahan lama atau untuk aplikasi perbaikan tanah.

Studi lebih lanjut harus dilakukan untuk suhu yang lebih tinggi di atas 150° C dan suhu yang lebih rendah di bawah 25° C untuk memeriksa perubahan dalam sifat rekayasa tanah. Analisis mikro juga harus dilakukan untuk mempelajari perubahan morfologi tanah dengan suhu yang bervariasi.

Kekuatan tanah liat meningkat secara bertahap dengan

peningkatan suhu laju peningkatan kekuatannya signifikan pada radius terdekat. Peningkatan kekuatan seiring dengan peningkatan suhu lempung (Joshi, Fellow, ASCE, Gopal Achari, D. Horsfield, and T.S. Nagaraj).

F. Konduktivitas *Thermal* pada Tanah

Pemahaman yang jelas mengenai perpindahan panas melalui geo-material dan tanah sangat menarik di berbagai bidang ilmu rekayasa teknik. Seperti: merancang kabel berarus listrik tinggi yang terkubur dalam tanah, pembuangan limbah nuklir dan teknik peningkatan tanah thermal, dll. Energi Thermal dapat ditransfer pada geo-material atau tanah dengan konduksi, radiasi dan konveksi.

Konduksi panas terjadi melalui transmisi energi panas dari satu partikel ke partikel lain. Konveksi adalah pengangkutan panas oleh beberapa massa pembawa panas. Radiasi adalah transfer energi panas oleh gelombang elektromagnetik.

Baik konveksi maupun konduksi panas membutuhkan molekul untuk mentransfer panas. Panas radiasi tidak memerlukan molekul untuk memindahkan panas dari satu permukaan ke permukaan lainnya.

Untuk lempung jenuh, perpindahan panas dengan konduksi adalah sangat penting, sementara perpindahan panas dengan konveksi adalah yang terpenting karena permeabilitas hidroliknya yang mengontrol pergerakan air sangat kecil. Selain itu, transfer panas radiasi hanya

signifikan di tanah kering dengan pori-pori besar pada suhu tinggi (Abuel-Naga & Bergado, 2005).

Beberapa peneliti telah memodelkan perpindahan panas melalui geo-material dengan bantuan model analitik atau numerik. Oleh karena itu, perhatian besar telah diarahkan untuk memperkirakan sifat termo-fisik tanah yang mengontrol besarnya dan laju aliran panas. Sifat termo-fisik tanah adalah *Difusivitas Thermal (D)* sama dengan *Konduktivitas Thermal (λ),* dibagi dengan Kapasitas Panas (C). Hubungan antara ketiga sifat tersebut adalah sebagai berikut:

$$D=\lambda/C \quad \text{.....} (1)$$

Banyak peneliti menggunakan fakta bahwa kapasitas panas tanah adalah jumlah dari kapasitas panas konstituen tanah untuk memperkirakan nilai C (de Vries dan Afgan 1975). Dengan estimasi C dan λ, properti Thermal D yang tersisa dapat ditentukan menggunakan Persamaan (1). Uji lapangan atau laboratorium dapat digunakan untuk mengukur konduktivitas thermal tanah. Namun uji lapangan mahal dan memakan waktu yang agak lama dan tidak leluasa untuk mengontrol kondisi batas-batasnya. Di sisi lain, tes laboratorium relatif murah dan mudah dilakukan. Namun, perhatian yang besar harus diberikan pada gangguan terhadap sampel tanah dan memperhatikan ataupun mengatur dengan kondisi keterbatasan peralatan uji.

Beberapa peneliti (Sepaskhah dan Boersma 1979; Sundberg 1988; Morinl dan Silva 1984; Brandon dan Mitchell 1989; Singh dan Rao 1998;

Abu-Hamdeh dan Reeder 2000; Ochsner et al. 2001) telah mempelajari hubungan antara konduktivitas thermal dan sifat-sifat tanah. Seperti: komposisi mineral, berat isi kering (porositas), fluida-pori, derajat kejenuhan, kadar air dan suhu.

Efek geometris partikel tanah terhadap nilai konduktivitas thermal lempung jenuh telah dibahas oleh Penner (1963), Mitchell (1993) dan Midttomme et al. (1998). **Tabel 1** mencantumkan konduktivitas thermal mineral pada umumnya.

Tabel 1. Thermal Conductivity of Common Minerals (Abuel, 2013)

Mineral	Thermal Conductivity, W/m.° C
Quartz	7·8
Calcite	3·4
Dolomite	5·1
Anhydrite	6·4
Pyrite	19·2
Siderite	3·0
Orthoclase	2·3
Albite	2·3
Halite	6·5
Chlorite	5·1
Kaolinite	2·8
Smectite	1·8
Illite	1·8
Air	0·03
Water	0·60

Parameter *Thermal* tanah seperti Konduktivitas *Thermal (Thermal Conductivity)* pada tanah merupakan salah satu parameter *Thermal* yang menunjukkan banyaknya energi yang dapat disalurkan di dalam tanah.

Tabel 2 Jenis Tanah dan Kondktivitas Termal

No	Jenis	Konduktivitas Thermal [W/m/K]	Kapasitas Thermal Khusus [J/Kg/K]
1	Lempung	0,25-4,20	800-2.646
2	Pasir	0,15-5,03	800-1.747
3	Kerikil	4,44;	1,175

(Sumber: Hamdhan dan Clarke, 2010)

Koefisien Ekspansi Thermal (α) merupakan salah satu parameter Thermal yang menunjukkan besar dari pemuaian yang disebabkan oleh adanya peningkatan suhu. Nilai Koefisien Ekspansi Thermal pada mineral tanah lempung arah Perpendicular = $18*10^{-6}$ K^{-1} dan arah parallel = $5,2*10^{-6}$ K^{-1} (Agar et al 1986).

G. Matriks Studi Terdahulu

Penelitian ini memakai dasar beberapa penelitian yang pernah dilakukan. Dari berbagai penelitian yang menyangkut perbaikan tanah lunak dengan metode *Preloading*, pemasangan PVD, hingga kombinasi PVD dan Induksi Termal. Di bawah ini pada **Tabel 3**, dijelaskan mengenai matriks penelitian terdahulu hingga saat ini mengenai topik perbaikan tanah lunak dengan topik utama Induksi Termal.

Matriks disusun berdasarkan *maping* riset yang menggambarkan hubungan satu topik dengan topik lain yang mempunyai kaitan, sehingga mengerucut pada topik yang belum pernah diteliti agar mendapatkan suatu *novelty* atau kebaharuan yang menjadi syarat dari penelitian doktor. Cara yang dilakukan adalah dengan membangun suatu alur yang menggambarkan Pohon Pengetahuan, sehingga terstuktur bagian mana yang belum pernah diteliti sebelumnya dan mempermudah peneliti–peneliti berikutnya.

Riset atau *Research* adalah suatu penyelidikan, pemeriksaan, pencermatan, percobaan yang membutuhkan ketelitian dengan menggunakan metode atau kaidah tertentu untuk memperoleh suatu hasil dengan tujuan tertentu. Matriks Riset meliputi review pengumpulan, pengolahan, analisis, penyajian data yang dilakukan peneliti sebelumnya dengan koridor keilmiahan yang harus sesuai dengan bidang akademik keilmuan.

Tabel 3. Matriks Penelitian Terdahulu

No	Penelitian	Judul Penelitian	Temuan/Kajian	Publikasi
1.	Moritz, L. (1995).	Geotechnical Properties of Clay at Elevated Temperaturs.	Penelitian ini menjelaskan pengaruh heating pada properties tanah lempung pada heat storage di Swedia. Dalam penelitiannya yang menggunakan uji laboratorium seperti modifikasi triaxial,	Swedish Geotechnic al Institute (SGI) S-581 93 Linkoping, Sweden. ISSN 0348-0755 ISRN

			oedometer dan lain-lain, memperlihatkan bahwa pengaruh heating pada pure water dan clay particle, mengembang setelah kenaikan suhu, yang mana memberikan kenaikan pada pure water pressure dan swelling index-nya.	SGI-R-- 95/47--SE
2	Abuel-Naga, HM., Bergado, DT., Soralump, S., & Rujivipat, P. (2005)	Thermal Consolidation of Soft Bangkok Clay	Perubahan volume yang diInduksi Termal, bergantung pada stress history tanah tersebut. Permeabilitas hidrolik tanah jenuh meningkat saat suhu uji meningkat. Peningkatan ini terutama karena penurunan dalam fluida tanah dan viskositas.	Lowland Technology Internationa l Journal, 7(1), 13-22.
3.	Bergado, D. T., Abuel-Naga, H. M., & Chaiprakaike o w, S. (2006).	Effect of Temperatur on the Consolidation of Soft Bangkok Clay With PVD.	Hasil pengujian menunjukkan bahwa kombinasi dari beban thermal dan mekanik memberikan hasil yang menjanjikan dan merupakan teknik yang layak karena mempercepat laju konsolidasi dan meningkatkan tingkat penyelesaian karena berkurangnya efek smear zone di sekitar titik PVD.	In the Sixteenth Internationa l Offshore and Polar Engineering Conference. Internationa l Society of Offshore and Polar Engineers.
4.	Abuel-Naga, HM., Bergado, DT., & Chaiprakaike o w, S. (2006).	Innovative Thermal Technique for Enhancing the Performance of Prefabricated Vertical Drain During the Preloading Process.	Menaikkan suhu tanah selama periode Preloading dapat meningkatkan kinerja PVD, khususnya, dengan mengurangi efek retardasi drainase akibat smear zone di sekitar PVD. Perilaku ini dapat dikaitkan dengan peningkatan konduktivitas hidrolik tanah saat suhu tanah meningkat.	Geotextiles and Geomembr anes, 24(6), 359-370.
5.	Pothiraksanon , C., Bergado,	Novel Thermo-Pvd Consolidation	Hasil dari termo-PVD, dimana drainase	Lowland Technology

	D.T., Abuel-Naga, HM., Hayashi, S., & Du, YJ. (2007).	Technique For Soft Soils.	dikombinasikan dengan sumber panas, berkinerja lebih baik daripada kasus dimana PVD dan sumber panas dipisahkan. Menaikkan suhu tanah selama periode Preloading dapat meningkatkan kinerja PVD. Khususnya dengan mengurangi efek perlambatan drainase karena smear zone di sekitar PVD.	Internationa l: the Officisl Journal of the Internationa l Association of Lowland Technology (IALT)/Instit ute of Lowland Technology, Saga University, 9(2), 38-48.
6.	Bergado, DT., Abuel-Naga, HM., & Bouazza, A. (2006).	Temperatur Effects on Engineering Behaviour of Soft Bangkok Clay.	1.) Perubahan volume lempung Bangkok yang diInduksi secara thermal tergantung pada riwayat tegangan dan tidak tergantung pada tingkat tegangan. 2) Stiffness dan undrained shear strength tergantung suhu. Keduanya meningkat karena kenaikan suhu tanah. 3) Konduktivitas hidrolik lempung Bangkok lunak meningkat karena suhu tanah meningkat, penurunan viskositas air.	Soft Soil Engineering : Proceeding s of the Fourth Internationa l Conference on Soft Soil Engineering , Vancouver, Canada, 4-6 October 2006 (P. 373). CRC Press.
7.	Abuel-Naga, HM., Bergado, DT., & Bouazza, A. (2007).	Thermally Induced Volume Change and Excess Pore Water Pressure of Soft Bangkok Clay.	Perilaku termo-mekanis mendasar tanah liat Bangkok lunak, mengalami suhu hingga 90° C, yakni perubahan volume yang disebabkan suhu tergantung pada stress history dan tidak tergantung pada diterapkannya besaran tekanan. Namun jumlah perubahan volume yang disebabkan suhu dikendalikan oleh indeks plastisitas tanah.	Engineering Geology, 89(1-2), 144-154.

8.	Abuel-Naga, HM., Bergado, DT., & Lim, B. F. (2007).	Effect of Temperatur on Shear Strength and Yielding Behavior of Soft Bangkok Clay.	Stiffness dan undrained shear strength bergantung pada suhu, karena keduanya meningkat ketika suhu tanah meningkat atau setelah mengalami riwayat suhu. Efek Thermal pada kekuatan geser, stifness dan yielding behaviour dapat dikaitkan dengan perubahan volume yang diInduksi secara Thermal dan Thermally induced fabric changes.	Soils and Foundation s, 47(3), 423-436.
9.	Abuel-Naga, HM., Bergado, DT., Bouazza, A., & Pender, MJ. (2009)..	Thermal Conductivity of Soft Bangkok Clay from Laboratory and Field Measurements	Konduktivitas Thermal dari tanah liat lunak jenuh (Bangkok clay) yang dilakukan sehubungan dengan penyelidikan, menggunakan Induksi Termal untuk meningkatkan proses konsolidasi tanah lunak. Konduktivitas Thermal spesimen tanah, diukur di laboratorium menggunakan steady state method (divided bar test) dan metode keadaan transien (needle probe method). Secara umum, hasil uji laboratorium menunjukkan bahwa Konduktivitas Thermal meningkat dengan meningkatnya kepadatan tanah.	Engineering Geology, 105(3-4), 211-219.
10.	Hamdhan, IN., & Clarke, BG. (2010)	Determination of Thermal Conductivity of Coarse and Fine Sand Soils.	Konduktivitas Thermal dari pasir pada tanah berbutir halus pada steady state. Penentuan konduktivitas thermal dari pasir (pasir kasar kering, pasir kasar jenuh, pasir halus kering dan pasir halus jenuh).	In Proceeding s of World Geothermal Congress (Pp. 1-7). Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.
11.	Abuel-Naga, H. M., Lorezo, G. A., & Bergado, D.	Current State of Knowledge on Thermal Consolidation	Efek temperatur pada interaksi antara pile-tanah. Selain itu membahas perilaku termo-hidro-	Geotech. Eng. J. SEAGS & AGSSEA,

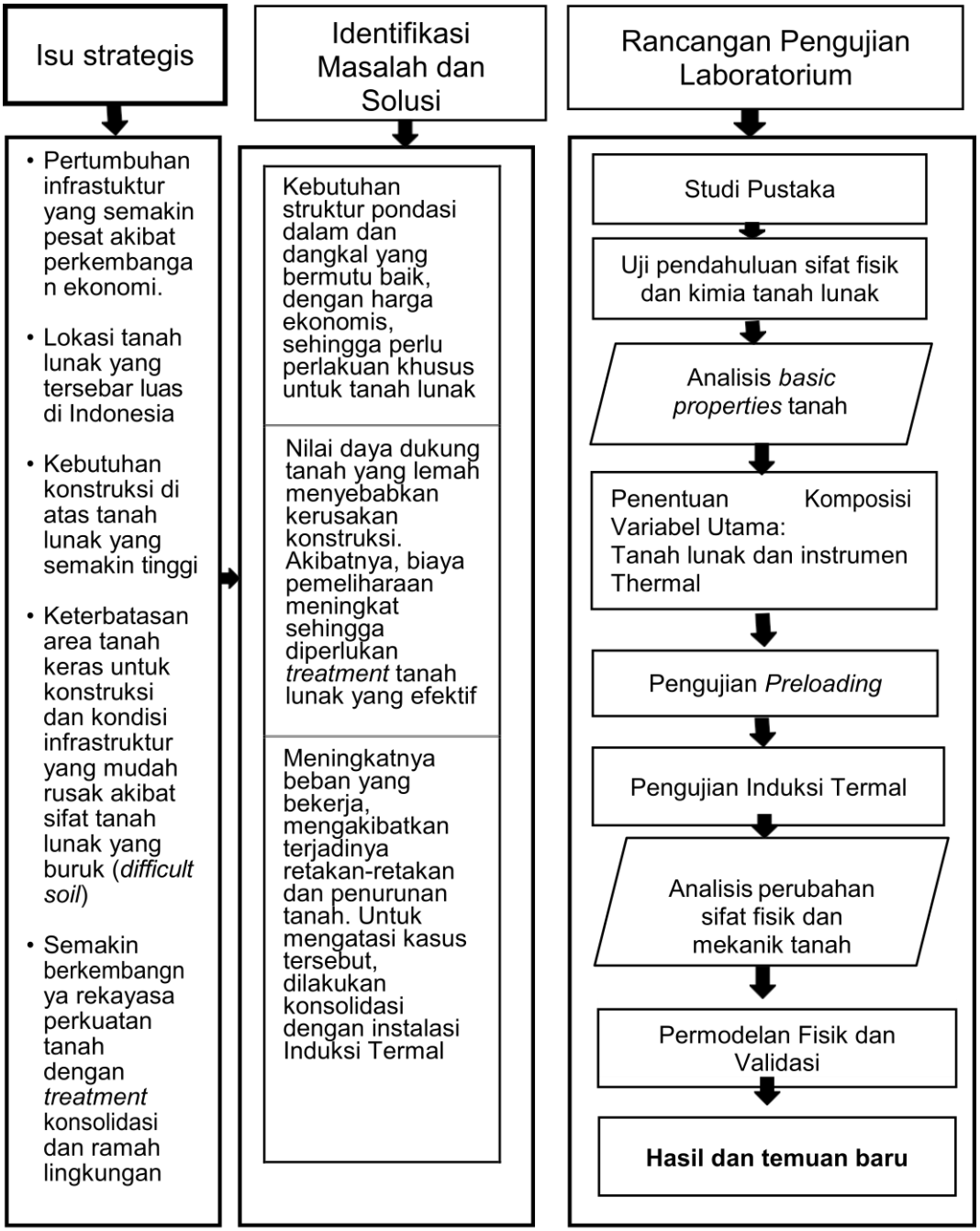
	T. (2013).	Using Prefabricated Vertical Drains.	mekanis dari lempung jenuh dan konduktivitas Thermal tanah pada interaksi pile- tanah disarankan untuk diteliti lebih lanjut.	44(4), 132-141.
13	L. Sun, J. Lu, W. Guo, S. Yan, and T. Jia,2016	Models to Predict Compressibility and Permeability of Reconstituted Clays	Uji permeabilitas dilakukan untuk menyelidiki kompresibilitas dan permeabilitas tanah liat laut yang telah direkonstitusi.	Arabian Journal of Geoscience s Volume 1 3
14	Ming Fana, James E. McClurea, Ryan T. Armstrong, Mehdi Shabaninejad c,2020	Influence of Clay Wettability Alteration on Relative Permeability	Pengaruh Perubahan Basah Tanah Liat terhadap Permeabilitas Relatif	American Geophysica l Union
15	Joshi, Fellow, Gopal Achari, D. Horsfield, and T. S. Nagaraj	Effect of Heat Treatment on Strength of Clays	Perlakuan Thermal mengubah sifat fisik dan mekanik tanah liat.	Journal of Geoteehnic al Engineering
16	Abu Siddique A.M.M. Safiullah	Permeability Characteristics of Reconstituted Dhaka Clay	Permeabilitas tanah yang direkonstitusi menurun.	Conference Bangladesh university of Enginee
17	Chao Lyu, Qiang Sun, Weiqian g Zhang & Jishi Geng	A Predictive Model for the Thermal Conductivity of Silty Clay Soil Based on Soil Porosity and Saturation	Menurunnya kadar air karena peningkatan thermal.	Arabian Journal of Geoscience s Volume 13

18	F.Anjum. M.Y.Naz. A.Ghaffar. S.Shukrullah. N.M.Abdel-Salam. K.A.Ibrahim.	Study of Thermal and Mechanical Traits of Organic Waste Incorporated Fired Clay Porous Material	Meningkatnya kuat tekan akibat Induksi Termal.	4th internatio nal Conference on Materials Science & Nanotechno logy(2020)
19	Haijun Lu, Jianjun Liu,Yuan Li, and Yiqie Dong	Heat Transport and Water Permeability During Cracking of the Landfill Compacted Clay Cover	Menunjukkan bahwa tanah liat yang dipadatkan benar- benar kehilangan kemampuan permeabilitas	Hindawi Publishing Corporation Journal of Chemistry Volume 2015
20	Ward J, Oates	The Effect of Thermal Treatment on the Engineering Properties of Clays	Hubungan propertis lempung dengan thermal pada kadar air tertentu.	Highway Materials Research Laboratory Lexington, Kentucky
21	Yan-Jun Shen 1, (2018).	Influence of Temperatur on the Microstructure Deterioration of Sandstone	Perubahan perubahan Pengaruh temperature pada batuan berpasir terutama pada porositasnya	Energies 11, no. 7 (July 4, 2018): 1753. doi:10.3390 /en1107175 3
22	Fu, Yanbin, Siyue He, Sizhan Zhang, and Yong Yang	Parameter Thermal Analysis on Hardening Soil Model of Soft Soil for Foundation Pits Based on Shear Rates in Shenzhen Bay, China	Adanya pengaruh parameter terhadap pemodelan Hardening Soil Model of Soft Soil	Advances in Materials Science and Engineering 2020

H. Kerangka Pikir Penelitian

Kerangka pikir dalam penelitian ini berupa model konseptual yang disusun berdasarkan beberapa pertimbangan dari beberapa isu yang

berkembang saat ini. Antara lain: pertumbuhan infrastuktur dan aktivitas yang semakin pesat akibat perkembangan daerah dan jaman, penyebaran tanah lunak yang tersebar di Indonesia dengan luasan yang cukup besar, serta kebutuhan konstruksi di atas tanah lunak yang semakin tinggi seperti di daerah Kalimantan, Sumatera dan Papua.



Gambar 2 Kerangka Pikir Penelitian

Dari hasil identifikasi masalah yang ada, ditarik sebuah konsep perbaikan tanah lunak yang dianggap inovatif dan mampu meghadirkan solusi alternatif dari metode perbaikan yang sudah ada. Oleh karena itu penggabungan metode kombinasi antara Preloading dan Induksi Termal dianggap sebagai sebuah topik penelitian yang sangat strategis untuk dikembangkan dalam mengatasi problema tanah lunak. Hasil riset diharapkan mampu menjadi solusi untuk perbaikan tanah lunak yang ekonomis, cepat dan mudah.

Penggunaan metode gabungan dengan Induksi Termal dan Preloading masih perlu diteliti lebih lanjut, untuk menghasilkan temuan-temuan empirik yang berguna bagi masyarakat luas. Dalam penelitian ini, Induksi Termal divariasikan dengan model vertikal dan ber-inklinasi pada pemodelan skala laboratorium untuk mencari perubahan perilaku fisik ,mineralogi dan mekanis tanah. Skala pembebanan dibuat dari blok beton dengan variasi ukuran.Heater terbuat dari copper bar atau batang tembaga yang dirakit dengan regulator temperatur 100^0C , 200^0C , 300^0C

, 400^0C. Copper bar dengan Panjang 40 cm sebagai bahan media konduksi,dipasang posisi vertikal dam miring pada uji model.Langkah awal uji elemen vertical dan miring, kemudian uji model kombinasi vertical dan miring.Tiap perlakuan atau treatment variasi temperature selama 360 menit yang dipakai diobservasi fisik dan mekanis sampel.