

**DISERTASI**

**PERILAKU KONSOLIDASI LAPISAN TANAH LUNAK  
DIBAWAH TIMBUNAN YANG DIPADATKAN DENGAN  
METODE RAPID IMPACT COMPACTION (RIC)**

**CONSOLIDATION BEHAVIOR OF SOFT SOIL LAYER UNDER  
EMBANKMENT WITH RAPID IMPACT COMPACTION (RIC)  
METHOD**

**IRNAWATY  
D013171014**



**PROGRAM STUDI S3 ILMU TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2023**

**DISERTASI**

**PERILAKU KONSOLIDASI LAPISAN TANAH LUNAK  
DIBAWAH TIMBUNAN YANG DIPADATKAN DENGAN  
METODE RAPID IMPACT COMPACTION (RIC)**

CONSOLIDATION BEHAVIOR OF SOFT SOIL LAYER UNDER  
EMBANKMENT WITH RAPID IMPACT COMPACTION (RIC)  
METHOD

**IRNAWATY  
D013171014**



**PROGRAM STUDI S3 ILMU TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2023**

LEMBAR PENGESAHAN

PERILAKU KONSOLIDASI TANAH LUNAK DIBAWAH TIMBUNAN YANG  
DIPADATKAN DENGAN METODE RAPID IMPACT COMPACTION (RIC)

**CONSOLIDATION BEHAVIOR OF SOFT SOIL LAYER UNDER  
EMBANKMENT WITH RAPID IMPACT COMPACTION (RIC) METHOD**

Disusun dan Diajukan oleh

**IRNAWATY**  
**NIM. D013171014**

Telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Disertasi  
Pada tanggal 20 Januari 2023  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui  
Komisi Penasehat



**Prof. Dr. Ir. Abd. Rachman Djamaluddin, MT.**  
Promotor



**Ir. H. Achmad Bakri Muhiddin, MSc.Ph.D**  
Co-Promotor



**Dr. Eng. Ardy Arsyad, ST., M.Eng.Sc**  
Co-Promotor



Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin

**Prof. Dr.Eng. Ir.M. Isran Ramli, ST. MT. IPM**



Ketua Program Studi  
S3 Teknik Sipil

**Dr. Eng. Ir.Hj. Rita Irmawaty, ST.MT**

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS / DISERTASI

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Irnawaty  
Nomor Mahasiswa : D013 17 1014  
Program Studi : S3 Teknik Sipil

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis/disertasi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambil alihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa Sebagian atau keseluruhan tesis/disertasi ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 20 Januari 2023

Yang menyatakan,

 Irnawaty

## PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah Subhana Wata'allah, berkat rahmat dan karunianya sehingga disertasi ini dapat selesai pada waktunya.

Berbagai pihak telah banyak memberikan bantuan selama penelitian dan penulisan disertasi ini berlangsung. Melalui kesempatan ini saya menyampaikan terima kasih kepada : Bapak Prof. Dr. Ir. Abdul Rachman Djamaluddin, MT selaku ketua Komisi Penasihat (Promotor), Bapak Ir. Achmad Bakri Muhiddin, M.Sc., Ph.D dan Dr. Eng. Ardy Arsyad. ST.,M. Eng.Sc selaku Co-Promotor atas bimbingan dan arahan sejak penelitian, sampai selesainya penulisan disertasi ini.

Ibu Dr. Eng. Ir. Steeva Gaily Rondonuwu, S.T., M.Agr. selaku penguji Eksternal, Bapak Prof. Dr. Ir. M. Wihardi Tjaronge, ST, MT, Bapak Dr. Eng. Ir. Tri Harianto, S.T., M.T. Bapak Dr. Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, ST, MT, dan Bapak Dr. Eng. Ir. Bambang Bakri, S.T., M.T. Masing-masing selaku anggota tim penguji atas masukan dan sarannya untuk perbaikan naskah disertasi ini.

Selanjutnya ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Rektor Universitas Hasanuddin dan jajarannya, Direktur Program Pascasarjana Unhas dan jajarannya, Dekan Fakultas Teknik Unhas dan jajarannya, Ketua Departemen Sipil Unhas dan jajarannya, Ketua Program Studi S3 Teknik Sipil Unhas dan seluruh staf yang telah membantu penulis selama proses perkuliahan, penelitian dan penyelesaian administrasi akademik.

Kepada teman-teman mahasiswa S3 angkatan 2017 khususnya di konsentrasi Geoteknik yang saya tidak dapat sebutkan namanya satu persatu yang telah banyak membantu dalam penyelesaian disertasi ini.

Kedua orang tua penulis, ayahanda H. Muh. Daming Opu Dg. Situju dan Ibunda Hj. St. Sunduseng Kuruseng (alm) dengan segala doa dan dorongan yang tak henti-hentinya. kasih sayang dan usaha yang tulus dan tidak pernah lelah demi keberhasilan anak-anaknya.

Suami tercinta Abdul Hafid Natsir atas segala kasih sayang dan doa serta dorongan moril yang tidak henti-hentinya.

Saudara-saudara penulis, Dr. Hj. Sri Undai Nurbayani, S.E, M.Si, CPF H. Atjo Muchlis, ST.,MKom,atas segala bantuan, perhatian dan doanya. Terutama kakanda Ipar Dr.H.Muh.Idhil Maming, ST.,MT sebagai teman dan kakanda atas segala bantuan dan dorongannya sehingga penulis sampai di detik ini.

Di samping itu sekaligus menyampaikan permohonan maaf atas segala kekurangan dan kesalahan yang diperbuat, baik sengaja maupun tidak disengaja. Semoga Allah selalu memberikan perlindungan berbagai kesulitan yang dialami dapat diatasi dengan tenang dan bahagia. Akhir kata, atas penulis berharap hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat sebesar-besarnya untuk pengembangan ilmu pengetahuan. Amin

Makassar, Januari 2023

Irnawaty

## **ABSTRAK**

IRNAWATY, *Consolidation Behavior of Soft Soil Layer Under Embankment with Rapid Impact Compaction*, Lead Advisor by **Abdul Rachman DJamaluddin** (Promotor), **Achmad Bakri Muhiddin** (Ass.Advisor), dan **Ardy Arsyad** (Ass.Advisor).

### **Abstract**

The weakness of soil bearing capacity and the large settlements are the problems that often occur in landfill soils. These soil characteristics lead to a greater potential for collapse and compression. The time of compression on soft soils can also take up to hundreds of years. To overcome those condition, an effective soil improvement method is needed to increase ground improvement to make it gain strength. This study aims to obtain consolidation values in the soft soil layers of the Prefabricated Vertical Drain (PVD) model, and landfill deformation values that are compacted using the Rapid Impact Compaction (RIC) method. The soft soil material from the engineering campus of Gowa Regency, South Sulawesi. The stone sand material from the Sand Mine location on Borisalo village, Parangloe sub-district, Gowa Regency, South Sulawesi Province. The research method uses an experimental test that starts with testing the physical and mechanical characteristics of soft soil and stone sand. The test soil sample was placed in a test box measuring 100 x 100 x150 cm, then reconstitution was carried out by allowing it to stand until water was saturated. The results showed that the consolidation method without PVD took 60 days with a settlement of 6.85 cm, while the consolidation using PVD decreased 8 cm for 40 days. The soil improvement method uses RIC for a load of 70 kg occurs the settlement is 10 cm, while a load of 90 kg the settlement is 11 cm for 6 hours. This proves that the soil improvement method using Rapid Impact Compaction is more effective than the consolidation method.

**Keywords:** Soft Soil, Consolidation, Prefabricated Vertical Drain (PVD), Rapid Impact Compaction (RIC)

## ABSTRAK

IRNAWATY, *Perilaku Konsolidasi Lapisan Tanah Lunak Dibawah Timbunan Yang Dipadatkan Dengan Metode Rapid Impact Compaction (RIC)* (dibimbing oleh **Abdul Rachman DJamaluddin, Achmad Bakri Muhiddin, dan Ardy Arsyad**).

Masalah yang sering terjadi pada tanah timbunan adalah daya dukung tanah yang rendah dan pemampatan/penurunan yang besar. Karakteristik tanah ini menyebabkan potensi keruntuhan dan pemampatan yang lebih besar. Selain itu waktu untuk menyelesaikan pemampatan pada tanah lunak mungkin memakan waktu hingga ratusan tahun. Sehingga untuk mengatasi hal itu, perlu metode perbaikan tanah yang efektif untuk meningkatkan ground improvement agar menjadi lebih kuat atau gain strength. Penelitian ini bertujuan mendapatkan konsolidasi pada lapisan tanah lunak model akibat *Prefabricated Vertical Drain (PVD)*, mendapatkan nilai deformasi timbunan yang dipadatkan dengan metode *Rapid Impact Compaction (RIC)*. Membandingkan penurunan yang terjadi antara metode konsolidasi beban preloading dengan penurunan metode Rapid Impact Compaction pada lapisan tanah lunak. Tanah lunak yang digunakan berasal dari kampus teknik Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan. Material Sirtu berasal dari daerah lokasi Tambang Pasir jalan Malino Borisalo kecamatan Parangloe Kabupaten Gowa, 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 lunak dan sirtu. Sampel tanah uji diletakkan pada bak uji berukuran 100 x 100 x150 cm, kemudian dilakukan rekonstitusi dengan cara mendinginkan sampai kondisi jenuh air. Hasil penelitian menunjukkan metode konsolidasi tanpa prefabricated vertical drain membutuhkan waktu selama 60 hari dengan penurunan sebesar 6,85 cm sedangkan konsolidasi yang menggunakan prefabricated vertical drain penurunan yang terjadi adalah 8 cm selama 40 hari. Metode perbaikan tanah menggunakan Rapid Impact Compaction (RIC) untuk beban 70 kg, penurunan yang terjadi sebesar 10 cm dan untuk beban 90 kg penurunan yang didapatkan sebesar 11 cm selama 6 jam. Ini membuktikan bahwa metode perbaikan tanah menggunakan Rapid Impact Compaction lebih efektif dibandingkan dengan metode konsolidasi

**Kata Kunci** : Tanah Lunak, Konsolidasi, Rapid Impact Compaction

## DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL .....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	ii
ABSTRAK.....	iii
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR TABEL.....	xi
<b>BAB I      PENDAHULUAN</b>	
A. Latar Belakang .....	1
B. Rumusan Masalah.....	7
C. Tujuan Penelitian .....	8
D. Lingkup dan Batasan Penelitian .....	9
E. Manfaat Penelitian .....	9
F. Sistematika Penulisan.....	10
<b>BAB II     TINJAUAN PUSTAKA</b>	
A. Tanah Lunak .....	13
B. Konsolidasi .....	17
C. Penurunan .....	19
D. Parameter Tanah .....	26
E. Metode Perbaikan Tanah dengan Preloading .....	27
F. Prefabricated Vertical Drain .....	30
G. Metode Perbaikan Tanah .....	38
H. Metode Perbaikan Tanah dengan Pemadatan Standar .....	41
I. Metode Perbaikan Tanah dengan Rapid Impact Compaction (RIC).....	46
J. Matriks Studi Terdahulu.....	53
K. Kerangka Fikir Penelitian.....	64

### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

A. Rancangan Penelitian.....	65
B. Lokasi Penelitian dan Deskripsi Lokasi Pengambilan Sampel .....	73
C. Metode Pengambilan Sampel .....	75
D. Pengujian Karakteristik Fisik dan Mekanis Tanah .....	75
E. Pengujian Sirtu .....	78
F. Uji Model Konsolidasi .....	79
G. Uji Model Rapid Impact Compaction.....	81
H. Analisa Data .....	83

### **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

A. Karakteristik Fisik dan Mekanis Tanah .....	86
B. Uji Model Konsolidasi Tanah Lunak tanpa Prefabricated Vertical Drain (PVD) .....	89
C. Uji Model Konsolidasi Tanah Lunak Menggunakan Prefabricated Vertical Drain .....	90
D. Perbandingan Uji Model Konsolidasi tanpa dan menggunakan Prefabricated Vertical Drain .....	91
E. Uji Model Rapid Impact Compaction (RIC).....	94
1. Uji Model Rapid Impcat Compaction Beban 70 Kg..	94
2. Uji Model Rapid Impact Compaction Beban 90 Kg .	95
F. Perbandingan Uji Model Rapid Impact Compaction Beban 70 kg dan Beban 90 Kg.....	97
G. Perbandingan Antara Uji Model Rapid Impact Compaction dengan Uji Model Konsolidasi	99
H. Energi Rapid Impact Compaction	
1. Energi Rapid Impact Compaction (RIC) beban 70 Kg	100
2. Energi Rapid Impact Compaction (RIC) beban 90 Kg	101
I. Kondisi Nilai (CBR) setelah Pemanpatan RIC dengan Energy yang dibebani beban 70 kg dan 90 kg	103

I. Temuan Empirik .....	106
-------------------------	-----

**BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

A. Kesimpulan .....	108
B. Saran .....	108

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN-LAMPIRAN

# BAB I

## PENDAHULUAN

### A. Latar Belakang

Problem utama pada pembangunan infrastruktur diatas tanah lempung lunak (*soft clay*) adalah daya dukung tanah dasarnya yang relatif rendah dan pemampatan tanah dasarnya yang relatif besar serta berlangsung relatif lama. Tanah lempung lunak termasuk tanah yang bermasalah (*problematic soil*) atau tanah yang sulit (*difficult soil*). Hal ini disebabkan oleh kondisi lapisan tanah yang lunak dan memiliki permeabilitas rendah sehingga tidak dapat langsung dilakukan pekerjaan konstruksi di atasnya. Daya dukung yang rendah dapat menyebabkan kerugian, mulai dari kerugian dari sisi biaya konstruksi yang semakin mahal, hingga terancamnya keselamatan konstruksi, yaitu struktur yang dibuat tidak mampu berdiri secara stabil dan bisa roboh. Apabila tanpa dilakukan perbaikan pada tanah dasarnya terlebih dahulu maka infrastruktur yang dibangun diatasnya akan berpotensi mengalami kerusakan sebelum mencapai umur konstruksi yang direncanakan.

Masalah yang sering terjadi pada tanah timbunan adalah daya dukung tanah yang rendah dan pemampatan/penurunan yang besar. Karakteristik tanah ini menyebabkan potensi keruntuhan dan pemampatan yang lebih besar. Selain itu waktu untuk menyelesaikan pemampatan pada tanah lunak mungkin memakan waktu hingga ratusan tahun.

Penanganan tanah lunak untuk konstruksi infrastruktur perlu direncanakan dan dilakukan secara tepat agar tidak terjadi penurunan (*settlement*) pasca konstruksi melebihi yang dipersyaratkan. Persebaran tanah lunak di Indonesia cukup merata, melihat luasnya daerah tanah lempung yang dimiliki hampir di setiap pulau. Tanah lunak menempati area > 20 juta hektar atau > 10% dari tanah daratan di Indonesia. (*Wardoyo, et al, 2019*).

Konstruksi timbunan diatas tanah lunak memiliki dan menghadapi pola permasalahan yang sama, berupa timbulnya deformasi yang berlebihan dalam bentuk differential settlement dan ketidakstabilan daya dukung yang tidak memadai. Differential settlement terjadi akibat nilai kuat geser tanah lunak yang rendah yang ditandai dengan penurunan tidak seragam antara arah memanjang terhadap arah melintang khususnya pada bagian yang mengalami perulangan beban yang tinggi, sementara ketidakstabilan daya dukung menimbulkan efek penurunan permukaan badan timbunan secara terus menerus sampai level yang lebih rendah dari lahan eksisting disekitarnya dalam jangka panjang, yang diakibatkan sifat mampat yang besar dan permeabilitas yang rendah serta dapat berakibat naiknya permukaan air tanah (*Titi Paveenchana and Manoon, 2009*). Kondisi ini tentunya tidak diharapkan karena akan menimbulkan biaya perawatan badan timbunan secara terus menerus untuk mempertahankan operasionalnya (*Balasubramaniam et.al 2010*).

Secara operasional konstruksi timbunan yang berada diatas lapisan tanah lunak selama pelaksanaan pemadatan akan mengakibatkan efek terhadap lapisan struktur timbunan dan lapisan tanah lunak dibawahnya. Lapisan struktur timbunan akan mengalami deformasi elastik berupa penurunan segera yang akan memberikan efek peningkatan kepadatan, sementara pada lapisan tanah lunak yang umumnya terendam dan jenuh air akan mengalami bangkitan tekanan air pori dan deposisi butiran tanah lunak (*Briggs et al., 2017*) yang akan memberikan efek pemampatan dan penurunan lapisan tanah lunak. Sehingga dengan demikian aplikasi pemadatan dinamis pada tanah timbunan diatas tanah lunak masih membutuhkan penelitian lebih lanjut khususnya pada deformasi struktur timbunan dan deposisi lapisan tanah lunak dibawahnya.

Berbagai upaya dan inovasi teknologi telah dilakukan untuk meminimalkan permasalahan yang timbul pada konstruksi timbunan diatas tanah lunak, antara lain, pemadatan tanah (*compaction*), konsolidasi tanah (*consolidation* atau *preloading*), pengeringan tanah (*dewatering*), penggantian tanah (*replacement*) dan perekatan partikel tanah (*permeation resin*). yang mana metodenya dapat dikelompokkan berdasarkan inovasi terhadap perkuatan struktur timbunan dan inovasi terhadap lapisan tanah lunaknya sendiri. (*J. F. Chen, et al , 2015; Cascone and Biondi, 2013*). Untuk badan timbunan yang umum dilakukan adalah perbaikan struktur timbunan berupa metode pemadatan dengan atau

tanpa perkuatan badan timbunan serta rekayasa pemilihan bahan material timbunan.

Sementara untuk lapisan tanah lunaknya sendiri metode yang telah banyak diaplikasikan adalah stabilisasi metode berbasis mekanis berupa *densification*, disamping metode lainnya berbasis hidrolis dan stabilisasi kimia (Branch, et.al, 2016). Untuk mencapai kualitas timbunan pada kedua kelompok metode tersebut usaha pemadatan merupakan hal yang penting di perhatikan karena hal ini terkait dengan pengaruh yang ditimbulkannya baik pada lapisan konstruksi timbunannya sendiri maupun terhadap lapisan tanah lunaknya selama pelaksanaan konstruksi.

Pemilihan metode penanganan juga mempertimbangkan biaya dan waktu pada saat pelaksanaan konstruksi di lapangan. Umumnya digunakan konstruksi pile slab dan cakar ayam untuk pembangunan konstruksi jalan diatas tanah lunak, tetapi penggunaan struktur tersebut membutuhkan biaya yang besar. Untuk itu sangat dibutuhkan metode alternatif yang lebih efisien biaya dan waktu, serta minim resiko terhadap dampak lingkungan.

Untuk penanganan permasalahan tersebut salah satu metode yang digunakan adalah konsolidasi yang dikombinasi dengan *preloading* dan *Prefabricated Vertical Drain (PVD)*. *Preloading* atau pemberian beban awal dilakukan dengan cara memberikan beban sehingga tanah akan termampatkan sebelum konstruksi didirikan. *Prefabricated Vertical Drain*

(PVD) adalah sistem drainase buatan yang dipasang vertikal di dalam lapisan tanah. (Dhar, Siddique, & Ameen, 2011).

Metode *Preloading* konvensional atau yang biasa disebut prabeban merupakan sebuah metode untuk memperbaiki masalah yang ditimbulkan tanah lempung lunak, namun pada proses pelaksanaannya metode ini sering mengalami permasalahan diantaranya adalah kelongsoran tanah timbunan. Selain itu metode ini juga memerlukan biaya yang besar dikarenakan perpindahan tanah timbunan yang harus dilakukan.

Pemilihan metode pemadatan timbunan merupakan salah satu tahapan krusial dalam metode pelaksanaan suatu konstruksi timbunan diatas tanah lunak yang tidak dapat dilewatkan. Beberapa metode pemadatan dinamis lapisan timbunan tebal yang dikenal saat ini diantaranya adalah *Rapid Impact Compaction (RIC)*. Metode ini adalah pemadatan tanah secara dinamis dengan konsep *Low Energi Dynamic Compaction*, (Parvizi, 2009) yang pertama kali diperkenalkan di UK di awal tahun 1990 sebagai metode yang awalnya digunakan untuk memperbaiki runway lapangan terbang yang rusak akibat bomb, dan sejak tahun 2003 telah mulai digunakan secara efektif di beberapa negara (Becker, 2011 and Mohammed, et.al, 2013).

Selain itu, *Rapid Impact Compaction (RIC)* merupakan suatu metode dinamis yang umumnya digunakan untuk memadatkan tanah berpasir dimana kandungan tanah liat dan lanau yang rendah. Secara

garis besar prinsip kerja metode *Rapid Impact Compaction (RIC)* adalah dengan memberikan tekanan dengan besaran tertentu pada permukaan tanah yaitu menggunakan palu yang dijatuhkan dari ketinggian tertentu dengan intensitas tumbukan yang diukur dalam satuan blows/minute atau tumbukan/menit.

Pada metode *Rapid Impact Compaction (RIC)* proses pemadatan lapisan tanah diawali dengan adanya momentum tumbukan dan gaya impact pada alas penumbuk dipermukaan timbunan, masalah yang timbul adalah akibat penjalaran gelombang tekan dan gelombang geser yang dihasilkan dari proses pemadatan tidak hanya memperkuat struktur timbunan tetapi juga mengakibatkan gangguan pada lapisan tanah lunak berupa naiknya tekanan air pori serta mengubah susunan butiran partikel tanah yang mengakibatkan terjadinya pemampatan tanah (*Hamidi et al., 2009 and Falkner, et.al, 2010*).

Peralatan utama *Rapid Impact Compaction* berupa massa penumbuk yang di jatuhkan dari ketinggian tertentu. Hal yang membedakan metode ini dengan *Dynamic Compaction (DC)* adalah penggunaan massa penumbuk yang lebih ringan, tinggi jatuh yang lebih rendah namun dengan frekuensi tumbukan yang lebih tinggi, sehingga total kumulatif energi yang dihasilkan pada metode *Rapid Impact Compaction (RIC)* lebih besar daripada metode *Dynamic Compaction (DC)* dalam satuan waktu yang sama (*Becker, 2011*).

Salah satu peneliti terdahulu telah merakit suatu model alat yang dapat menstimulasikan metode kerja Rapid Impact Compaction (RIC) yang dikendalikan secara elektro-mekanis pada frekuensi tumbukan 30-40 per menit dalam skala laboratorium. Untuk menganalisis perilaku deformasi dan peningkatan tekanan air pori suatu konstruksi timbunan di atas lapisan tanah lempung. Dari hasil penelitian menunjukkan pencapaian 90% deformasi vertikal pada bidang kontak alas tumbukan terjadi pada 175 kali pukulan. (Arifin B, et al, 2019)

Oleh karena itu, didalam penelitian ini akan dibahas bagaimana penurunan yang terjadi antara metode konsolidasi yang dikombinasi dengan preloading menggunakan Prefabricated Vertical Drain (PVD) dengan penurunan yang di hasilkan oleh Rapid Impact Compaction (RIC). Diharapkan dari hasil studi eksperimental ini akan diperoleh temuan empiris dan gambaran secara menyeluruh terhadap “Perilaku Konsolidasi Lapisan Tanah Lunak yang Dipadatkan dengan Metode Rapid Impact Compaction (RIC)”.

## **B. Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah yang adalah :

1. Bagaimana kondisi nilai (CBR) setelah pamanpatan RIC dengan energy yang dibebani beban 70 kg dan 90 kg
2. Bagaimana karakteristik pemampatan akibat proses konsolidasi terhadap lapisan tanah lunak ?

3. Bagaimana perilaku konsolidasi pada lapisan tanah lunak model
4. Bagaimana perilaku konsolidasi lapisan tanah lunak dibawah timbunan yang dipadatkan dengan metode Rapid Impact Compaction?
5. Berapa perbandingan penurunan yang terjadi antara metode konsolidasi beban preloading dengan penurunan metode Rapid Impact Compaction pada lapisan tanah lunak.

### **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.

Tujuan penelitian ini sebagai berikut :

1. Mengevaluasi karakteristik fisik, dan mekanis jenis tanah lunak.
2. Mendapatkan karakteristik pemanfaatan akibat proses konsolidasi terhadap lapisan tanah lunak.
3. Mendapatkan konsolidasi pada lapisan tanah lunak model akibat Prefabricated Vertical Drain.
4. Mendapatkan nilai deformasi timbunan yang dipadatkan dengan metode Rapid Impact Compaction.

5. Membandingkan penurunan yang terjadi antara metode konsolidasi beban preloading dengan penurunan metode Rapid Impact Compaction pada lapisan tanah lunak.

#### **D. Lingkup dan Batasan Penelitian**

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

1. Pemodelan pengujian dilakukan dengan skala uji laboratorium yakni uji eksperimental terhadap bak uji model.
2. Model tanah yang diuji berdasarkan pemeriksaan sifat fisiknya memenuhi karakteristik sebagai tanah timbunan sirtu dan tanah lempung lunak
3. Model perilaku tanah lunak akibat perlakuan konsolidasi dan Rapid Impact Compaction (RIC).

#### **E. Manfaat Penelitian**

Pada riset ini, secara general penulis berharap aspek-aspek yang di teliti mampu memberi manfaat yang seluas-luasnya bagi ilmu pendidikan, selain itu manfaat spesifik yang diharapkan adalah sebagai berikut:

Berdasarkan tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini, maka hasil penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat dalam memberikan informasi tentang pemanfaatan tanah lempung lunak dengan penggunaan alat Rapid Impact Compaction.

Optimalisasi penggunaan Rapid Impact Compaction melalui pemahaman perilaku konsolidasi lapisan tanah lunak dibawah timbunan yang dipadatkan dengan metode Rapid Impact Compaction.

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 Rapid Impact Compaction

## **F. Sistematikan Penulisan**

Gambaran umum mengenai isi penelitian ini, disusun secara singkat dengan sistematika penulisan yang terdiri dari lima Bab sebagai berikut :

## **BAB I PENDAHULUAN**

Pada bab ini dijelaskan latar belakang masalah, rumusan masalah menjelaskan permasalahan yang diamati dan dilaksanakan, tujuan dan mamfaat penelitian ini dilakukan, ruang lingkup sebagai batasan masalah dalam penulisan, mamfaat penelitian menjelaskan keluaran penelitian serta sistematika penulisan tentang pengenalan isi per bab dalam penulisan ini.

## **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Memaparkan teori-teori dasar tentang Konsolidasi, Preloading, Prefabricated Vertical Drain dan Rapid Impact Compaction (RIC) yang digunakan sebagai landasan untuk menganalisis dan membahas permasalahan penelitian serta tinjauan terhadap penelitian sebelumnya yang relevan dengan penelitian ini.

## **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Menerangkan teknis penelitian yang dilakukan, kerangka konseptual penelitian, menguraikan tentang urutan kerja dan tata cara kerja penelitian mulai dari pengambilan contoh tanah, pengujian karakter fisik dan mekanis tanah sebagai media percobaan, penjelasan model Rapid Impact Compaction (RIC), dan skematik peralatan uji model pengujian eksperimental laboratorium.

## **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini membahas tentang hasil penelitian yang meliputi karakteristik fisik dan mekanis tanah sebagai media pengujian, hasil pengujian

laboratorium, perbandingan hasil pengujian laboratorium dengan hasil pengujian skala model, temuan penelitian dan rekomendasi kelanjutan penelitian.

## **BAB V KESIMPULAN**

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian dan saran



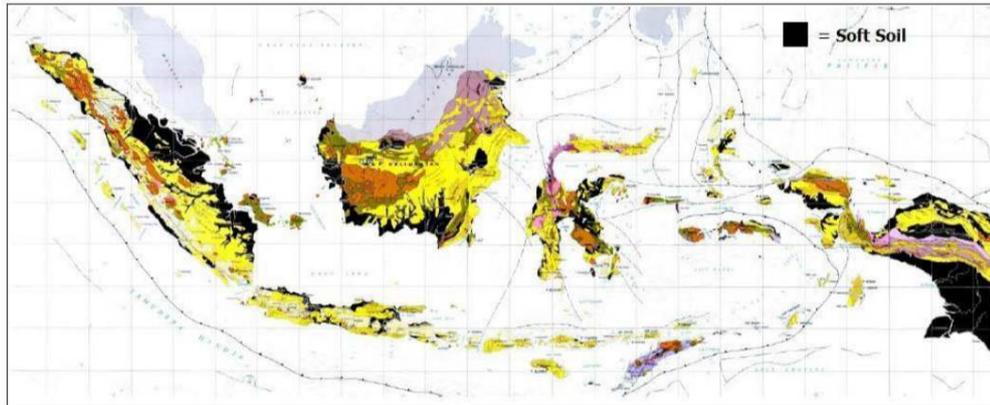
## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **A. Tanah Lunak**

Kebutuhan lahan untuk pembangunan infrastruktur khususnya di beberapa negara Asia selama dua dekade terakhir mengalami perkembangan yang cukup signifikan (Guan-Bao et al., 2013). Dalam pelaksanaannya kadang diperhadapkan pada masalah pemilihan konstruksi timbunan di atas tanah lunak yang tidak dapat dihindari. Hal ini dapat dijumpai pada hampir semua sektor pembangunan seperti konstruksi jalan raya, jalan rel kereta api, bandara udara, area pengembangan pelabuhan untuk penumpukan dan yang terakhir adalah lahan yang didapatkan dari hasil kegiatan reklamasi untuk lahan permukiman dan perkantoran (Bo, et. al, 2015).

Indonesia merupakan daerah yang memiliki tanah lunak yang cukup besar. Tanah lunak 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. (Wardoyo, et. al, 2019). Adapun peta penyebaran tanah lunak di Indonesia dapat dilihat pada Gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1. Penyebaran Tanah Lunak Di Indonesia (Widodo,2019)

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 terdrainasi 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.

Tabel 1. Hubungan N, konsistensi dan kuat tekan bebas ( $q_u$ ) untuk tanah lempung jenuh (Terzaghi dan Peck, 1948)

N Value	Consistency	Unconfine Compression ( $q_u$ )(kN/m <sup>2</sup> )
< 2	Very soft	< 25
2 - 4	Soft	25 – 50
4 - 8	Medium	50 – 100
8 – 15	Stiff	100 – 200
15 – 30	Very Stiff	200 – 400
> 30	Hard	> 400

Tabel 2. Hubungan N dengan kerapatan relatif ( $D_r$ ) untuk tanah pasir (Terzaghi dan Peck, 1948)

N Value	Relative Density ( $D_r$ )
< 4	Very Loose
4 - 10	Loose
10 – 30	Medium
30 – 50	Dense
> 50	Very Dense

Indikasi lapangan yang menunjukkan tanah lunak adalah bisa dibentuk dengan mudah oleh jari tangan dan akan keluar di antara jari jika diremas dengan kepalan tangan. Selain memiliki kuat geser rendah dan kompreibilitas yang tinggi, lempung sebagai tanah lunak berbutir halus mempunyai plastisitas tinggi dan perubahan kembang susut yang relatif besar dimana dalam kondisi kadar airnya bertambah maka volumenya mengembang dan begitu pula sebaliknya akan menyusut dan pecah-pecah apabila dalam keadaan kering. Plastis adalah sifat yang

memungkinkan tanah berubah bentuk tanpa terjadinya perubahan isi. Selain itu tanah lempung juga memiliki sifat kohesif yaitu rekatan antar sesama partikel. (Li et al., 2020)

Ditinjau dari ukuran butirannya, lempung didefinisikan sebagai golongan partikel yang berukuran kurang dari 0,002 mm (Das, 1985). Namun demikian, partikel berukuran antara 0,002 mm sampai 0,005 mm juga masih digolongkan sebagai partikel lempung.

Menurut Terzaghi (1967) tanah lempung kohesif diklasifikasikan sebagai tanah lunak apabila mempunyai daya dukung lebih kecil dari 0,5 kg/cm<sup>2</sup> dan nilai standard penetration test lebih kecil dari 4 (N-value<4). Berdasarkan uji lapangan, tanah lunak secara fisik dapat diremas dengan mudah oleh jari-jari tangan. Menurut Toha(1989), sifat umum tanah lunak adalah memiliki kadar air 80-100%, batas cair 80-110%, batas plastis 30-45%, saat dites sieve analysis, maka butiran yang lolos oleh saringan no 200 akan lebih besar dari 90% serta memiliki kuat geser 20-40 kN/m.

Tanah lunak merupakan tanah kohesif yang terdiri dari sebagian besar butir-butir yang sangat kecil seperti lempung atau lanau. Sifat tanah lunak adalah gaya gesernya kecil, kemampatannya besar, koefisien permeabilitas yang kecil dan mempunyai daya dukug rendah jika dibandingkan dengan tanah lempung lainnya. Tanah lempung lunak secara umum mempunyai sifat-sifat sebagai berikut,

1. Kuat geser rendah
2. Bisa kadar air bertambah, kuat gesernya berkurang

3. Bila struktur tanah terganggu, kuat gesernya berkurang
4. Bila basah bersifat plastis dan mudah mampat
5. Menyusut bila kering dan membang bila basah
6. Memiliki kompresibilitas yang besar
7. Berubah volumenya dengan bertambahnya waktu akibat rangkakan pada beban yang konstan
8. Merupakan material kedap air

## **B. KONSOLIDASI TANAH**

Suatu lapisan tanah yang mengalami tegangan, maka tanah akan mengalami regangan. Regangan yang terjadi disebabkan oleh perubahan susunan tanah dan berkurangnya rongga pori di dalam tanah. Bekerjanya tegangan pada tanah yang berbutir halus yang jenuh (dan hampir jenuh) akan menghasilkan regangan yang tergantung kepada waktu. Penurunan yang tergantung terhadap waktu disebut penurunan konsolidasi. Bila lapisan tanah mengalami beban di atasnya, maka air pori akan mengalir keluar dari lapisan tersebut dan volumenya akan berkurang atau dengan kata lain akan mengalami konsolidasi (Wesley, 2017).

Konsolidasi tanah adalah suatu proses pengecilan volume secara perlahan-lahan pada tanah jenuh sempurna dengan permeabilitas rendah akibat pengaliran sebagian air pori. Proses tersebut berlangsung terus

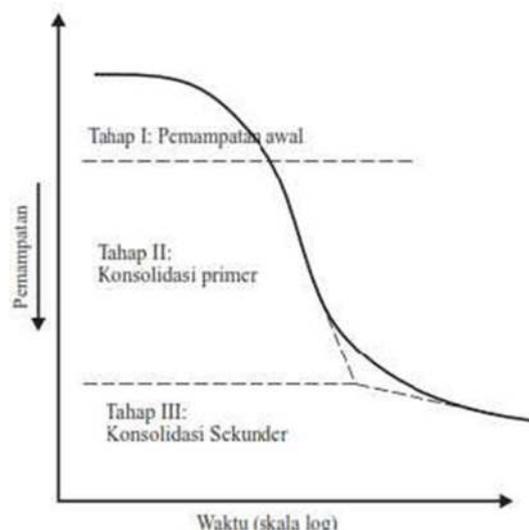
sampai kelebihan tegangan air pori yang disebabkan oleh kenaikan tegangan total telah benar-benar hilang. (Soedarmo dan Purnomo, 2001)

Pada umumnya, tahapan konsolidasi dapat ditunjukkan oleh grafik hubungan antara pemampatan dan waktu. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa ada tiga tahapan yang berbeda yang dapat dijalankan, yaitu:

Tahap I: Pemampatan awal (*initial compression*), yang pada umumnya terjadi disebabkan oleh pembebanan awal (*preloading*).

Tahap II: Konsolidasi primer (*primary consolidation*), yaitu periode selama tegangan air pori secara lambat laun dipindahkan ke dalam tegangan efektif, sebagai akibat dari keluarnya air dari pori-pori tanah.

Tahap III: Konsolidasi sekunder (*secondary consolidation*), yaitu terjadi setelah tegangan air pori hilang seluruhnya. Pemampatan yang terjadi adalah disebabkan oleh penyesuaian yang bersifat plastis dari butir-butir tanah setelah konsolidasi primer. (Braja M. Das, 1988).



Gambar 2. Grafik hubungan waktu-pemampatan selama konsolidasi untuk suatu pembebanan yang diberikan.

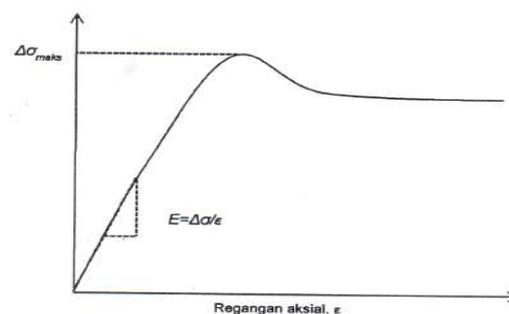
### C. PENURUNAN

Penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*) yang terjadi dibagi menjadi penurunan konsolidasi primer (*primary consolidation settlement*) dan penurunan konsolidasi sekunder (*secondary consolidation settlement*). Penurunan konsolidasi primer merupakan hasil dari perubahan volume pada tanah kohesif jenuh akibat keluarnya air pori yang menempati rongga-rongga pada tanah. Konsolidasi sekunder merupakan proses kelanjutan dari konsolidasi primer, dengan proses yang sangat lambat. (K Sari & Wardani, 2020). Penurunan konsolidasi sekunder terjadi sebagai akibat aksi deformasi partikel tanah yang bersifat plastis. Besar penurunan konsolidasi sekunder sangat signifikan pada tanah organik. Penurunan total dinyatakan dengan persamaan :

$$S = S_i + S_c + S_s \quad (1)$$

#### 1. Penurunan Seketika

Penurunan seketika (*Immediate Settlement*) terjadi dalam kondisi *undrained* (tidak ada perubahan kadar air). Penurunan ini terjadi seketika setelah tegangan bekerja.



Gambar 3. Menjelaskan cara penentuan nilai modulus young ( $E_u$ ) yang dapat diperoleh dari uji *triaxial undrained* di laboratorium.

Hasil yang diperoleh dari pengujian laboratorium dipengaruhi oleh gangguan benda uji dan kecepatan pembebanan. Gangguan benda uji akan membuat Modulus Young tanah semakin kecil sehingga jauh dari nilai aslinya ketika benda uji masih berada didalam tanah.

Dalam pelaksanaan, sampel tanah yang benar-benar tidak terganggu sangat sulit didapatkan dilapangan meskipun telah diupayakan dengan sangat hati-hati. Oleh karena itu, hasil dari uji penetrasi dilapangan dapat dikorelasikan untuk mengestimasi nilai Modulus Young dan parameter tanah lainnya. Bowles (1979) pada Tabel 3 memberikan hubungan antara nilai modulus young  $E$  ( $\text{kN/m}^2$ ) dengan nilai SPT, Tabel 4 menunjukkan nilai representatif modulus young dari berbagai jenis tanah, dan Tabel 5 menunjukkan nilai representatif poisson ratio dari berbagai jenis tanah.

Tabel 3. Korelasi nilai N-SPT dengan Modulus Young (Bowles, 1979)

Jenis Tanah	$E_s$ ( $\text{kN/m}^2$ )
Sand (Normally Consolidated)	$E_s = 500 (N+15)$ $E_s = 6000 N$ $E_s = (15000 \text{ to } 22000) \ln N$
Sand (Saturated)	$E_s = 250 (N+15)$
Sand, all (Normally Consolidated)	$E_s = (2600 \text{ to } 2900) N$
Sand (Over Consolidated)	$E_s = 40000 + 1050 N$ $E_s = 1200 (N+6)$
Gravelly Sand	$E_s = 600 (N+6), N < 15$
Clayey Sand	$E_s = 320 (N+15)$
Silty, Sandy Silt, or Clayey Silt	$E_s = 300 (N+6)$

Tabel 4. Nilai representatif modulus young tanah (Bowles, 1979)

<b>Jenis Tanah</b>	<b><math>E_s</math> (kN/m<sup>2</sup>)</b>
Lempung :	
Sangat lunak	300 - 3000
Lunak	2000 - 4000
Sedang	4500 - 9000
Keras	7000 - 20000
Berpasir	30000 - 42500
Pasir :	
Berlanau	5000 - 20000
Tidak padat	10000 - 25000
Padat	50000 - 100000
Pasir dan Kerikil :	
padat	80000 - 200000
tidak padat	50000 - 140000
Lanau	2000 - 20000
Loess	15000 - 60000
Serpilh (shales)	140000 - 1400000

Tabel 5. Nilai representatif poisson ratio tanah (Bowles, 1979)

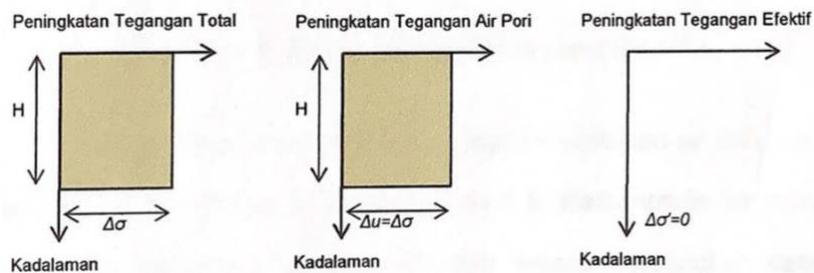
Jenis Tanah	$\mu$
Lempung jenuh	0,40 – 0,50
Lempung tak jenuh	0,10 – 0,30
Lempung berpasir	0,20 – 0,30
Lanau	0,30 – 0,35
Pasir padat	0,20 – 0,40
Pasir kasar ( $e=0,4-0,7$ )	0,15
Pasir halus ( $e=0,4-0,7$ )	0,25
Batu	0,10 – 0,40
Loess	0,10 – 0,30
Beton	0,15

Penurunan seketika (*immediate settlement*) terjadi dalam kondisi *undrained* (tidak ada perubahan kadar air). Penurunan ini terjadi seketika setelah tegangan bekerja. Besarnya penurunan seketika bergantung pada besarnya modulus elastisitas tanah dan besarnya beban timbunan yang diberikan.

## 2. Penurunan Konsolidasi Primer

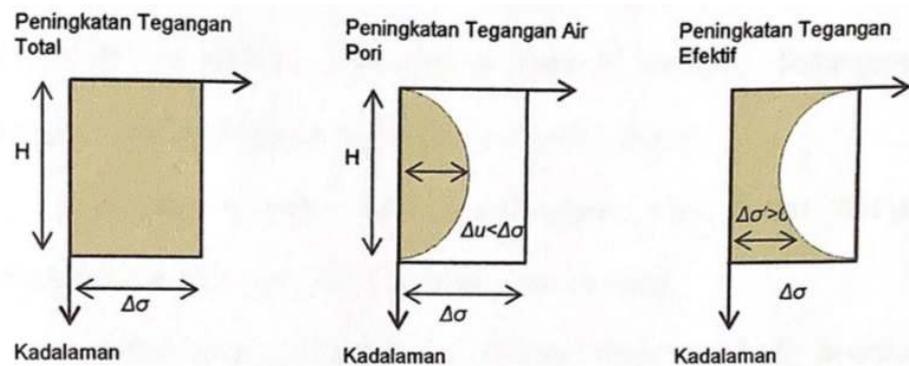
Penurunan konsolidasi primer (*Primary consolidation settlement*) merupakan salah satu proses penurunan yang terjadi pada lempung jenuh berbutir halus dengan kecepatan rembesan yang kecil dan tergantung pada waktu. Proses terjadinya penurunan konsolidasi primer diakibatkan oleh adanya dissipasi tekanan air pori serta keluarnya udara dalam rongga dari massa tanah. Proses konsolidasi primer didasarkan pada suatu mekanisme bahwa penambahan tegangan pada tanah lempung jenuh air akan diteruskan ke air pori dan butiran tanah dengan proporsi masing-masing seperti pada persamaan :

Sifat lempung dengan kecepatan rembesan yang rendah dan air dengan sifat *incompressible* dibandingkan butiran tanah, maka pada tahap awal pembebanan ( $t = 0$ ), seluruh penambahan tegangan ( $\Delta\sigma$ ) akan dipikul oleh air ( $\Delta u = \Delta\sigma$ ) dan tidak dipikul oleh butiran tanah ( $\Delta\sigma' = 0$ ) kondisi pada saat  $t = 0$ , ditunjukkan pada gambar 4.



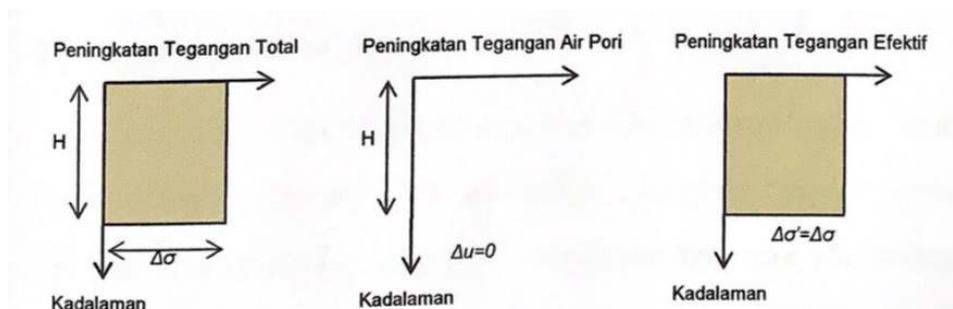
Gambar 4. Kondisi Tegangan tanah saat  $t = 0$

Sesaat setelah pemberian penambahan tegangan ( $\Delta\sigma$ ), air dalam pori mulai tertekan dan akan mengalir keluar menuju lapisan yang lebih permeable. Dengan proses ini, tekanan air pori pada tiap-tiap kedalaman pada lapisan lempung akan berkurang secara perlahan-lahan dan tegangan yang dipikul oleh butiran tanah keseluruhan (tegangan efektif/ $\Delta\sigma'$ ) akan bertambah. Akan tetapi, besar penurunan tegangan air pori ( $\Delta u$ ) dan peningkatan tegangan efektif ( $\Delta\sigma'$ ) tidak terjadi secara seragam disetiap kedalaman lapisan tanah lempung. Semakin dekat dengan lapisan *permeable*, penurunan tegangan air pori ( $\Delta u$ ) dan peningkatan tegangan efektif ( $\Delta\sigma'$ ) berlangsung lebih cepat. Kondisi pada saat  $0 < t < \infty$  ditunjukkan pada gambar 5.



Gambar 5. Kondisi tegangan tanah saat  $0 < t < \infty$

Secara teoritis pada saat  $t = \infty$ , seluruh kelebihan air pori sudah terdissipasi dari lapisan lempung, jadi  $\Delta u = 0$ . Pada kondisi ini semua tambahan tegangan ( $\Delta \sigma$ ) akan diterima secara keseluruhan dalam bentuk tegangan efektif ( $\Delta \sigma'$ ) pada partikel tanah sehingga  $\Delta \sigma = \Delta \sigma'$  kondisi pada saat  $t = \infty$ , ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Kondisi tegangan tanah saat  $t = \infty$

Proses keluarnya air dari pori-pori tanah secara perlahan-lahan sebagai akibat adanya penambahan beban secara transfer proporsi kelebihan tekanan air pori ke tegangan efektif, menyebabkan terjadinya penurunan yang merupakan fungsi dari waktu (*time-dependent settlement*). Selama konsolidasi terjadi, angka pori  $e$  akan terus

mengalami perubahan, dan hubungannya dengan tegangan ( $\sigma$ ) ditunjukkan dengan grafik hubungan antara  $e - \log \sigma'$ .

Ada dua definisi yang menjelaskan sifat tanah (lempung) berdasarkan kondisi sejarah pembebanannya yaitu :

1. **Normally consolidated**, dimana tekanan efektif *overburden* saat ini merupakan tekanan maksimum yang pernah dialami oleh tanah tersebut.
2. **Overconsolidated**, dimana tekanan efektif *overburden* saat ini lebih kecil daripada tekanan yang pernah dialami oleh tanah tersebut. Tekanan efektif *overburden* maksimum yang pernah dialami oleh tanah dinamakan tekanan prakonsolidasi (*preconsolidation pressure*).

### 3. Penurunan Konsolidasi Sekunder

Pada akhir konsolidasi primer, penurunan pada tanah masih tetap terjadi sebagai akibat aksi deformasi partikel tanah yang bersifat plastis. Tahapan konsolidasi ini dinamakan konsolidasi sekunder (*Secondary Consolidation Settlement*). Penurunan konsolidasi sekunder sangat kecil dan tidak signifikan pada jenis tanah lempung overconsolidated.

Konsolidasi sekunder sangat signifikan pada tanah organik dan tanah anorganik dengan kompresibilitas tinggi. Variasi angka pori dan waktu untuk penambahan beban akan sama seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.



Tv	0.008	0.031	0.071	0.126	0.197	0.287	0.403	0.567	0.848	~
----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	---

## 2. Koefisien Konsolidasi Vertikal ( $C_v$ )

Koefisien konsolidasi vertikal menentukan kecepatan pengaliran pada arah vertikal dalam tanah karena pada umumnya konsolidasi berlangsung satu arah saja yaitu arah vertikal, maka koefisien konsolidasi sangat berpengaruh terhadap kecepatan konsolidasi yang terjadi. Harga  $C_v$  dapat dicari menggunakan persamaan (3).

$$C_v = \frac{T_v H^2}{t} \quad (3)$$

dimana :

$C_v$  = koefisien konsolidasi ( $\text{cm}^2/\text{dtk}$ )

$T_v$  = Faktor waktu bergantung dari derajat konsolidasi ( $U$ )

$H$  = Tebal lapisan tanah *compressible* (m)

$t$  = Waktu untuk mencapai derajat konsolidasi  $U\%$  (dtk)

## E. Metode Perbaikan Tanah dengan *Preloading*

Pada tanah yang lunak, mudah mampat dan tebal, kadang-kadang dibutuhkan untuk mengadakan pembebanan sebelum pelaksanaan bangunannya sendiri. Cara ini disebut prapembebanan (*preloading*) atau prakompresi (*precompression*). Jadi, *preloading* adalah suatu proses

pemberian beban di atas tanah sebelum pembangunan strukturnya sendiri guna mengkonsolidasi tanah. Maksud dari preloading ini adalah untuk meniadakan atau mereduksi penurunan konsolidasi primer, yaitu dengan membebani tanah lebih dahulu sebelum pelaksanaan bangunan. Setelah penurunan konsolidasi primer selesai atau sangat kecil, baru beban tanah dibongkar dan struktur dibangun di atas tanah tersebut. Keuntungan dari preloading kecuali mengurangi penurunan, juga menambah kuat geser tanah. Cara ini banyak digunakan dalam proyek-proyek besar.

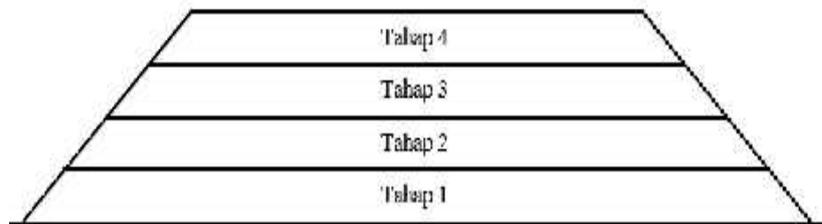
Metode Preloading adalah pembebanan awal atau perbaikan tanah dengan berat timbunan dan ekuivalens sekitar berat struktur yang dipakai kemudian (Chu.et.al 2004).

Metode pembebanan awal (*preloading*) adalah metode penimbunan beban yang besarnya sama dengan besar beban konstruksi yang akan dilaksanakan. *Preloading* dilaksanakan ketika tanah dasar memiliki daya dukung yang tidak cukup kuat. Pemberian beban yang tinggi dan besar akan menyebabkan kelongsoran pada tanah tersebut sehingga waktu yang dibutuhkan untuk mencapai tinggi timbunan rencana tergantung dari peningkatan daya dukung tanah dasarnya, (Kristiyanti, 2010).

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). (Do et al., 2018). 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 konstruksi 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.



Gambar 8. Timbunan diletakkan secara bertahap (Sumber : Mochtar, 2012)

### F. Prefabricated Vertical Drain

*Vertical drain* merupakan suatu saluran drainase buatan yang dimasukkan ke dalam tanah lunak sehingga air yang keluar dari massa tanah akibat adanya *preloading* akan bergerak lebih cepat ke arah horizontal yaitu menuju *vertical drain* yang dipasang. *Vertical drain* dapat diklasifikasikan menjadi 3 tipe umum, yaitu : *sand drain*, *fabric encased drain*, dan *prefabricated vertical drain* (PVD). (Badarinath & El Naggar, 2021)

Prefabricated Vertical Drain (PVD) berupa suatu plastik bergerigi pipih (biasa disebut *drain core*) memanjang yang diselimuti membran yang berfungsi sebagai *filter*. PVD dipasang secara vertikal pada lapisan tanah dengan menggunakan sebuah mesin. Kedalaman PVD yang dipasang tergantung jenis tanah dan kedalaman tanah lunaknya. (Stark et al., 2018)

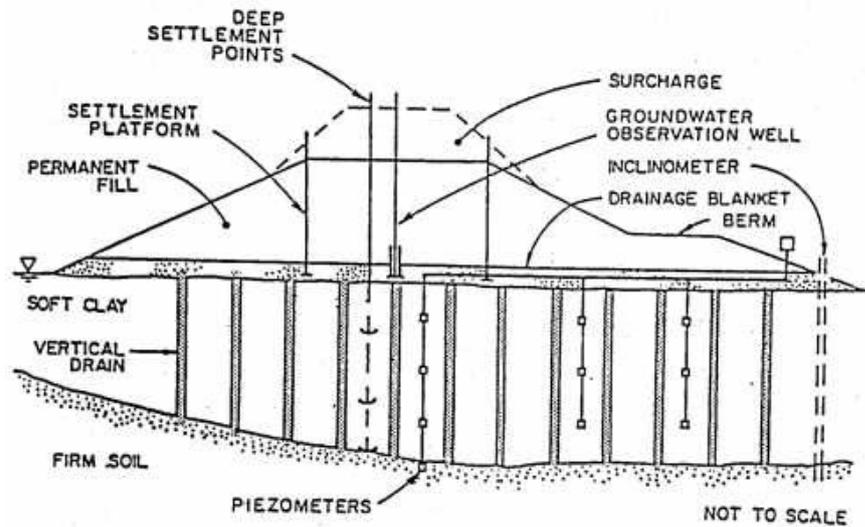
Ada beberapa manfaat penggunaan PVD adalah sebagai berikut :

1. Mempersingkat waktu terjadinya konsolidasi akibat beban di atasnya

2. Mengurangi pengaruh beban surcharge yaitu terjadinya konsolidasi dalam waktu yang lama sehingga dengan adanya PVD dan preloading pemampatan dapat selesai dalam waktu yang diinginkan.
3. Proses instalasi lebih cepat dan tidak memerlukan banyak tenaga kerja serta relatif lebih murah.
4. Pengaliran air lebih baik dan terkontrol.

Tujuan penggunaan PVD apabila dikombinasikan dengan *preloading* adalah :

1. Mempercepat terjadinya proses konsolidasi primer yang disebabkan oleh beban di atasnya (*preloading*), sehingga pemampatan tanah dapat selesai sesuai dengan waktu yang diinginkan. Kombinasi *preloading* dengan pemasangan PVD dapat dilihat pada Gambar 9.
2. Meningkatkan kekuatan dari tanah lunak yang disebabkan oleh pemampatan yang sudah selesai.



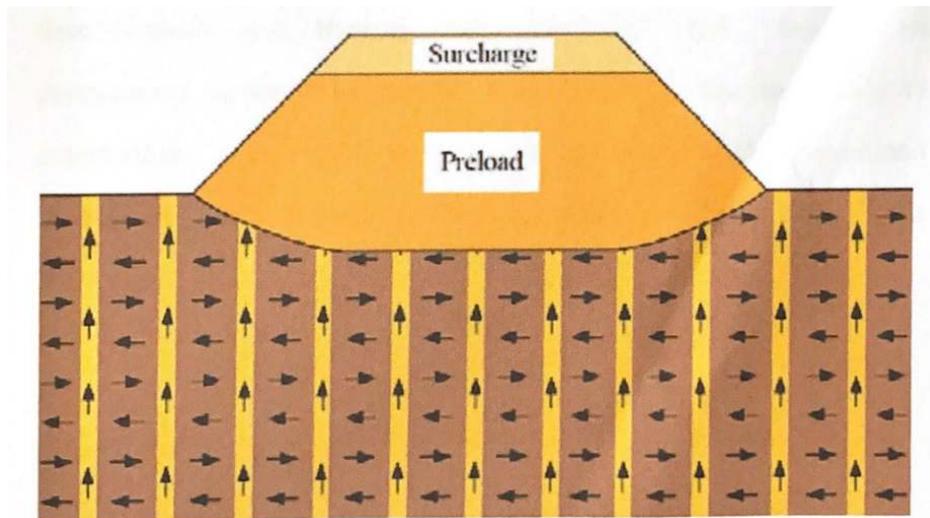
Gambar 9. Kombinasi *preloading* dengan vertikal drain

### Parameter tanah untuk penentuan derajat konsolidasi dengan PVD

- a. Derajat konsolidasi vertikal
- b. Derajat konsolidasi horizontal

#### 1. Karakteristik PVD

*Vertical drain* yaitu sistem drainase buatan yang dipasang vertikal di dalam lapisan tanah lunak (Badarinath & El Naggat, 2021). Metode ini bertujuan untuk mempercepat terjadinya penurunan konsolidasi karena lintasan air pori yang menjadi lebih pendek pada arah horizontal sehingga proses konsolidasi menjadi lebih cepat, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 10 berikut :

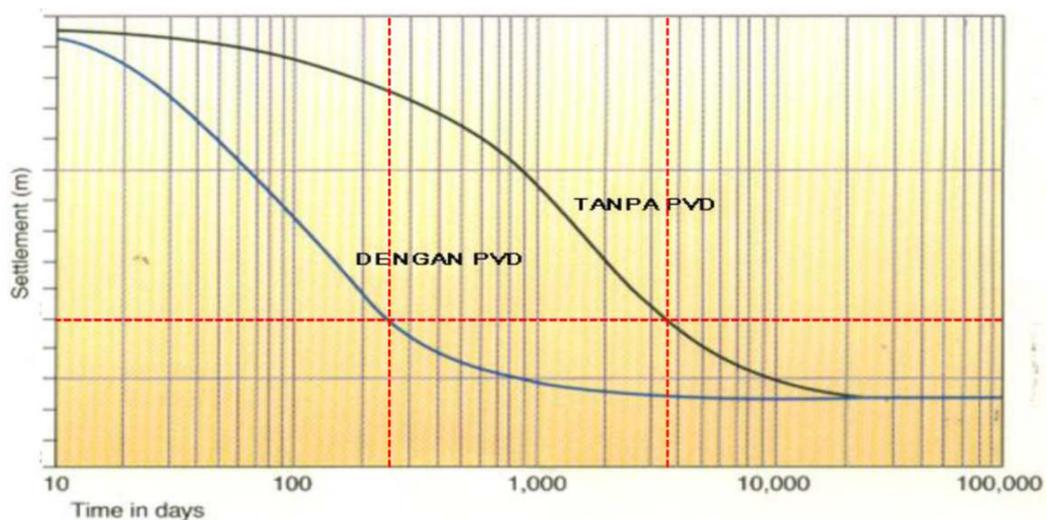


Gambar 10. Aliran air pori pada *vertical drain*

Metode *vertical drain* pada awalnya dilakukan dengan metode *sand drain*. Akan tetapi seiring dengan kemajuan teknologi, *prefabricated vertical drain* (PVD) sudah mulai menggantikan fungsi *sand drain* sebagai sistem drainase buatan. Pada tahun 1925, D.J Moran menyarankan penggunaan drainase pasir untuk stabilitas tanah. Kemudian tahun 1926 di Amerika, *vertical drain* untuk percepatan konsolidasi telah digunakan pada pembangunan timbunan jalan. Beberapa tahun kemudian, *sand drain* juga digunakan di California, pada saat itu *vertical drain* berupa kolom-kolom pasir yang disebut *sand drain*. Tahun 1930-an, Kjellman dari Swedia mengembangkan *prefabricated vertical drain* (PVD) yang terbuat dari bahan geosintetik, dan sejak itu banyak digunakan dalam proyek-proyek di Eropa dan Jepang dalam tahun 1940-an. (Christady, 2008).

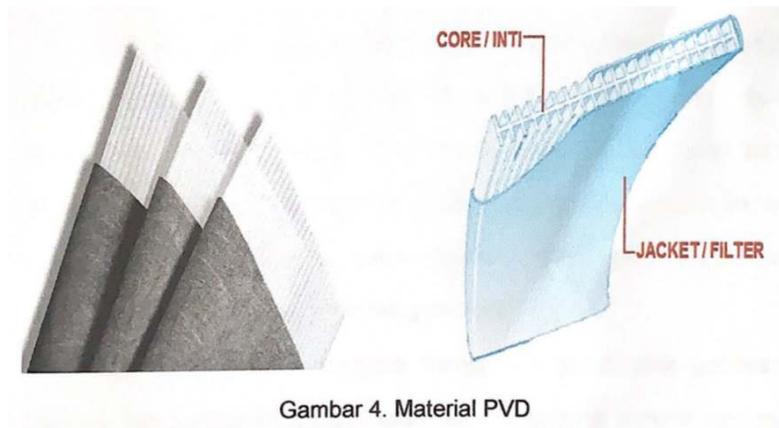
Sementara di Indonesia, aplikasi *prefabricated vertical drain* (PVD) diperkenalkan oleh Nicholls, 1981 (Bergado, 1996). Dewasa ini

penggunaan *vertical drain* semakin banyak diminati, karena metode ini memberikan keuntungan dengan mempercepat waktu penurunan konsolidasi tanah secara signifikan sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Penurunan dengan menggunakan PVD

Bentuk material *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) adalah komposit (gabungan) dari inti (core) dan filter (jacket) dapat dilihat pada Gambar 12 dan filter (jacket) bekerja sebagai penyaring air dan inti (core) bekerja sebagai media pengalir air secara vertikal. Kombinasi sistem ini bertujuan untuk memperpendek waktu perbaikan lapisan tanah lempung yang cukup tebal karena dengan penggunaan *prefabricated vertical drain* akan menyebabkan terjadinya aliran air pori padat dikeluarkan dengan lebih cepat.



Gambar 4. Material PVD

Gambar 12. Material Prefabricated Vertical Drain

Perancangan drainase vertikal membutuhkan prediksi kecepatan pengaliran kelebihan tekanan air pori akibat beban akibat rembesan arah radial yang menuju drainase vertikal serta kontribusi drainase vertikal.

Pada saat pemasangan, koefisien konsolidasi disekitar kolom drainase vertikal dapat berkurang karena efek *remolding* (pembentukan kembali) yang disebut *smear* (pengotoran). Asumsi yang digunakan adalah lempung dalam zona terganggu mempunyai satu batas dengan kelebihan tekanan air pori nol, dan batas lainnya dengan kelebihan tekanan air pori yang terganggu pada waktu.

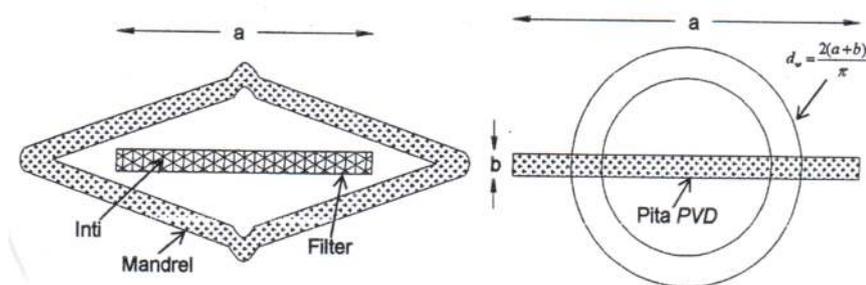
#### a. Diameter ekuivalen Prefabricated Vertical Drain

*PVD* yang pada umumnya berpenampang empat persegi panjang harus dinyatakan dalam bentuk diameter ekuivalen ( $d_w$ ) karena teori konsolidasi dengan drainase vertikal mengasumsikan bahwa air pori dialirkan oleh drainase vertikal penampang lingkaran. Diameter ekuivalen

*PVD* didefinisikan sebagai diameter lingkaran drainase yang mempunyai kemampuan drainase yang sama dengan *PVD*.

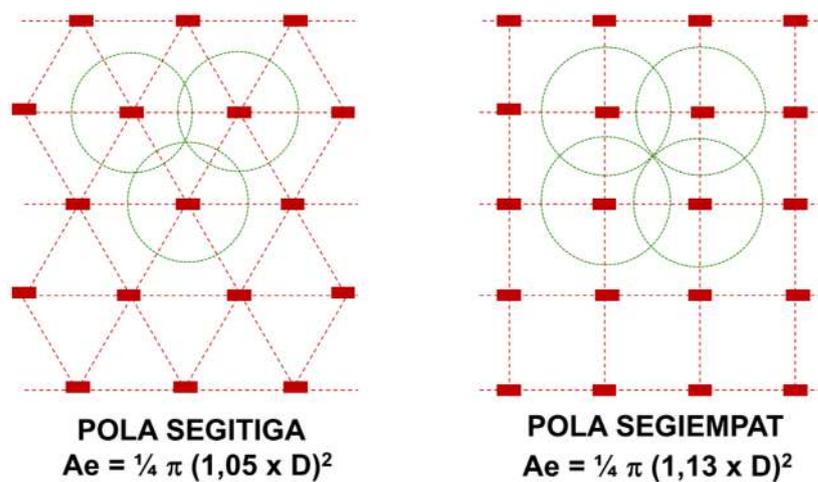
Diameter equivalen dianggap hanya dipengaruhi oleh geometri drainase dan konfigurasi dan tidak tergantung pada kondisi lapisan, sifat tanah, dan pengaruh pemasangan. Diameter equivalen dihitung berdasarkan ilustrasi pada Gambar 13. Jika keliling drainase vertikal bulat =  $\pi d_w$  dan keliling drainase empat persegi panjang =  $2(a + b)$ , maka :

$$d_w = \frac{2(a+b)}{\pi} \quad (4)$$



Gambar 13. Penentuan diameter equivalen *PVD*

#### b. Diameter pengaruh *PVD*



Gambar 14. Pemasangan drainase vertikal

Pengaturan jarak dalam drainase vertikal merupakan hal yang sangat penting. Hal ini sesuai dengan fungsi *PVD* untuk mengurangi panjang lintasan pengaliran arah horizontal. Jarak drainase vertikal tergantung pada jenis dan permeabilitas tanah. Hubungan antara jarak drainase vertikal ( $S$ ) dengan diameter pengaruh ( $D$ ) diperlihatkan pada Gambar 14, dan dinyatakan dalam persamaan :

$$D = 1,13 S \text{ (pola bujur sangkar)} \quad (5)$$

$$D = 1,05 S \text{ (pola segitiga sama sisi)} \quad (6)$$

Pemasangan drainase vertikal dapat menimbulkan gangguan pada tanah sekelilingnya. Gangguan ini tergantung pada ukuran dan bentuk mandrel, struktur mikro dari tanah, dan prosedur pemasangan. Solusi yang mungkin dapat diambil adalah dengan memperkecil luas penampang mandrel, namun kekuatannya harus dipertahankan Tabel 7 menunjukkan sejumlah rekomendasirasio perubahan  $d_w$  dan  $k_h$  menjadi  $d_s$  dan  $k_s$  (koefisien radial akibat efek *smear*).

Tabel 7. Nilai empirik smear ratio dan  $k_h/k_s$ 

Source	Extent	Permeability	Remarks
Barron (1948)	$r_s = 1,6 r_w$	$k_h/k_s = 3$	Assumed
Hansbo (1979)	$r_s = 1,5 \sim 3 r_w$	Open	Based on available literature at the time
Hansbo (1981)	$r_s = 1,5 r_w$	$k_h/k_s = 3$	Assumed in case study
<b>Bergado et al, (1991)</b>	$r_s = 2 r_w$	$k_h/k_v = 1$	Laboratory investigation and back analysis for soft Bangkok clay
Onoue (1991)	$r_s = 1,6 r_w$	$k_h/k_s = 3$	From test interpretation
<b>Almeida et al, (1993)</b>	$r_s = 1,5 \sim 2 r_w$	$k_h/k_s = 3\sim 6$	Based on experience
<b>Indraratna et al, (1998)</b>	$r_s = 4\sim 5 r_w$	$k_h/k_v = 1,15$	Laboratory investigation (for Sydney clay)
<b>Chai and Miura (1999)</b>	$r_s = 2\sim 3 r_w$	$k_h/k_s = C_f (k_h/k_s)$	$C_f$ the ratio between lab and field values
Hird et al, (2000)	$r_s = 1,6 r_w$	$k_h/k_s = 3$	Recommend of design
Xiao (2000)	$r_s = 4 r_w$	$k_h/k_s = 1,3$	Laboratory investigation (for Kaolin clay)

### G. Metode Perbaikan Tanah

Pemadatan dinamis (Dynamic Compaction), juga dikenal sebagai pemadatan dalam yang dinamis, telah dipergunakan orang lebih dari 1000 tahun lalu, namun baru diperkenalkan secara teknis pada pertengahan

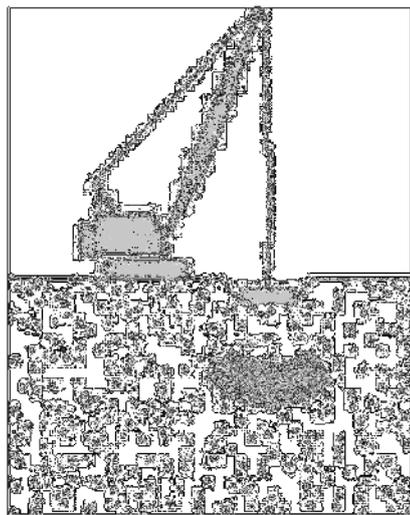
1960an oleh Luis Menard. Metode ini memungkinkan dilakukan perawatan tanah pada kedalaman, dengan memberikan beban dinamis di permukaan. Konsolidasi dinamis akan mengakibatkan pemadatan terjadi pada tanah granular yang longgar. Prinsip teknik ini terdiri dari beban dijatuhkan berulang-ulang dengan berat beban beberapa ton dari ketinggian di atas 10 meter. Di atas lapisan tanah liat, bahan isian ditempatkan di permukaan tanah yang akan dipadatkan, sehingga membuat proses penggantian material secara dinamis menjadi lebih efektif.(Hussin, 2006), bahwa metode ini baik digunakan untuk mengurangi penurunan pondasi, mengurangi penurunan seismik dan potensi likuifaksi, keamanan konstruksi, pemadatan tumpukan sampah, memperbaiki lahan bekas tambang, dan mengurangi penurunan pada tanah yang berpotensi runtuh (collapsible soils).

Efektifitas dari hasil pekerjaan pemadatan dinamis sangat ditentukan oleh besarnya beban penumbukan yang diterapkan. Pengaruhbeban penumbuk terhadap hasil dynamic compaction seperti yang terlihat pada Tabel 8. berikut : (Hussin, 2006)

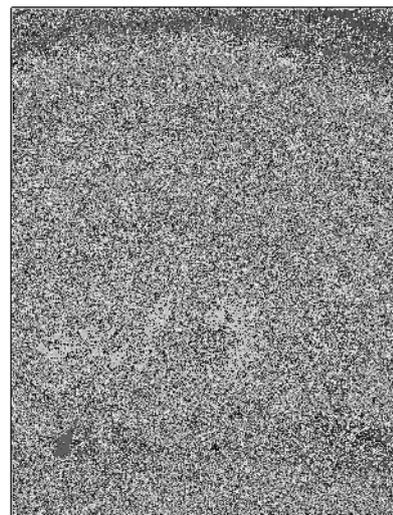
Tabel 8. Hubungan Enersi Penumbuk dengan Peluang Capaian Perbaikan dengan Metode Dynamic Campaction.

Soil Description	Expected Improvement	Typical Energy Required (tons ft/cf) <sup>a</sup>
Gravel and sand <10% silt, no clay	Excellent	2–2.5
Sand with 10–80% silt and <20% clay, $pI < 8$	Moderate if dry; minimal if moist	2.5–3.5
Finer-grained soil with $pI > 8$	Not applicable	—
Landfill	Excellent	6–11

<sup>a</sup>Energy = (drop height × weight × number of drops)/soil volume to be compacted; 1 ton ft/ft<sup>3</sup> = 94.1 kJ/m<sup>3</sup>.



(a). Skema



(b). Implementasi Lapangan

Gambar 15. Skema dan Penerapan Dynamic Compaction  
(James D. Hussin, 2006)

Kedalaman pengaruh dari pemadatan yang dilakukan sangat tergantung pada besarnya energi yang disalurkan dari setiap pukulan beban yang diterapkan ke permukaan tanah. Kedalaman pengaruh tersebut berhubungan dengan akar kuadrat dari energi per satu pukulan (bobot dikalikan tinggi jatuh). Korelasi berikut dikembangkan oleh Dr Robert Lucas berdasarkan data lapangan dengan formula berikut :

(Hussin, 2006)

$$D = k.(W.H)^{1/2} \quad (7)$$

Dimana :

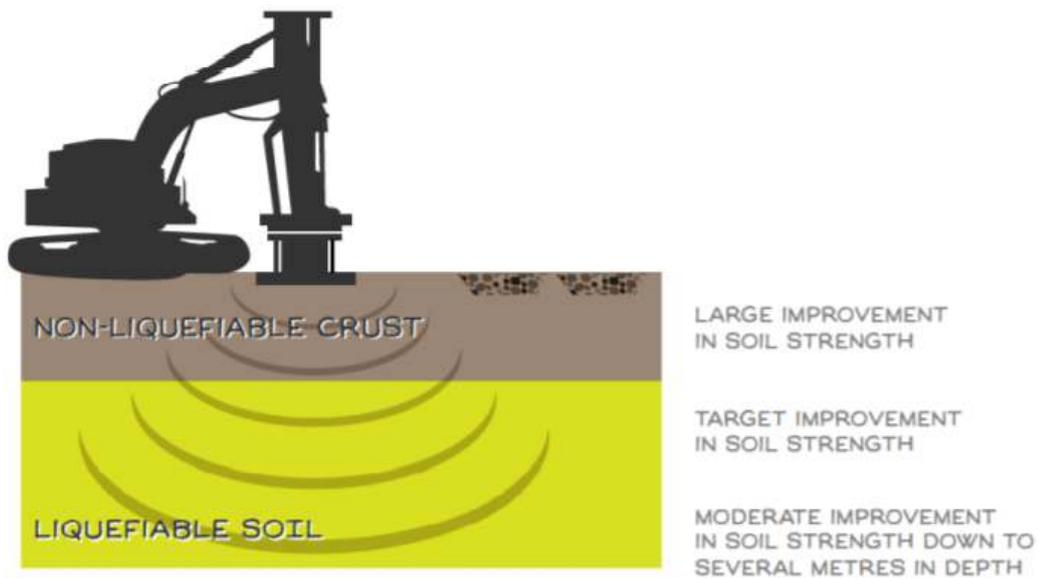
$D$  = kedalaman pengaruh maksimum di bawah muka tanah (m).

$W$  = berat beban pukulan (ton)

$H$  = tinggi jatuh beban pukulan (m)

$k$  = konstanta yang nilai bervariasi dengan tipe tanah (0,3 s/d 0,7), dengan nilai yang lebih rendah untuk tanah halus.

Sebagai mana telah diungkap sebelumnya bahwa teknik pemadatan dinamis cukup efektif diterapkan untuk meminimalkan resiko likuifaksi pada saat terjadi gempa. Likuifaksi terjadi ketika tanah di bawah permukaan air tanah sementara kehilangan kekuatan dan kekakuan akibat getaran. Hal ini menyebabkan tanah untuk sementara "mencairkan (liquefy)", sehingga sejumlah besar air, pasir dan lumpur halus keluar ke permukaan, dan menyebabkan permukaan tanah mengalami deformasi, dan menimbulkan tegangan yang pada bangunan yang berada di atas permukaan tanah yang mengalami pencairan (Ruwhenua, 2013). Ruwhenua (2013) menawarkan metode untuk perbaikan tanah yang berpotensi likuifaksi, yakni : Rapid Impact Compaction ; Metode ini menerapkan pemadatan tanah dengan menggunakan berat jatuh yang melekat pada lengan penggali. Metode Ini bekerja paling sesuai diterapkan pada tanah berpasir. Getaran dari alat pemadatan perludikendalikan untuk membatasi gangguan getaran pada tetangga.



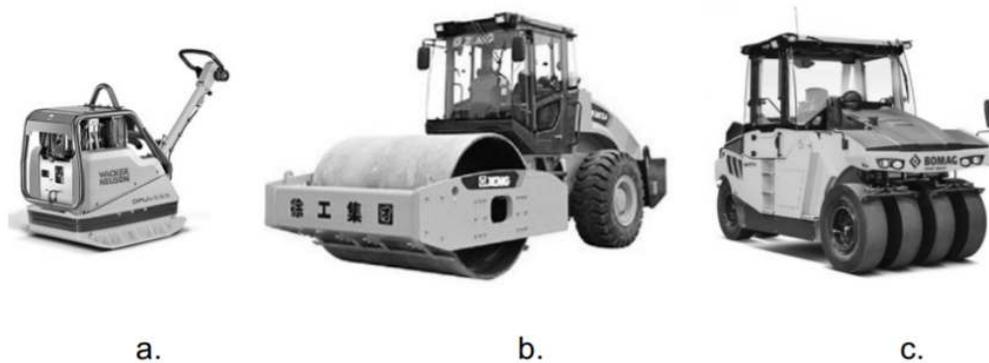
Gambar. 16. Skema Perbaikan Tanah Berpotensi Likuifaksi Metode Rapid Impact Compaction (Ruwhenua, 2013).

#### H. Metode Perbaikan Tanah dengan Pemadatan Standar

Perbaikan tanah dengan pemadatan dilakukan dengan menyalurkan enersi berupa beban dinamis (dynamic load) dari permukaan tanah ke dalam lapisan tanah di bawah permukaan. Metode seperti ini sangat umum digunakan dalam perbaikan lapisan tanah dasar (subgrade) di bawah lapis perkerasan jalan (pavement) atau pada jalur landasan pesawat (runway) pada bangunan bandara.

Pemadatan Standar adalah pemadatan menggunakan rol atau pelat yang secara berulang kali menerapkan tekanan statis, penggilasan atau getaran pada permukaan tanah untuk memadatkan geomaterial, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 17. ketebalan pemadatan standar

umumnya terbatas hanya 30 cm – 50 cm, dengan cara melewati peralatan secara berulang diatas lapisan yang dipadatkan.



Gambar. 17. Beberapa Model Peralatan Pemadatan Standar  
Plate Compactor, b. Vibrator Roller, c. Tire Roller

Pemadatan tanah adalah proses dimana massa tanah yang terdiri dari partikel butir padat, udara dan air berkurang volumenya akibat penerapan beban sesaat dengan cara penggilasan, tumbukan dan getaran yang dikenal sebagai densifikasi. Pemadatan secara umum dapat dibedakan atas Pemadatan standar (shallow compaction) dan pemadatan dinamis (dynamic Compaction).

Proctor dalam (Han, 2015), telah mengamati bahwa ada hubungan yang pasti antara kadar air dan berat volume kering yang dipadatkan. Untuk berbagai jenis tanah pada umumnya terdapat suatu nilai kadar air optimum tertentu untuk mencapai berat volume kering maksimumnya.

Pada setiap pengujian tanah dengan kadar air tertentu yang dipadatkan di laboratorium berat volume keringnya dihitung sebagai :

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{w\%}{100}} \quad (8)$$

Dalam hal ini  $w$  (%) persentase kadar air;  $\gamma$  = berat volume tanah.

Selain kadar air dan jenis tanah, faktor penting lainnya yang mempengaruhi pemadatan adalah usaha pemadatan (energi per satuan volume). Energi pemadatan per satuan volume yang digunakan untuk uji Proctor ditentukan oleh jumlah tumbukan per lapisan ( $N$ ); jumlah lapisan per mould ( $l$ ); berat penumbuk ( $W$ ) dan tinggi jatuh penumbuk ( $h$ ) persatuan volume mould ( $V$ ) yang dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$E = \frac{N \cdot l \cdot W \cdot H}{V} \quad (9)$$

Dimana :

$E$  = enersi pemadatan per volume satuan

$N$  = jumlah pukulan per lapisan

$l$  = jumlah lapisan

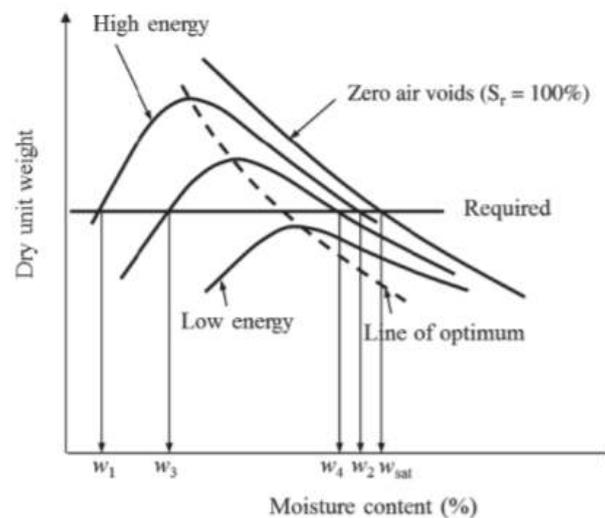
$W$  = berat penumbuk

$H$  = tinggi jatuh penumbuk

$V$  = volume mould

Jika energi pemadatan per satuan volume tanah berubah, maka kurva berat volume pemadatan juga akan berubah, hal ini ditunjukkan

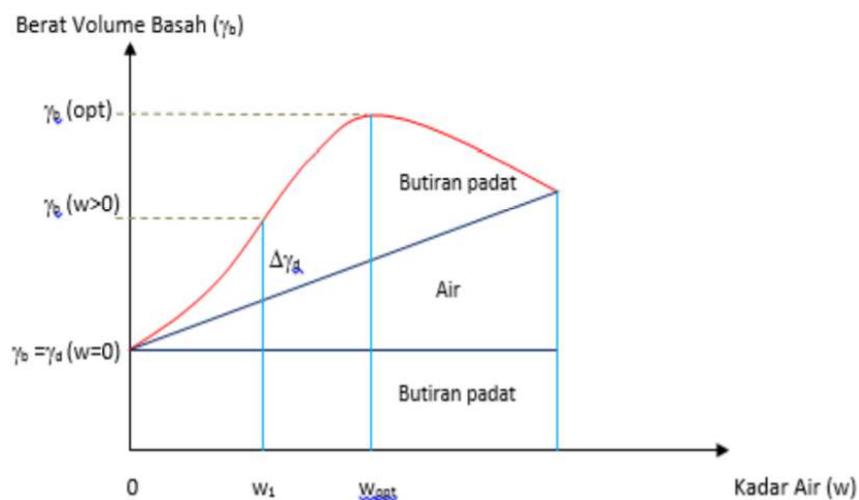
pada Gambar. 18. jika energi pemadatan meningkat, berat satuan kering maksimum pemadatan juga meningkat sementara kadar air optimum menurun sampai batas tertentu.



Gambar. 18. Kurva pemadatan (Han, 2015)

Pada proses pemadatan akan memperlihatkan fenomena bahwa “berat volume kering” akan bertambah seiring penambahan kadar air. Pada kadar air nol ( $w=0$ ), berat volume tanah basah ( $\gamma_b$ ) akan sama dengan berat volume tanah kering ( $\gamma_d$ ). Apabila kadar air ditambahkan secara berangsur-angsur dan pemadatan tetap dilakukan dengan nilai usaha pemadatan yang sama, maka berat butiran tanah per satuan volume juga akan bertambah. Pada saat kadar air melampaui kadar air tertentu, terlihat fenomena lain bahwa kenaikan kadar air justru akan mengurangi berat volume kering pada tanah, maka nilai kadar air tersebut

dinamakan “kadar air optimum”. Menurunkan nilai beratvolume kering pada kadar air optimum tersebut, karena air yang ditambahkan bukan lagi melunakkan partikel tanah, tetapi justru mengisi rongga yang seharusnya diisi oleh butiran padat. Untuk menjelaskan korelasi antara penambahan kadar air dengan perubahan berat volume tanah, seperti yang diperlihatkan pada gambar berikut.



Gambar. 19. Kadar Air vs Berat Volume pada Pemadatan

### I. Metode Perbaikan Tanah dengan Rapid Impact Compaction (RIC)

Salah satu metode pemadatan dinamis lapisan timbunan tebal yang dikenal saat ini diantaranya adalah Rapid Impact Compaction. Metode ini adalah pemadatan tanah secara dinamis dengan konsep Low Energi Dynamic Compaction. Peralatan utama Rapid Impact Compaction berupa massa penumbuk yang di jatuhkan dari ketinggian tertentu. Hal yang membedakan metode ini dengan Dynamic Compaction adalah

penggunaan massa penumbuk yang lebih ringan, tinggi jatuh yang lebih rendah namun dengan frekuensi tumbukan yang lebih tinggi, sehingga total kumulatif energi yang dihasilkan pada metode RIC lebih besar daripada metode Dynamic Compaction (DC) dalam satuan waktu yang sama. (Becker, 2011)(Mohammed et al., 2013)

Dilaboratorium pengaruh usaha pemadatan umumnya di uji menggunakan standard proctor maupun modified proctor dengan mengacu pada kurva hasil pemadatan. Telah umum di ketahui bahwa jika energi usaha pemadatan persatuan volume tanah berubah maka kecenderungannya adalah kurva pemadatan juga akan berubah dengan meningkatnya usaha pemadatan dengan parameter utamanya adalah berat volume kering dan kadar air.

Menurut Proctor, ada hubungan yang pasti antara kadar air dan berat volume kering yang dipadatkan sebagaimana persamaan (4) dalam hal ini  $w$  (%) persentase kadar air;  $\gamma$  = berat volume tanah.

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{w(\%)}{100}} \quad (10)$$

Untuk berbagai jenis tanah pada umumnya terdapat suatu nilai kadar air optimum tertentu untuk mencapai berat volume kering maksimumnya, kepadatan kering pada kadar air optimum didefinisikan sebagai kepadatan kering maksimum. Berdasarkan Persamaan (10)

setiap peningkatan kadar air yang melebihi kadar air optimum cenderung mengurangi kepadatan kering.

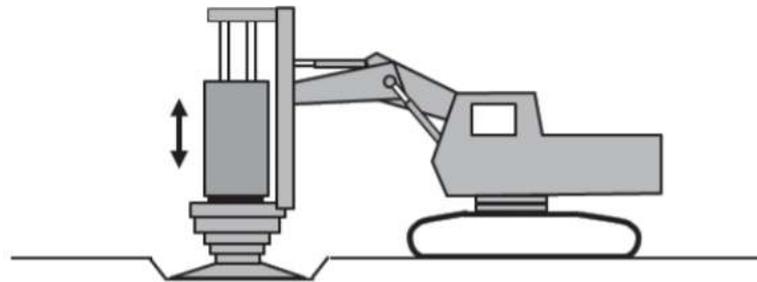
Selain kadar air dan jenis tanah, faktor penting lainnya yang mempengaruhi pemadatan adalah energi per satuan volume. Energi pemadatan per satuan volume yang digunakan untuk uji Proctor ditentukan oleh jumlah tumbukan per lapisan (N); jumlah lapisan per mould (l); berat penumbuk (W) dan tinggi jatuh penumbuk (h) persatuan volume mould (V) yang dapat dinyatakan dengan Persamaan (11)

$$E = \frac{N.l.W.h}{V} \quad (11)$$

Meningkatkan usaha pemadatan akan meningkatkan kepadatan maksimum namun akan mengurangi kadar air optimum. Kurva pemadatan secara umum memperlihatkan bahwa rasio void udara tetap sama pada kepadatan maksimum, sehingga pada kadar air yang tinggi, hanya ada sedikit pertambahan kepadatan yang diperoleh dengan meningkatkan usaha pemadatan. Tanah lempung memiliki kandungan air optimum yang jauh lebih tinggi, akibatnya menurunkan kepadatan kering maksimum. Efek meningkatkan upaya pemadatan juga jauh lebih besar dalam kasus tanah lempung.

Rapid Impact Compactionsuatu metode pemadatan antara conventional shallow compaction and deep dynamic compaction.

Memperkuat geomaterial dengan berulang kali menjatuhkan palu hidrolik yang dipasang pada excavator dengan kecepatan tinggi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 20. Berat palu biasanya 5–12 ton, yang dijatuhkan bebas dari ketinggian 1,2 m di atas kaki baja melingkar dengan diameter 1,0–1,5 m (yang paling umum berdiameter 1,5 m). (Han, 2015)



Gambar. 20. Rapid Impact Compaction

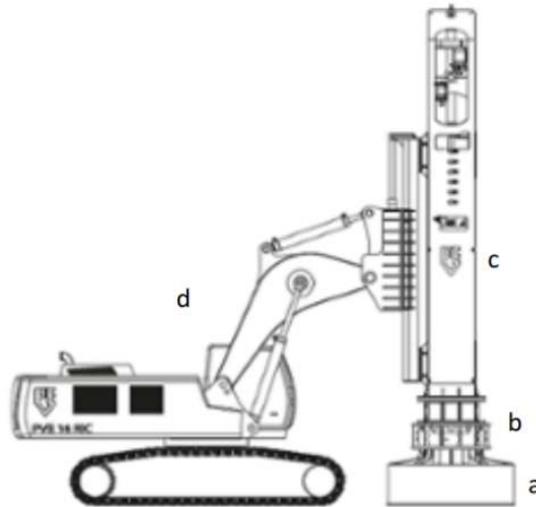
Diantara beberapa metode pemadatan dinamis saat ini telah berkembang metode pemadatan lain yang dikenal sebagai Rapid Impact Compaction, RIC. Jika dibandingkan dengan dynamic compaction yang dapat digunakan sampai kedalaman lebih 10, maka RIC merupakan pemadatan dekat lapisan permukaan dengan kedalaman efektif pemadatan 4-10 m, jelas jangkauan pemadatannya lebih tebal dari pemadatan standar yang kurang dari 1m, Tingkat kedalaman tergantung pada jenis dan sifat geomaterial, muka air tanah, dan energi yang dihasilkan. (Adam & Paulmichl, 2007)

Metode ini umumnya cocok untuk geomaterial granular, termasuk kerikil, pasir, lanau, timbunan (yaitu, campuran pasir, lumpur, dan clay), serta limbah industri dan tambang. Metode ini umumnya dapat memperbaiki geomaterial hingga kedalaman 6m(kebanyakan3–4 m)..(Han, 2015).Metode RIC mampu meningkatkan kepadatan tanah sampai 70%, mereduksi penurunan hingga 50%, dengan biaya yang efektif, dapat digunakan pada area yang sulit serta cocok digunakan pada area yang sempit dan luas. (Mohammed et al., 2013)

Peralatan Rapid Impact Compaction, RIC terdiri atas 3 komponen utama Gambar (21); yaitu alas penumbuk (anvil); alur penumbuk (rig) dan penumbuk (hammer; compactor). Peralatan penumbuk Rapid Impact Compaction ditautkankan ke hydraulic excavator sebagai perangkat penopang mekanik yang dapat mengatur frekuensi tumbukan antara 40-60 /menit sebagai ciri metode rapid compaction. (Falkner et al., 2010) (Adam et al., 2011) (Tarawneh & Matraji, 2014).

Metode kerja Rapid Impact Compaction dimulai dengan membuat penataan rencana titik tumbukan (layout), dimana jarak terjauh antara titik tumbukan ditentukan oleh rekomendasi disain dan panjang lengan hydraulic excavator yang digunakan. Urutan titik pemadatan umumnya digunakan dua lintasan, lintasan pertama antara titik terjauh sebagai lintasan primer (Gambar 22a) dan lintasan kedua sebagai lintasan sekunder (Gambar 22b) untuk overlapping titik pemadatan diantara titik pemadatan lintasan primer.

Adapun disain lintasan titik pemadatan dikenal dua tipikal yaitu penataan berbentuk lengkung (Gambar. 22) dan penataan berbentuk bujur sangkar (Gambar. 23).



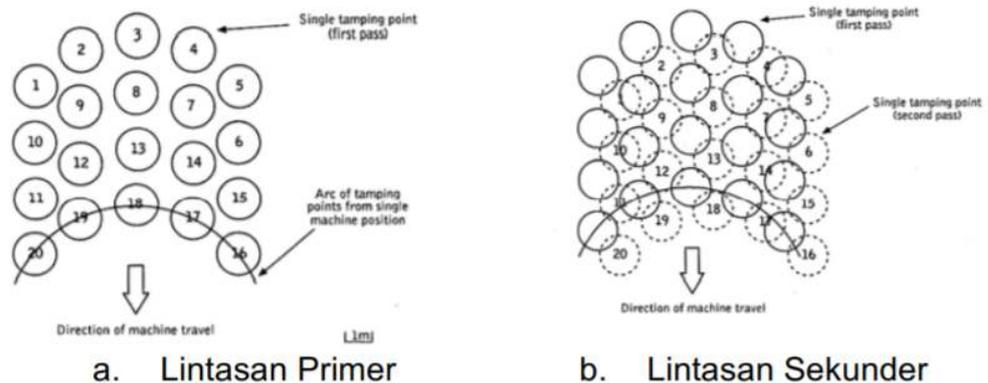
Gambar. 21. Perangkat utama RIC, a. Anvil landasan penumbuk; b. Compactor-Hammer; c. Rig Compactor; d. Perangkat mekanik (diesekogroup.com, 2017)

Pada metode Rapid Impact Compaction, proses pemadatan pada dihentikan (Ghanbari & Hamidi, 2014), jika salah satu dari hal berikut tercapai:

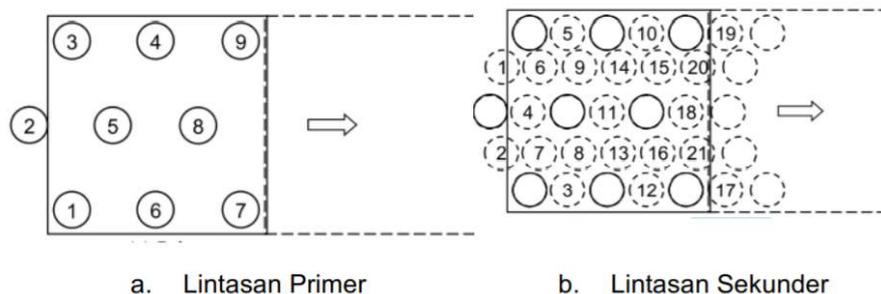
1. Kedalaman lubang amblesan titik pukulan lebi dari 900mm;
2. Final set tumbukan kurang dari 2cm;
3. Jumlah pukulan telah melebihi 90 pukulan;
4. Anvil mengenai lapisan bebatuan sehingga tidak dapat diteruskan.

Pekerjaan terakhir metode Rapid Impact Compaction, setelah semua lintasan selesai dikerjakan adalah penyelesaian perataan permukaan yang dikenal sebagai ironing passing menggunakan plat rata berukuran

1,8m. (Adam and Paulmichl, 2007;Becker, 2011) dimana sebelumnya dilakukan penutupan lubang amblesan dan pemadatan ulang yang dapat menggunakan vibrator roller.



Gambar. 22. Tipikal tata letak titik pemadatan berbentuk lengkung (Adam and Paulmichl, 2007)



Gambar. 23. Tipikal tata letak titik pemadatan berbentuk bujur sangkar, (Adam and Paulmichl, 2007)

Kontrol hasil pemadatan rapid impact compaction dilakukan dengan membandingkan tingkat kepadatan sebelum dan setelah dilakukan pemadatan, jenis pengujian yang umum digunakan adalah korelasi derajat kepadatan dengan hasil CPT dan SPT pada titik pengujian, atau pengujian langsung menggunakan loading test, (Mohammed et al., 2013).

Parameter energi pemadatan metode, RIC ditentukan oleh berat penumbuk (Compactor); berat dan luas geometri landasan penumbuk (anvil); frekuensi tumbukan dan kumulatif total tumbukan dalam satu siklus pemadatan pada titik tumbukan yang sama. Pada metode pemadatan Rapid Impact Compaction, penumbuk dijatuhkan pada alas penumbuk yang ditempatkan diatas permukaan tanah secara tetap, dalam hal ini besarnya kecepatan sebelum dan setelah terjadi tumbukan menurut (Falkner et al., 2010) yang diturunkan dari persamaan momentum dapat dihitung dengan persamaan 12 dan 13 sebagai berikut :

$$V_H = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (12)$$

$$V_F = \frac{2 \cdot W_H \cdot V_H}{W_H + W_F} \quad (13)$$

Dimana :

h = tinggijatuh, m

W<sub>H</sub> = berat penumbuk, kg

W<sub>F</sub> = Berat alas penumbuk, kg

g = gravitasi, m/det<sup>2</sup>

V<sub>H</sub> = Kecepatan penumbuk pada saat terjadi tumbukan, m/det

V<sub>F</sub> = Kecepatan pelat alas penumbuk dan penumbuk sesaat setelah terjadi tumbukan, m/det

## J. Matriks Studi Terdahulu

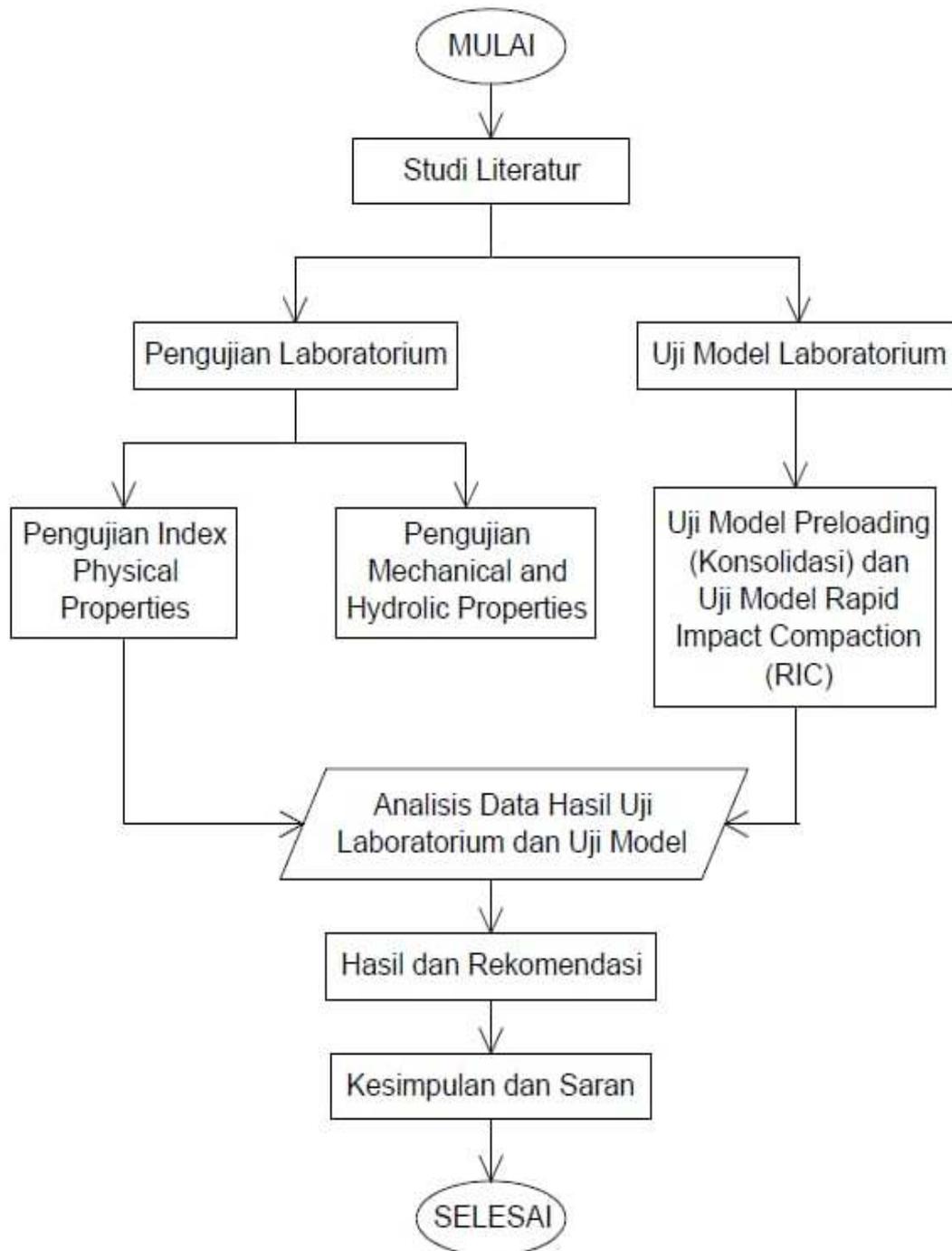
Penelitian ini memakai dasar beberapa penelitian yang pernah dilakukan. Dari berbagai penelitian yang menyangkut perbaikan tanah lunak dengan metode *preloading*, pemasangan PVD, penggunaan metode Rapid Impact Compaction.

Penelitian ini memakai dasar beberapa penelitian yang pernah dilakukan. Dari berbagai penelitian yang menyangkut perbaikan tanah lunak dengan metode *preloading*, pemasangan Prefabricated Vertical Drain. Hingga pematatan dengan menggunakan Rapid Impact Compaction. Dibawah ini pada Tabel 9, dijelaskan mengenai matriks penelitian terdahulu hingga saat ini mengenai topik perbaikan tanah lunak dengan topik utama induksi thermal.

Matriks disusun berdasarkan mapping 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 kebaruaran yang menjadi syarat dari penelitian doktor.

Cara yang dilakukan adalah dengan membangun suatu alur yang menggambar pohon pengetahuan, sehingga terstruktur bagian mana yang belum pernah diteliti sebelumnya dan mempermudah peneliti-peneliti berikutnya.

### K. Kerangka Pikir Penelitian



Gambar 24. Kerangka Pikir Penelitian

