

145/FT.EKS.01/SKRIP/02/2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PARAMETER PIPA DALAM TANAH
TERLIKUIFAKSI**

SKRIPSI

CUT YUNITA

0806369190

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
DEPOK
JANUARI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

PARAMETRIC STUDY OF PIPES IN LIQUEFIED SOIL

SKRIPSI

CUT YUNITA

0806369190

FACULTY OF ENGINEERING

CIVIL ENGINEERING STUDY PROGRAM

DEPOK

JANUARY 2012

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Cut Yunita

NPM : 0806369190

Tanda tangan : 

Tanggal : 18 Januari 2012

SHEET OF ORIGINALITY STATEMENT

**This Script is truly my own work,
and all the sources either quoted or referred
I stated that all is true.**

Name : Cut Yunita

NPM : 0806369190

Signature : 

Date : 18 Januari 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Cut Yunita
NPM : 0806369190
Program studi : Teknik Sipil
Tanggal : 18 Januari 2012
Judul Skripsi : Studi Parameter Pipa dalam Tanah Terlikuifaksi

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Widjojo A. Prakoso, M.Sc, Ph.D

(.....)

Penguji I : Prof.Dr.Ir. Tommy Ilyas

(.....)

Penguji II : Dr.Ir. Damrizal Damoerin, M.Sc

(.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 18 Januari 2012

SHEET OF APPROVAL

The final assignment submitted by :

Name : Cut Yunita
NPM : 0806369190
Study Program : Civil Engineering
Date : 18 January 2011
Title : Parametric Study of Pipes in Liquefied Soil

Has already examined successfully by the Examiner Board and accepted as the one of the requirements needed to obtain The Bachelor Degree in Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Indonesia

EXAMINER BOARD

Counselor : Ir. Widjojo A. Prakoso, M.Sc, Ph.D

(.....)

Examiner I : Prof.Dr.Ir. Tommy Ilyas

(.....)

Examiner II : Dr.Ir. Damrizal Damoerin, M.Sc

(.....)

Approved in : Depok

Date : 18 January 2012

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai civitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Cut Yunita
NPM : 0806369190
Program Studi : Teknik Sipil
Departemen : Teknik Sipil
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

“Studi Parameter Pipa Dlam Tanah Terlikuifaksi”

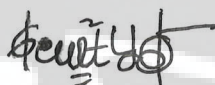
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Depok

Pada tanggal: 18 Januari 2011

Yang menyatakan



(Cut Yunita)

ABSTRAK

Nama : Cut Yunita

Program Studi : Teknik Sipil

Judul : Studi Parameter Pipa dalam Tanah Terlikuifaksi

Likuifaksi adalah salah satu fenomena dari *Permanent Ground Deformation* (PGD) yang terjadi pada kondisi gempa dengan skala besar, dimana tanah pasir jenuh kehilangan kekuatannya akibat meningkatnya tekanan air pori secara berlebihan dan menurunnya tegangan efektif tanah karena proses pemadatan yang terjadi akibat adanya getaran gempa. Tanah pasir ini kemudian memiliki perilaku lebih mirip cairan daripada tanah itu sendiri. Kondisi ini sangat berbahaya bagi jaringan pipa bawah tanah karena tanah sudah tidak mampu lagi menyokong pipa sehingga dapat mengakibatkan kerusakan pada pipa seperti tertekuk atau terangkatnya pipa keluar dari permukaan tanah. Ada beberapa bentuk kegagalan tanah akibat likuifaksi antara lain kegagalan aliran, pergerakan lateral tanah (*lateral spreading*), kegagalan daya dukung, kegagalan pergoyangan tanah dan penurunan tanah yang berbeda.

Dan penelitian ini dilakukan untuk melihat pengaruh bentuk kegagalan tanah akibat likuifaksi jenis *displacement* horizontal tanah (*lateral spreading*) terhadap jaringan pipa bawah tanah. Penelitian dilakukan dengan menggunakan bantuan program AutoPIPE V8i yang merupakan suatu program *engineering* untuk analisis tegangan pipa yang bertujuan untuk melihat respon pipa akibat terjadinya *displacement* horizontal tanah tersebut. Penelitian dilakukan terhadap pipa baja menerus grade API 5L X65 dengan variasi diameter 16 inci dengan ketebalan dinding 12.7 mm dan diameter 14 inci dengan ketebalan dinding 11.1 mm. Pipa ini merupakan pipa bawah tanah penyalur gas yang dikubur pada kedalaman 1.5 meter dari permukaan tanah. Variasi lebar area tanah terlikuifaksi dibuat 10 m, 20 m, 30 m, 40 m dan 50 m. Hasil dari analisis akan memperlihatkan rasio tegangan pipa dan juga gaya dalam yang dialami pipa akibat *displacement* horizontal tanah.

Hasil analisis dengan bantuan program komputer Autopipe V8i menunjukkan bahwa pipa meskipun dengan diameter lebih besar akan tetap mengalami kegagalan jika terjadi likuifaksi pada tanah disekelilingnya. Maka sebaiknya sebelum menentukan rute pipa, sebaiknya terlebih dahulu dilakukan investigasi geoteknik untuk melihat area tanah yang berpotensi mengalami likuifaksi jika terjadi gempa dengan skala besar. Jika memungkinkan rute pipa harus dihindarkan dari area tanah yang berpotensi likuifaksi tersebut, namun jika tidak memungkinkan maka diperlukan tindakan perbaikan tanah disekeliling jalur pipa bawah tanah tersebut.

Kata kunci :

Tanah Pasir, Pipa Bawah Tanah, *Permanent Ground Deformation* (PGD), Likuifaksi, *Displacement* Horizontal Tanah, AutoPIPE V8i

ABSTRACT

Name : Cut Yunita
Study Program : Civil Engineering
Title : Parametric Study of Pipes in Liquefied Soil.

Liquefaction is one of the Permanent Ground Deformation (PGD) phenomena which occurs in a large-scale earthquake condition, where the saturated sandy soil loses its strength due to the increase in excess pore water pressure and reduced effective stress due to soil compaction processes which is induced by the earthquake shaking. This sandy soil is then behave more like fluids than the soil itself. This condition is very dangerous for the underground pipeline because the soil is no longer able to support the pipes so that it can cause damage to the pipeline such as buckling, pipe lift off from the surface of the soil, etc. There are several types of ground failure induced by liquefaction, those are flow failure, soil lateral movement (lateral spreading), loss of bearing strength, ground oscillation and differential settlement.

And this research is conducted to see the effect of soil failure kind of horizontal ground displacement (lateral spreading) induced by liquefaction to the underground pipelines. The research is performed by using AutoPIPE V8i program which is an engineering program for pipe stress analysis to see the response of the pipes due to the horizontal displacement of the soil. Research is conducted to a continuous steel pipes grade API 5L X65 with a variation of diameter of 16 inches with a wall thickness of 12.7 mm and a diameter of 14 inches with a wall thickness of 1.11 mm. This pipes is a gas transmission underground pipeline which buried at a depth of 1.5 meters from the ground level. Variations of the width of liquefied soil area is made for 10 m, 20 m, 30 m, 40 m and 50 m. The results of the analysis will show the pipe stress ratio and also internal force and moment occurred to the pipe due to ground horizontal displacement.

The analysis result by using AutoPIPE V8i computer program shown that eventhough the pipes with larger diameter would still experience a failure if the liquefaction occurred to the surrounding soil of the pipes. So, before determining the pipeline route, it shall be better to do a geotechnical investigations to observe the soil area which is potential for the liquefaction to occur if a large scale of the earthquake happened. If possible the pipeline route should be avoided from the potential liquefied soil area, however if it is impossible to do so then a soil improvement around the pipeline route will be required.

Keywords :

Sand, Underground Pipes, Permanent Ground Deformation (PGD), Liquefaction, Ground Horizontal Displacement, AutoPIPE V8i

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah S.W.T yang cinta, kasih sayang dan pertolonganNya tidak pernah berhenti mengalir sehingga tugas akhir ini dapat selesai.

Penyusunan tugas akhir yang berjudul ” Studi Parameter Pipa dalam Tanah Terlikuifaksi” ini merupakan salah satu syarat untuk dapat menyelesaikan jenjang pendidikan Sarjana di Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Dalam menyelesaikan penulisan tugas akhir ini penulis banyak mendapat bantuan baik moril, materil maupun spirituil dari berbagai pihak, sehingga pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada :

1. Orang tua saya Ayahanda Teuku Yunis Indra dan khususnya almarhumah Ibunda Cut Nur'aini yang sangat saya sayangi dan saya cintai. Semoga Allah S.W.T mengasihi mereka sebagaimana mereka mengasihi saya sedari kecil.
2. Bapak Prof. Dr.Ir Irwan Katili, DEA selaku Kepala Departemen Teknik Sipil UI.
3. Bapak Ir. Widjojo A. Prakoso, M.Sc, Ph.D sebagai Dosen Pembimbing yang selalu membantu dalam menyelesaikan skripsi ini.
4. Dewan Penguji Bapak Prof.Dr.Ir. Tommy Ilyas dan Bapak Dr.Ir. Damrizal Damoerin, M.Sc yang memberikan masukan – masukan untuk kesempurnaan skripsi ini.
5. Para Dosen Teknik Sipil Universitas Indonesia yang telah memberikan ilmu pengetahuannya kepada saya yang sangat membantu dalam penulisan tugas akhir ini.
6. Seluruh keluarga dan sanak famili saya : Dek Novi, Bunda Cut Ruhaya, Ayahsyik Indra, Kak Asih dan Bang Adrizal, Uni Emi dan Bang Ambo, Mbak Irna dan Mas Budi, BigB Rizaluddin, Kak Ita dan Bang Petra, Fitri dan Etek Dan, Pak Anzir dan Ibu serta semua yang tidak dapat disebutkan yang selalu memberikan dukungan baik berupa doa, semangat juga bantuan yang sangat berarti bagi saya.
7. Rekan – rekan kerja dan senior – senior saya di Structural/Civil/Pipeline Department PT. Technip Indonesia : Ibu Salamah, Pak Jaya Kumar, Pak Ong Yeancu, Pak Ali, Pak Yuddy, Pak Gani, Pak Heru, Bagas, Suparna, Denia, Mbak Mary, Mbak Ovi, Pak Widodo, Pak Sarno, Fantri, Dickky, Oridian, Dito,

dan semua yang tidak dapat disebutkan yang selalu bersedia membantu dalam berbagai hal.

8. Sahabat-sahabat saya, Kartika, Sari, Garlina, Ira, Anita, Muhammad Asrih, Ferial, Saptoyo Aji, Indira, Maya Siska, Syukur Hidayat, Mulyadi Yuniarto, Sumarni, Lia Andika, Mohd Hanafi, Uthie dan semua yang tidak bisa disebutkan satu per satu yang selalu memberikan dukungan dan bantuan yang sangat berharga bagi saya.
9. Pihak-pihak yang terlibat secara langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan tugas akhir ini.

Semoga segala bentuk dukungan dan bantuan tulus ikhlas yang diberikan tersebut mendapat imbalan yang tak terhingga dari Allah S.W.T.

Saya menyadari bahwa tugas akhir ini tidak terlepas dari kekurangan-kekurangan yang terjadi karena keterbatasan kemampuan saya sehingga kritik dan saran merupakan suatu hal yang sangat berharga untuk menyempurnakan isi tugas akhir saya ini. Semoga tugas akhir ini dapat berguna di kemudian hari.

Jakarta, Januari 2012

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Tujuan Penelitian	2
1.3 Ruang Lingkup	3
1.4 Sistematika Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Tanah	5
2.1.1 Tanah Pasir	5
2.1.2 Kuat Geser Tanah Pasir.....	6
2.1.3 Elastisitas Pada Tanah Pasir	8
2.2 Deformasi Permanen Tanah/Permanent Ground Deformation (PGD)	10
2.3 Likuifaksi.....	12
2.3.1 Efek Likuifaksi Terhadap Tanah.....	13
2.3.2 Kondisi – kondisi Potensial untuk Terjadinya Likuifaksi	17
2.3.3 Kuat Geser Tanah Terlikuifaksi	18
2.3.4 Likuifaksi yang Mengakibatkan Displacement Horizontal Tanah	15
2.4 Pipa.....	19
2.4.1 Pipa Bawah Tanah.....	20

2.5	Interaksi Pipa dan Tanah (Pegas Tanah).....	22
2.5.1	Properti Tanah Arah Longitudinal.....	23
2.5.2	Properti Tanah Arah Transversal Horizontal.....	24
2.5.3	Properti Tanah Arah Vertikal Ke Bawah.....	26
2.5.4	Properti Tanah Arah Vertikal Ke Atas.....	28
2.6	AutoPIPE.....	30

BAB III METODE PENELITIAN

3.1	Penjelasan Penelitian	31
3.2	Diagram Alir Penelitian.....	32
3.3	Penjelasan Diagram Alir Penelitian	33
3.3.1	Menentukan Properti Pipa	33
3.3.2	Mengolah Data Tanah.....	33
3.3.3	Menghitung Displacement Horizontal Tanah dan Pegas Tanah	35
3.3.4	Pemodelan Pipa dan Pegas Tanah pada AutoPIPE	37
3.3.5	Cek Rasio Tegangan pada Pipa dan Catat Gaya Dalam serta Deformasi Pipa.....	42
3.3.6	Analisa Perubahan Deformasi dan Gaya Dalam Pipa Akibat Kondisi Berbeda	43

BAB IV ANALISIS

4.1	Perhitungan Displacement Horizontal Tanah.....	44
4.2	Perhitungan Pegas Tanah.....	52
4.2.1	Pegas Tanah untuk Pipa 14 inci.....	53
4.2.2	Pegas Tanah untuk Pipa 16 inci	55
4.3	Perhitungan Gaya Tanah Akibat <i>Displacement</i> Horizontal Tanah	58
4.3.1	Gaya Tanah untuk Pipa 14 inci	58
4.3.2	Gaya Tanah untuk Pipa 16 inci	63
4.4	Hasil Pemodelan AutoPIPE	
4.4.1	Hasil Pemodelan AutoPIPE untuk Pipa 14 inci	68
4.4.2	Hasil Pemodelan AutoPIPE untuk Pipa 16 inci	72

4.5	Analisa hasil pemodelan AutoPIPE	76
------------	---	-----------

BAB V PENUTUP

5.1	Kesimpulan	80
5.2	Saran	81

DAFTAR PUSTAKA

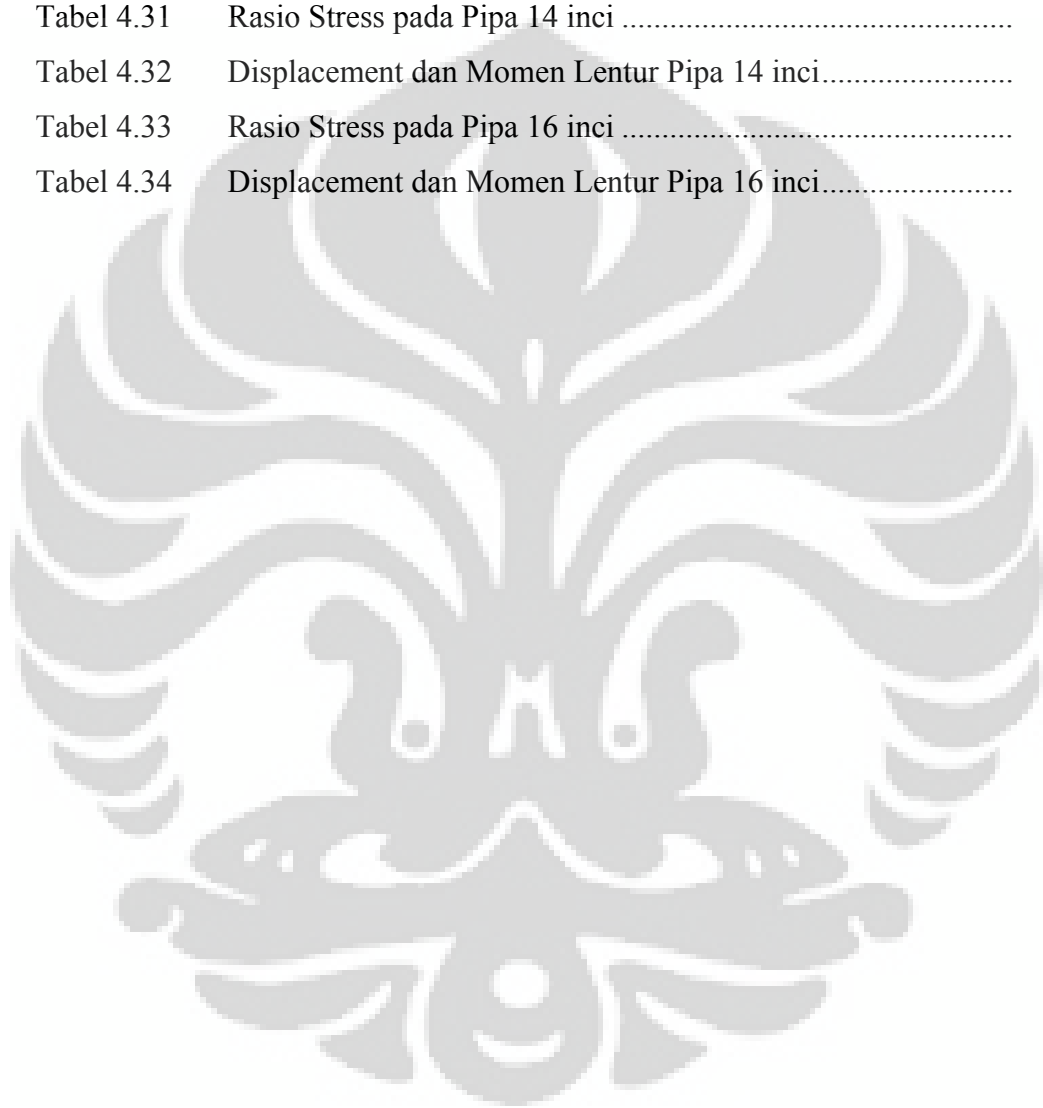


DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Klasifikasi Jenis Ukuran Pasir	6
Tabel 2.2	Rentang Nilai ϕ untuk Pasir	8
Tabel 2.3	Nilai E_s	9
Tabel 2.4	Jangkauan Nilai Poisson (μ)	9
Tabel 2.5	Bahaya Likuifaksi Berdasarkan Kombinasi Modified Mercally Intensity dan Kategori Potensi Likuifaksi	18
Tabel 2.6	Nilai k_v untuk Pasir	25
Tabel 2.7	Koefisien Daya Tahan Transversal Pipa pada Pasir (R_s).....	26
Tabel 2.8	Berat Isi Efektif Tanah Berdasarkan Lokasi Muka Air Tana	27
Tabel 3.1	Properti Pipa dan Gas	33
Tabel 3.2	Properti Tanah Terlikuifaksi	35
Tabel 4.1	Data Tanah Terlikuifaksi.....	44
Tabel 4.2	Displacement Horizontal Tanah.....	47
Tabel 4.3	Distribusi <i>Displacement</i> Horizontal Tanah untuk Lebar Area Tanah Terlikuifaksi = 10 m.....	48
Tabel 4.4	Distribusi <i>Displacement</i> Horizontal Tanah untuk Lebar Area Tanah Terlikuifaksi = 20 m.....	48
Tabel 4.5	Distribusi <i>Displacement</i> Horizontal Tanah untuk Lebar Area Tanah Terlikuifaksi = 30 m.....	49
Tabel 4.6	Distribusi <i>Displacement</i> Horizontal Tanah untuk Lebar Area Tanah Terlikuifaksi = 40 m.....	50
Tabel 4.7	Distribusi <i>Displacement</i> Horizontal Tanah untuk Lebar Area Tanah Terlikuifaksi = 50 m.....	51
Tabel 4.8	Properti Tanah untuk Perhitungan Pegas Tanah	52
Tabel 4.9	Properti Pipa 14 inci untuk Perhitungan Pegas Tanah.....	53
Tabel 4.10	Perhitungan Faktor – Faktor Tanah dan Berat Tanah untuk Pipa 14 inci	53
Tabel 4.11	Daya Tahan Tanah Arah Transversal Horizontal untuk Pipa 14 inci	54

Tabel 4.12	Daya Tahan Tanah Arah Transversal Horizontal untuk Pipa 14 inci	54
Tabel 4.13	Daya Tahan Tanah Arah Transversal Horizontal untuk Pipa 14 inci	55
Tabel 4.14	Daya Tahan Tanah Arah Transversal Horizontal untuk Pipa 14 inci	55
Tabel 4.15	Properti Pipa 16 inci untuk Perhitungan Pegas Tanah.....	55
Tabel 4.16	Perhitungan Faktor – Faktor Tanah dan Berat Tanah untuk Pipa 16 inci	56
Tabel 4.17	Daya Tahan Tanah Arah Transversal Horizontal untuk Pipa 16 inci	57
Tabel 4.18	Daya Tahan Tanah Arah Transversal Horizontal untuk Pipa 16 inci	57
Tabel 4.19	Daya Tahan Tanah Arah Transversal Horizontal untuk Pipa 16 inci	57
Tabel 4.20	Daya Tahan Tanah Arah Transversal Horizontal untuk Pipa 16 inci	57
Tabel 4.21	Gaya Tanah Akibat <i>Displacement</i> Horizontal Tanah (F_i) untuk Pipa 14 inci dan Lebar Area Tanah Terlikuifaksi = 10 m..	59
Tabel 4.22	Gaya Tanah Akibat <i>Displacement</i> Horizontal Tanah (F_i) untuk Pipa 14 inci dan Lebar Area Tanah Terlikuifaksi = 20 m..	59
Tabel 4.23	Gaya Tanah Akibat <i>Displacement</i> Horizontal Tanah (F_i) untuk Pipa 14 inci dan Lebar Area Tanah Terlikuifaksi = 30 m..	60
Tabel 4.24	Gaya Tanah Akibat <i>Displacement</i> Horizontal Tanah (F_i) untuk Pipa 14 inci dan Lebar Area Tanah Terlikuifaksi = 40 m..	61
Tabel 4.25	Gaya Tanah Akibat <i>Displacement</i> Horizontal Tanah (F_i) untuk Pipa 14 inci dan Lebar Area Tanah Terlikuifaksi = 50 m..	62
Tabel 4.26	Gaya Tanah Akibat <i>Displacement</i> Horizontal Tanah (F_i) untuk Pipa 16 inci dan Lebar Area Tanah Terlikuifaksi = 10 m..	63
Tabel 4.27	Gaya Tanah Akibat <i>Displacement</i> Horizontal Tanah (F_i) untuk Pipa 16 inci dan Lebar Area Tanah Terlikuifaksi = 20 m..	64

Tabel 4.28	Gaya Tanah Akibat <i>Displacement</i> Horizontal Tanah (F_i) untuk Pipa 16 inci dan Lebar Area Tanah Terlikuifaksi = 30 m..	65
Tabel 4.29	Gaya Tanah Akibat <i>Displacement</i> Horizontal Tanah (F_i) untuk Pipa 16 inci dan Lebar Area Tanah Terlikuifaksi = 40 m..	66
Tabel 4.30	Gaya Tanah Akibat <i>Displacement</i> Horizontal Tanah (F_i) untuk Pipa 16 inci dan Lebar Area Tanah Terlikuifaksi = 50 m..	67
Tabel 4.31	Rasio Stress pada Pipa 14 inci	68
Tabel 4.32	Displacement dan Momen Lentur Pipa 14 inci.....	69
Tabel 4.33	Rasio Stress pada Pipa 16 inci	72
Tabel 4.34	Displacement dan Momen Lentur Pipa 16 inci.....	73



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram Skema PGD Akibat Kegagalan Tanah.....	11
Gambar 2.2	Pipa Melintasi Zona PGD yang Membentuk Sudut.....	11
Gambar 2.3	PGD Longitudinal, Pipa Melintasi Zona PGD Searah dengan Pergerakan Tanah	12
Gambar 2.4	PGD Transverssal, Pipa Melintasi Zona PGD Melintang dengan Pergerakan Tanah.....	12
Gambar 2.5	Efek – Efek Potensial Likuifaksi.....	13
Gambar 2.6	Kegagalan Aliran	14
Gambar 2.7	Lateral Spreading	15
Gambar 2.8	Kegagalan Pergoyangan Tanah.....	15
Gambar 2.9	Kehilangan Daya Dukung.....	16
Gambar 2.10	Penurunan yang Berbeda.....	17
Gambar 2.11	Pendekatan Pemodelan Pipa	22
Gambar 2.12	Faktor Daya Dukung.....	27
Gambar 2.13	Faktor <i>Breakout</i> (F_c).....	29
Gambar 2.14	Faktor <i>Breakout</i> (F_q)	29
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	32
Gambar 3.2	Korelasi N-SPT dengan Program AllPipe	34
Gambar 3.3	Distribusi Displacement Horizontal Tanah.....	36
Gambar 3.4	Membuat File Baru pada AutoPIPE.....	38
Gambar 3.5	Memasukkan Properti Pipa	38
Gambar 3.6	Membuat Bentuk Pipa.....	39
Gambar 3.7	Memasukkan Properti Tanah	40
Gambar 3.8	Pemodelan Tanah untuk Kondisi Sebelum Likuifaksi.....	40
Gambar 3.9	Pemodelan Tanah untuk Kondisi Likuifaksi.....	40
Gambar 3.10	Memasukkan <i>Concentrated Force</i>	41
Gambar 3.11	<i>Concentrated Force</i>	41
Gambar 4.1	Elevasi dan Ketebalan Lapisan Tanah Terlikuifaksi.....	46
Gambar 4.2	Grafik Momen Lentur Pipa 14 inci untuk Lebar Area Likuifaksi 10 m	70

Gambar 4.3	Grafik Momen Lentur Pipa 14 inci untuk Lebar Area Likuifaksi 20 m	70
Gambar 4.4	Grafik Momen Lentur Pipa 14 inci untuk Lebar Area Likuifaksi 30 m	71
Gambar 4.5	Grafik Momen Lentur Pipa 14 inci untuk Lebar Area Likuifaksi 40 m	71
Gambar 4.6	Grafik Momen Lentur Pipa 14 inci untuk Lebar Area Likuifaksi 50 m	72
Gambar 4.7	Grafik Momen Lentur Pipa 16 inci untuk Lebar Area Likuifaksi 10 m	74
Gambar 4.8	Grafik Momen Lentur Pipa 16 inci untuk Lebar Area Likuifaksi 20 m	74
Gambar 4.9	Grafik Momen Lentur Pipa 16 inci untuk Lebar Area Likuifaksi 30 m	75
Gambar 4.10	Grafik Momen Lentur Pipa 16 inci untuk Lebar Area Likuifaksi 40 m	75
Gambar 4.11	Grafik Momen Lentur Pipa 16 inci untuk Lebar Area Likuifaksi 50 m	76
Gambar 4.12	Grafik Momen Lentur Maksimum Pipa 14 inci VS Pipa 16 inci	77
Gambar 4.13	Grafik Gabungan Momen Lentur Pipa 14 inci.....	78
Gambar 4.14	Grafik Gabungan Momen Lentur Pipa 16 inci.....	78
Gambar 4.15	Grafik Rasio Stress Kombinasi Pipa 14 inci VS Pipa 16 inci..	79

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Gempa dapat menyebabkan deformasi tanah sementara atau *Transient Ground Deformation* (TGD) dan deformasi tanah yang permanen atau *Permanent Ground Deformation* (PGD), keduanya berakibat buruk untuk sistem perpipaan bawah tanah. TGD adalah respon dinamik dari tanah, TGD dapat menyebabkan retakan dan celah pada tanah akibat dari dorongan pergerakan tanah yang kuat yang menimbulkan regangan geser dan tarik setempat yang melebihi kekuatan tanah. Dan PGD adalah pergerakan tanah yang tidak terkontrol yang terjadi setelah getaran gempa berhenti, PGD sering mengakibatkan *displacement* yang besar dan dapat terjadi berupa patahan permukaan tanah (*fault rupture*), likuifaksi dan tanah longsor.

Pada kawasan dengan aktivitas seismik yang tinggi, *Permanent Ground Deformation* (PGD) berupa likuifaksi tanah telah diidentifikasi sebagai bahaya besar terhadap struktur jaringan pipa bawah tanah. Likuifaksi didefinisikan sebagai perubahan bentuk material tanah non kohesif dari bentuk padat menjadi bentuk cair sebagai konsekuensi akibat peningkatan tekanan air pori dan penurunan tegangan efektif (Youd, 1973). Likuifaksi pada suatu lapisan tanah tidak selalu berarti bahwa kegagalan tanah terjadi, tetapi ketika likuifaksi dikombinasikan dengan kondisi geologi tertentu, hal ini dapat menimbulkan pergerakan tanah secara permanen dalam skala besar. Kondisi yang paling mungkin mengakibatkan terjadinya likuifaksi adalah jika terdapat lapisan pasir lepas yang dikombinasikan dengan muka air tanah yang tinggi. Kondisi ini kerap kali ditemukan pada lapisan – lapisan delta muda, terusan sungai, dataran banjir, lapisan – lapisan Aeolian dan juga pada timbunan lepas atau dipadatkan sebagian.

Ada beberapa bentuk kegagalan tanah yang berkaitan dengan likuifaksi antara lain kegagalan aliran (*flow failures*), pergerakan lateral (*lateral spreading*), kegagalan daya dukung (*bearing capacity failures*), pergerakan lapisan permukaan tanah secara terpisah dari lapisan tanah terlikuifaksi dibawahnya (*ground oscillation*), daya angkat (*buoyancy*) dan juga penurunan (*settlement*). *Lateral Spreading* adalah salah satu

bentuk deformasi tanah yang paling umum yang berkaitan dengan likuifaksi saat terjadi gempa. Bentuk deformasi ini melibatkan pergerakan lateral material tanah yang disebabkan likuifaksi dari lapisan dibawahnya. *Displacement* tanah yang terjadi biasanya berkisar antara 1 (satu) sampai dengan beberapa meter. Pergerakan ini juga kerap kali disertai keretakan tanah.

Lateral Spreading dapat mengakibatkan masalah khusus bagi jaringan pipa bawah tanah yang terdapat pada area likuifaksi. Karena pada saat terjadi pergerakan tanah, jaringan pipa akan terbebani oleh tekanan tanah tersebut. Hal ini dapat mengakibatkan kerusakan yang fatal pada jaringan pipa seperti terjadinya *buckling* yang dapat berakibat pada kebocoran dan akan menimbulkan kerugian besar untuk masyarakat di sekitarnya karena jaringan pipa bawah tanah ini umumnya berguna untuk menyalurkan pendukung kelangsungan hidup sehari – hari seperti air minum, air limbah, gas, minyak bumi, listrik, dll yang juga dapat menimbulkan malapetaka jika terjadi kebocoran apabila jaringan pipa tersebut termasuk pipa yang membawa zat – zat berbahaya seperti gas dan air limbah . Jaringan pipa tersebar pada area yang sangat luas sehingga sangat mungkin ada bagian dari jaringan pipa ini yang melewati area berpotensi terjadinya likuifaksi saat gempa. Seringkali tidak ada alternatif untuk dapat mengatur ulang rute jaringan pipa. Oleh karena itu, desain jaringan pipa pada kawasan gempa perlu mengidentifikasi area yang potensial terjadinya likuifaksi dan mempertimbangkan potensi terjadinya *displacement* tanah dalam skala besar. Model – model analitis akan sangat membantu dalam mengevaluasi respon jaringan pipa terhadap likuifaksi yang mengakibatkan pergerakan tanah sehingga dapat diambil tindakan – tindakan pencegahan.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis seberapa besar efek dari karakteristik *Permanent Ground Deformation* (PGD) berupa *displacement* horizontal tanah (*lateral spreading*) terhadap pipa bawah tanah. Suatu parameter studi dilakukan dengan menggunakan program komputer AutoPIPE V8i yang akan memperkirakan respon dari jaringan pipa bawah tanah terhadap pergerakan lateral tanah akibat *Permanent Ground Deformation* (PGD) berupa likuifaksi.

1.3 Ruang Lingkup

- Penelitian ini dibatasi hanya untuk melihat reaksi pipa bawah tanah terhadap pengaruh *Permanent Ground Deformation* (PGD) berupa likuifaksi jenis *lateral spreading* (*displacement* horizontal tanah) saja. Sehingga tidak akan dibahas reaksi pipa terhadap respon dinamik tanah/*transient ground deformation* (TGD).
- Penelitian ini akan dilakukan pada pipa baja menerus (*continous welded steel pipe*) sepanjang 200 m yang berisi gas dengan tekanan 14.58 MPa dan suhu maksimum 60° C pada kondisi operasi. Properti pipa yang dipilih adalah pipa baja dengan grade X65 diameter 14 inci (355.6 mm) dengan ketebalan dinding pipa 11.1 mm dan pipa baja diameter 16 inci (406.4 mm) dengan ketebalan dinding pipa 12.7 mm, dimana spesifikasi pipa ini mengacu kepada API 5L, 2004 “Specification for Line Pipe”.
- Untuk properti tanah terlikuifaksi diambil dari data “Laporan Penyelidikan Tanah Proyek Dermaga 108 Tanjung Priok Jakarta Utara” yang dilakukan Laboratorium Mekanika Tanah Fakultas Teknik Universitas Indonesia, dengan variasi area tanah terlikuifaksi 10 m, 20 m, 30 m, 40 m dan 50 m.
- Dan analisis respon pipa bawah tanah akibat pergerakan lateral tanah karena *Permanent Ground Deformation* (PGD) berupa likuifaksi tanah yang akan dilakukan dengan program komputer AutoPIPE ini mengacu kepada peraturan teknis ASME B31.8 (2007) “*Gas Transmission and Distribution Piping System*”.

1.4 Sistematika Penulisan

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menguraikan latar belakang masalah, tujuan penelitian, pembatasan masalah serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menguraikan tentang dasar teori yang berhubungan dengan penelitian guna menunjang dalam pembahasan penelitian.

BAB III METODE PENELITIAN

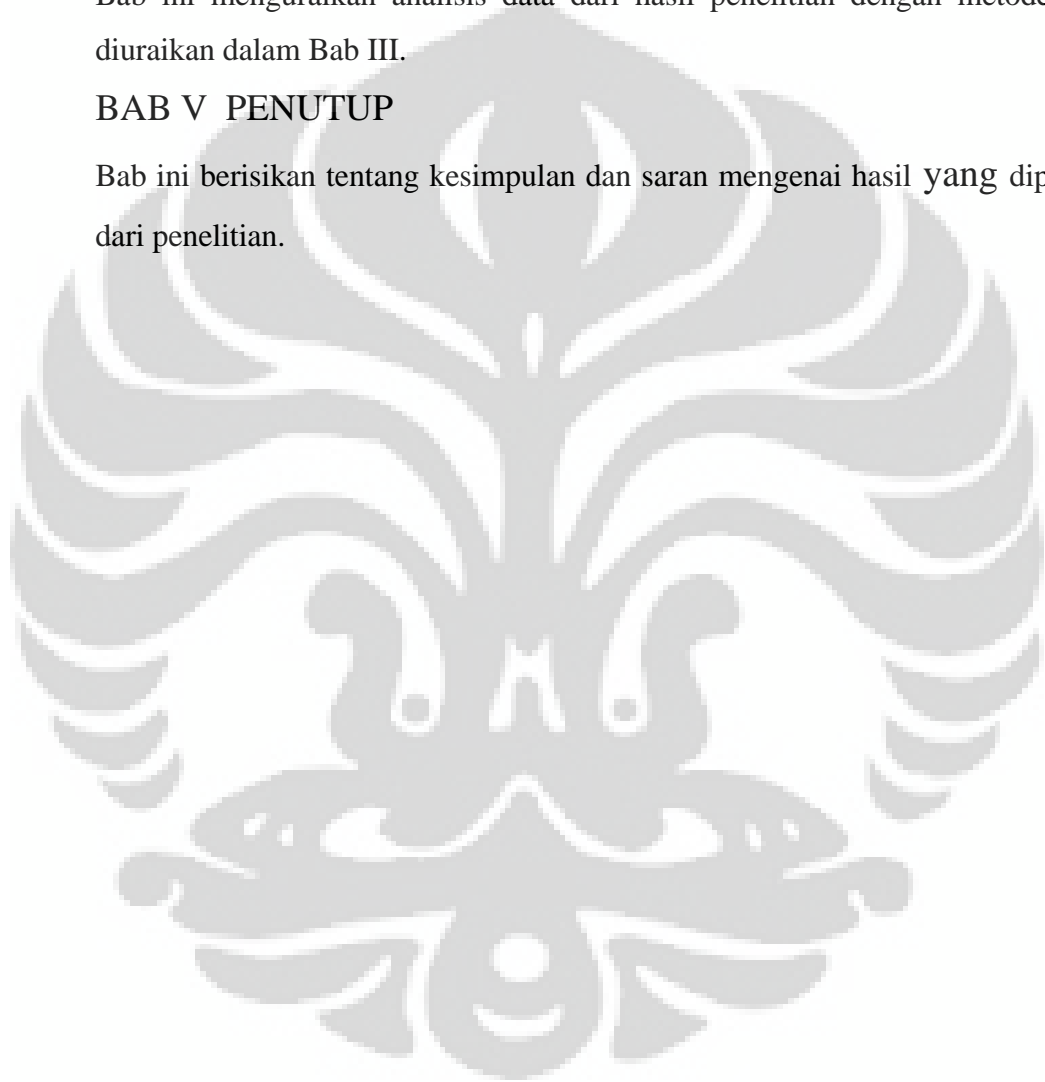
Bab ini menguraikan tentang metode penelitian yang akan digunakan dalam pengumpulan data, metode pengolahan data yang akan digunakan untuk analisa

BAB IV ANALISIS

Bab ini menguraikan analisis data dari hasil penelitian dengan metode yang diuraikan dalam Bab III.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisikan tentang kesimpulan dan saran mengenai hasil yang diperoleh dari penelitian.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanah

Menurut R.F. Craig (1986), tanah adalah akumulasi partikel mineral yang tidak mempunyai atau lemah ikatan antar partikelnya, yang terbentuk karena pelapukan dari batuan. Diantara partikel – partikel tanah terdapat ruang kosong yang disebut pori – pori (*void space*) yang berisikan air dan atau udara. Ikatan yang lemah antara partikel – partikel tanah disebabkan oleh pengaruh karbonat atau oksida yang tersenyawa diantara partikel – partikel tersebut, atau dapat juga disebabkan oleh adanya material organik. Bila hasil dari pelapukan tersebut tetap berada pada tempat semula, maka bagian ini disebut tanah sisa (*residual soil*). Hasil pelapukan yang terangkut ketempat lain dan mengendap di beberapa tempat yang berlainan disebut tanah bawaan (*transportation soil*). Media pengangkut tanah berupa gaya gravitasi, angin, air dan gletsyer. Pada saat berpindah tempat, ukuran dan bentuk partikel – partikel dapat berubah dan terbagi dalam beberapa rentang ukuran. Berdasarkan British Standard 5930 (1981), tipe – tipe dasar tanah berdasarkan rentang ukuran partikel adalah berangkal (*boulders*), kerakal (*cobbles*), kerikil (*gravel*), pasir (*sand*), lanau (*silt*) dan lempung (*clay*). Campuran dari tipe – tipe tanah dasar disebut tipe komposit.

Pada penelitian ini penulis menggunakan jenis tanah pasir, oleh karena itu pembahasan akan lebih difokuskan untuk tanah pasir.

2.1.1 Tanah Pasir

Pasir merupakan suatu jenis material tanah berbutir yang terjadi secara alami dan tersusun dari pecahan batuan yang halus serta partikel – partikel mineral. Diameter partikel – partikel pasir berkisar antara 0,0625 milimeter sampai dengan 2 milimeter. Material utama pembentuk pasir adalah silikon dioksida (SiO_2). Komposisi pasir sangat bervariasi tergantung pada sumber dan keadaan batuan setempat, sebagian besar terdiri dari mineral kuarsa dan feldspar.

Pasir dibawa oleh angin dan air, terbentuk menjadi lapisan – lapisan di pantai, bukit pasir dan berbagai tempat lainnya (Wikipedia, n.d.).

Tabel 2.1. Klasifikasi Jenis Ukuran Pasir

Jenis Pasir	Batas - Batas Ukuran Butiran Pasir
Pasir Kasar (Coarse Sand)	0.06 - 0.2 cm
Pasir Sedang (Medium Sand)	0.02 - 0.06 cm
Pasir halus (Fine Sand)	0.006 - 0.02 cm

(sumber : Ir. V. Sunggono Kh, Buku Teknik Sipil, hal. 131)

2.1.2 Kuat Geser Tanah Pasir

Kekuatan tanah ialah tahanan yang terbentuk dari suatu kombinasi partikel yang bergulir, bergeser dan meremuk oleh setiap tekanan pori berlebih yang terjadi selama pergerakan partikel. Ketahanan terhadap deformasi ini ialah kekuatan geser tanah yang merupakan kemampuan tanah melawan tegangan geser yang timbul didalam tanah. Kekuatan geser tanah merupakan aspek yang sangat penting dalam geoteknik. Bearing capacity pada pondasi dangkal maupun dalam, slope stability, disain dinding penahan tanah, disain pavement, juga disain infrastruktur perpipaan bawah tanah secara tidak langsung dipengaruhi oleh kekuatan geser. Struktur dan lereng harus stabil dan aman terhadap keruntuhan total ketika mengalami gaya yang sangat besar.

Kekuatan geser ini diukur dalam dua istilah parameter tanah, yaitu kohesi 'c' atau tarik-menarik antar partikel dan sudut gesekan 'φ' atau tahanan terhadap gesekan antar partikel. Pada hakikatnya peremukan butir tahanan terhadap gulir dan faktor-faktor lain tercakup dalam kedua parameter ini. Kekuatan geser dalam arti tegangan total pada bentuk suatu persamaan adalah :

$$\tau = c + \sigma \tan\phi \quad (2.1)$$

dan dengan menggunakan tegangan efektif :

$$\tau' = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2.2)$$

dimana :

τ = kekuatan geser (kN/m^2)

c = kohesi

σ = tegangan normal pada bidang geser (kN/m^2)

ϕ = sudut geser ($^\circ$)

Karakteristik kekuatan geser pasir dapat ditentukan dari hasil-hasil uji triaksial dalam kondisi terdrainasi maupun hasil-hasil pengujian geser langsung. Pasir merupakan jenis tanah nonkohesif (berbutir kasar), dimana kekuatan gesernya terjadi akibat adanya gesekan antara butir – butir tanah sehingga sering disebut sudut geser dalam (ϕ). Kekuatan geser pada tanah granuler seperti pada pasir hampir mendekati analogi pada tahanan gesek benda padat pada bidang kontak. Hubungan antara tegangan normal pada bidang tanah dan kekuatan gesernya dapat ditulis dengan persamaan berikut :

$$\tau_f = \sigma \tan \phi \quad (2.3)$$

dimana :

τ_f = tegangan geser keruntuhan, atau kekuatan geser

σ = tegangan normal pada bidang geser

ϕ = sudut geser

Sudut geser untuk pasir jenuh sedikit lebih kecil dibandingkan dengan pasir yang kering untuk kepadatan yang relatif sama. Jika pasir berada dibawah muka air, maka efek dari tegangan normal air pada bidang geser harus dihitung. Tegangan normalnya harus dalam keadaan efektif. Tegangannya sama dengan tegangan total pada sebuah titik dikurangi tegangan air pori. Kekuatan geser material akan bertambah sejalan dengan besarnya nilai sudut geser. Oleh karena itu :

$$\tau_f = (\sigma - u) \tan \phi' \quad (2.4)$$

dimana :

τ_f = tegangan geser keruntuhan, atau kekuatan geser

σ = tegangan normal pada bidang geser

u = tekanan air pori

ϕ = sudut geser

Tabel 2.2. Rentang Nilai ϕ untuk Pasir

	Lepas (ϕ_{cv})	Rapat (ϕ_{maks})
Pasir berukuran seragam, partikel bulat	27°	-35°
Pasir bergradasi baik, partikel bersudut	33°	-45°
Kerikil berpasir	35°	-50°
Pasir berlanau	(27°-30°)	-(30°-34°)

(sumber : R.F. Craig, Mekanika Tanah, hal. 105)

2.1.3 Elastisitas pada Tanah Pasir

Modulus tegangan-regangan E_s dan rasio poisson μ adalah sifat-sifat elastis yang penting. Modulus elastisitas merupakan perbandingan antara tegangan dengan regangan.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.5)$$

dimana:

E = modulus elastisitas (kN/m^2)

σ = tegangan (kN/m^2)

ε = regangan

Tabel 2.3. Nilai Es

Soil	Es (MPa)
<ul style="list-style-type: none"> • Glacial Till 	
Loose	10 – 150
Dense	150 – 720
Very Dense	500 - 1440
<ul style="list-style-type: none"> • Sand 	
Silty	5 - 20
Loose	10 - 25
Dense	50 - 81
<ul style="list-style-type: none"> • Sand and Gravel 	
Loose	50 – 150
Dense	100 – 200

(sumber: Joseph E.Bowles, Foundation Analysis and Design, hal. 125)

Ratio Poisson merupakan perbandingan antara regangan lateral dan regangan aksial.

$$\mu = \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_a}$$

(2.6)

Tabel 2.4 Jangkauan Nilai Poisson (μ)

Type of Material	μ
Clay, saturated	0.4 – 0.5
Clay, unsaturated	0.1 – 0.3
Sandy clay	0.2 – 0.3
Silt	0.3 – 0.35

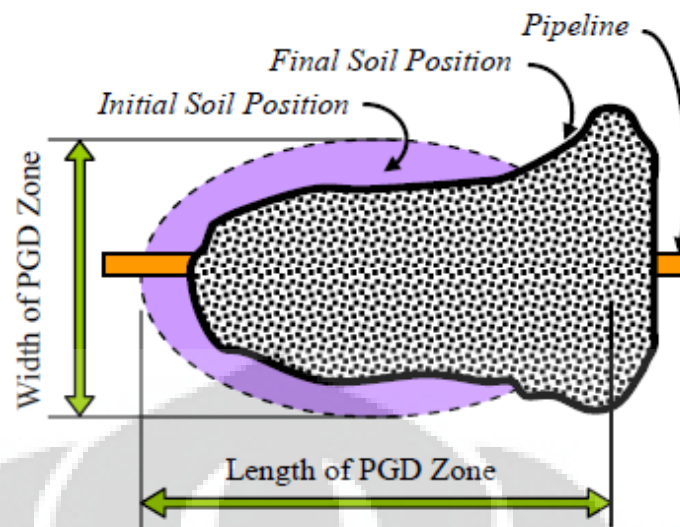
Tabel 2.4 (Sambungan)

Type of Material	μ
Sand, gravelly sand	0.1 – 1
Commonly used	0.3 – 0.4
Rock	0.1 – 0.4 (depends somewhat on type of rock)
Loess	0.1 – 0.3
Ice	0.36
Concrete	0.15
Steel	0.33

(sumber : Joseph E. Bowles, Foundation Analysis and Design, hal. 123)

2.2 Deformasi Permanen Tanah/*Permanent Ground Deformation* (PGD)

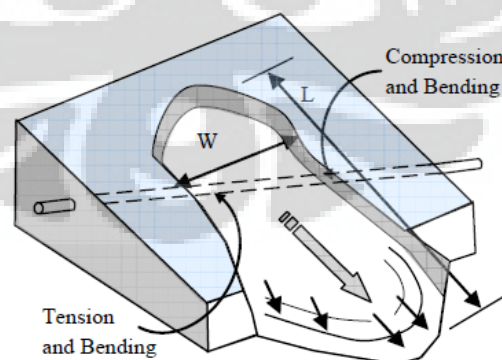
O'Rourke dan XueJie (1999) menyebutkan bahwa gempa menyebabkan deformasi tanah sementara atau *Transient Ground Deformation* (TGD) dan deformasi tanah yang permanen atau *Permanent Ground Deformation* (PGD), keduanya berakibat buruk untuk sistem perpipaan bawah tanah. TGD adalah respon dinamik dari tanah, TGD dapat menyebabkan retakan dan celah pada tanah akibat dari dorongan pergerakan tanah yang kuat yang menimbulkan regangan geser dan tarik setempat yang melebihi kekuatan tanah. Dan PGD adalah pergerakan tanah yang tidak terkontrol yang terjadi setelah getaran gempa berhenti, PGD sering mengakibatkan *displacement* yang besar berupapatahan permukaan tanah (*fault rupture*), likuifaksi dan tanah longsor.



Gambar 2.1. Diagram Skema PGD akibat Kegagalan Tanah

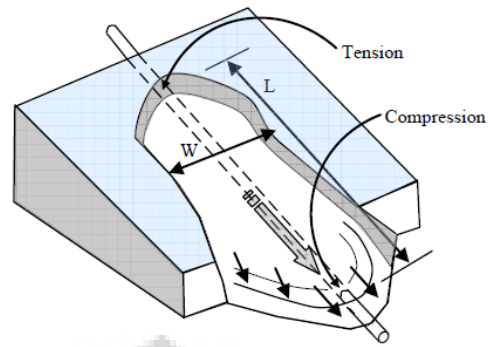
Sumber : Guideline of Seismic Design of Buried Pipeline (2007)

Dan kerusakan paling parah pada sistem perpipaan selama gempa disebabkan oleh PGD. Pergerakan tanah yang berhubungan dengan gempa tergantung pada sumber PGD, tipe tanah, kedalaman muka air tanah, kemiringan, intensitas gempa dan lamanya guncangan kuat pada tanah. Sulit untuk memperkirakan *displacement* tanah dengan tepat namun penyebaran PGD sebagai pergerakan sepanjang bagian tanah yang rusak dapat dipergunakan untuk memperkirakan efek deformasi pada pipa bawah tanah. Berikut ini beberapa kondisi yang akan terjadi pada pipa bawah tanah akibat variasi bentuk PGD :



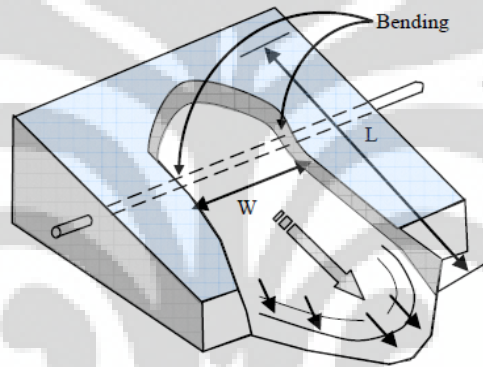
Gambar 2.2. Pipa Melintasi Zona PGD yang Membentuk Sudut

Sumber : Guideline of Seismic Design of Buried Pipeline (2007)



Gambar 2.3. PGD Longitudinal, Pipa Melintasi Zona PGD Searah dengan Pergerakan Tanah

Sumber : Guideline of Seismic Design of Buried Pipeline (2007)



Gambar 2.4. PGD Transversal, Pipa Melintasi Zona PGD Melintang dengan Pergerakan Tanah

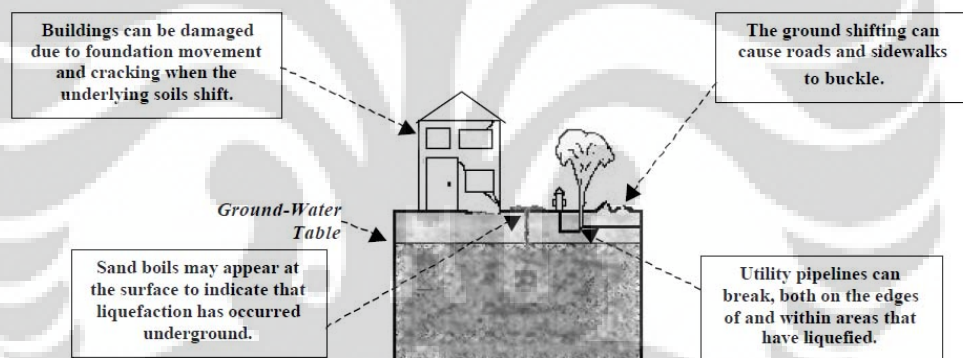
Sumber : Guideline of Seismic Design of Buried Pipeline (2007)

Pada penelitian ini, kondisi pipa adalah seperti pada gambar 2.10, pipa melintasi zona PGD melintang dengan pergerakan tanah. Sehingga gaya dalam yang dialami pipa adalah berupa momen lentur.

2.3 Likuifaksi

Likuifaksi, menurut Mogami dan Kubo (1953), merupakan suatu fenomena yang melibatkan deformasi tanah disebabkan oleh gangguan monotonik, gangguan sementara atau berulang terhadap tanah jenuh tidak berkoheesi dalam kondisi tidak terdrainasi. Timbulnya tekanan air pori yang

berlebihan pada kondisi pembebanan tak terdrainasi merupakan tanda dari semua fenomena likuifaksi. Kecenderungan tanah kering tak berkohesi untuk memadat pada pembebanan static maupun siklik juga merupakan tandanya juga. Ketika tanah tak berkohesi dalam kondisi jenuh dan pembebanan cepat terjadi pada kondisi tak terdrainasi, maka kecenderungan untuk memadat menyebabkan tekanan air pori berlebihan akan meningkat dan tegangan efektif akan berkurang. Ketika tanah terlikuifaksi, material – material pasir yang jenuh air akan berlaku seperti cairan daripada berlaku seperti tanah padat. Likuifaksi dapat menyebabkan *displacement* tanah dan kegagalan tanah seperti *lateral spreading*, tanah longsor, penurunan tanah, timbulnya daya angkat tanah, juga penurunan. Kerusakan yang disebabkan oleh likuifaksi sangat berbahaya bagi pipa – pipa bawah tanah, landasan pacu pesawat terbang, fasilitas – fasilitas pelabuhan, permukaan jalan dan bangunan – bangunan lain di sekitarnya.



Gambar 2.5. Efek – Efek Potensial Likuifaksi

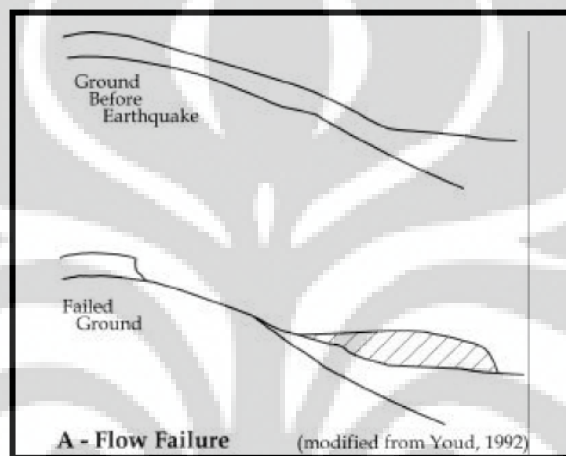
Sumber : Knudsen and Others (2000)

2.3.1 Efek Likuifaksi Terhadap Tanah

Ketika tanah terlikuifaksi dan gagal, akan dapat menyebabkan kerusakan pada bangunan – bangunan di sekelilingnya. Kerusakan ini antara lain berasal dari bentuk kegagalan - kegagalan tanah akibat likuifaksi berikut ini :

1. Kegagalan Aliran (*flow failure*)

O'Rourke dan Lane (1989), menyatakan bahwa kegagalan aliran merupakan bentuk pergerakan tanah yang sangat berbahaya yang berhubungan dengan likuifaksi, umumnya terjadi pada pasir lepas yang jenuh dengan kemiringan antara 10° - 20° . Kegagalan ini sering disebut sebagai aliran tanah yang sangat cepat dimana butiran – butiran tanah mengalir seperti cairan. Saat terjadinya kegagalan aliran, sejumlah besar material bisa mengalir berpuluh – puluh meter dengan kecepatan relatif tinggi dan dapat mengakibatkan kerusakan yang sangat parah pada pipa bawah tanah.

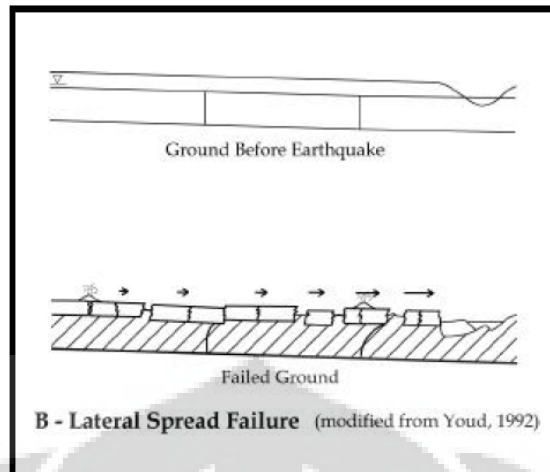


Gambar 2.6. Kegagalan Aliran

Sumber : ABAG Earthquake Program (2001)

2. Pergerakan Lateral (*Lateral Spreading*)

Pergerakan lateral merupakan salah satu bentuk paling umum dari pergerakan permanen tanah akibat likuifaksi saat terjadinya gempa. Bentuk kegagalan ini disebut sebagai penurunan horizontal lapisan permukaan tanah biasanya berkisar antara 1m – 2 m dengan kemiringan $0,3^\circ$ - 3° . Pergerakan lateral bersifat sangat merusak untuk sistem perpipaan bawah tanah karena dapat mengakibatkan pergerakan tanah yang sangat besar, dimana tekanan pasif tanah dapat bergerak melawan struktur pipa bawah tanah sehingga pipa bisa patah atau berpindah dari posisi semula (O'Rourke and Lane, 1989).

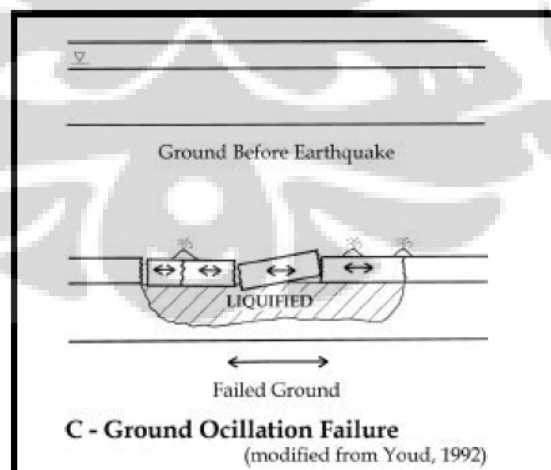


Gambar 2.7. Lateral Spreading

Sumber : ABAG Earthquake Program (2001)

3. Kegagalan Pergoyangan Tanah (*Ground Oscillation Failure*)

Menurut O'Rourke and Lane (1989), ketika likuifaksi terjadi pada kemiringan yang sangat kecil, bentuk deformasi tanah sementara akan muncul dan dapat mengakibatkan pergerakan permanen lateral tanah. Pada kondisi ini, jika likuifaksi terjadi di kedalaman akan dapat membuat blok – blok lapisan tanah utuh bergerak bolak – balik pada tanah terlikuifaksi selama terjadi gempa. Pergoyangan tanah (*ground oscillation*) biasanya disertai dengan keretakan dan penurunan permukaan tanah.

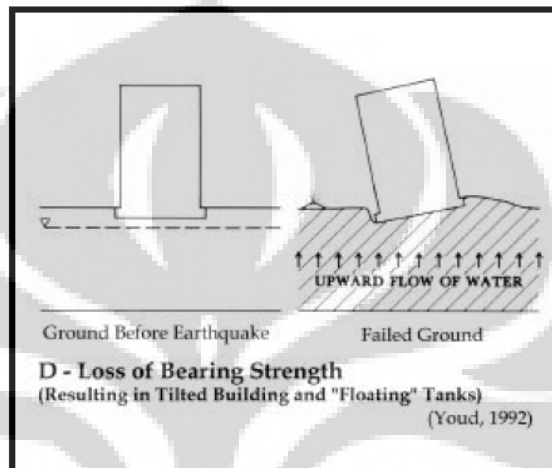


Gambar 2.8. Kegagalan Pergoyangan Tanah

Sumber : ABAG Earthquake Program (2001)

4. Kehilangan Daya Dukung (*Loss of Bearing Strength*)

Ketika tanah terlikuifaksi, tanah menjadi lemah dan dapat kehilangan daya dukungnya untuk menyokong bangunan, terutama bangunan – bangunan besar dengan perencanaan pondasi yang buruk. Fasilitas – fasilitas seperti tanki bawah tanah dan jaringan pipa dapat mengapung ke atas bahkan kadang – kadang sampai melewati permukaan tanah (ABAG Earthquake Program, 2001).

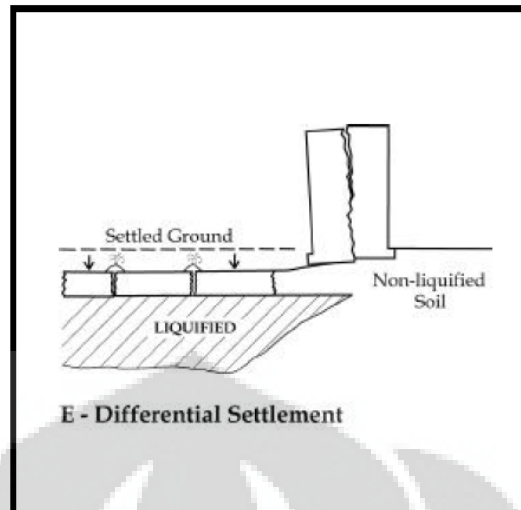


Gambar 2.9. Kehilangan Daya Dukung

Sumber : ABAG Earthquake Program (2001)

5. Penurunan yang Berbeda (*Differential Settlement*)

Ketika terjadi likuifaksi saat gempa, tekanan pori mendesak keluar air dan endapan tanah melalui retakan yang menimbulkan *sand boils* yang mengakibatkan penurunan yang berbeda pada permukaan tanah karena mengalami kehilangan volume meskipun tidak terjadi pergerakan horizontal yang berarti (O'Rourke dan Lane, 1989).



Gambar 2.10. Penurunan yang Berbeda

Sumber : ABAG Earthquake Program (2001)

2.3.2 Kondisi – Kondisi Potensial untuk Terjadinya Likuifaksi

Menurut ABAG Earthquake Program (2001), likuifaksi hanya dapat terjadi bila tiga hal dibawah ini terpenuhi :

1. Tanah pada area tersebut harus berupa pasir lepas (tidak dipadatkan atau tidak terkonsolidasi) dan tidak mengandung banyak lempung.
2. Tanah pasir tersebut harus dalam kondisi jenuh air akibat muka air tanah yang tinggi.
3. Dan tanah harus mengalami getaran yang cukup lama dan keras oleh gempa untuk dapat menimbulkan likuifaksi.

Table 2.5. Bahaya Likuifaksi Berdasarkan Kombinasi Modified Mercally Intensity dan Kategori Potensi Likuifaksi

MMI Value	Description of MMI Shaking Severity	Summary Damage Description of MMI Used on 1995 Maps	Liquefaction Susceptibility Category				
			Very Low	Low	Moderate	High	Very High
I.							
II.							
III.							
IV.							
V.	Light	Pictures Move					
VI.	Moderate	Objects Fall					
VII.	Strong	Nonstructural Damage			Moderately Low Hazard	Moderately Low Hazard	Moderate Hazard
VIII.	Very Strong	Moderate Damage			Moderate Hazard	Moderate Hazard	Moderate Hazard
IX.	Violent	Heavy Damage			High Hazard	High Hazard	High Hazard
X.	Very Violent	Extreme Damage			High Hazard	High Hazard	High Hazard

Sumber : ABAG Earthquake Program (2001)

2.3.3 Kuat Geser Tanah Terlikuifaksi

Menurut Kramer (1996), ketidakstabilan terjadi ketika tegangan geser yang dibutuhkan untuk menjaga keseimbangan lapisan tanah melebihi kuat geser lapisan tanah tersebut. Kemudian tanah berdeformasi sampai mencapai suatu konfigurasi dimana tegangan geser tidak melebihi kuat geser tanah. Jumlah deformasi yang dibutuhkan untuk mencapai keadaan stabil sangat dipengaruhi oleh perbedaan antara tegangan geser yang dibutuhkan untuk keseimbangan dan kuat geser tanah terlikuifaksi. Jika kuat geser tanah terlikuifaksi hanya sedikit lebih kecil dibandingkan tegangan geser untuk keseimbangan, deformasi permanen yang terjadi kecil. Sebaliknya, jika perbedaan antara kuat geser dan tegangan geser besar, maka deformasi cenderung sangat besar. Evaluasi yang tepat dari efek likuifaksi yang menyebabkan ketidakstabilan membutuhkan estimasi kuat geser tanah terlikuifaksi yang tepat pula.

Ada 3 (tiga) pendekatan yang telah dikembangkan untuk memperkirakan kuat geser tanah terlikuifaksi. Yang pertama berdasarkan suatu program dari contoh tanah yang tidak terganggu dan uji coba laboratorium. Yang kedua berdasarkan parameter tes insitu dan interpretasi kasus – kasus likuifaksi yang diketahui. Dan yang ketiga adalah dengan memperlakukan kuat geser tanah terlikuifaksi sebagai kekuatan yang dinormalisasikan.

2.3.4 Likuifaksi yang Mengakibatkan *Displacement Horizontal Tanah*

Penelitian ini dibatasi hanya untuk melihat pengaruh likuifaksi yang menimbulkan *displacement* horizontal tanah (*lateral spreading*) saja. Oleh karena itu dibawah ini akan dibahas persamaan – persamaan yang akan dipakai dalam menghitung besarnya *displacement* horizontal tanah yang terjadi. Persamaan – persamaan ini mengacu kepada ” *Recommended Practice for Design of Gas Transmission Pipeline in Areas Subject to Liquefaction* “ (Japan Gas Association, 2001).

$$\delta_h = 36.c \cdot \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{1/2 \cdot \gamma_i \cdot H_i^2 + \sigma_{vi} \cdot H_i}{(1/2 \cdot \gamma_i \cdot H_i + \sigma_{vi})^2 \cdot N_{bi}} \right\} \quad (2.7)$$

Dimana :

δ_h = *Displacement* horizontal tanah (m)

c = Koefisien urban area, jika pipa dikubur pada suatu urban area dimana bangunan menggunakan tiang pancang atau memiliki *basement* maka nilainya adalah 0.5, jika tidak demikian maka nilainya adalah 1 (satu).

H_i = Ketebalan tanah terlikuifaksi lapisan ke – i (m)

γ_i = Berat isi tanah terlikuifaksi lapisan ke – i (kN/m^3)

N_{bi} = Nilai SPT tanah terlikuifaksi lapisan ke – i yang dikoreksi yang dihitung terhadap efek ukuran butiran tanah.

$$N_{bi} = N_{li} + \Delta N_{li} \quad (2.8)$$

σ_{vi} = Tekanan overburden total yang terjadi pada bagian permukaan tanah terlikuifaksi lapisan ke – i (kN/m^2)

N_{li} = Nilai SPT tanah terlikuifaksi lapisan ke – i yang berhubungan dengan tekanan overburden efektif sebesar 98 kN/m^2

$$N_{li} = \frac{1,7.N_i}{\sigma'_{vi}/98 + 0,7} \quad (2.9)$$

N_i = Nilai SPT tanah terlikuifaksi lapisan ke – i

ΔN_{li} = Koreksi nilai SPT lapisan tanah terlikuifaksi yang dihitung terhadap efek butiran tanah.

$$\Delta N_{li} = 0 \text{ jika } 0\% \leq FC \leq 10\%$$

$$\Delta N_{li} = 5 \text{ jika } 10\% \leq FC \leq 20\%$$

$$\Delta N_{li} = 10 \text{ jika } 20\% \leq FC$$

FC = Persentase lempung dan lanau (%)

θ_g = Tingkat kemiringan permukaan tanah (%)

σ'_{vi} = Tekanan efektif overburden yang terjadi pada bagian tengah tanah terlikuifaksi lapisan ke –i (kN/m²)

2.4 Pipa

Pipa merupakan suatu material berbentuk lingkaran yang berfungsi untuk menyalurkan benda-benda yang mengalir seperti air, gas, bahan-bahan kimia, limbah dan lain-lain. Pipa merupakan suatu komponen yang sangat penting dalam semua bidang industri karena melalui system perpipaan ini mengalir berbagai jenis material yang penting untuk menunjang kehidupan manusia.

Moser, A.P. (2001) menyebutkan bahwa sistem perpipaan harus cukup kuat untuk menahan tegangan, memiliki dinding yang halus serta sistem sambungan yang baik dan kuat dan secara kimia harus aman terhadap tanah dan air disekitarnya, sistem perpipaan juga harus didesain untuk jangka waktu yang lama. Ada berbagai jenis pipa saat ini, dari jenis pipa yang kaku seperti pipa beton sampai pada jenis pipa yang *flexible* seperti pipa plastik dan baja. Masing-masing jenis pipa ini memiliki keunggulan tersendiri yang terdiri dari

kekakuan ketahanan terhadap korosi, fleksibilitas, keringanan juga kemudahan dalam penyambungan.

Pekerjaan pemasangan perpipaan dapat dikelompokkan menjadi bagian-bagian :

1. Di atas tanah
2. Di bawah tanah
3. Di dalam air

Pada penelitian ini penulis menggunakan jenis perpipaan yang di pasang di bawah tanah (*buried pipe*).

2.4.1 Pipa Bawah Tanah

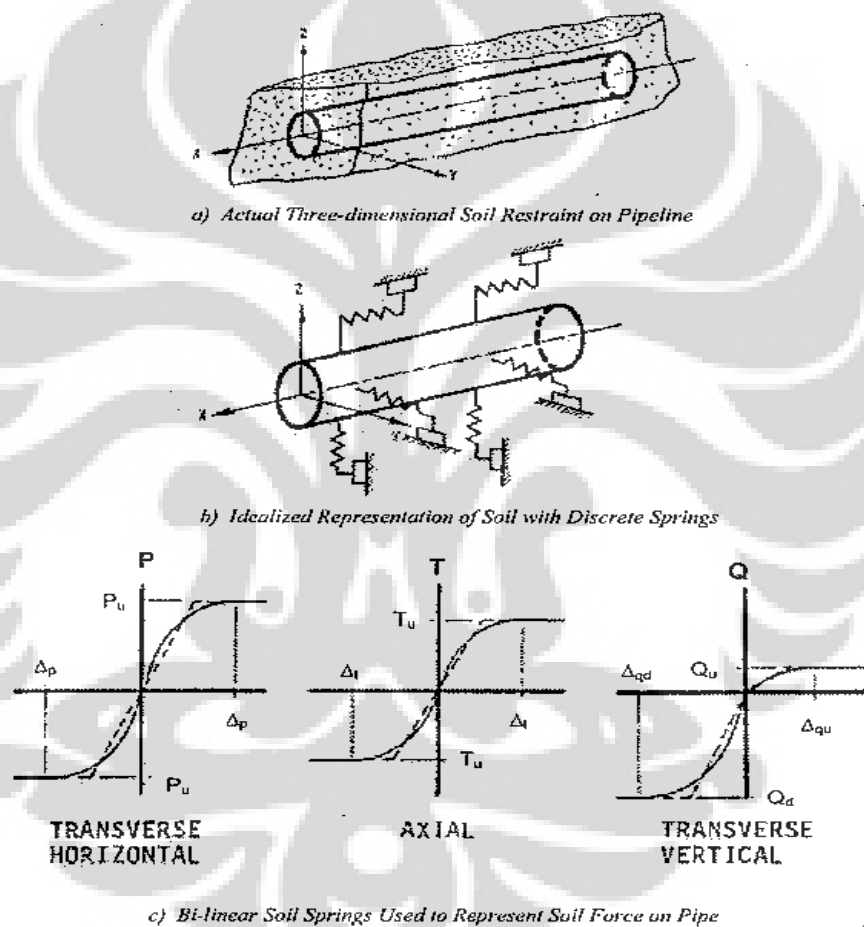
Sistem perpipaan bawah tanah biasanya digunakan untuk menyalurkan air, limbah, minyak, gas alam dan material – material lainnya. Saluran pipa bawah tanah ini dapat dikategorikan sebagai saluran pipa menerus maupun dalam bentuk ruas – ruas (*segmented*). Pipa baja dengan sambungan las termasuk saluran pipa menerus, sementara saluran pipa dalam beruas – ruas antara lain termasuk pipa besi tuang dengan sambungan *rubber gasketed*, pipa besi daktail dengan sambungan *rubber gasketed*, pipa beton, pipa semen asbestos, dll.

Keamanan saluran pipa bawah tanah saat gempa telah menarik perhatian yang sangat besar akhir – akhir ini. Menurut Moser, A.P. (2001), ciri penting dari saluran pipa bawah tanah adalah bahwa saluran pipa ini umumnya tersebar pada area yang luas dan dipengaruhi oleh berbagai bahaya geotektonik. Ciri lainnya yang juga membedakannya dengan struktur dan fasilitas lain di permukaan tanah adalah pergerakan relatif pipa akibat tanah sekelilingnya umumnya kecil dan gaya – gaya inersia akibat berat dari saluran pipa tersebut dan isinya relatif tidak penting. Saluran pipa bawah tanah dapat rusak oleh PGD maupun TGD. Meskipun bahaya PGD biasanya terbatas pada kawasan yang kecil, namun potensi kerusakan sangat tinggi karena PGD menyebabkan deformasi yang parah pada saluran pipa bawah tanah. Sebaliknya, bahaya TGD umumnya mempengaruhi

seluruh jaringan pipa tetapi dengan tingkat kerusakan yang lebih kecil seperti terjadinya kebocoran pipa.

2.5 Interaksi Pipa dan Tanah (Pegas Tanah)

American Lifelines Alliance (2001) menjelaskan bahwa tanah yang membebani saluran pipa diwakili oleh pegas nonlinear yang berlainan (misalnya *elastic-plastic*, multi-linear) seperti pada gambar 2.11.



Gambar 2.11. Pendekatan Pemodelan Pipa

Sumber : American Lifelines Alliance (2001) "Guideline for Design of Buried Steel Pipe"

Pegas tanah untuk penelitian ini akan dihitung dengan persamaan – persamaan dari informasi petunjuk program AutoPIPE untuk tanah pasir. Dan AutoPIPE menyebut perhitungan pegas tanah ini sebagai perhitungan properti tanah sebagaimana dijelaskan dibawah ini :

2.5.1 Properti Tanah Arah Longitudinal

Berdasarkan studi – studi perilaku tiang pada kondisi pembebanan aksial, telah dikembangkan suatu hubungan antara gaya geser (adhesi) dan pergerakan longitudinal pipa. Nilai K_1 dan P_1 tergantung dari diameter pipa bawah tanah, kedalaman penguburan pipa dan properti dari tanah. Pada tanah pasir, nilai P_1 dapat digambarkan sebagai daya tahan sudut geser antara pipa dan tanah (δ).

Untuk tanah pasir, daya tahan *ultimate* longitudinal tanah (P_1) dihitung dengan persamaan (2.10).

$$P_1 = \pi d \cdot k_s \cdot Z \cdot \gamma' \cdot \tan \delta \quad (2.10)$$

Nilai k_s bisa bervariasi tergantung kepadatan relatif atau pemadatan tanah disekeliling pipa. Untuk pasir lepas, nilai k_s adalah 0.25, sementara untuk pasir yang dipadatkan, nilai k_s berkisar antara 0.5 – 1.0. Displacement pipa yang berkaitan dengan P_1 dapat digambarkan sebagai fungsi diameter pipa, dan berada pada kisaran dibawah ini :

$$\frac{d}{60} \leq y_1 \leq \frac{d}{25} \quad (2.11)$$

Sehingga nilai K_1 dapat dihitung pada kisaran :

$$\frac{25P_1}{d} \leq K_1 \leq \frac{60P_1}{d} \quad (2.12)$$

Dimana :

P_1 = Daya tahan ultimate tanah terhadap pergerakan longitudinal pipa, K_2 diasumsikan sama dengan nol (kN/m)

d = Diameter luar pipa (mm)

- k_s = Koefisien tekanan lateral tanah
 Z = Kedalaman dari permukaan tanah ke bagian tengah pipa (m)
 γ' = Berat isi efektif tanah (N/m^3)
 = $\gamma_{sat} - \gamma_{H_2O}$ untuk kedalaman di bawah muka air tanah
 = $\gamma_{dry} + w(\gamma_{sat} - \gamma_{dry})$ untuk kedalaman di atas muka air tanah
 δ = Sudut geser dalam tanah terhadap pipa ($^\circ$)
 K_1 = Kekakuan tanah arah longitudinal (N/mm^2)

2.5.2 Properti Tanah Arah Transversal Horizontal

Daya tahan terhadap defleksi transversal pipa bawah tanah dapat dihitung menggunakan informasi dari studi – studi perilaku pembebanan lateral tiang dan daya tahan pasif *anchor plate*. Studi – studi telah menunjukkan bahwa nilai K_1 diperkirakan meningkat berbanding lurus dengan kedalaman tanah. Sehingga K_1 dapat digambarkan sebagai berikut :

$$K_1 = Z k_i \quad (2.13)$$

Dimana :

- K_1 = Kekakuan tanah arah transversal horizontal (N/mm^2)
 Z = Kedalaman dari permukaan tanah ke bagian tengah pipa (m)
 k_i = Parameter kekakuan tanah (N/mm^3)

Nilai dari parameter kekakuan tanah (k_i) dapat dilihat pada tabel 2.6. Daya tahan terhadap defleksi transversal pipa sangat bergantung kepada apakah tanah dipadatkan atau tidak. Proses pemadatan akan meningkatkan kepadatan relatif tanah pasir, dan tanah pasir yang tidak dipadatkan akan memiliki daya tahan yang kecil terhadap *displacement* pipa.

Table 2.6. Nilai k_i untuk Pasir

Relative Density	Range of k_i Values (lb/in ³)	
	Above Water	Below Water
Loose	8 - 25	5 - 20
Medium	25 - 90	16 - 60
Dense	65 - 225	40 - 125

Sumber : Informasi Petunjuk AutoPIPE

Daya tahan *ultimate* tanah (P_1) di sekeliling pipa terhadap *displacement* transversal pipa ditentukan oleh kekuatan tanah. Perkiraan P_1 berdasarkan pada teori tekanan pasif tanah untuk *anchor* blok. Untuk pipa yang dikelilingi tanah pasir, nilai P_1 dihitung dengan persamaan (2.14).

$$P_1 = R_s \cdot d \cdot Z \cdot \gamma' \quad (2.14)$$

Dimana :

P_1 = Daya tahan ultimate tanah terhadap pergerakan transversal pipa, K_2 diasumsikan sama dengan nol (kN/m)

d = Diameter luar pipa (mm)

Z = Kedalaman dari permukaan tanah ke bagian tengah pipa (m)

γ' = Berat isi efektif tanah (N/m³)

= $\gamma_{\text{sat}} - \gamma_{\text{H}_2\text{O}}$ untuk kedalaman dibawah muka air tanah

= $\gamma_{\text{dry}} + w(\gamma_{\text{sat}} - \gamma_{\text{dry}})$ untuk kedalaman diatas muka air tanah

R_s = Koefisien yang bervariasi terhadap kedalaman penguburan pipa dan kepadatan relatif dari tanah (lihat tabel 2.7)

Table 2.7. Koefisien Daya Tahan Transversal Pipa pada Pasir (R_s)

H/d	R_s at Various Relative Densities		
	Loose	Medium-Dense	Dense
1	2.7	3.9	5.7
2	3.0	4.5	6.9
3	3.8	5.9	9.6
4	4.5	7.2	11.9
5	5.0	8.2	13.7
6	5.4	8.9	15.2
8	6.0	10.0	17.2
10	6.4	10.7	18.6
12	6.6	11.3	19.6

H = depth from ground surface to bottom of pipe
d = pipe diameter

Sumber : Informasi Petunjuk AutoPIPE

2.5.3 Properti Tanah Arah Vertikal Ke Bawah

Daya dukung vertical yang disediakan tanah terhadap pergerakan arah ke bawah dari pipa bawah tanah dapat digambarkan dengan teori daya dukung konvensional. Pipa diasumsikan sebagai pondasi menerus berbentuk silinder. Sehingga, reaksi tanah *ultimate* (P_1) dapat ditentukan dengan persamaan (2.15).

$$P_1 = d \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot d \cdot \gamma_1 \cdot N_\gamma + c \cdot N_c + H \cdot \gamma_3 \cdot N_q \right) \quad (2.15)$$

Dimana :

P_1 = Daya tahan *ultimate* tanah terhadap pergerakan pipa ke arah bawah, K_2 diasumsikan sama dengan nol (kN/m)

d = Diameter luar pipa (mm)

H = Kedalaman dari permukaan tanah ke bagian bawah pipa (m)

γ' = Berat isi efektif tanah (N/m^3)

γ_1, γ_3 = Berat isi efektif tanah berdasarkan lokasi muka air tanah (N/m^3)

(lihat tabel 2.8)

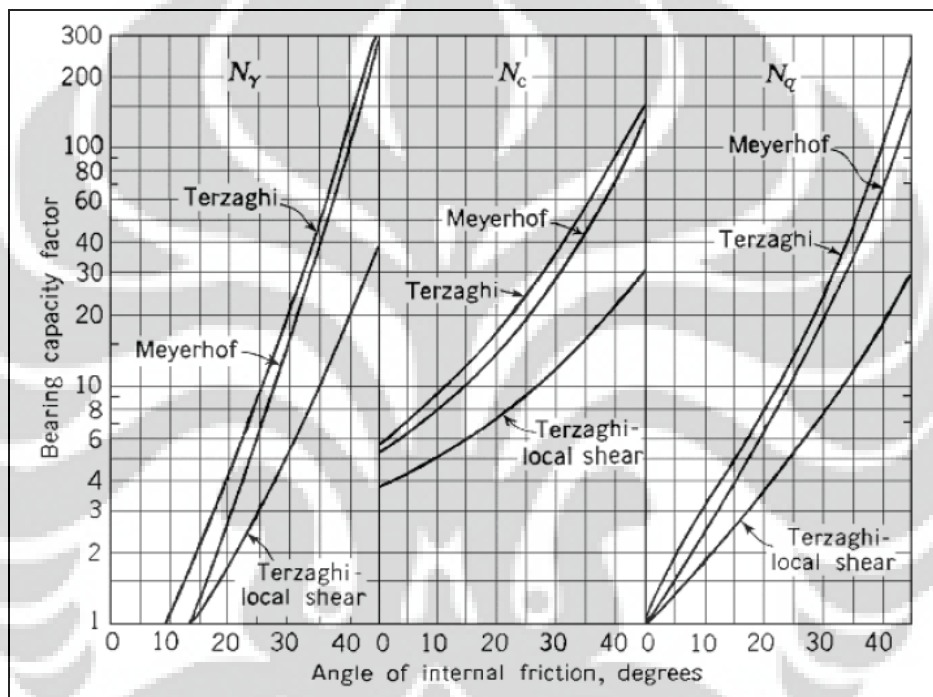
c = Kohesi untuk tanah dibawah pipa (N/m^2)

N_γ, N_q, N_c = Faktor Daya Dukung (lihat gambar 2.12)

Table 2.8. Berat Isi Efektif Tanah Berdasarkan Lokasi Muka Air Tanah

(Z_w) Depth from Ground Surface to Water Table	$\gamma_1' =$	$\gamma_3' =$
$\geq (H+d)$	$\gamma_{dry} + w(\gamma_{sat} - \gamma_{dry})$	$\gamma_{dry} + w(\gamma_{sat} - \gamma_{dry})$
$H \leq Z_w < (H+d)$	$\gamma_{sat} - \gamma_{H2O}$	$\gamma_{dry} + w(\gamma_{sat} - \gamma_{dry})$
$< H$	$\gamma_{sat} - \gamma_{H2O}$	$\gamma_{sat} - \gamma_{H2O}$

Sumber : Informasi Petunjuk AutoPIPE



Gambar 2.12. Faktor Daya Dukung

Sumber : Informasi Petunjuk AutoPIPE

Displacement yang dibutuhkan untuk menggerakkan seluruh daya tahan tanah biasanya dipertimbangkan berkisar antara 10% sampai dengan 15% dari diameter luar pipa. Dengan dasar ini, *displacement* yang berkaitan dengan P_1 dapat digambarkan sebagai fungsi dari diameter pipa, dan berada pada kisaran antara :

$$\frac{d}{10} \leq y_1 \leq \frac{d}{6.67} \quad (2.16)$$

Sehingga, nilai kekakuan tanah terhadap pergerakan pipa ke arah bawah (K_1) dihitung berkisar antara :

$$\frac{6.67P_1}{d} \leq K_1 \leq \frac{10P_1}{d} \quad (2.17)$$

2.5.4 Properti Tanah Arah Vertikal Ke Atas

Perkiraan desain untuk tipe pergerakan ini adalah berdasarkan studi – studi terhadap *anchor* tanah yang menerima gaya angkat ke atas. Daya tahan angkat ke atas terdiri dari dua bagian yaitu : berat irisan tanah (W_s) diatas *anchor* dan daya tahan geser dari irisan tanah yang sedang bergerak ke atas. Sehingga, daya tahan ultimate tanah (P_1) dapat ditentukan dari persamaan (2.18).

$$P_1 = W_s + d(c.F_c + D.\gamma'.F_q) \quad (2.18)$$

Dan

$$W_s = \gamma.(d.(D + 0.5d) - \frac{\pi}{8}d^2) \quad (2.19)$$

Dimana :

P_1 = Daya tahan *ultimate* tanah terhadap pergerakan pipa ke arah atas, K_2 diasumsikan sama dengan nol (kN/m)

W_s = Berat efektif irisan tanah per satuan panjang (kN/m)

d = Diameter luar pipa (mm)

D = Kedalaman dari permukaan tanah ke bagian atas pipa (m)

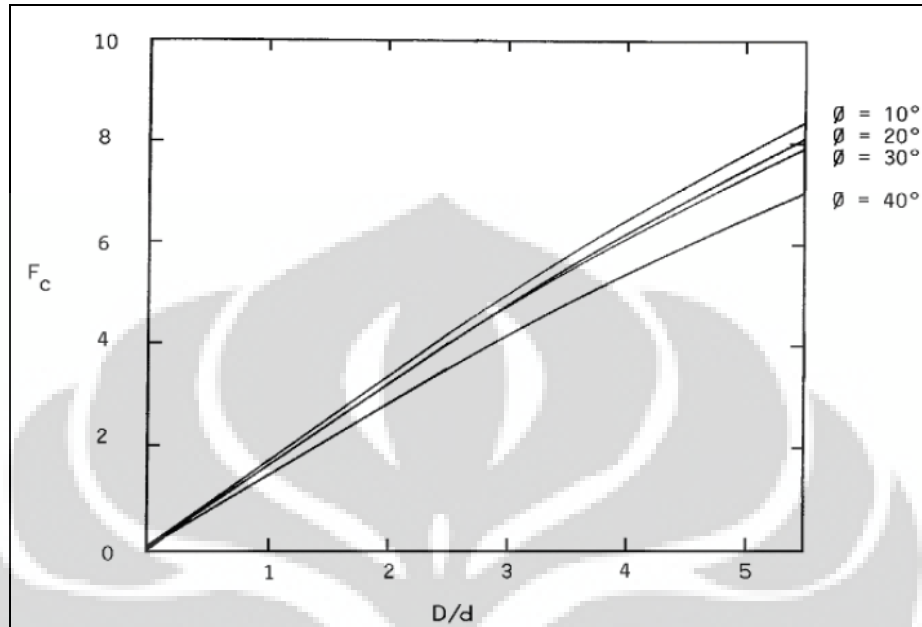
γ' = Berat isi efektif tanah (N/m^3)

= $\gamma_{sat} - \gamma_{H_2O}$ untuk kedalaman dibawah muka air tanah

= $\gamma_{dry} + w(\gamma_{sat} - \gamma_{dry})$ untuk kedalaman diatas muka air tanah

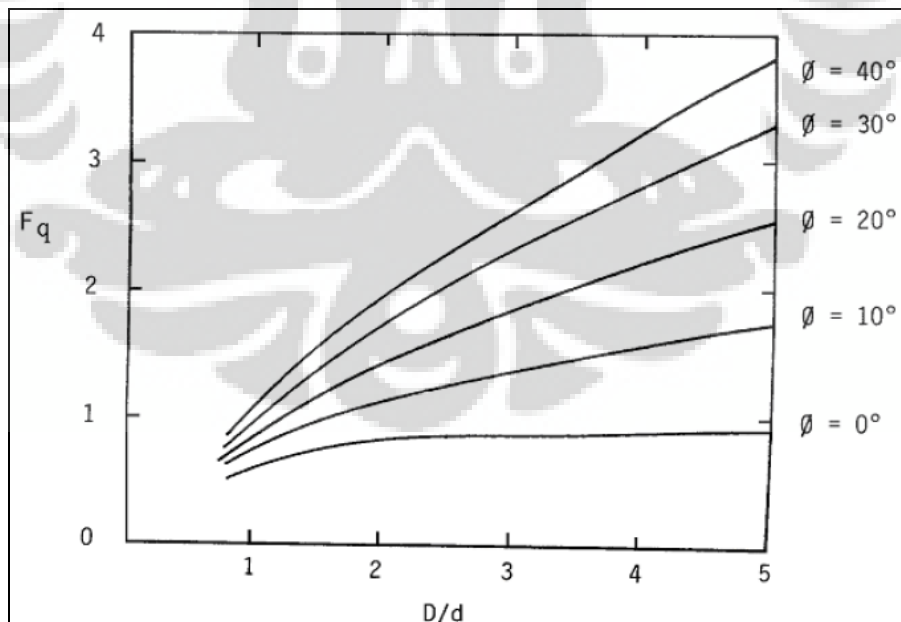
c = Kohesi untuk tanah diatas pipa (N/m^2)

F_c, F_q = Faktor *breakout* (lihat gambar 2.13 dan 2.14)



Gambar 2.13. Faktor *Breakout* (F_c)

Sumber : Informasi Petunjuk AutoPIPE



Gambar 2.14. Faktor *Breakout* (F_q)

Sumber : Informasi Petunjuk AutoPIPE

Ujicoba menunjukkan bahwa untuk menggerakkan seluruh daya tahan angkat pasir padat sampai pasir lepas dibutuhkan displacement yang relatif kecil, berkisar antara 1% sampai dengan 2% dari kedalaman menuju bagian atas pipa (D). Sehingga berdasarkan prinsip ini, *displacement* yang berkaitan dengan P_1 dapat digambarkan sebagai fungsi dari kedalaman (D) dan berada pada kisaran :

$$\frac{D}{100} \leq y_1 \leq \frac{D}{50} \quad (2.20)$$

Sehingga, nilai kekakuan tanah terhadap pergerakan pipa ke arah atas (K_1) dihitung berkisar antara :

$$\frac{50P_1}{D} \leq K_1 \leq \frac{100P_1}{D} \quad (2.21)$$

2.6 AutoPIPE

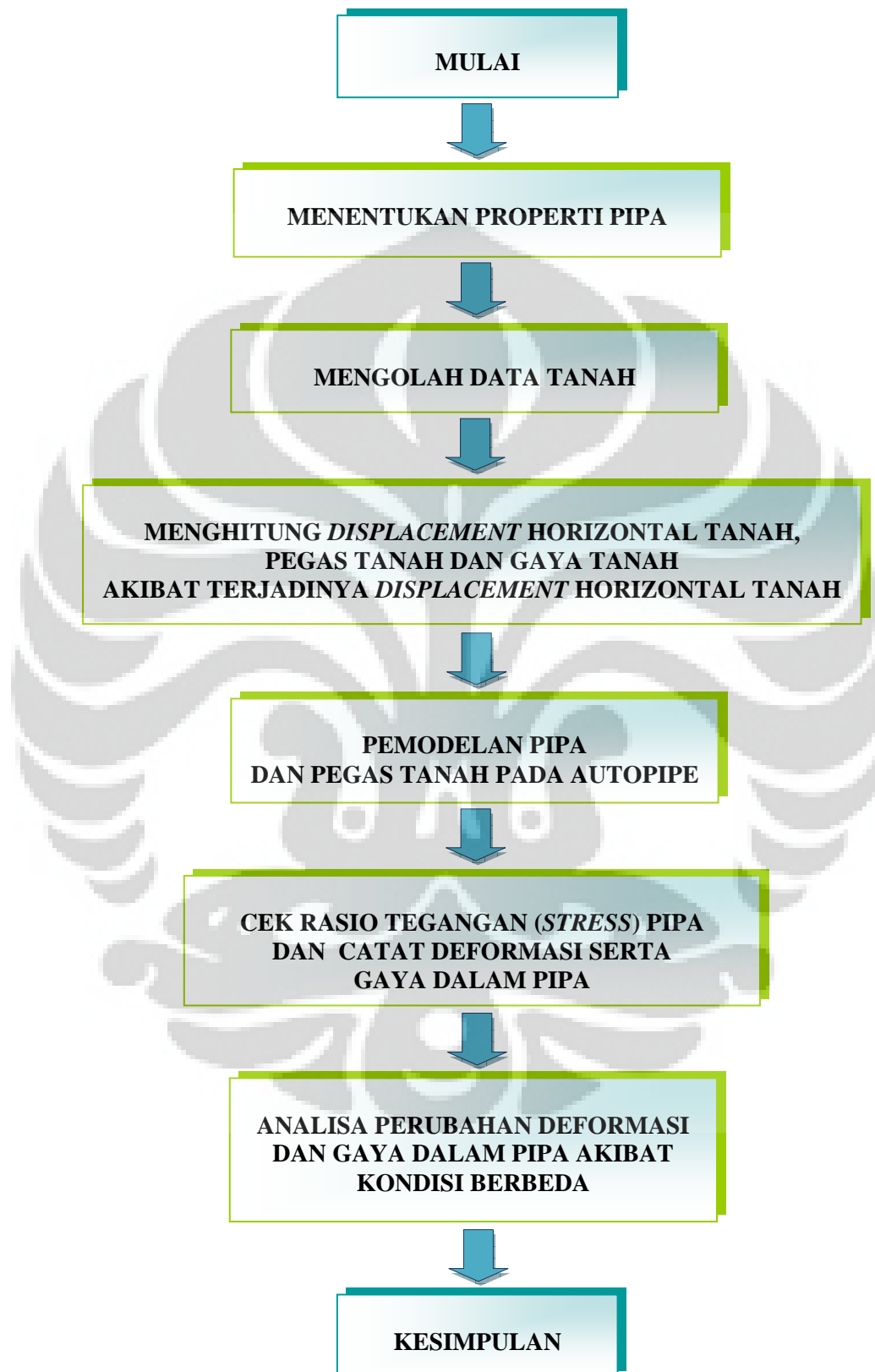
Penelitian ini menggunakan bantuan program komputer AutoPIPE. AutoPIPE adalah suatu program komputer *engineering* untuk menganalisis tegangan (*stress*) pada pipa, analisis *flange*, desain *pipe support* dan analisis pembebanan pada peralatan – peralatan *nozzle* baik pada kondisi pembebanan statik maupun dinamik. AutoPIPE memiliki peraturan – peraturan teknis untuk desain seperti ASME, European, British Standard, API, NEMA, ANSI, ASCE, AISC, UBC, WRC dan juga batasan – batasan desain untuk memberikan analisis yang akurat. AutoPIPE juga memiliki perbendaharaan material yang sangat lengkap untuk komponen – komponen pipa dan struktur seperti pipa, *reducer*, *tee*, *valve*, *flange*, *beam*, koneksi – koneksi fleksibel dan lain – lain. AutoPIPE dapat dipergunakan untuk analisis jaringan perpipaan di atas tanah, di bawah tanah dan juga di dalam air (di laut).

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Penjelasan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan bantuan program komputer AutoPIPE V8i. AutoPIPE merupakan suatu program analisa *finite element* yang biasa dipergunakan untuk menganalisa tegangan (*stress*) pada sistem perpipaan akibat adanya beban statis maupun dinamis. AutoPIPE memiliki perbendaharaan properti material dan komponen – komponen pipa yang cukup lengkap dan juga memiliki pilihan peraturan – peraturan teknis yang akan dijadikan acuan dalam analisa. Elemen – elemen pipa pada AutoPIPE dimodelkan sebagai pipa berbentuk balok lurus 3 dimensi yang dihubungkan oleh titik – titik simpul (*nodes*). AutoPIPE juga dapat memodelkan pegas tanah yang berada disekeliling pipa yang nilai – nilainya terlebih dahulu dihitung sesuai dengan persamaan – persamaan yang disediakan dalam program AutoPIPE tersebut. Pemodelan yang dibuat dalam penelitian ini adalah untuk pemodelan pipa penyalur gas bawah tanah sehingga peraturan teknis yang dijadikan acuan adalah ASME B31.8 (2007) ” *Gas Transmissions and Distribution Piping Systems* ”, dimana data untuk properti pipa dan gas yang mengalir di dalam pipa ini diambil dari data desain *pipeline* Proyek K dari PT.Technip Indonesia dan juga mengacu kepada peraturan teknis API Spec 5L (2004) ” *Line Pipe Specification* “. Sedangkan untuk properti tanah terlikuifaksi diambil dari data laporan penyelidikan tanah Proyek Dermaga 108 Pelabuhan Tanjung Priok Jakarta Utara yang dilakukan oleh Laboratorium Mekanika Tanah Fakultas Teknik Universitas Indonesia (2007). Pemodelan dibuat untuk pipa baja menerus jenis *Carbon Steel* dengan panjang pipa dibatasi sepanjang 200 m yang diasumsikan dalam kondisi beroperasi, pipa ini merupakan pipa bawah tanah yang dikubur pada kedalaman 1.5 meter dari permukaan tanah. Hasil analisa yang akan dicek pada AutoPIPE adalah berupa rasio tegangan pipa serta deformasi dan gaya dalam pada pipa akibat adanya *displacement* horizontal tanah (*lateral spreading*) karena likuifaksi.

3.2 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

3.3 Penjelasan Diagram Alir Penelitian

3.3.1 Menentukan Properti Pipa

Properti pipa yang terdiri dari jenis pipa, diameter, ketebalan dinding dan termasuk juga properti gas yang mengalir di dalam pipa tersebut diambil dari data desain *pipeline* Proyek K dari PT. Technip Indonesia. Sebagai variasi pemodelan maka dipilih dua jenis diameter pipa yaitu pipa 16 inci dan pipa 14 inci. Properti pipa dan gas ini dibutuhkan sebagai input pada AutoPIPE. Adapun data – data properti pipa dan gas yang mengalir di dalamnya dapat dilihat pada table 3.1.

Tabel 3.1. Properti Pipa dan Gas

Parameter	Satuan	Pipa 16 inci	Pipa 14 inci
Properti Pipa			
Nominal diameter pipa	mm	406.4	355.6
Ketebalan dinding pipa	mm	12.7	11.1
Material pipa	-	<i>Carbon Steel</i>	
Kelas material pipa	-	API 5L X-65	
Proses manufaktur pipa	-	<i>Electric resistance Welded (ERW)</i>	
Kuat leleh minimum spesifikasi (SMYS)	MPa	450	
Kuat tarik minimum spesifikasi (SMTS)	MPa	535	
Modulus Young	MPa	207000	
Angka Poisson	-	0.3	
Berat jenis material pipa	kg/m ³	7850	
Lapisan anti korosi	-	<i>Asphalt Enamel</i>	
Berat jenis lapisan anti korosi	kg/m ³	1280	
Properti Gas di dalam Pipa			
Jenis gas		<i>Sales Gas</i>	
Berat jenis maksimum gas	kg/m ³	77	
Tekanan gas dalam pipa	MPa	14.58	
Suhu maksimum gas dalam pipa	°C	60	

3.3.2 Mengolah Data Tanah

Data tanah yang diperoleh dari laporan penyelidikan tanah Proyek Dermaga 108 Pelabuhan Tanjung Priok Jakarta Utara yang dilakukan oleh Laboratorium Mekanika Tanah Fakultas Teknik Universitas Indonesia (2007) menunjukkan bahwa lapisan atas dari tanah yang diselidiki setebal 7 m yang merupakan pasir sangat lepas

memiliki potensi yang sangat tinggi untuk terjadinya likuifaksi jika terjadi gempa dilihat dari nilai N-SPT yang rendah dan letak muka air tanah yang dangkal yaitu 3 meter dari permukaan tanah. Dari data pengujian tanah ini diperoleh nilai N-SPT pada lapisan atas setebal 7 m tersebut adalah bervariasi dari 5 pukulan, 4 pukulan dan 3 pukulan. Untuk keperluan perhitungan horizontal *displacement* tanah, maka lapisan tanah pasir setebal 7 meter ini dibagi menjadi tiga lapisan sesuai dengan nilai N-SPT nya dengan tebal lapisan 1 adalah 3 meter, lapisan 2 adalah 2 meter dan lapisan 3 adalah 2 meter. Dan muka air tanah terletak pada kedalaman 3 meter dari permukaan tanah.

Dikarenakan pengujian laboratorium hanya dilakukan mulai kedalaman tanah 7.5 meter sehingga properti tanah yang diperlukan untuk perhitungan *displacement* horizontal tanah dan juga perhitungan pegas tanah seperti berat isi tanah (γ) dan sudut geser dalam (ϕ) pada kedalaman 0 – 7 meter tidak tersedia pada laporan penyelidikan tanah ini. Oleh karena itu, untuk memperoleh properti tanah tersebut dilakukan dengan mengkorelasikan nilai N-SPT yang tersedia. Dimana korelasi ini dibuat dengan menggunakan program komputer AllPile yang biasa dipergunakan untuk perencanaan tiang pancang. Korelasi N-SPT pada program AllPile ini menggunakan pendekatan NAVY DM-7 (NAVFAC). Properti tanah yang dihasilkan melalui korelasi N-SPT dengan program AllPile ini dapat dilihat pada gambar 3.2 dibawah ini :

Zg-m	Soil Data Input	G-kN/m3	Phi	C-kN/m2	k-MN/m3	e50 or Dr	Nspt	Type
0	Sand/Gravel	14.9	25.0	0.0	0.0	0.00	0	4
3	Sand/Gravel[W]	7.0	29.8	0.0	3.7	19.97	5	4
5	Sand/Gravel[W]	6.7	29.0	0.0	2.8	16.43	4	4
7	Sand/Gravel[W]	6.5	28.4	0.0	2.2	13.82	3	4
	Click to Open							
	Click to Open							
	Click to Open							
	Click to Open							
	Click to Open							
	Click to Open							

Gambar 3.2. Korelasi N-SPT dengan Program AllPile

Nilai G pada output AllPile merupakan berat isi tanah (γ) dan Φ adalah sudut geser dalam (ϕ). Dimana untuk lapisan tanah yang berada dibawah muka air tanah, nilai berat isi tanah yang dihasilkan adalah merupakan berat isi tanah dalam kondisi terapung (γ_b atau γ') sehingga perlu dijumlahkan dengan berat isi air (γ_w) sebesar 9.81 kN/m^3 agar dapat dipergunakan sebagai berat isi jenuh (γ_{sat}). Dan untuk keperluan perhitungan dalam penelitian ini, berat isi tanah (γ) dan sudut geser dalam (ϕ) yang dihasilkan diambil nilai rata – rata antara dua lapisan tanah sehingga diperoleh data seperti pada tabel 3.2.

Tabel 3.2. Properti Tanah Terlikuifaksi

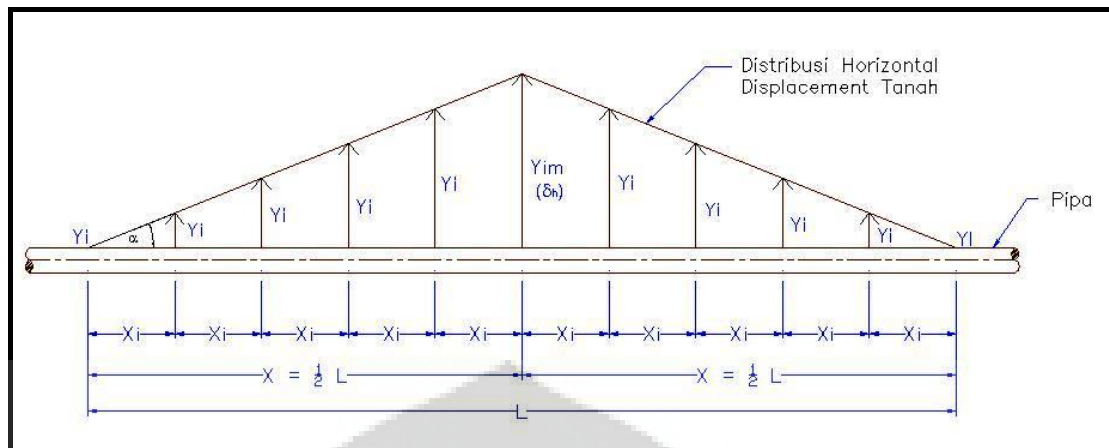
Parameter Tanah	Satuan	Lapisan 1	Lapisan 2	Lapisan 3
Berat isi (γ)	kN/m^3	15.9	-	-
Berat isi jenuh (γ_{sat})	kN/m^3	-	16.7	16.3
Sudut geser dalam (ϕ)	$^\circ$	27.4	29.4	28.7

Nilai berat isi tanah dan sudut geser dalam yang dihasilkan dari output Allpile ini selanjutnya dipergunakan dalam perhitungan *displacement* horizontal tanah dan perhitungan pegas tanah untuk dijadikan sebagai input pada program AutoPIPE.

3.3.3 Menghitung *Displacement Horizontal Tanah dan Pegas Tanah*

Sebelum memulai pemodelan pada AutoPIPE, maka terlebih dahulu perlu dihitung besarnya *displacement* horizontal tanah dengan menggunakan persamaan – persamaan yang terdapat pada “ *Recommended Practice for Design of Gas Transmission Pipeline in Areas Subject to Liquefaction* ” (Japan Gas Association, 2001) seperti yang sudah diuraikan pada sub bab 2.2.4.

Dalam penelitian ini, *displacement* horizontal tanah diasumsikan berbentuk segitiga sama kaki yang puncaknya berada pada bagian tengah panjang pipa yaitu pada jarak 100 m dari kiri dan kanan ujung pipa dan terdistribusi per 1 (satu) meter panjang pipa sehingga besarnya *displacement* horizontal tanah akan bervariasi pada setiap titik per 1 (satu) meter sesuai dengan lebar area tanah terlikuifaksi seperti terlihat pada gambar 3.3 dibawah ini :



Gambar 3.3. Distribusi Displacement Horizontal Tanah

Dimana :

L = lebar area tanah terlikuifaksi (meter)

$X = 0.5$ dari lebar area tanah terlikuifaksi (meter)

$X_i = 1$ (satu) meter

$Y_{im} = \delta_h =$ Displacement horizontal tanah maksimum (meter), yang dihitung dengan persamaan (2.7) sub bab 2.2.4.

$Y_i =$ Besarnya displacement horizontal tanah per jarak 1 (satu) meter sepanjang lebar area tanah terlikuifaksi dan dihitung dengan persamaan (3.1) dan (3.2).

$$Y_i = \tan \alpha \cdot (X - (X_i + \dots + X_n)) \quad (3.1)$$

$$\tan \alpha = \frac{\delta_h}{X} \quad (3.2)$$

Untuk perhitungan pegas tanah dilakukan untuk empat arah yaitu arah transversal horizontal, longitudinal, vertikal ke atas dan vertikal ke bawah dengan menggunakan persamaan – persamaan pada informasi petunjuk dalam program AutoPIPE yang juga telah dipaparkan pada sub bab 2.5.

Dan untuk perhitungan gaya tanah yang timbul akibat terjadinya displacement horizontal tanah dihitung dengan persamaan (3.3).

$$F_i = Y_1 \cdot K_1 \cdot D \quad (3.3)$$

Dimana :

F_i = Gaya yang timbul akibat *displacement* horizontal tanah per jarak 1 (meter) sepanjang lebar area tanah terlikuifaksi (kN)

Y_i = Besarnya *displacement* horizontal tanah per jarak 1 (satu) meter sepanjang lebar area tanah terlikuifaksi (meter).

K_1 = Kekakuan tanah terhadap pergerakan horizontal tanah (N/mm^2)
(dihitung dengan persamaan (2.13) pada sub bab 2.5.2)

D = Diameter pipa (mm)

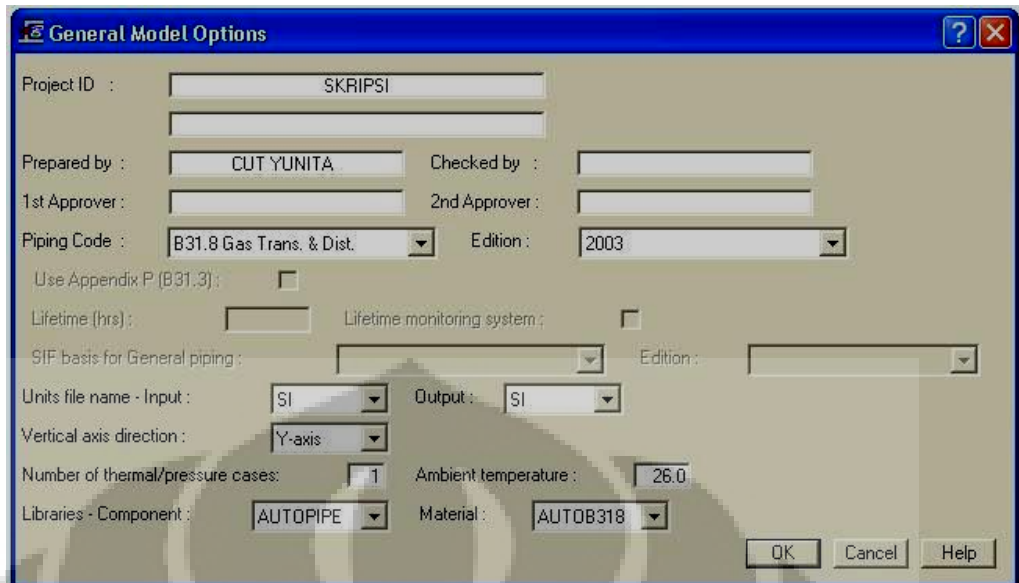
3.3.4 Pemodelan Pipa dan Pegas Tanah pada AutoPIPE

Pemodelan pipa dibuat untuk dua variasi diameter pipa, yaitu pipa 14 inci dan pipa 16 inci. Panjang pipa adalah 200 m dengan variasi lebar area tanah terlikuifaksi 10 m, 20 m, 30 m, 40 m, dan 50 m. Pemodelan juga dibuat untuk pipa dengan kondisi tanah yang belum mengalami likuifaksi untuk membandingkan rasio tegangan yang dialami pipa dan melihat respon pipa terhadap *displacement* horizontal tanah akibat likuifaksi. Jadi total pemodelan yang dibuat adalah 22 jenis model.

Dimana pegas tanah diberikan pada arah horizontal, longitudinal, vertikal ke atas dan vertikal ke bawah pipa. Tahap – tahap pemodelan pada AutoPIPE seperti dijelaskan dibawah ini :

1. Membuat file baru pada AutoPIPE

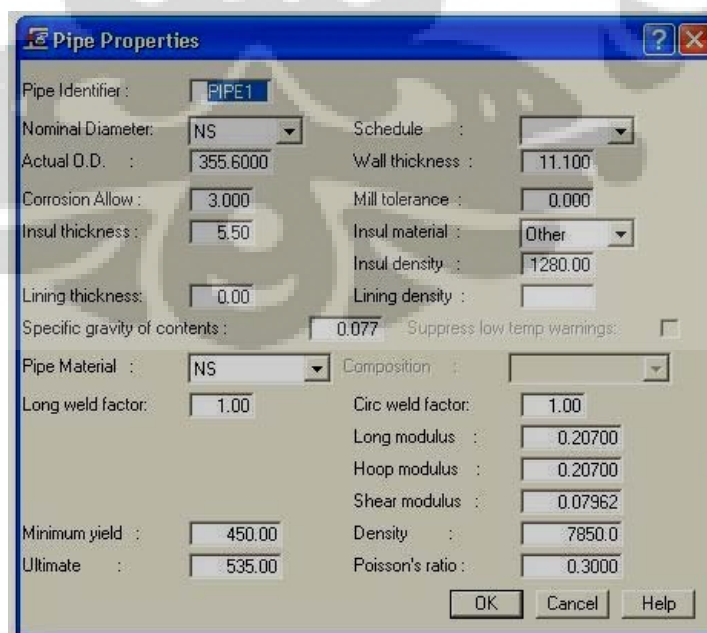
Untuk membuat file baru pada AutoPIPE, terlebih dahulu harus ditentukan peraturan teknis yang akan dijadikan acuan analisa, jenis satuan yang akan dipakai dan orientasi arah sumbu vertikal juga diperlukan input suhu disekeliling pipa. Karena pada penelitian ini pipa dalam kondisi terkubur (*buried*) maka suhu yang dipergunakan adalah suhu tanah disekitarnya yang diasumsikan sebesar $26^\circ C$.



Gambar 3.4. Membuat File Baru pada AutoPIPE

2. Memasukkan Properti Pipa

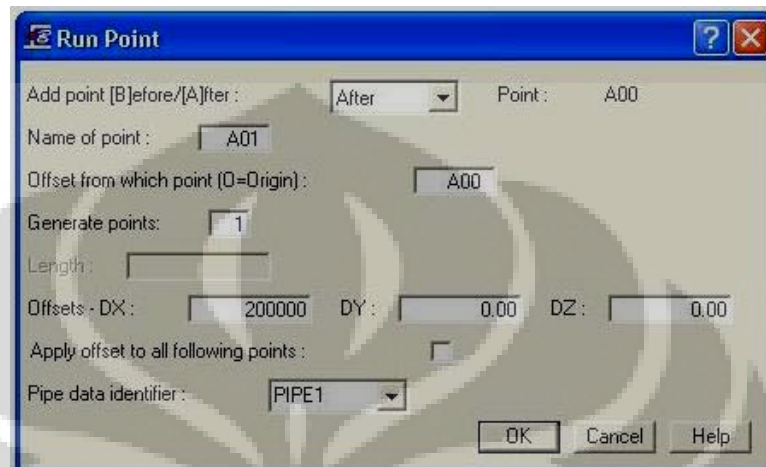
Pada tahap ini dimasukkan properti pipa yang akan dianalisa yaitu berupa diameter, ketebalan dinding pipa, berat jenis pipa, ketebalan dan berat jenis lapisan anti korosi, kuat leleh minimum spesifikasi (SMYS), kuat tarik minimum spesifikasi (SMTS), angka poisson, modulus Young, modulus geser dan juga *specific gravity* dari gas yang terdapat di dalam pipa.



Gambar 3.5. Memasukkan Properti Pipa

3. Membuat Bentuk Pipa

Panjang pipa dimasukkan sepanjang 200 m kemudian dibagi menjadi titik – titik simpul (*nodes*) sejarak 1 (satu) meter. Pada ujung bagian kanan dan kiri pipa diberi *Anchor* sebagai batasan analisa.



Gambar 3.6. Membuat Bentuk Pipa

4. Memasukkan Properti Tanah

Pegas tanah horizontal, longitudinal, vertikal keatas dan vertikal kebawah yang sudah dihitung dengan persamaan – persamaan dari informasi petunjuk pada program AutoPIPE dimasukkan sepanjang pipa sejarak 200 meter untuk pipa yang berada pada kondisi tanah yang belum mengalami likuifaksi. Dan untuk pemodelan pipa pada kondisi tanah terlikuifaksi, pegas tanah hanya di input sepanjang pipa yang berada pada area tanah tidak terlikuifaksi sedangkan untuk pipa yang berada pada kondisi tanah terlikuifaksi hanya diberikan gaya yang timbul akibat adanya *displacement* horizontal tanah (*lateral spreading*) karena likuifaksi yang terdistribusi per 1 (satu) meter panjang pipa.

Soil Properties

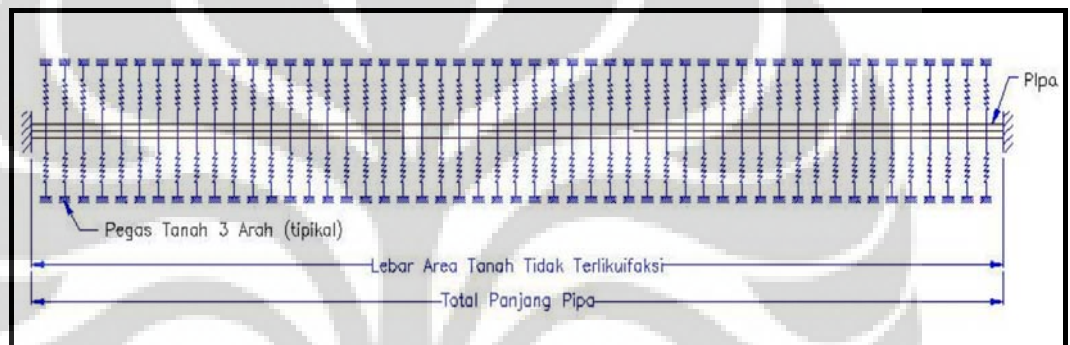
Soil identifier : SOIL1

Maximum spacing : 1000.00

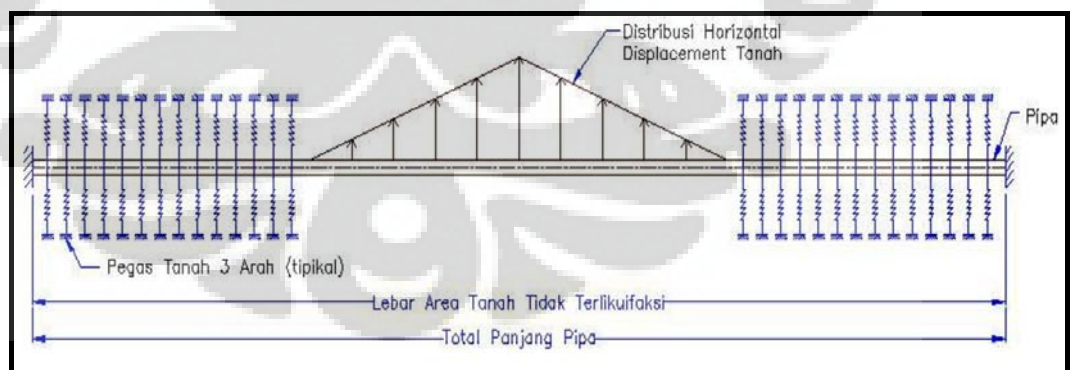
	k1	p1	k2
Trans Horizontal :	3.660	49450.000	0.001
Longitudinal :	0.170	2560.000	0.001
Trans Vertical Up :	1.060	31710.000	0.001
Trans Vertical Dn :	3.820	209740.000	0.001

OK Cancel Help

Gambar 3.7. Memasukkan Properti Tanah



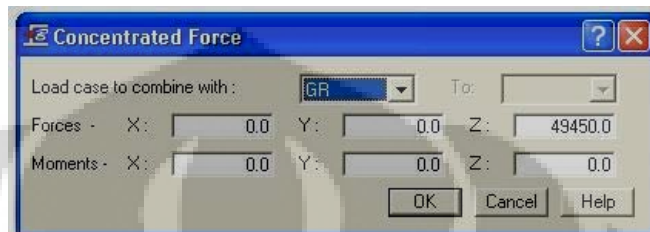
Gambar 3.8. Pemodelan Tanah untuk Kondisi Sebelum Likuifaksi



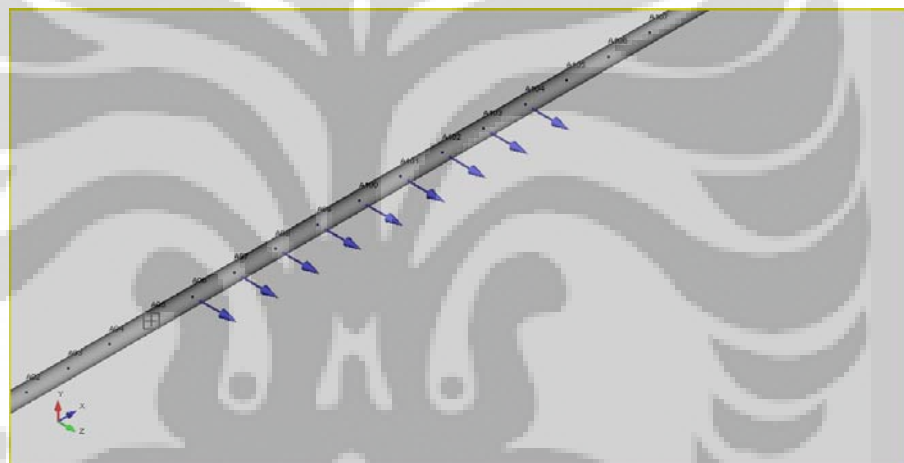
Gambar 3.9. Pemodelan Tanah untuk Kondisi Likuifaksi

5. Memasukkan Gaya Tanah yang timbul Akibat *Displacement* Horizontal Tanah (*Lateral Spreading*)

Gaya yang timbul akibat *displacement* horizontal tanah dimasukkan pada bagian pipa yang berada di area tanah terlikuifaksi dengan distribusi per 1 (satu) meter panjang pipa pada arah lateral pipa.



Gambar 3.10. Memasukkan *Concentrated Force*



Gambar 3.11. *Concentrated Force*

6. Mengatur Kombinasi Beban

Kombinasi beban untuk analisa tegangan (*stress*) pipa akibat pengaruh *displacement* horizontal tanah adalah GRT1P1, dimana :

GR = Beban gravitasi termasuk berat pipa, berat lapisan anti korosi, berat gas di dalam pipa dan berat tanah disekeliling pipa termasuk *displacement* horizontal tanah.

T1 = Suhu disekeliling pipa sampai dengan suhu maksimum gas di dalam pipa

P1 = Tekanan gas di dalam pipa.

Selanjutnya model siap untuk dianalisa dan kemudian dapat dilihat hasil analisa pada output AutoPIPE.

3.3.5 Cek Rasio Tegangan pada Pipa dan Catat Gaya Dalam serta Deformasi Pipa

Dari output AutoPIPE dapat diperiksa rasio tegangan pada pipa dan dilakukan pencatatan deformasi serta gaya dalam yang terjadi pada pipa akibat *displacement* horizontal tanah. Menurut peraturan teknis ASME B31.8 (2007), untuk analisa tegangan (*stress*) pipa ada beberapa parameter yang harus diperiksa. Rasio tegangan maksimum yang terjadi dibanding rasio tegangan yang diizinkan untuk setiap parameter ini tidak boleh lebih besar dari 1 (satu), karena jika lebih besar dari 1 (satu) maka pipa berada dalam kondisi gagal. Sebagai perbandingan akan dilihat rasio tegangan pipa pada kondisi tanah sebelum terlikuifaksi dan setelah terjadinya likuifaksi. Parameter – parameter yang harus diperiksa antara lain :

1. Tegangan Lingkar (*Hoop Stress*) adalah tegangan pada suatu pipa dengan ketebalan dinding t yang beraksi dalam arah melingkar pada bidang yang tegak lurus dengan sumbu longitudinal pipa yang dihasilkan oleh tekanan fluida P pada pipa dengan diameter D .

Tegangan lingkar (*hoop stress*) maksimum yang diizinkan adalah
 $S_H \leq F.E.T. SMYS$

2. Tegangan Ekspansi Akibat Temperatur yaitu tegangan yang dialami pipa akibat adanya ekspansi karena pengaruh temperatur didalam maupun diluar pipa.
3. Tegangan Longitudinal atau Tegangan Aksial adalah tegangan normal yang terjadi sejajar dengan sumbu longitudinal pipa yang dapat disebabkan oleh tekanan di dalam pipa, ekspansi akibat temperatur, beban – beban luar aksial lainnya juga tegangan lentur nominal akibat berat atau beban luar lainnya.

Tegangan longitudinal maksimum yang diizinkan adalah
 $S_L \leq 0.9.SMYS.T$

4. Tegangan Kombinasi adalah tegangan kombinasi antara tegangan lingkar (*hoop stress*) dan tegangan longitudinal.

Dalam pemodelan AutoPIPE untuk penelitian ini dipergunakan tegangan kombinasi Von mises, dimana tegangan izin maksimumnya adalah:

$$\left| S_L^2 + S_H^2 - S_L \cdot S_H \right|^{0.5} \leq K_C * SMYS * T$$

Keterangan :

S_H = Tegangan lingkaran

S_L = Tegangan longitudinal

SMYS = Kuat leleh minimum spesifikasi = 450 MPa (lihat Tabel 3.1)

F = Faktor desain yang berhubungan dengan dimana lokasi pipa berada (dalam penelitian ini pipa diasumsikan berada pada kelas 2 sehingga faktor desainnya sesuai dengan Table 841.114A ASME B31.8 (2007) adalah 0.6)

E = Faktor sambungan longitudinal yang berhubungan dengan proses manufaktur pipa, untuk spesifikasi pipa API 5L ERW = 1 (ASME B31.8 (2007) Tabel 841.115A)

T = Faktor penurunan suhu, untuk temperature dibawah 121.1 °C, T = 1 (ASME B31.8 (2007) Tabel 841.116A)

k = 1 (untuk beban non periodik yang terjadi dalam waktu singkat)

3.3.6 Analisa Perubahan Deformasi dan Gaya Dalam Pipa Akibat Kondisi Berbeda.

Setelah diperoleh output dari AutoPIPE, maka selanjutnya dilakukan analisa perubahan deformasi dan gaya dalam pipa akibat kondisi berbeda yaitu adanya perbedaan lebar area tanah terlikuifaksi juga perbedaan diameter pipa. Kemudian diambil kesimpulan dari penelitian ini.

BAB IV ANALISIS

4.1 Perhitungan *Displacement Horizontal Tanah*

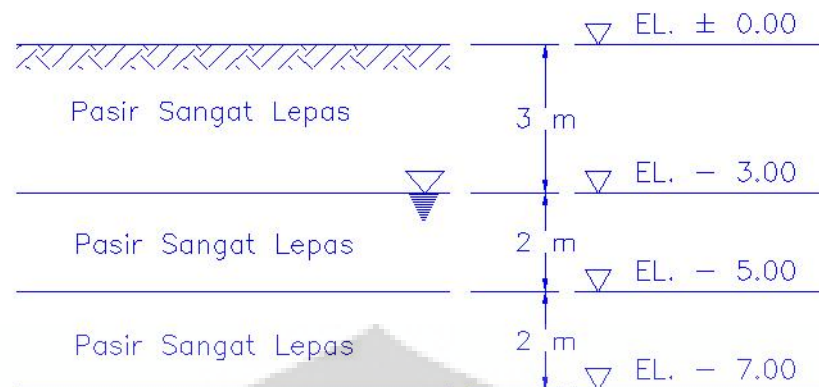
Dari data tanah untuk Proyek Dermaga 108 Pelabuhan Tanjung Priok Jakarta Utara, dilakukan perhitungan seberapa besar *displacement* horizontal tanah yang akan terjadi akibat adanya likuifaksi saat terjadi gempa. Analisa dilakukan dengan menggunakan persamaan – persamaan dari “ *Recommended Practice for Design of Gas Transmission Pipeline in Areas Subject to Liquefaction* ” (Japan Gas Association, 2001) seperti yang sudah diuraikan pada sub bab 2.2.4. Hasil perhitungan dijelaskan dibawah ini :

Table 4.1. Data Tanah Terlikuifaksi

Parameter	Simbol	Satuan	Nilai	Keterangan
Lapisan 1				
Jenis Tanah	-	-	Pasir sangat lepas	dari data Laporan Penyelidikan Tanah Proyek Dermaga 108 Pelabuhan Tanjung Priuk Jakarta Utara
Tebal Lapisan Tanah	H_1	m	3	
Nilai SPT tanah terlikuifaksi lapisan ke - 1	N_1	-	5	
Nilai SPT tanah terlikuifaksi lapisan ke - 1 yang berhubungan dengan tekanan oeverburden efektif sebesar 98 kN/m ²	N_{11}	-	9.01	lihat persamaan (2.9) sub bab 2.2.4
Koreksi nilai SPT lapisan tanah terlikuifaksi yang dihitung terhadap efek ukuran butiran tanah.	ΔN_{11}	-	10	dari <i>Recommended Practice</i> , untuk kondisi $20\% \leq FC$
Nilai SPT tanah likuifaksi lapisan ke - 1 yang terkoreksi yang dihitung terhadap efek ukuran butiran tanah.	N_{b1}	-	19.01	lihat persamaan (2.8) sub bab 2.2.4
Sudut Geser Dalam	ϕ_1	°	27.4	dari program AllPile dengan korelasi nilai N-SPT
Berat Isi Tanah	γ_1	kN/m ³	15.9	

Table 4.1. (Sambungan)

Parameter	Simbol	Satuan	Nilai	Keterangan
Lapisan 2				
Jenis Tanah	-	-	Pasir sangat lepas	dari data Laporan Penyelidikan Tanah Proyek Dermaga 108 Pelabuhan Tanjung Priuk Jakarta Utara
Tebal Lapisan Tanah	H_2	m	2	
Nilai SPT tanah terlikuifaksi lapisan ke - 2	N_2	-	4	
Nilai SPT tanah terlikuifaksi lapisan ke - 2 yang berhubungan dengan tekanan oeverburden efektif sebesar 98 kN/m ²	N_{I2}	-	5.41	lihat persamaan (2.9) sub bab 2.2.4
Koreksi nilai SPT lapisan tanah terlikuifaksi yang dihitung terhadap efek ukuran butiran tanah.	ΔN_{I2}	-	10	dari <i>Recommended Practice</i> , untuk kondisi $20\% \leq FC$
Nilai SPT tanah likuifaksi lapisan ke - 2 yang terkoreksi yang dihitung terhadap efek ukuran butiran tanah.	N_{b2}	-	15.41	lihat persamaan (2.8) sub bab 2.2.4
Sudut Geser Dalam	ϕ_2	°	29.4	dari program AllPile dengan korelasi nilai N-SPT
Berat Isi Tanah	γ_2/γ_{sat}	kN/m ³	16.7	
Lapisan 3				
Jenis Tanah	-	-	Pasir sangat lepas	dari data Laporan Penyelidikan Tanah Proyek Dermaga 108 Pelabuhan Tanjung Priuk Jakarta Utara
Tebal Lapisan Tanah	H_3	m	2	
Nilai SPT tanah terlikuifaksi lapisan ke - 3	N_3	-	3	
Nilai SPT tanah terlikuifaksi lapisan ke - 3 yang berhubungan dengan tekanan oeverburden efektif sebesar 98 kN/m ²	N_{I3}	-	3.66	lihat persamaan (2.9) sub bab 2.2.4
Koreksi nilai SPT lapisan tanah terlikuifaksi yang dihitung terhadap efek ukuran butiran tanah.	ΔN_{I3}	-	10	dari <i>Recommended Practice</i> , untuk kondisi $20\% \leq FC$
Nilai SPT tanah likuifaksi lapisan ke - 3 yang terkoreksi yang dihitung terhadap efek ukuran butiran tanah.	N_{b3}	-	13.66	lihat persamaan (2.8) sub bab 2.2.4
Sudut Geser Dalam	ϕ_3	°	28.7	dari program AllPile dengan korelasi nilai N-SPT
Berat Isi Tanah	γ_3/γ_{sat}	kN/m ³	16.3	



Gambar 4.1. Elevasi dan Ketebalan Lapisan Tanah Terlikuifaksi

Selanjutnya dilakukan perhitungan tegangan total *overburden* pada bagian permukaan tanah terlikuifaksi lapisan ke – i dan tegangan efektif *overburden* pada bagian tengah tanah terlikuifaksi lapisan ke – i dengan mengacu kepada gambar 4.1.

1. Tegangan total *overburden* pada bagian permukaan tanah terlikuifaksi lapisan ke – i :

- Kedalaman 0 meter (permukaan lapisan 1) :

$$\sigma_{v1} = \gamma_1 \cdot 0 = 0$$

- Kedalaman 3 meter (permukaan lapisan 2) :

$$\sigma_{v2} = \sigma_{v1} + (\gamma_1 \cdot 3) = 47.70 \text{ kN/m}^2$$

- Kedalaman 5 meter (permukaan lapisan 3) :

$$\sigma_{v3} = \sigma_{v2} + (\gamma_2 \cdot (5-3)) = 81.10 \text{ kN/m}^2$$

2. Tegangan efektif *overburden* pada bagian tengah tanah terlikuifaksi lapisan ke – i :

- Kedalaman 1.5 meter (bagian tengah lapisan 1) :

$$\sigma_{v1} = \gamma_1 \cdot 1.5 = 23.85 \text{ kN/m}^2$$

$$\mu_1 = \gamma_w \cdot 1.5 = 0$$

maka,

$$\sigma'_{v1} = \sigma_{v1} - \mu = 23.85 \text{ kN/m}^2$$

- Kedalaman 4 meter (bagian tengah lapisan 2) :

$$\sigma_{v2} = 3 \cdot \gamma_1 + ((4 - 3) \cdot \gamma_2) = 64.40 \text{ kN/m}^2$$

$$\mu_2 = \gamma_w \cdot (4 - 3) = 9.81 \text{ kN/m}^2$$

maka,

$$\sigma'_{v2} = \sigma_{v2} - \mu_2 = 54.59 \text{ kN/m}^2$$

- Kedalaman 6 meter (bagian tengah lapisan 3) :

$$\sigma_{v3} = 3 \cdot \gamma_1 + ((5 - 3) \cdot \gamma_2) + ((6 - 5) \cdot \gamma_3) = 97.40 \text{ kN/m}^2$$

$$\mu_3 = \gamma_w \cdot (6 - 3) = 29.43 \text{ kN/m}^2$$

maka,

$$\sigma'_{v3} = \sigma_{v3} - \mu_3 = 67.97 \text{ kN/m}^2$$

Tabel 4.2. *Displacement* Horizontal Tanah

Parameter	Simbol	Satuan	Nilai	Keterangan
Koefisien urban area	c	-	1	dari <i>Recommended Practice</i> , untuk pipa yang ditanam bukan pada kawasan urban
Tingkat kemiringan permukaan tanah	θ_g	%	3	Menurut O'Rourke & Lane (1989)
<i>Displacement</i> horizontal tanah	δ_h	m	1.76	lihat persamaan (2.7) sub bab 2.2.4

Dari hasil perhitungan dapat dilihat bahwa dengan jenis dan kondisi tanah seperti pada Dermaga 108 Pelabuhan Tanjung Priok Jakarta Utara, jika terjadi gempa yang memicu terjadinya likuifaksi maka *displacement* horizontal tanah maksimum yang akan terjadi adalah cukup besar yaitu 1.76 meter. Selanjutnya dengan menggunakan metodologi pada sub bab 3.3.3 diperoleh hasil perhitungan distribusi *displacement* horizontal tanah untuk masing – masing lebar area tanah terlikuifaksi seperti pada tabel 4.3, sampai dengan tabel 4.7.

Tabel 4.3. Distribusi *Displacement* Horizontal Tanah
untuk Lebar Area Tanah Terlikuifaksi = 10 m

Titik	Displacement Horizontal Tanah (m)
Y0	0.00
Y1	0.35
Y2	0.70
Y3	1.06
Y4	1.41
Y5	1.76
Y6	1.41
Y7	1.06
Y8	0.70
Y9	0.35
Y10	0.00

Tabel 4.4. Distribusi *Displacement* Horizontal Tanah
untuk Lebar Area Tanah Terlikuifaksi = 20 m

Titik	Displacement Horizontal Tanah (m)
Y0	0.00
Y1	0.18
Y2	0.35
Y3	0.53
Y4	0.70
Y5	0.88
Y6	1.06
Y7	1.23
Y8	1.41
Y9	1.59
Y10	1.76
Y11	1.59
Y12	1.41
Y13	1.23
Y14	1.06
Y15	0.88
Y16	0.70
Y17	0.53
Y18	0.35
Y19	0.18
Y20	0.00

Tabel 4.5. Distribusi *Displacement* Horizontal Tanah
 untuk Lebar Area Tanah Terlikuifaksi = 30 m

Titik	Displacement Horizontal Tanah (m)
Y0	0.00
Y1	0.12
Y2	0.23
Y3	0.35
Y4	0.47
Y5	0.59
Y6	0.70
Y7	0.82
Y8	0.94
Y9	1.06
Y10	1.17
Y11	1.29
Y12	1.41
Y13	1.53
Y14	1.64
Y15	1.76
Y16	1.64
Y17	1.53
Y18	1.41
Y19	1.29
Y20	1.17
Y21	1.06
Y22	0.94
Y23	0.82
Y24	0.70
Y25	0.59
Y26	0.47
Y27	0.35
Y28	0.23
Y29	0.12
Y30	0.00

Tabel 4.6. Distribusi *Displacement* Horizontal Tanah
 untuk Lebar Area Tanah Terlikuifaksi = 40 m

Titik	Displacement Horizontal Tanah (m)
Y0	0.00
Y1	0.09
Y2	0.18
Y3	0.26
Y4	0.35
Y5	0.44
Y6	0.53
Y7	0.62
Y8	0.70
Y9	0.79
Y10	0.88
Y11	0.97
Y12	1.06
Y13	1.15
Y14	1.23
Y15	1.32
Y16	1.41
Y17	1.50
Y18	1.59
Y19	1.67
Y20	1.76
Y21	1.67
Y22	1.59
Y23	1.50
Y24	1.41
Y25	1.32
Y26	1.23
Y27	1.15
Y28	1.06
Y29	0.97
Y30	0.88
Y31	0.79
Y32	0.70
Y33	0.62
Y34	0.53
Y35	0.44
Y36	0.35
Y37	0.26
Y38	0.18
Y39	0.09
Y40	0.00

Tabel 4.7. Distribusi *Displacement* Horizontal Tanah
 untuk Lebar Area Tanah Terlikuifaksi = 50 m

Titik	Displacement Horizontal Tanah (m)
Y0	0.00
Y1	0.07
Y2	0.14
Y3	0.21
Y4	0.28
Y5	0.35
Y6	0.42
Y7	0.49
Y8	0.56
Y9	0.63
Y10	0.70
Y11	0.78
Y12	0.85
Y13	0.92
Y14	0.99
Y15	1.06
Y16	1.13
Y17	1.20
Y18	1.27
Y19	1.34
Y20	1.41
Y21	1.48
Y22	1.55
Y23	1.62
Y24	1.69
Y25	1.76
Y26	1.69
Y27	1.62
Y28	1.55
Y29	1.48
Y30	1.41
Y31	1.34
Y32	1.27
Y33	1.20
Y34	1.13
Y35	1.06
Y36	0.99
Y37	0.92
Y38	0.85
Y39	0.78
Y40	0.70
Y41	0.63
Y42	0.56
Y43	0.49

Tabel 4.7.(Sambungan)

Titik	Displacement Horizontal Tanah (m)
Y44	0.42
Y45	0.35
Y46	0.28
Y47	0.21
Y48	0.14
Y49	0.07
Y50	0.00

4.2 Perhitungan Pegas Tanah

Pegas tanah dihitung dengan menggunakan persamaan – persamaan dari informasi petunjuk AutoPIPE sebagaimana telah dipaparkan pada sub bab 2.5. Pegas tanah ini dihitung empat arah yaitu pegas tanah arah horizontal, longitudinal, vertikal ke atas dan vertikal ke bawah dan dihitung untuk masing – masing diameter pipa 14 inci dan pipa 16 inci. Adapun properti tanah yang akan dipakai dalam perhitungan pegas tanah adalah properti tanah lapisan 1 (lapisan tanah paling atas) setebal 3 meter dimana pipa terkubur (lihat tabel 4.8.).

Tabel 4.8. Properti Tanah untuk Perhitungan Pegas Tanah

Parameter	Simbol	Satuan	Nilai	Keterangan
Kedalaman dari permukaan tanah ke bagian atas pipa	D	mm	1500	
Berat isi efektif tanah	$\gamma'/\gamma'_1/\gamma'_3$	N/m ³	15900	dari program AllPile dengan korelasi nilai N-SPT
Berat isi tanah	γ	N/m ³	15900	
Parameter kekakuan tanah	k_i	N/mm ³	0.0022	lihat tabel 2.6 sub bab 2.5.2

4.2.1 Pegas Tanah untuk Pipa 14 Inchi

Untuk pipa 14 inci, urutan perhitungan pegas tanah diperlihatkan pada tabel 4.9 sampai dengan tabel 4.14.

Tabel 4.9. Properti Pipa 14 inci untuk Perhitungan Pegas Tanah

Parameter	Simbol	Satuan	Nilai	Keterangan
Diameter Luar Pipa	OD	mm	355.6	dari data <i>pipeline</i> Proyek K
Ketebalan Dinding Pipa	t_{st}	mm	11.1	
Ketebalan lapisan anti korosi	t_{corr}	mm	5.5	

Tabel 4.10. Perhitungan Faktor – Faktor Tanah dan Berat Tanah untuk Pipa 14 inci

Parameter	Simbol	Satuan	Nilai	Keterangan
Total diameter pipa	d	mm	366.6	$d = OD + 2.t_{corr}$
Kedalaman dari permukaan tanah ke bagian bawah (<i>bottom</i>) pipa	H	mm	1866.6	$H = D + d$
Kedalaman dari permukaan tanah ke bagian tengah pipa	Z	mm	1683.3	$Z = D + (0.5.d)$
Parameter nondimensional	H/d	-	5.09	
Parameter nondimensional	D/d	-	4.09	
Koefisien daya tahan transversal	R_s	-	5.04	lihat tabel 2.7 sub bab 2.5.2 (dengan interpolasi)
Koefisien tekanan lateral tanah pasir	k_s	-	0.25	dari informasi petunjuk AutoPIPE
Sudut geser dalam dari tanah terhadap pipa (<i>Angle of friction of soil against pipe face</i>)	δ	°	18.4	menurut “ Lindeburg (n.d.) “, $\delta=0,67.\phi$
Sudut geser dalam	ϕ	°	27.4	dari program AllPile dengan korelasi N-SPT

Tabel 4.10. (Sambungan)

Parameter	Simbol	Satuan	Nilai	Keterangan
Faktor daya dukung (<i>Bearing Capacity Factor</i>)	N_c		29.0	lihat gambar 2.12 (Terzaghi) sub bab 2.5.3
	N_q	-	18.0	lihat gambar 2.12 (Terzaghi) sub bab 2.5.3
	N_γ	-	13.0	lihat gambar 2.12 (Terzaghi) sub bab 2.5.3
Faktor <i>Breakout</i>	F_c		6.2	lihat gambar 2.13 sub bab 2.5.4
Faktor <i>Breakout</i>	F_q		2.6	lihat gambar 2.14 sub bab 2.5.4
Berat isi efektif dari irisan tanah (<i>Effective unit weight of soil wedge</i>)	W_s	kN/m	8.97	lihat persamaan (2.19) sub bab 2.5.4

Tabel 4.11. Daya Tahan Tanah Arah Transversal Horizontal untuk Pipa 14 inci

Parameter	Simbol	Satuan	Nilai	Keterangan
Kekakuan tanah arah transversal horizontal	K_1	N/mm ²	3.66	lihat persamaan (2.13) sub bab 2.5.2
Daya tahan ultimate tanah terhadap <i>displacement</i> transversal horizontal pipa	P_1	kN/m	49.45	lihat persamaan (2.14) sub bab 2.5.2

Tabel 4.12. Daya Tahan Tanah Arah Longitudinal untuk Pipa 14 inci

Parameter	Simbol	Satuan	Nilai	Keterangan
Kekakuan tanah arah longitudinal	K_1	N/mm ²	0.17	lihat persamaan (2.12) sub bab 2.5.1
Daya tahan ultimate tanah terhadap <i>displacement</i> longitudinal pipa	P_1	kN/m	2.56	lihat persamaan (2.10) sub bab 2.5.1

Tabel 4.13. Daya Tahan Tanah Arah Vertikal Ke Bawah untuk Pipa 14 inci

Parameter	Simbol	Satuan	Nilai	Keterangan
Kekakuan tanah arah vertikal ke bawah	K_1	N/mm ²	3.82	lihat persamaan (2.17) sub bab 2.5.3
Daya tahan ultimate tanah terhadap <i>displacement</i> pipa arah vertikal ke bawah	P_1	kN/m	209.74	lihat persamaan (2.15) sub bab 2.5.3

Tabel 4.14. Daya Tahan Tanah Arah Vertikal Ke Atas untuk Pipa 14 inci

Parameter	Simbol	Satuan	Nilai	Keterangan
Kekakuan tanah arah vertikal ke atas	K_1	N/mm ²	1.06	lihat persamaan (2.21) sub bab 2.5.4
Daya tahan ultimate tanah terhadap <i>displacement</i> pipa arah vertikal ke atas	P_1	kN/m	31.71	lihat persamaan (2.18) sub bab 2.5.4

4.2.2 Pegas Tanah untuk Pipa 16 Inchi

Untuk pipa 16 inci, urutan perhitungan pegas tanah diperlihatkan pada tabel 4.15 sampai dengan tabel 4.20.

Tabel 4.15. Properti Pipa 16 inci untuk Perhitungan Pegas Tanah

Parameter	Simbol	Satuan	Nilai	Keterangan
Diameter Luar Pipa	OD	mm	406.4	dari data <i>pipeline</i> Proyek K
Ketebalan Dinding Pipa	t_{st}	mm	12.7	
Ketebalan lapisan anti korosi	t_{corr}	mm	5.5	

Tabel 4.16. Perhitungan Faktor – Faktor Tanah dan Berat Tanah untuk Pipa 16 inci

Parameter	Simbol	Satuan	Nilai	Keterangan
Total diameter pipa	d	mm	417.4	$d = OD + 2.t_{corr}$
Kedalaman dari permukaan tanah ke bagian bawah (<i>bottom</i>) pipa	H	mm	1917.4	$H = D + d$
Kedalaman dari permukaan tanah ke bagian tengah pipa	Z	mm	1708.7	$Z = D + (0.5.d)$
Parameter nondimensional	H/d	-	4.59	
Parameter nondimensional	D/d	-	3.59	
Koefisien daya tahan transversal	R_s	-	4.80	lihat tabel 2.7 sub bab 2.5.2 (dengan interpolasi)
Koefisien tekanan lateral tanah pasir	k_s	-	0.25	dari informasi petunjuk AutoPIPE
Sudut geser dalam dari tanah terhadap pipa (<i>Angle of friction of soil against pipe face</i>)	δ	$^\circ$	18.4	menurut “Lindeburg (n.d.)”, $\delta=0,67.\phi$
Sudut geser dalam	ϕ	$^\circ$	27.4	dari program AllPile dengan korelasi N-SPT
Faktor daya dukung (<i>Bearing Capacity Factor</i>)	N_c		29.0	lihat gambar 2.12 (Terzaghi) sub bab 2.5.3
	N_q	-	18.0	lihat gambar 2.12 (Terzaghi) sub bab 2.5.3
	N_γ	-	13.0	lihat gambar 2.12 (Terzaghi) sub bab 2.5.3
Faktor <i>Breakout</i>	F_c		6.2	lihat gambar 2.13 sub bab 2.5.4
Faktor <i>Breakout</i>	F_q		2.6	lihat gambar 2.14 sub bab 2.5.4
Berat isi efektif dari irisan tanah (<i>Effective unit weight of soil wedge</i>)	W_s	kN/m	10.25	lihat persamaan (2.19) sub bab 2.5.4

Tabel 4.17. Daya Tahan Tanah Arah Transversal Horizontal untuk Pipa 16 inci

Parameter	Simbol	Satuan	Nilai	Keterangan
Kekakuan tanah arah transversal horizontal	K_1	N/mm ²	3.71	lihat persamaan (2.13) sub bab 2.5.2
Daya tahan ultimate tanah terhadap <i>displacement</i> transversal horizontal pipa	P_1	kN/m	54.43	lihat persamaan (2.14) sub bab 2.5.2

Tabel 4.18. Daya Tahan Tanah Arah Longitudinal untuk Pipa 16 inci

Parameter	Simbol	Satuan	Nilai	Keterangan
Kekakuan tanah arah longitudinal	K_1	N/mm ²	0.18	lihat persamaan (2.12) sub bab 2.5.1
Daya tahan ultimate tanah terhadap <i>displacement</i> longitudinal pipa	P_1	kN/m	2.96	lihat persamaan (2.10) sub bab 2.5.1

Tabel 4.19. Daya Tahan Tanah Arah Vertikal Ke Bawah untuk Pipa 16 inci

Parameter	Simbol	Satuan	Nilai	Keterangan
Kekakuan tanah arah vertikal kebawah	K_1	N/mm ²	3.95	lihat persamaan (2.17) sub bab 2.5.3
Daya tahan ultimate tanah terhadap <i>displacement</i> pipa arah vertikal kebawah	P_1	kN/m	247.06	lihat persamaan (2.15) sub bab 2.5.3

Table 4.20. Daya Tahan Tanah Arah Vertikal Ke Atas untuk Pipa 16 inci

Parameter	Simbol	Satuan	Nilai	Keterangan
Kekakuan tanah arah vertical keatas	K_1	N/mm ²	1.20	lihat persamaan (2.21) sub bab 2.5.4
Daya tahan ultimate tanah terhadap <i>displacement</i> pipa arah vertikal keatas	P_1	kN/m	36.14	lihat persamaan (2.18) sub bab 2.5.4

Hasil perhitungan pegas tanah empat arah ini selanjutnya akan menjadi input untuk properti tanah pada pemodelan AutoPIPE. Sedangkan untuk perhitungan gaya tanah yang timbul akibat *displacement* horizontal tanah yang akan dipergunakan hanya P_1 dan K_1 arah horizontal saja. Dari hasil perhitungan pegas tanah untuk pipa diameter 14 inci dan 16 inci, dapat dilihat bahwa semakin besar diameter pipa maka kekakuan dan daya tahan *ultimate* tanah akan semakin besar pula karena semakin besarnya volume tanah yang mengelilingi pipa.

4.3 Perhitungan Gaya Tanah Akibat *Displacement* Horizontal Tanah

Setelah perhitungan distribusi *displacement* horizontal tanah (Y_i) dan pegas tanah dilakukan, maka selanjutnya dapat dihitung seberapa besar gaya tanah yang ditimbulkan akibat terjadinya *displacement* horizontal tanah ini. Gaya ini dihitung dengan menggunakan metodologi pada sub bab 3.3.3. Jika gaya tanah yang dihitung hasilnya lebih besar dari daya tahan *ultimate* tanah terhadap pergerakan horizontal tanah (P_1) pada perhitungan pegas tanah, maka gaya yang akan dipakai sebagai input ke AutoPIPE adalah daya tahan *ultimate* tanah terhadap pergerakan horizontal tanah (P_1) untuk masing – masing diameter pipa karena apabila gaya tanah yang timbul akibat *displacement* horizontal tanah ini lebih besar dari P_1 , maka artinya tanah sudah mengalami kegagalan (sudah melewati batas *ultimate* daya tahannya).

Gaya tanah yang ditimbulkan akibat terjadinya *displacement* horizontal tanah ini akan di input ke AutoPIPE pada bagian pipa sepanjang lebar area tanah terlikuifaksi yang bervariasi antara 10 m, 20 m, 30 m, 40 m dan 50 m per jarak 1 (satu) meter.

4.3.1 Gaya Tanah untuk Pipa 14 inci

Hasil perhitungan gaya tanah yang terjadi akibat adanya *displacement* horizontal tanah (F_i) terhadap pipa 14 inci dapat dilihat pada tabel 4.21 sampai dengan tabel 4.25. Dimana kekakuan tanah arah transversal horizontal (K_1) adalah sebesar 3.66 N/mm^2 dan daya tahan *ultimate* tanah terhadap pergerakan horizontal tanah (P_1) untuk pipa 14 inci adalah sebesar 49.45 kN (lihat tabel 4.11).

Tabel 4.21. Gaya Tanah Akibat *Displacement* Horizontal Tanah (F_i)
untuk Pipa 14 inci dan Lebar Area Tanah Terlikuifaksi = 10 m

Jarak (m)	F_i (kN)	P_1 (kN)	Gaya yang Digunakan (kN)
0	0.00	49.45	0.00
1	458.11	49.45	49.45
2	916.23	49.45	49.45
3	1374.34	49.45	49.45
4	1832.46	49.45	49.45
5	2290.57	49.45	49.45
6	1832.46	49.45	49.45
7	1374.34	49.45	49.45
8	916.23	49.45	49.45
9	458.11	49.45	49.45
10	0.00	49.45	0.00

Tabel 4.22. Gaya Tanah Akibat *Displacement* Horizontal Tanah (F_i)
untuk Pipa 14 inci dan Lebar Area Tanah Terlikuifaksi = 20 m

Jarak (m)	F_i (kN)	P_1 (kN)	Gaya yang Digunakan (kN)
0	0.00	49.45	0.00
1	229.06	49.45	49.45
2	458.11	49.45	49.45
3	687.17	49.45	49.45
4	916.23	49.45	49.45
5	1145.29	49.45	49.45
6	1374.34	49.45	49.45
7	1603.40	49.45	49.45
8	1832.46	49.45	49.45
9	2061.51	49.45	49.45
10	2290.57	49.45	49.45
11	2061.51	49.45	49.45
12	1832.46	49.45	49.45
13	1603.40	49.45	49.45
14	1374.34	49.45	49.45
15	1145.29	49.45	49.45
16	916.23	49.45	49.45
17	687.17	49.45	49.45
18	458.11	49.45	49.45
19	229.06	49.45	49.45
20	0.00	49.45	0.00

Tabel 4.23. Gaya Tanah Akibat *Displacement* Horizontal Tanah (F_i)
Untuk Pipa 14 inci dan Lebar Area Tanah Terlikuifaksi = 30 m

Jarak (m)	F_i (kN)	P_1 (kN)	Gaya yang Digunakan (kN)
0	0.00	49.45	0.00
1	152.70	49.45	49.45
2	305.41	49.45	49.45
3	458.11	49.45	49.45
4	610.82	49.45	49.45
5	763.52	49.45	49.45
6	916.23	49.45	49.45
7	1068.93	49.45	49.45
8	1221.64	49.45	49.45
9	1374.34	49.45	49.45
10	1527.05	49.45	49.45
11	1679.75	49.45	49.45
12	1832.46	49.45	49.45
13	1985.60	49.45	49.45
14	2137.87	49.45	49.45
15	2288.54	49.45	49.45
16	2137.87	49.45	49.45
17	1985.16	49.45	49.45
18	1832.46	49.45	49.45
19	1679.75	49.45	49.45
20	1527.05	49.45	49.45
21	1374.34	49.45	49.45
22	1221.64	49.45	49.45
23	1068.93	49.45	49.45
24	916.23	49.45	49.45
25	763.52	49.45	49.45
26	610.82	49.45	49.45
27	458.11	49.45	49.45
28	305.41	49.45	49.45
29	152.70	49.45	49.45
30	0.00	49.45	0.00

Tabel 4.24. Gaya Tanah Akibat *Displacement* Horizontal Tanah (F_i)
 untuk Pipa 14 inci dan Lebar Area Tanah Terlikuifikasi = 40 m

Jarak (m)	F_i (kN)	P_1 (kN)	Gaya yang Digunakan (kN)
0	0.00	49.45	0.00
1	114.53	49.45	49.45
2	229.06	49.45	49.45
3	343.59	49.45	49.45
4	458.11	49.45	49.45
5	572.64	49.45	49.45
6	687.17	49.45	49.45
7	801.70	49.45	49.45
8	916.23	49.45	49.45
9	1030.76	49.45	49.45
10	1145.29	49.45	49.45
11	1259.81	49.45	49.45
12	1374.34	49.45	49.45
13	1488.87	49.45	49.45
14	1603.40	49.45	49.45
15	1717.93	49.45	49.45
16	1832.46	49.45	49.45
17	1946.99	49.45	49.45
18	2061.51	49.45	49.45
19	2176.04	49.45	49.45
20	2288.54	49.45	49.45
21	2176.04	49.45	49.45
22	2061.51	49.45	49.45
23	1946.99	49.45	49.45
24	1832.46	49.45	49.45
25	1717.93	49.45	49.45
26	1603.40	49.45	49.45
27	1488.87	49.45	49.45
28	1374.34	49.45	49.45
29	1259.81	49.45	49.45
30	1145.29	49.45	49.45
31	1030.76	49.45	49.45
32	916.23	49.45	49.45
33	801.70	49.45	49.45
34	687.17	49.45	49.45
35	572.64	49.45	49.45
36	458.11	49.45	49.45
37	343.59	49.45	49.45
38	229.06	49.45	49.45
39	114.53	49.45	49.45
40	0.00	49.45	0.00

Tabel 4.25. Gaya Tanah Akibat *Displacement* Horizontal Tanah (F_i)
Untuk Pipa 14 inci dan Lebar Area Tanah Terlikuifikasi = 50 m

Jarak (m)	F_i (kN)	P_1 (kN)	Gaya yang Digunakan (kN)
0	0.00	49.45	0.00
1	91.62	49.45	49.45
2	183.25	49.45	49.45
3	274.87	49.45	49.45
4	366.49	49.45	49.45
5	458.11	49.45	49.45
6	549.74	49.45	49.45
7	641.36	49.45	49.45
8	732.98	49.45	49.45
9	824.61	49.45	49.45
10	916.23	49.45	49.45
11	1007.85	49.45	49.45
12	1099.47	49.45	49.45
13	1191.10	49.45	49.45
14	1282.72	49.45	49.45
15	1374.34	49.45	49.45
16	1465.97	49.45	49.45
17	1557.59	49.45	49.45
18	1649.21	49.45	49.45
19	1740.83	49.45	49.45
20	1832.46	49.45	49.45
21	1924.08	49.45	49.45
22	2015.70	49.45	49.45
23	2107.33	49.45	49.45
24	2198.95	49.45	49.45
25	2290.57	49.45	49.45
26	2198.95	49.45	49.45
27	2107.33	49.45	49.45
28	2015.70	49.45	49.45
29	1924.08	49.45	49.45
30	1832.46	49.45	49.45
31	1740.83	49.45	49.45
32	1649.21	49.45	49.45
33	1557.59	49.45	49.45
34	1465.97	49.45	49.45
35	1374.34	49.45	49.45
36	1282.72	49.45	49.45
37	1191.10	49.45	49.45
38	1099.47	49.45	49.45
39	1007.85	49.45	49.45
40	916.23	49.45	49.45
42	824.61	49.45	49.45
42	732.98	49.45	49.45
43	641.36	49.45	49.45

Tabel 4.25. (Sambungan)

Jarak (m)	F_i (kN)	P_1 (kN)	Gaya yang Digunakan (kN)
44	549.74	49.45	49.45
45	458.11	49.45	49.45
46	366.49	49.45	49.45
47	274.87	49.45	49.45
48	183.25	49.45	49.45
49	91.62	49.45	49.45
50	0.00	49.45	0.00

4.3.2 Gaya Tanah untuk Pipa 16 inci

Hasil perhitungan gaya tanah yang terjadi akibat adanya *displacement* horizontal tanah (F_i) terhadap pipa 16 inci dapat dilihat pada tabel 4.26 sampai dengan tabel 4.30. Dimana kekakuan tanah arah transversal horizontal (K_1) adalah sebesar 3.71 N/mm^2 dan daya tahan *ultimate* tanah terhadap pergerakan horizontal tanah (P_1) untuk pipa 14 inci adalah sebesar 54.43 kN (lihat tabel 4.17).

Tabel 4.26. Gaya Tanah Akibat *Displacement* Horizontal Tanah (F_i) untuk Pipa 16 inci dan Lebar Area Tanah Terlikuifaksi = 10 m

Jarak (m)	F_i (kN)	P_1 (kN)	Gaya yang Digunakan (kN)
0	0.00	54.43	0.00
1	531.46	54.43	54.43
2	1062.92	54.43	54.43
3	1594.38	54.43	54.43
4	2125.84	54.43	54.43
5	2657.30	54.43	54.43
6	2125.84	54.43	54.43
7	1594.38	54.43	54.43
8	1062.92	54.43	54.43
9	531.46	54.43	54.43
10	0.00	54.43	0.00

Tabel 4.27. Gaya Tanah Akibat *Displacement* Horizontal Tanah (F_i)
 untuk Pipa 16 inci dan Lebar Area Tanah Terlikuifaksi = 20 m

Jarak (m)	F_i (kN)	P_1 (kN)	Gaya yang Digunakan (kN)
0	0.00	54.43	0.00
1	265.73	54.43	54.43
2	531.46	54.43	54.43
3	797.19	54.43	54.43
4	1062.92	54.43	54.43
5	1328.65	54.43	54.43
6	1594.38	54.43	54.43
7	1860.11	54.43	54.43
8	2125.84	54.43	54.43
9	2391.57	54.43	54.43
10	2657.30	54.43	54.43
11	2391.57	54.43	54.43
12	2125.84	54.43	54.43
13	1860.11	54.43	54.43
14	1594.38	54.43	54.43
15	1328.65	54.43	54.43
16	1062.92	54.43	54.43
17	797.19	54.43	54.43
18	531.46	54.43	54.43
19	265.73	54.43	54.43
20	0.00	54.43	0.00

Tabel 4.28. Gaya Tanah Akibat *Displacement* Horizontal Tanah (F_i)
 untuk Pipa 16 inci dan Lebar Area Tanah Terlikuifaksi = 30 m

Jarak (m)	F_i (kN)	P_1 (kN)	Gaya yang Digunakan (kN)
0	0.00	54.43	0.00
1	177.15	54.43	54.43
2	354.31	54.43	54.43
3	531.46	54.43	54.43
4	708.61	54.43	54.43
5	885.77	54.43	54.43
6	1062.92	54.43	54.43
7	1240.07	54.43	54.43
8	1417.23	54.43	54.43
9	1594.38	54.43	54.43
10	1771.53	54.43	54.43
11	1948.68	54.43	54.43
12	2125.84	54.43	54.43
13	2302.99	54.43	54.43
14	2480.14	54.43	54.43
15	2657.30	54.43	54.43
16	2480.14	54.43	54.43
17	2302.99	54.43	54.43
18	2125.84	54.43	54.43
19	1948.68	54.43	54.43
20	1771.53	54.43	54.43
21	1594.38	54.43	54.43
22	1417.23	54.43	54.43
23	1240.07	54.43	54.43
24	1062.92	54.43	54.43
25	885.77	54.43	54.43
26	708.61	54.43	54.43
27	531.46	54.43	54.43
28	354.31	54.43	54.43
29	177.15	54.43	54.43
30	0.00	54.43	0.00

Tabel 4.29. Gaya Tanah Akibat *Displacement* Horizontal Tanah (F_i)
 untuk Pipa 16 inci dan Lebar Area Tanah Terlikuifikasi = 40 m

Jarak (m)	F_i (kN)	P_1 (kN)	Gaya yang Digunakan (kN)
0	0.00	54.43	0.00
1	132.86	54.43	54.43
2	265.73	54.43	54.43
3	398.59	54.43	54.43
4	531.46	54.43	54.43
5	664.32	54.43	54.43
6	797.19	54.43	54.43
7	930.05	54.43	54.43
8	1062.92	54.43	54.43
9	1195.78	54.43	54.43
10	1328.65	54.43	54.43
11	1461.51	54.43	54.43
12	1594.38	54.43	54.43
13	1727.24	54.43	54.43
14	1860.11	54.43	54.43
15	1992.97	54.43	54.43
16	2125.84	54.43	54.43
17	2258.70	54.43	54.43
18	2391.57	54.43	54.43
19	2524.43	54.43	54.43
20	2657.30	54.43	54.43
21	2524.43	54.43	54.43
22	2391.57	54.43	54.43
23	2258.70	54.43	54.43
24	2125.84	54.43	54.43
25	1992.97	54.43	54.43
26	1860.11	54.43	54.43
27	1727.24	54.43	54.43
28	1594.38	54.43	54.43
29	1461.51	54.43	54.43
30	1328.65	54.43	54.43
31	1195.78	54.43	54.43
32	1062.92	54.43	54.43
33	930.05	54.43	54.43
34	797.19	54.43	54.43
35	664.32	54.43	54.43
36	531.46	54.43	54.43
37	398.59	54.43	54.43
38	265.73	54.43	54.43
39	132.86	54.43	54.43
40	0.00	54.43	0.00

Tabel 4.30. Gaya Tanah Akibat *Displacement* Horizontal Tanah (F_i)
 untuk Pipa 16 inci dan Lebar Area Tanah Terlikuifaksi = 50 m

Jarak (m)	F_i (kN)	P_1 (kN)	Gaya yang Digunakan (kN)
0	0.00	54.43	0.00
1	106.29	54.43	54.43
2	212.58	54.43	54.43
3	318.88	54.43	54.43
4	425.17	54.43	54.43
5	531.46	54.43	54.43
6	637.75	54.43	54.43
7	744.04	54.43	54.43
8	850.34	54.43	54.43
9	956.63	54.43	54.43
10	1062.92	54.43	54.43
11	1169.21	54.43	54.43
12	1275.50	54.43	54.43
13	1381.79	54.43	54.43
14	1488.09	54.43	54.43
15	1594.38	54.43	54.43
16	1700.67	54.43	54.43
17	1806.96	54.43	54.43
18	1913.25	54.43	54.43
19	2019.55	54.43	54.43
20	2125.84	54.43	54.43
21	2232.13	54.43	54.43
22	2338.42	54.43	54.43
23	2444.71	54.43	54.43
24	2551.01	54.43	54.43
25	2657.30	54.43	54.43
26	2551.01	54.43	54.43
27	2444.71	54.43	54.43
28	2338.42	54.43	54.43
29	2232.13	54.43	54.43
30	2125.84	54.43	54.43
31	2019.55	54.43	54.43
32	1913.25	54.43	54.43
33	1806.96	54.43	54.43
34	1700.67	54.43	54.43
35	1594.38	54.43	54.43
36	1488.09	54.43	54.43
37	1381.79	54.43	54.43
38	1275.50	54.43	54.43
39	1169.21	54.43	54.43
40	1062.92	54.43	54.43

Tabel 4.30. (Sambungan)

Jarak (m)	F _i (kN)	P ₁ (kN)	Gaya yang Digunakan (kN)
41	956.63	54.43	54.43
42	850.34	54.43	54.43
43	744.04	54.43	54.43
44	637.75	54.43	54.43
45	531.46	54.43	54.43
46	425.17	54.43	54.43
47	318.88	54.43	54.43
48	212.58	54.43	54.43
49	106.29	54.43	54.43
50	0.00	54.43	0.00

4.4 Hasil Pemodelan AutoPIPE

Dari hasil pemodelan AutoPIPE dapat dilihat rasio tegangan pipa dan juga gaya dalam yang terjadi pada pipa akibat pengaruh *displacement* horizontal tanah untuk pipa 14 inci dan pipa 16 inci.

4.4.1 Hasil Pemodelan AutoPIPE untuk Pipa 14 inci

Untuk pipa 14 inci, dengan terjadinya *displacement* horizontal tanah maksimum sebesar 1.76 meter telah mengakibatkan kegagalan pada pipa sejak lebar area likuifaksi masih 10 meter. Kegagalan ini dapat dilihat dari rasio stress pipa pada tabel 4.31.

Tabel 4.31. Rasio Stress pada Pipa 14 inci

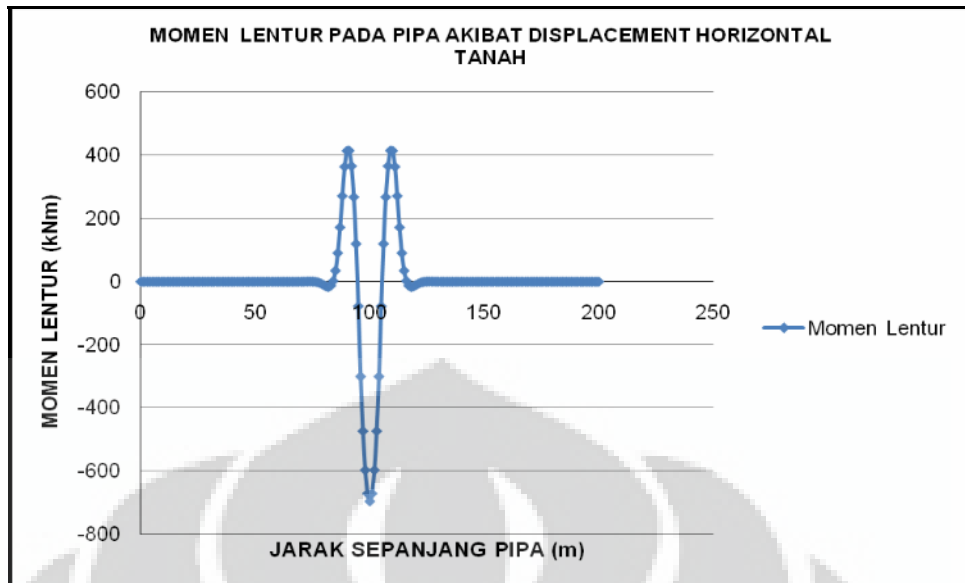
Lebar Area Tanah Terlikuifaksi	Tipe Stress	Kombinasi Beban	Node	Stress Maksimum (MPa)	Stress yang Diizinkan		Rasio Stress
					Faktor Desain	(MPa)	
Sebelum Likuifaksi	Hoop	Max P	ALL	234	0.6	270	0.87
	Ekspansi	Amb to T1	A00	0	S _A	364	0.00
	Longitudinal	GRTP1	ALL	19	0.9	405	0.05
	Kombinasi	GRTP1	ALL	244	1	450	0.54
10 m	Hoop	Max P	ALL	234	0.6	270	0.87
	Ekspansi	Amb to T1	A00	0	S _A	364	0.00
	Longitudinal	GRTP1	A100	710	0.9	405	1.75
	Kombinasi	GRTP1	A100	851	1	450	1.89

Tabel 4.31. (Sambungan)

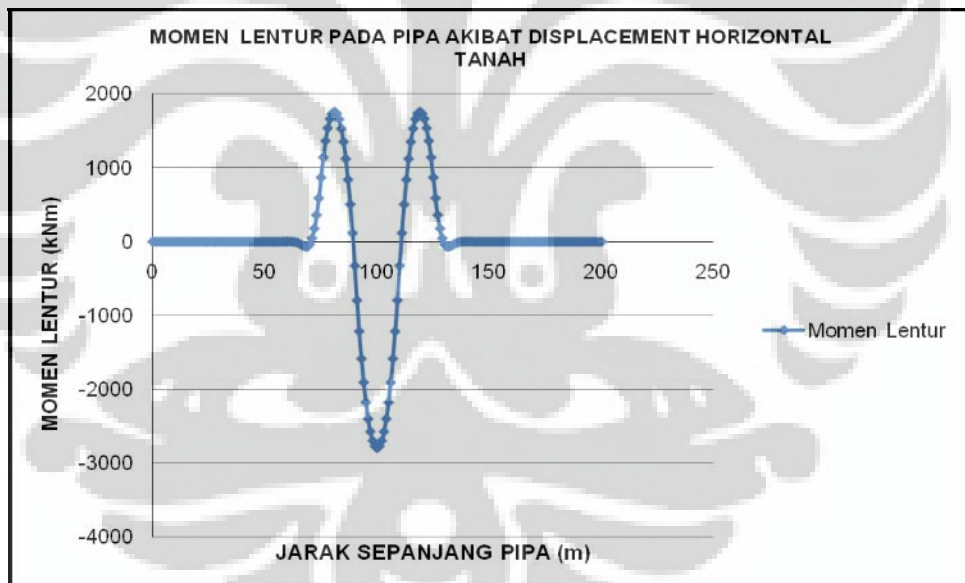
Lebar Area Tanah Terlikuifaksi	Tipe Stress	Kombinasi Beban	Node	Stress Maksimum (MPa)	Stress yang Diizinkan		Rasio Stress
					Faktor Desain	(MPa)	
20 m	Hoop	Max P	ALL	234	0.6	270	0.87
	Ekspansi	Amb to T1	A00	0	S_A	364	0.00
	Longitudinal	GRTP1	A100	2806	0.9	405	6.93
	Kombinasi	GRTP1	A100	2929	1	450	6.51
30 m	Hoop	Max P	ALL	234	0.6	270	0.87
	Ekspansi	Amb to T1	A00	0	S_A	364	0.00
	Longitudinal	GRTP1	A100	5811	0.9	405	14.35
	Kombinasi	GRTP1	A100	5963	1	450	13.25
40 m	Hoop	Max P	ALL	234	0.6	270	0.87
	Ekspansi	Amb to T1	A00	0	S_A	364	0.00
	Longitudinal	GRTP1	A100	9333	0.9	405	23.04
	Kombinasi	GRTP1	A100	9452	1	450	21.00
50 m	Hoop	Max P	ALL	234	0.6	270	0.87
	Ekspansi	Amb to T1	A00	0	S_A	364	0.00
	Longitudinal	GRTP1	A100	13137	0.9	405	32.44
	Kombinasi	GRTP1	A100	13255	1	450	29.46

Tabel 4.32. Displacement dan Momen Lentur Pipa 14 inci

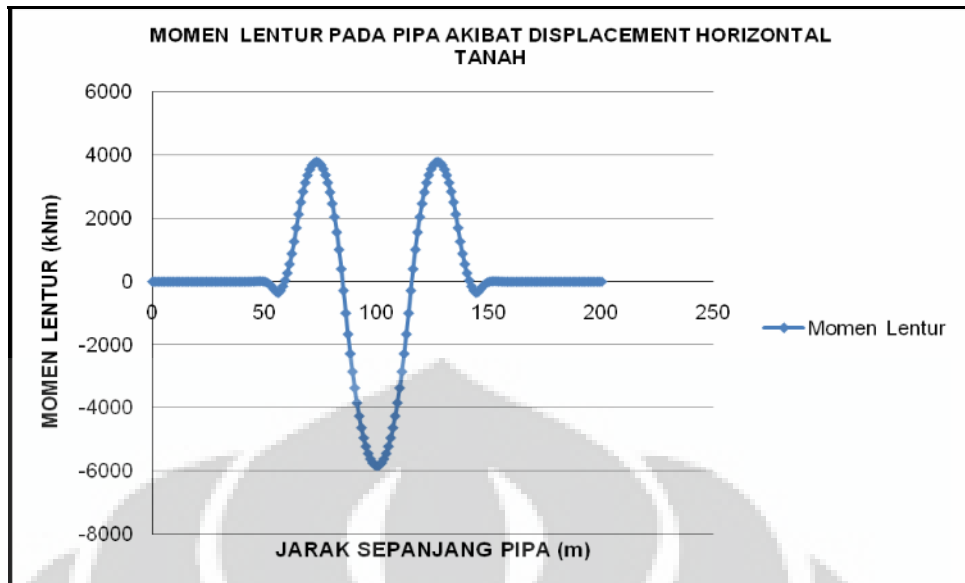
PARAMETER	SATUAN	LEBAR AREA TANAH TERLIKUIFAKSI (m)				
		10	20	30	40	50
Maksimum Displacement Horizontal Pipa	m	0.51	8.19	34.68	87.736	167.135
Maksimum Momen Lentur pada Pipa	kNm	-695.86	-2798.81	-5846.58	-9348.456	-13165.6



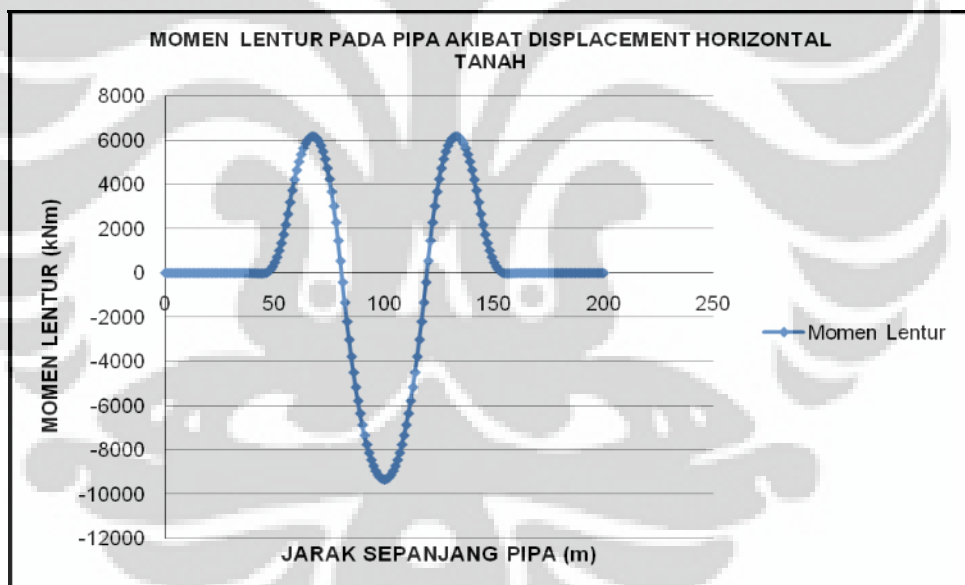
Gambar 4.2. Grafik Momen Lentur Pipa 14 inci untuk Lebar Area Likuifaksi 10 m



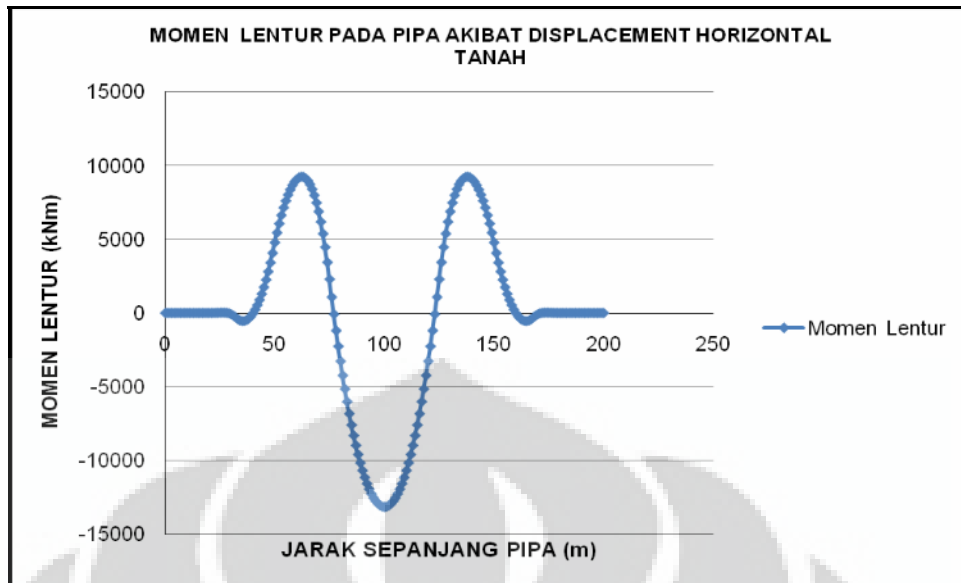
Gambar 4.3. Grafik Momen Lentur Pipa 14 inci untuk Lebar Area Likuifaksi 20 m



Gambar 4.4. Grafik Momen Lentur Pipa 14 inci untuk Lebar Area Likuifaksi 30 m



Gambar 4.5. Grafik Momen Lentur Pipa 14 inci untuk Lebar Area Likuifaksi 40 m



Gambar 4.6. Grafik Momen Lentur Pipa 14 inci untuk Lebar Area Likuifaksi 50 m

4.4.2 Hasil Pemodelan AutoPIPE untuk Pipa 16 inci

Untuk pipa 16 inci, dengan terjadinya *displacement* horizontal tanah maksimum sebesar 1.76 meter juga telah mengakibatkan kegagalan pada pipa sejak lebar area likuifaksi masih 10 meter. Kegagalan ini dapat dilihat dari rasio stress pipa pada tabel 4.33.

Tabel 4.33. Rasio Stress pada Pipa 16 inci

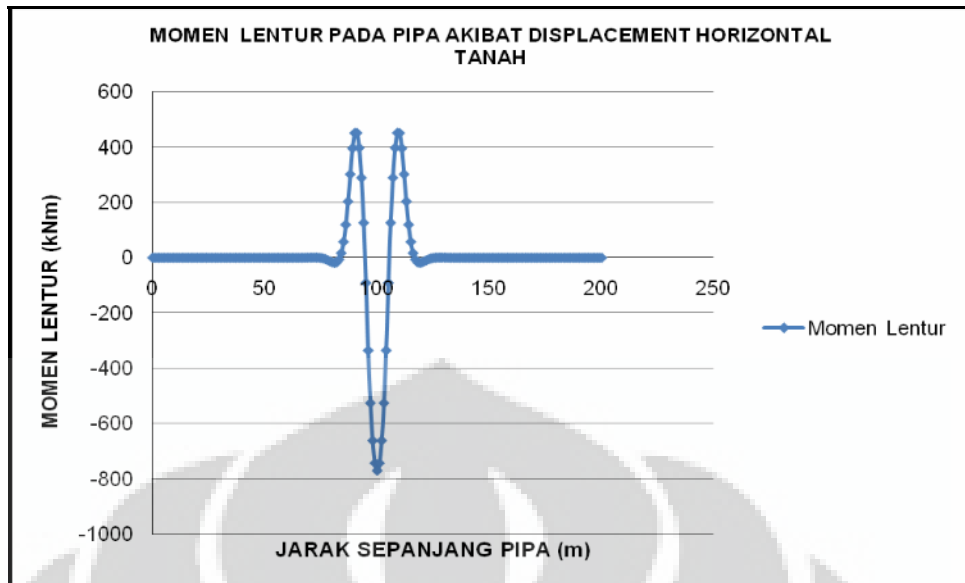
Lebar Area Tanah Terlikuifaksi	Tipe Stress	Kombinasi Beban	Node	Stress Maksimum (MPa)	Stress yang Diizinkan		Rasio Stress
					Faktor Desain	(MPa)	
Sebelum Likuifaksi	Hoop	Max P	ALL	234	0.6	270	0.87
	Ekspansi	Amb to T1	A00	0	S_A	364	0.00
	Longitudinal	GRTP1	ALL	20	0.9	405	0.05
	Kombinasi	GRTP1	ALL	244	1	450	0.54
10 m	Hoop	Max P	ALL	234	0.6	270	0.87
	Ekspansi	Amb to T1	A00	0	S_A	364	0.00
	Longitudinal	GRTP1	A100	531	0.9	405	1.31
	Kombinasi	GRTP1	A100	678	1	450	1.51
20 m	Hoop	Max P	ALL	234	0.6	270	0.87
	Ekspansi	Amb to T1	A00	0	S_A	364	0.00
	Longitudinal	GRTP1	A100	2098	0.9	405	5.18
	Kombinasi	GRTP1	A100	2224	1	450	4.94

Tabel 4.33. (Sambungan)

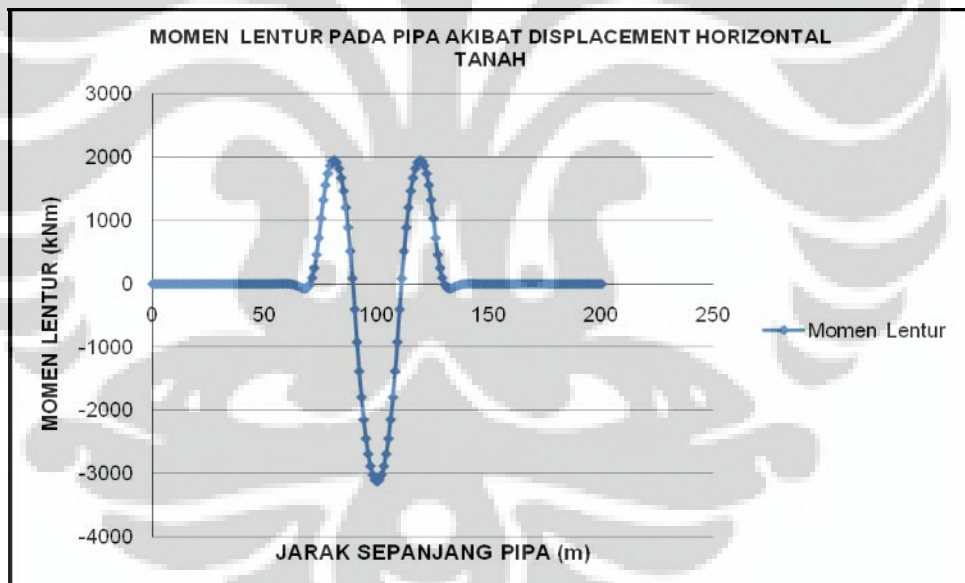
Lebar Area Tanah Terlikuifaksi	Tipe Stress	Kombinasi Beban	Node	Stress Maksimum (MPa)	Stress yang Diizinkan		Rasio Stress
					Faktor Desain	(MPa)	
30 m	Hoop	Max P	ALL	234	0.6	270	0.87
	Ekspansi	Amb to T1	A00	0	S_A	364	0.00
	Longitudinal	GRTP1	A100	4480	0.9	405	11.06
	Kombinasi	GRTP1	A100	4601	1	450	10.22
40 m	Hoop	Max P	ALL	234	0.6	270	0.87
	Ekspansi	Amb to T1	A00	0	S_A	364	0.00
	Longitudinal	GRTP1	A100	7284	0.9	405	17.99
	Kombinasi	GRTP1	A100	7403	1	450	16.45
50 m	Hoop	Max P	ALL	234	0.6	270	0.87
	Ekspansi	Amb to T1	A00	0	S_A	364	0.00
	Longitudinal	GRTP1	A100	10334	0.9	405	25.52
	Kombinasi	GRTP1	A100	10453	1	450	23.23

Tabel 4.34. Displacement dan Momen Lentur Pipa 16 inci

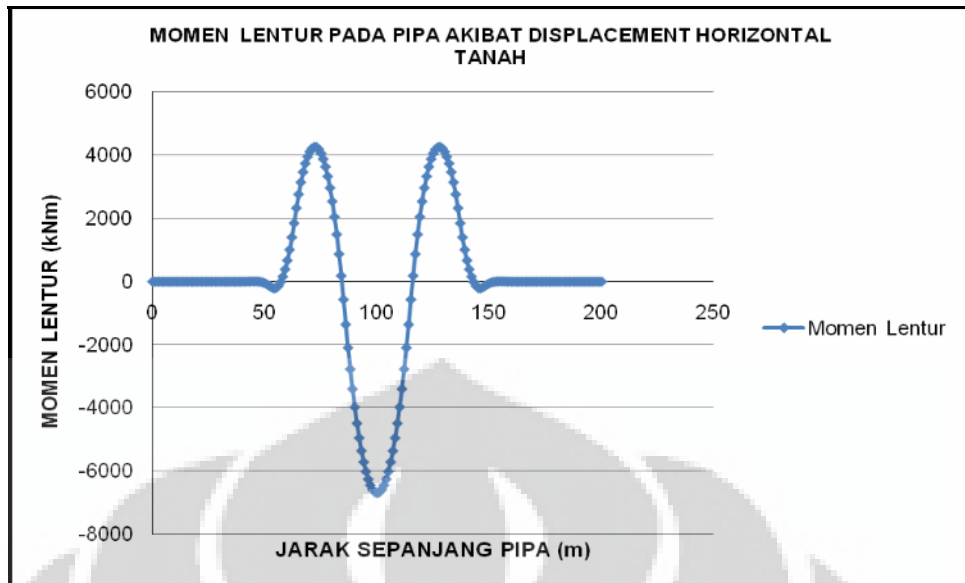
PARAMETER	SATUAN	LEBAR AREA TANAH TERLIKUIFAKSI (m)				
		10	20	30	40	50
Maksimum Displacement Horizontal Pipa	m	0.34	5.44	24.61	63.573	124.888
Maksimum Momen Lentur pada Pipa	kNm	-771.37	-3121.63	-6692.90	-10895.692	-15470.8



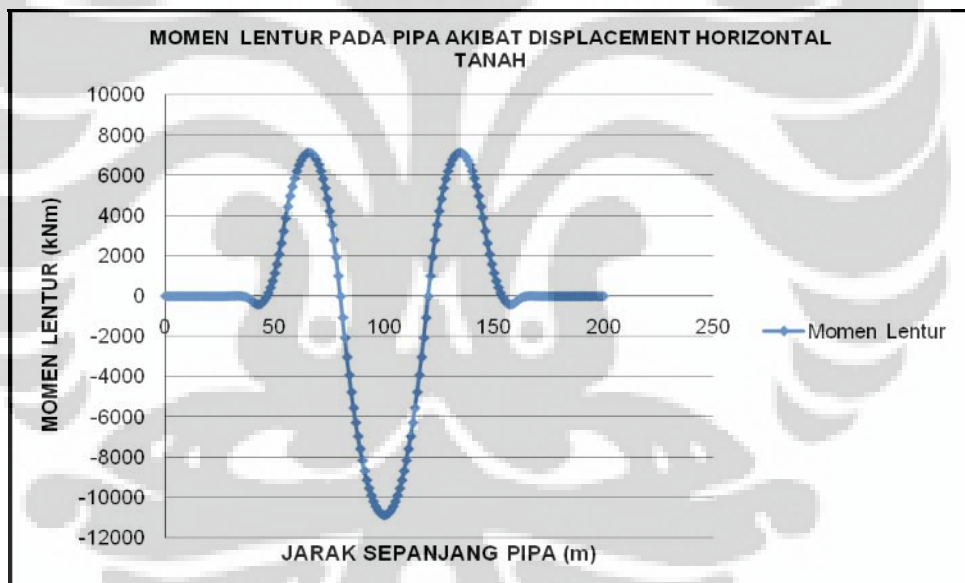
Gambar 4.7. Grafik Momen Lentur Pipa 16 inci untuk Lebar Area Likuifaksi 10 m



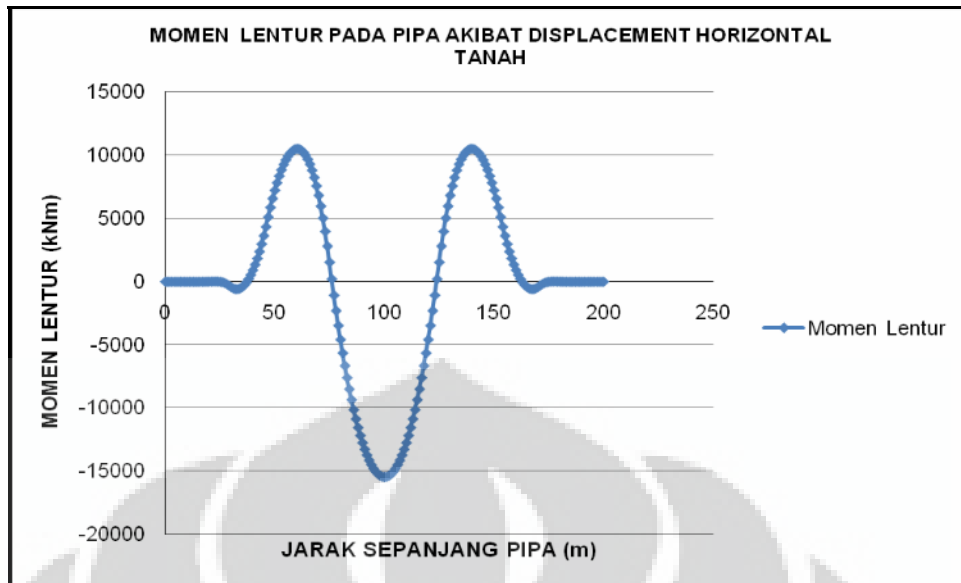
Gambar 4.8. Grafik Momen Lentur Pipa 16 inci untuk Lebar Area Likuifaksi 20 m



Gambar 4.9. Grafik Momen Lentur Pipa 16 inci untuk Lebar Area Likuifaksi 30 m



Gambar 4.10. Grafik Momen Lentur Pipa 16 inci untuk Lebar Area Likuifaksi 40 m



Gambar 4.11. Grafik Momen Lentur Pipa 16 inci untuk Lebar Area Likui-faksi 50 m

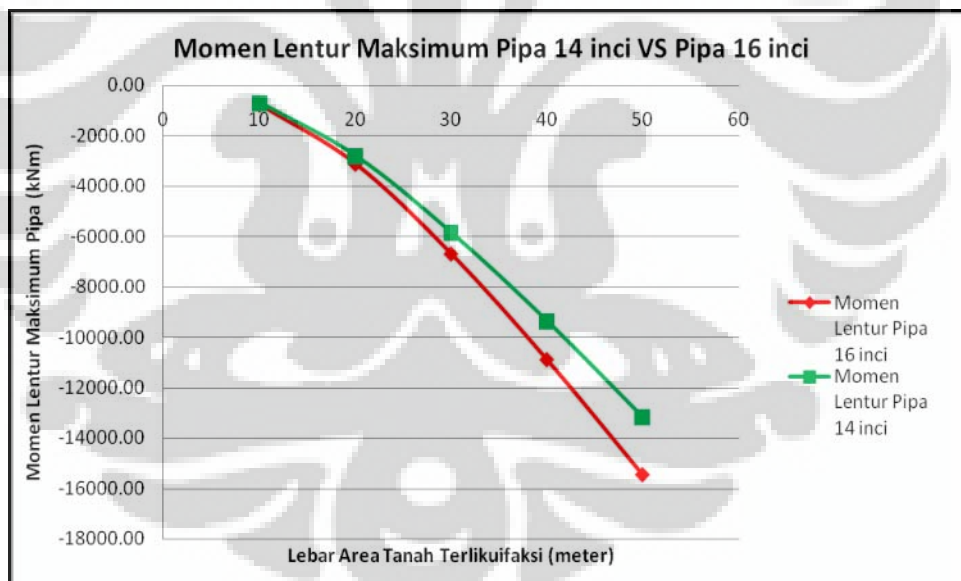
4.5 Analisa Hasil Pemodelan AutoPIPE

Dari hasil pemodelan dengan AutoPIPE untuk pipa 14 inci dan 16 inci, analisa yang dapat dilakukan antara lain :

- Akibat terjadinya *displacement* horizontal tanah pada pipa 14 inci dengan ketebalan dinding pipa 11.1 mm dan pipa 16 inci dengan ketebalan dinding 12.7, pipa mengalami kegagalan yang ditandai dengan rasio stress pipa yang sudah melebihi 1 (satu) bahkan sejak lebar area likuifaksi masih 10 meter. Dapat dilihat pada tabel 4.31 untuk pipa 14 inci dan tabel 4.33 untuk pipa 16 inci bahwa pada saat tanah belum mengalami likuifaksi, kondisi pipa dalam keadaan aman atau memenuhi kriteria desain dimana rasio stress pipa masih dibawah 1 (satu).
- Untuk *displacement* pipa 14 inci pada tabel 4.32 dan tabel 4.34 untuk pipa 16 inci terlihat angka –angka yang sangat besar dan tidak masuk akal. Angka – angka ini tidak riil lagi, dikarenakan keterbatasan program AutoPIPE. Dimana AutoPIPE hanya bisa membaca *displacement* pipa apabila pipa tidak dalam kondisi gagal (tegangan yang terjadi pada pipa tidak melebihi tegangan izin yang disyaratkan). Sedangkan pada penelitian ini, baik pipa 14 inci maupun 16

inci sudah mengalami kegagalan karena adanya likuifaksi (dapat dilihat rasio stress pipa yang sudah melebihi 1 (satu) pada tabel 4.31 dan 4.33).

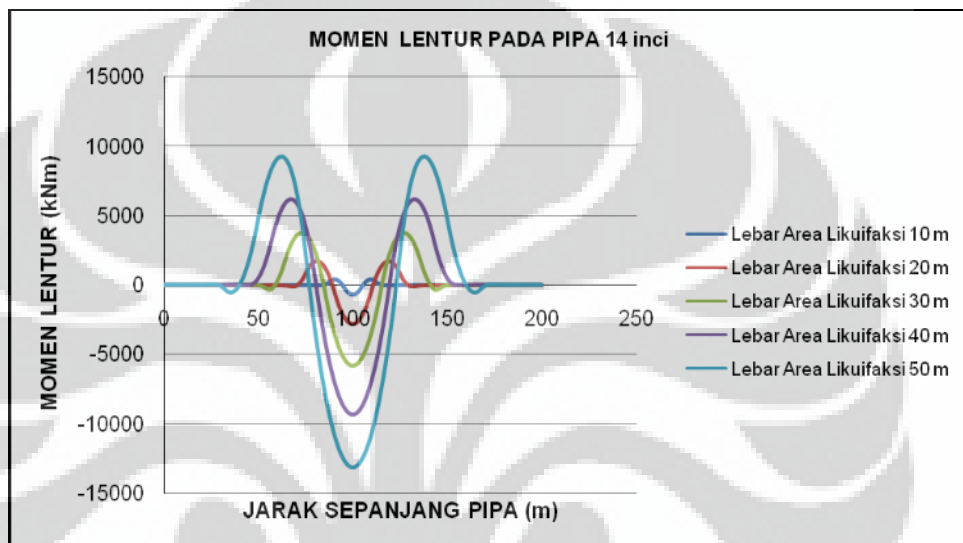
- Dari segi desain ketebalan dinding pipa 14 inci dan pipa 16 inci sudah memenuhi syarat dimana rasio tegangan lingkaran (*hoop stress*) masih dibawah 1 (satu) yaitu sebesar 0.87 (lihat tabel 4.31 dan 4.33) untuk lebar area tanah terlikuifaksi 10 m, 20 m, 30 m, 40 m dan 50 m. Jadi kegagalan yang dialami pipa adalah akibat terjadinya *displacement* horizontal tanah karena likuifaksi.
- Karena posisi pipa berada tegak lurus dengan arah *displacement* horizontal tanah, sesuai dengan gambar 2.10 pada sub bab 2.4 maka gaya dalam yang terjadi pada pipa adalah berupa momen lentur yang mengakibatkan tekuk (*buckling*) pipa pada arah lateral.



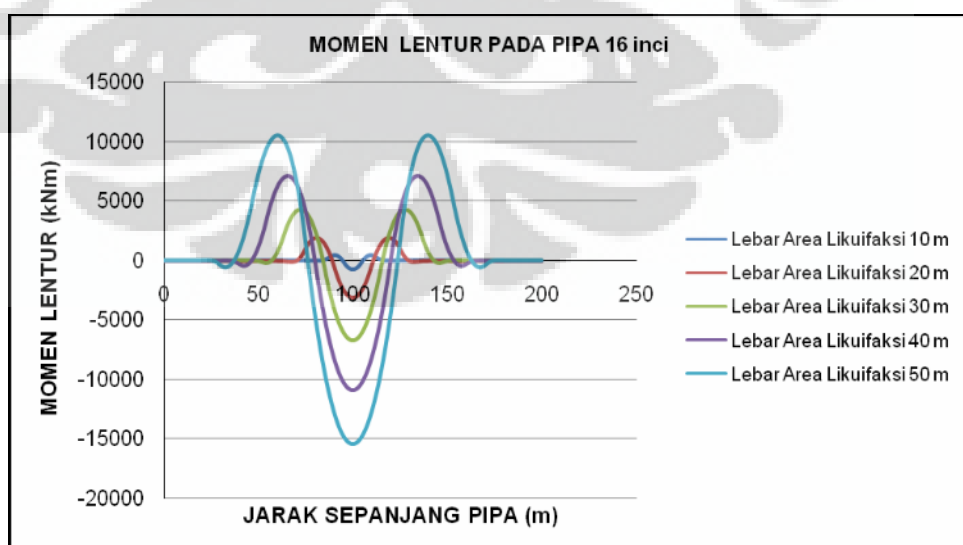
Gambar 4.12. Grafik Momen Lentur Maksimum Pipa 14 inci VS Pipa 16 inci

- Gaya horizontal tanah yang terjadi akibat likuifaksi pada pipa 14 inci per satu meter lebar area likuifaksi adalah sebesar 49.45 kN, sedangkan pada pipa 16 inci adalah sebesar 54.43 kN. Besarnya gaya tanah ini dipengaruhi oleh diameter pipa, semakin besar diameter pipa maka berat tanah disekelilingnya

akan semakin besar pula sehingga apabila terjadi gempa yang memicu likuifaksi khususnya *displacement* horizontal tanah maka gaya horizontal tanah yang akan mendorong pipa akan lebih besar pada diameter pipa yang lebih besar. Ini juga akan menimbulkan momen lentur yang lebih besar pada pipa dengan diameter lebih besar sebagaimana terlihat pada gambar 4.12 bahwa momen lentur maksimum untuk pipa 16 inci adalah lebih besar dari pada pipa 14 inci untuk area likuifaksi 10 m, 20 m, 30 m, 40 m dan 50 m.

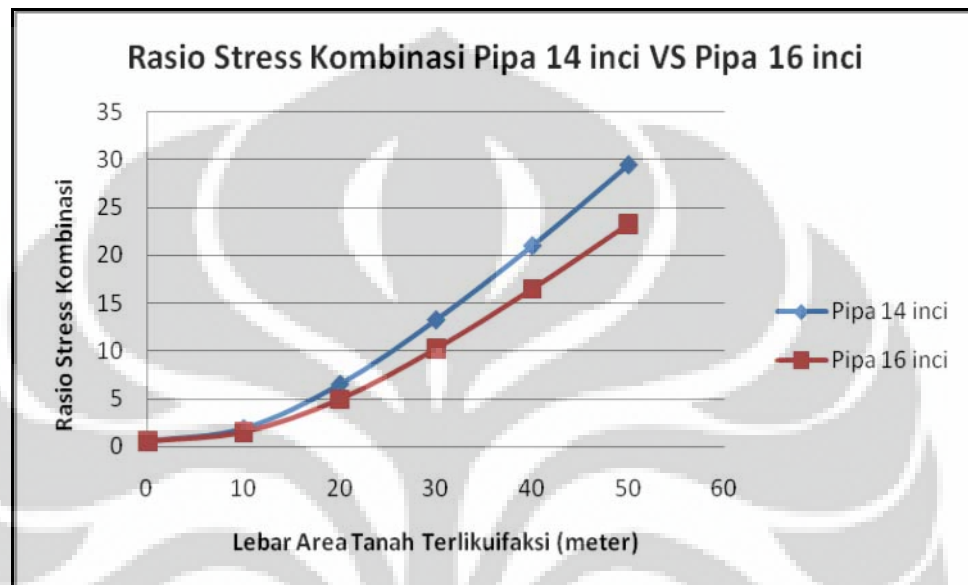


Gambar 4.13. Grafik Gabungan Momen Lentur Pipa 14 inci



Gambar 4.14. Grafik Gabungan Momen Lentur Pipa 16 inci

- Dapat dilihat juga pada gambar 4.13 dan 4.14 bahwa dengan lebar area tanah terlikuifaksi 10 m, 20 m, 30 m, 40 m dan 50 m, momen lentur yang terjadi justru lebih lebar dari area tanah terlikuifaksi itu sendiri. Dan semakin lebar area tanah terlikuifaksi maka momen lentur yang terjadi pun semakin besar.



Gambar 4.15. Grafik Rasio Stress Kombinasi Pipa 14 inci VS Pipa 16 inci

- Pada gambar 4.15, terlihat bahwa rasio stress kombinasi pipa 14 inci lebih tinggi dibandingkan pipa 16 inci. Artinya semakin besar diameter pipa semakin kuat pipa itu untuk dapat menahan beban. Namun dalam desain perpipaan juga harus ditinjau segi ekonomis sehingga pipa tidak bisa didesain dengan diameter sebesar mungkin untuk dapat menahan beban yang diperkirakan akan terjadi. Dalam kasus penelitian ini yang dapat dilakukan untuk mencegah kerusakan pipa akibat likuifaksi adalah dengan investigasi tanah untuk melihat area tanah yang potensial untuk terjadinya likuifaksi sehingga jika memungkinkan rute jaringan pipa harus dihindari dari zona tersebut. Dan jika tidak memungkinkan dapat dilakukan dengan perbaikan kondisi tanah yang potensial mengalami likuifaksi (Guideline of Seismic Design of Buried Pipeline , 2007).

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis respon pipa terhadap pengaruh *permanent ground deformation* (PGD) berupa likuifaksi jenis *displacement* horizontal tanah (*lateral spreading*) seperti pembahasan yang telah diuraikan dalam bab sebelumnya, diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Bahwa *displacement* horizontal tanah akibat *Permanent Ground Deformation* (PGD) berupa likuifaksi memiliki potensi bahaya besar bagi jaringan pipa bawah tanah. Gaya horizontal tanah yang mendorong pipa saat terjadinya likuifaksi memiliki daya rusak yang dapat membuat pipa mengalami kegagalan berupa kebocoran atau bahkan ledakan gas yang mengalir didalamnya yang dapat membahayakan penduduk dan lingkungan di sekitarnya.
2. Semakin lebar area tanah terlikuifaksi maka semakin besar gaya dalam yang akan dialami pipa akibat akumulasi gaya horizontal tanah yang semakin kuat mendorong pipa. Dalam penelitian ini, karena pipa berada tegak lurus dengan arah pergerakan horizontal tanah maka gaya dalam yang dialami pipa adalah berupa momen lentur yang mengakibatkan pipa tertekuk di arah lateral.
3. Semakin besar diameter pipa semakin kuat pipa tersebut untuk menahan beban, namun pipa tidak mungkin didesain dengan diameter sebesar mungkin karena pertimbangan nilai ekonomis. Karena itu harus dilakukan investigasi geoteknik terhadap tanah yang potensial mengalami likuifaksi sehingga rute pipa dapat dihindarkan dari zona likuifaksi tersebut jika memungkinkan atau jika tidak maka harus dilakukan perbaikan tanah yang memiliki potensi untuk terlikuifaksi jika terjadinya gempa dengan skala besar.

5.2. Saran

Saran yang dapat diberikan pada studi ini adalah bahwa untuk dapat menghindari terjadinya kegagalan jaringan pipa bawah tanah akibat likuifaksi maka sebaiknya sebelum ditentukan rute untuk jaringan pipa, terlebih dahulu harus dilakukan investigasi geoteknik untuk melihat adanya zona dimana tanah berpotensi mengalami likuifaksi karena melalui penelitian ini sudah terbukti bahwa pipa bawah tanah meskipun dengan diameter lebih besar tetap akan mengalami kegagalan jika berada pada kondisi tanah terlikuifaksi.



DAFTAR PUSTAKA

Japan Gas Association (2001), *Recommended Practice for Design of Gas Transmission Pipelines in Areas Subject to Liquefaction*, Japan.

ASME B31.8 (2007), *Gas Transmissions and Distribution Piping Systems*

AutoPIPE V8i Manual

Association Of Bay Area Government (2001), *A Guide to Liquefaction Hazard in Future Earthquake Affecting The SanFrancisco Area*

PT. Technip Indonesia (2010), Document No. K30-01-W-SDY-2005, “*Onshore Export Pipeline Stress Analysis*”, Jakarta

American Lifelines Alliance. (2001). *Guideline for The Design of Buried Steel Pipe*.
www.americanlifelinesalliances.com

Bowles, Joseph E. (1997). *Foundation Analisis and Design*. Singapore

Craig, R.F. (1991). *Mekanika Tanah*. Jakarta. Erlangga.

Kramer, Steven L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. United Stated of America. Prentice Hall.

Moser, A.P. (2001). *Buried Pipe Design (2nd Edition)*. New York. McGrawHill.

O’Rourke, Michael; Liu, Xuejie. (1999). *Response of Buried Pipelines Subject to Earthquake Effects*, NewYork. Multidiciplinary Center of Earthquake Engineering Research. <http://mceer.eng.buffalo.edu>

O'Rourke, T.D; Lane, P.A. (1989). *Liquefaction Hazards and their Effects on Buried Pipeline*. New York. Earthquake Engineering Research.

Sunggono, K.H. (1995). *Buku Teknik Sipil*. Bandung. Nova.

