

Pemodelan Struktural Dermaga dengan Variasi Tiang Pancang Menggunakan SAP2000

Sasti. N. Rizkillah^{a*}, E.I. Imananto^a dan E.A. Yudianto^a

^aJurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Nasional Malang, Indonesia 65152

* Corresponding author's e-mail: sastinrz@gmail.com

Received: 11 January 2026; revised: 14 January 2026; accepted: 18 January 2026

Abstract: Wharf structures operate in complex marine environments and are subjected to significant lateral loads from berthing forces, sea currents, and wave actions that affect structural behavior and foundation performance. One common method to improve lateral resistance is the use of inclined piles, which convert part of the horizontal load into axial compressive force. This study develops a numerical structural model of a wharf with variations in pile inclination from vertical to inclined configurations, limited to the modeling stage. Finite element modeling is carried out using SAP2000 based on wharf geometry, material properties of concrete and steel, soil parameters from site investigation data, and service load combinations representing operational conditions. All pile inclination models are analyzed using identical parameters to ensure consistent comparison. The evaluated responses include axial force, shear force, bending moment, and global lateral displacement of the wharf. The results show that the vertical pile configuration produces the largest lateral displacement of 0.147 m and high bending moments, indicating a flexible lateral response. As pile inclination increases, axial force rises from 6,471.024 kN and reaches a maximum of 6,496.89 kN at an intermediate inclination, while bending moments gradually decrease. Lateral displacement is reduced and reaches a minimum value of 0.133 m at the same inclination. Further increases in pile inclination lead to higher shear force and a gradual increase in lateral displacement despite lower bending moments. These results confirm that inclined piles improve the lateral performance of wharf foundations, with intermediate inclination providing the most balanced response between axial force, bending moment, and lateral displacement.

Keywords: wharf, structural modeling, SAP2000, pile foundation

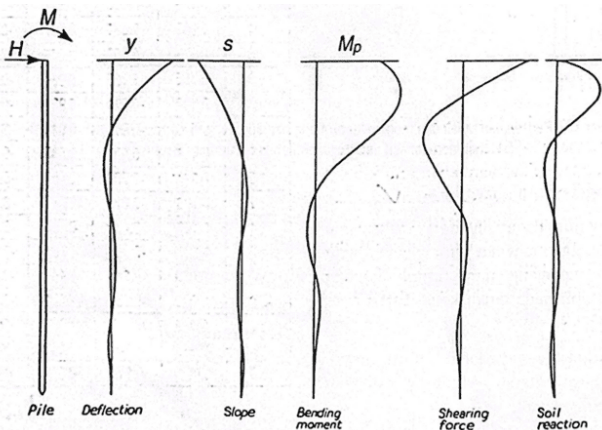
Abstrak: Struktur dermaga beroperasi pada lingkungan laut yang kompleks dan menerima beban lateral yang signifikan akibat gaya sandar kapal, arus laut, dan gelombang. Beban tersebut mempengaruhi perilaku struktur dan kinerja fondasi dermaga. Salah satu metode yang umum digunakan untuk meningkatkan ketahanan lateral adalah penggunaan tiang pancang miring, yang mengubah sebagian beban horizontal menjadi gaya aksial tekan. Penelitian ini mengembangkan model struktur dermaga secara numerik dengan variasi kemiringan tiang pancang dari kondisi tegak hingga miring, dengan ruang lingkup terbatas pada tahap pemodelan. Pemodelan dilakukan menggunakan metode elemen hingga dengan perangkat lunak SAP2000 berdasarkan geometri dermaga, sifat material beton dan baja, parameter tanah hasil penyelidikan lapangan, serta kombinasi beban layanan yang merepresentasikan kondisi operasional. Seluruh variasi kemiringan tiang dianalisis menggunakan parameter yang sama untuk memastikan hasil yang dapat dibandingkan secara konsisten. Respons struktur yang dievaluasi meliputi gaya aksial, gaya geser, momen lentur, dan perpindahan lateral global dermaga. Hasil analisis menunjukkan bahwa konfigurasi tiang tegak menghasilkan perpindahan lateral terbesar sebesar 0,147 m dan momen lentur yang relatif tinggi, yang menandakan respons lateral yang lebih fleksibel. Seiring meningkatnya kemiringan tiang, gaya aksial meningkat dari 6.471,024 kN hingga mencapai nilai maksimum 6.496,89 kN pada kemiringan menengah, sementara momen lentur mengalami penurunan bertahap. Perpindahan lateral menurun dan mencapai nilai minimum sebesar 0,133 m pada kemiringan yang sama. Pada kemiringan yang lebih besar, gaya geser meningkat dan perpindahan lateral kembali bertambah meskipun momen lentur terus menurun. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan tiang pancang miring meningkatkan kinerja lateral fondasi dermaga, dengan kemiringan menengah memberikan respons paling seimbang antara gaya aksial, momen lentur, dan perpindahan lateral.

Kata kunci: dermaga, pemodelan struktur, SAP2000, fondasi tiang pancang

1. Pendahuluan

Dermaga merupakan struktur penting dalam sistem transportasi laut yang berfungsi mendukung kegiatan sandar, bongkar muat, dan tambat kapal. Struktur ini bekerja pada lingkungan laut yang kompleks dan menerima kombinasi beban vertikal serta lateral yang signifikan [1]. Beban lateral pada dermaga umumnya berasal dari gaya sandar kapal, gaya tambat, arus laut, gelombang, serta beban gempa. Oleh karena itu, sistem fondasi dermaga harus dirancang mampu menyalurkan beban-beban tersebut secara aman ke lapisan tanah pendukung yang lebih stabil.

Fondasi tiang pancang banyak digunakan pada struktur dermaga karena mampu menembus lapisan tanah lunak di permukaan dan memobilisasi daya dukung tanah yang lebih dalam (Gambar 1). Pada kondisi tertentu, tiang pancang dipasang dengan kemiringan tertentu atau dikenal sebagai tiang pancang miring (*batter pile*). Penggunaan tiang pancang miring bertujuan meningkatkan kapasitas dan kekakuan lateral fondasi dengan mengubah sebagian gaya lateral menjadi gaya aksial tekan yang lebih efektif ditahan oleh elemen tiang [2]. Konsep ini telah lama diterapkan pada struktur dermaga dan jembatan laut yang menerima beban lateral dominan [3].



Gambar 1. Perilaku pondasi tiang dengan beban lateral H dan momen M berupa (a) Defleksi; (b) Putaran sudut atau slope; (c) Momen; (d) Geser dan reaksi tanah [2]

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa konfigurasi dan kemiringan tiang pancang sangat mempengaruhi respons lateral struktur dermaga. [4] memodelkan struktur dermaga menggunakan SAP2000 dan menunjukkan bahwa perubahan susunan tiang berdampak langsung terhadap momen lentur dan perpindahan struktur. [3] melaporkan bahwa penggunaan tiang pancang miring mampu meningkatkan kekakuan lateral grup tiang dan menurunkan deformasi akibat beban horizontal. [5] juga menunjukkan bahwa variasi sudut kemiringan tiang mengubah distribusi gaya aksial dan respons deformasi fondasi dermaga. Studi numerik oleh [6] serta [7] memperlihatkan bahwa *batter pile* lebih efektif dalam menahan beban lateral dibandingkan tiang tegak karena sebagian beban lateral dialihkan menjadi gaya aksial tekan.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya lebih berfokus pada evaluasi kapasitas ultimit dan kinerja akhir struktur. Kajian yang secara khusus membahas tahap pemodelan struktur dermaga dengan

variasi kemiringan tiang pancang secara konsisten masih relatif terbatas. Perbedaan asumsi pemodelan, parameter tanah, dan pendekatan analisis pada penelitian terdahulu sering menyebabkan hasil yang sulit dibandingkan secara langsung [8]. Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang berfokus pada penyusunan model struktur dermaga yang konsisten sebagai dasar analisis lanjutan.

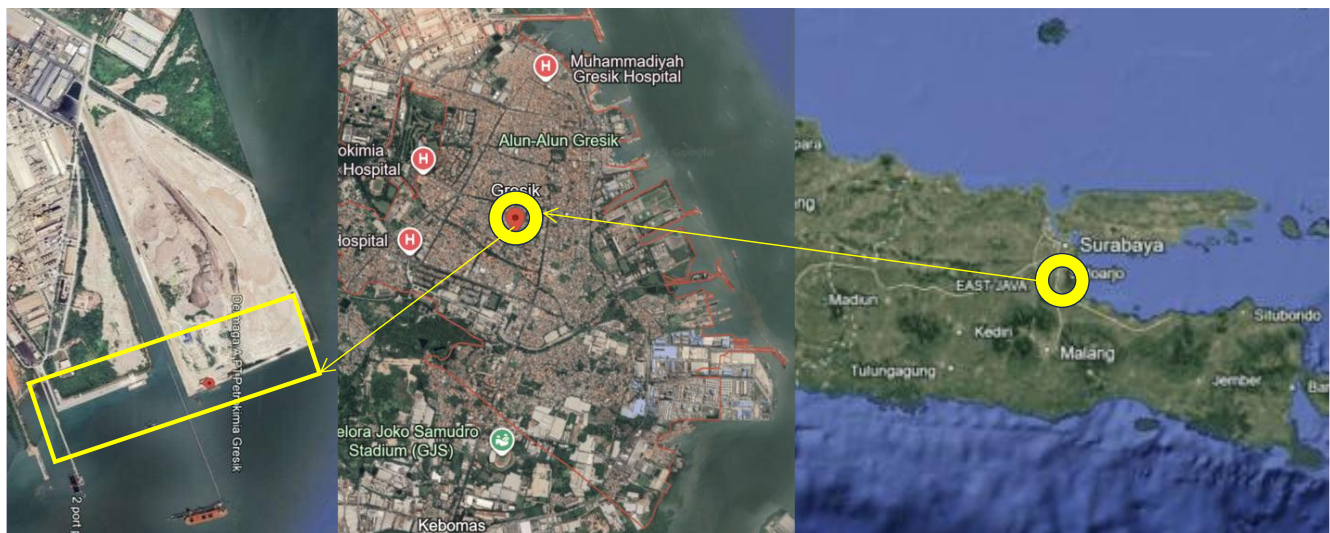
Berdasarkan latar belakang tersebut, [9] penelitian ini bertujuan menyusun pemodelan struktur dermaga dengan variasi kemiringan tiang pancang menggunakan metode elemen hingga melalui perangkat lunak SAP2000. Fokus penelitian dibatasi pada tahap pemodelan dan evaluasi respons awal struktur akibat pembebanan layanan, tanpa membahas kapasitas ultimit [10]. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar yang andal untuk analisis lanjutan terkait kekuatan, kekakuan, dan stabilitas struktur dermaga.

Penelitian ini menyajikan model numerik dermaga A Petrokimia Gresik dengan variasi kemiringan tiang pancang yang dianalisis secara konsisten [11]. Model ini memberikan dasar kuantitatif untuk membandingkan pengaruh sudut kemiringan terhadap gaya aksial, momen lentur, dan perpindahan lateral. Hasilnya dapat digunakan sebagai acuan awal dalam penentuan konfigurasi fondasi dermaga yang lebih efisien dan aman pada tahap perencanaan lanjutan.

2. Metode Penelitian

2.1. Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan pada Dermaga A PT Petrokimia Gresik, yang berlokasi di Jl. Raya Roomo Kec, Manyar, Kabupaten Gresik, Jawa Timur (Gambar 2). Lokasi ini dipilih karena dermaga tersebut memiliki aktivitas bongkar muat yang tinggi dan menerima beban lateral signifikan dari kapal.



Gambar 2. Peta lokasi penelitian

2.2. Data

Metode pengumpulan data pada penelitian ini dilakukan melalui studi dokumen dan studi literatur. Data yang

digunakan diambil dari proyek pembangunan Dermaga A Petrokimia Gresik. Data tersebut meliputi data geometri struktur dermaga, dimensi elemen struktur, spesifikasi material beton dan baja, serta data hasil penyelidikan tanah.

BORING LOG										P.T. PETROSOL		
CLIENT : PI.PEMBANGUNAN PERUMAHAN			BORING METHOD : CORING & SAMPLING									
PROJECT : EPCC-DERMAGA A,PETROKIMIA			SPT : AUTOMATIC HAMMER									
LOCATION : GRE.SIK,JAWA TENGAH			DATE : 11-12 Des 2024									
BORE HOLE NO. : BH-06			DRILLER : RIWAN									
DEPTH : 40.00 m			LOGGER : CHANDRA									
COORDINATE : X=682719.9617 Y=9211398.959			RECORDED BY : WIWIN									
ELEVATION : -												
WATER DEPTH : -10.00 m												
SAMPLE DEPTH (meter)	USCS	GRAPH SYMBOL	ROCK/SOIL DESCRIPTION	DEPTH (meter)	SPT - N value	blows/cm			N PER FOOT		RECOVERY (%)	CORRECTION (%)
						N1	N2	N3	40	80		
0.00	ML		SANDY SILT, fine grained sand, gray, very soft.									
2.00			SILTY CLAY, gray, very soft to soft.									
2.00	CH											
8.00			SILTY CLAY, gray, soft to medium stiff.									
8.00	CH											
13.00			SILTY SAND, gray, fine to medium grained sand, medium dense to dense.									
13.00	SP											
24.00			SILTY SAND, gray, fine to coarse grained sand, weakly cemented, dense to very dense.									
24.00	SP											

Gambar 3. Data Borlog Page 1

BORING LOG										P.T. PETROSOL		
CLIENT : PI.PEMBANGUNAN PERUMAHAN			BORING METHOD : CORING & SAMPLING									
PROJECT : EPCC-DERMAGA A,PETROKIMIA			SPT : AUTOMATIC HAMMER									
LOCATION : GRE.SIK,JAWA TENGAH			DATE : 11-12 Des 2024									
BORE HOLE NO. : BH-06			DRILLER : RIWAN									
DEPTH : 40.00 m			LOGGER : CHANDRA									
COORDINATE : X=682719.9617 Y=9211398.959			RECORDED BY : WIWIN									
ELEVATION : -												
WATER DEPTH : -10.00 m												
SAMPLE DEPTH (meter)	USCS	GRAPH SYMBOL	ROCK/SOIL DESCRIPTION	DEPTH (meter)	SPT - N value	blows/cm			N PER FOOT		RECOVERY (%)	CORRECTION (%)
						N1	N2	N3	40	80		
30.00	SP		SILTY SAND, gray, fine to coarse grained sand, weakly cemented, dense to very dense.									
31.50			Clayey SL, gray, weakly cemented, hard 0.									
31.50	MH											
40.00			END OF THE BORING.									

Gambar 4. Data Borlog Page 2

Data geometri dan material diperoleh dari gambar rencana dan dokumen teknis proyek, sedangkan data tanah berasal dari laporan investigasi tanah berupa nilai N SPT dan parameter tanah pendukung (Gambar 3 dan Gambar 4). Data pembebanan mengacu pada kondisi operasional dermaga yang direncanakan pada proyek tersebut dan disesuaikan dengan standar perencanaan dermaga yang berlaku

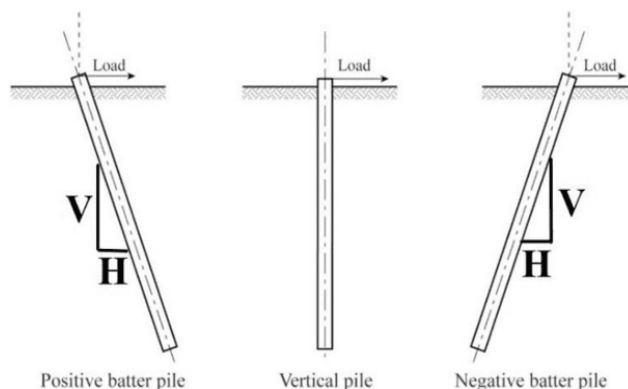
2.2. Metode dan Tahapan Penelitian

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan pemodelan numerik berbasis metode elemen hingga dengan bantuan perangkat lunak SAP2000. Tujuan utama metode ini adalah untuk memperoleh respons struktur dermaga terhadap variasi kemiringan tiang pancang secara kuantitatif dan dapat dibandingkan antar model [12].

Tahapan penelitian dimulai dari pengumpulan data teknis Dermaga A Petrokimia Gresik yang meliputi data geometri dermaga, dimensi elemen struktur, spesifikasi material beton dan baja, serta data tanah dari hasil penyelidikan lapangan berupa nilai N SPT dan parameter tanah. Data pembebanan meliputi beban mati, beban hidup, beban sandar kapal, beban arus, dan beban gempa yang disesuaikan dengan standar perencanaan dermaga [13, 14].

Data geometri dan material kemudian dimasukkan ke dalam SAP2000 untuk membangun model struktur tiga dimensi. Elemen balok, pelat, pile cap, dan tiang pancang dimodelkan sesuai gambar rencana. Data tanah dimasukkan dalam bentuk pegas tanah lateral dan aksial untuk merepresentasikan interaksi tanah dan tiang pancang.

Selanjutnya dilakukan pemodelan variasi kemiringan tiang pancang mulai dari kondisi tegak hingga 1H:4V sesuai dengan tipe yang telah ditetapkan (Gambar 5 dan Tabel 1). Setiap variasi dianalisis menggunakan parameter material, tanah, dan pembebanan yang sama sehingga perbedaan hasil hanya disebabkan oleh perubahan sudut kemiringan tiang.



Gambar 5. Tiang tegak dan tiang miring

Kombinasi pembebanan layanan kemudian diterapkan pada setiap model. Setelah proses analisis selesai, keluaran SAP2000 berupa gaya aksial, gaya geser, momen lentur, dan perpindahan lateral diekstraksi untuk setiap variasi kemiringan. Tahap akhir adalah analisis komparatif antar model untuk menilai pengaruh kemiringan tiang terhadap respons struktur dermaga. Hasil perbandingan digunakan untuk mengidentifikasi konfigurasi kemiringan tiang yang

memberikan kinerja lateral paling seimbang antara peningkatan kekakuan dan pengendalian gaya aksial.

Tabel 1. Tipe pancang

No. Tipe	Tipe Tiang
Tipe 1	Tegak
Tipe 2	1H:12V
Tipe 3	1H:11V
Tipe 4	1H:10V
Tipe 5	1H:9V
Tipe 6	1H:8V
Tipe 7	1H:7V
Tipe 8	1H:6V
Tipe 9	1H:5V
Tipe 10	1H:4V

Pengaruh nonlinieritas material, degradasi kekakuan tanah, serta efek konsolidasi jangka panjang tidak diperhitungkan. Asumsi ini dipilih agar fokus penelitian tetap pada evaluasi respons awal struktur akibat variasi kemiringan tiang pancang, sebagaimana umum diterapkan pada studi pemodelan numerik struktur dermaga dan fondasi tiang pancang [15].

Kombinasi pembebanan yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada standar perencanaan struktur dermaga dan disesuaikan dengan kondisi proyek Dermaga A Petrokimia Gresik (Tabel 2). Kombinasi beban meliputi beban mati, beban hidup, beban arus, beban sandar kapal, beban tambat, dan beban gempa yang disusun dalam beberapa skenario pembebanan layanan. Seluruh kombinasi pembebanan diterapkan secara konsisten pada setiap variasi kemiringan tiang pancang agar pengaruh kemiringan tiang terhadap respons struktur dapat dianalisis secara objektif [14].

Tabel 2. Kombinasi pembebanan

Load Comb	Load Case							
	DL	SDL	LL	C	Be	M	Eqx	Eqy
Comb 1	1,4	1,4	-	-	-	-	-	-
Comb 2	1,2	1,2	1,6	-	-	-	-	-
Comb 3	1,2	1,2	-	1,2	-	-	-	-
Comb 4	1,2	1,2	1,6	1,2	-	-	-	-
Comb 5A	1,0+k	1,0+k	0,1	-	-	-	1,3	0,39
Comb 5B	1,0+k	1,0+k	0,1	-	-	-	-1,3	0,39
Comb 5C	1,0+k	1,0+k	0,1	-	-	-	1,3	-0,39
Comb 5D	1,0+k	1,0+k	0,1	-	-	-	-1,3	-0,39
Comb 5E	1,0+k	1,0+k	0,1	-	-	-	0,39	1,3
Comb 5F	1,0+k	1,0+k	0,1	-	-	-	0,39	-1,3
Comb 5G	1,0+k	1,0+k	0,1	-	-	-	-0,39	1,3
Comb 5H	1,0+k	1,0+k	0,1	-	-	-	-0,39	-1,3
Comb 6A	1,0+k	1,0+k	0,1	-	-	-	1,3	0,39
Comb 6B	1,0+k	1,0+k	0,1	-	-	-	-1,3	0,39
Comb 6C	1,0+k	1,0+k	0,1	-	-	-	1,3	-0,39
Comb 6D	1,0+k	1,0+k	0,1	-	-	-	-1,3	-0,39
Comb 6E	1,0+k	1,0+k	0,1	-	-	-	0,39	1,3
Comb 6F	1,0+k	1,0+k	0,1	-	-	-	0,39	-1,3
Comb 6G	1,0+k	1,0+k	0,1	-	-	-	-0,39	1,3
Comb 6H	1,0+k	1,0+k	0,1	-	-	-	-0,39	-1,3
Comb B1	1,2	1,2	1,6	1,2	1	-	-	-
Comb B2	1,2	1,2	1	1,2	1	-	-	-
Comb M1	1,2	1,2	1,6	1,2	-	1,6	-	-
Comb M2	1,2	1,2	1	1,2	-	1,6	-	-

Analisis data dilakukan dengan mengevaluasi keluaran hasil pemodelan berupa gaya dalam elemen struktur yang meliputi gaya aksial, gaya geser, dan momen lentur, serta perpindahan struktur akibat kombinasi pembebanan layanan. Hasil analisis disajikan dalam bentuk nilai numerik dan kecenderungan respons struktur untuk setiap variasi kemiringan tiang pancang. Selanjutnya, hasil tersebut dibandingkan antar model untuk mengidentifikasi pengaruh kemiringan tiang terhadap respons awal struktur dermaga. Pendekatan analisis komparatif antar model ini umum digunakan dalam penelitian pemodelan numerik

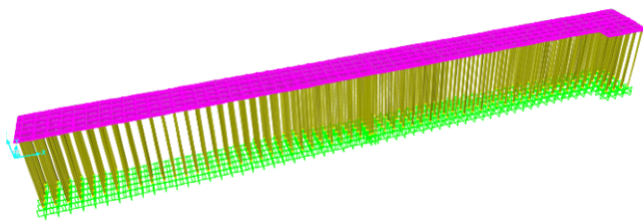
untuk menilai pengaruh parameter geometrik terhadap kinerja struktur [16].

Parameter evaluasi dalam penelitian ini meliputi gaya aksial, gaya geser, momen lentur pada elemen struktur, serta perpindahan lateral dermaga akibat pembebanan layanan. Parameter-parameter tersebut dipilih karena secara langsung merepresentasikan mekanisme penyaluran beban dan kinerja awal struktur dermaga. Perbandingan antar variasi kemiringan tiang pancang dilakukan berdasarkan nilai maksimum dan kecenderungan perubahan respons struktur.

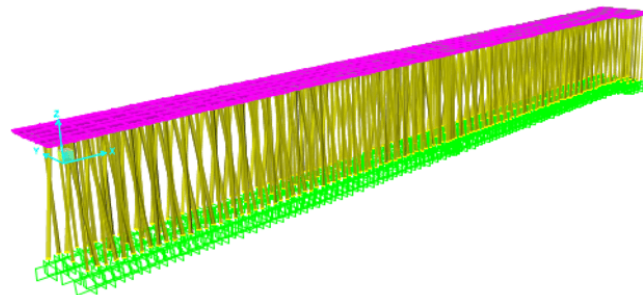
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Pemodelan Struktur

Pemodelan struktur dermaga dengan variasi kemiringan tiang pancang berhasil disusun menggunakan perangkat lunak SAP2000 v22. Gambar 6 menunjukkan model fondasi Dermaga A dengan konfigurasi Tiang Pancang Tipe 1, yaitu seluruh tiang dipasang dalam kondisi tegak. Tiang-tiang disusun dalam kelompok yang terhubung oleh *pile cap* dan menopang balok serta pelat dermaga. Jarak antar tiang mengikuti gambar rencana dermaga dan dipertahankan sama pada seluruh variasi model. Panjang tiang dan diameter tiang juga dibuat identik pada semua tipe agar perbedaan respons struktur hanya disebabkan oleh sudut kemiringan tiang. Pada model ini, beban vertikal dan lateral dari struktur atas diteruskan ke tanah melalui gaya aksial tekan dan momen lentur pada tiang pancang. Beban lateral terutama ditahan oleh mekanisme lentur tiang dan reaksi tanah lateral di sepanjang batang tiang.



Gambar 6. Pemodelan Tiang Pancang Tipe 1



Gambar 7. Pemodelan Tiang Pancang Tipe 8

Gambar 7 menunjukkan model fondasi dengan tiang pancang tipe 8 yang memiliki kemiringan 1H:6V. Susunan *pile cap*, jarak antar tiang, panjang tiang, dan dimensi elemen struktur atas dibuat sama dengan Tipe 1, sehingga perbedaan perilaku struktur hanya dipengaruhi oleh orientasi tiang. Pada Tipe 8, sebagian besar tiang dipasang miring ke arah datangnya beban lateral sehingga komponen gaya horizontal diubah menjadi gaya aksial tekan sepanjang sumbu tiang[17].

Perbedaan prinsip utama antara Tipe 1 dan Tipe 8 terletak pada mekanisme penyaluran beban lateral. Pada Tipe 1, beban lateral ditahan terutama melalui momen lentur pada tiang tegak dan reaksi tanah lateral, sehingga menghasilkan deformasi lateral yang lebih besar. Pada Tipe 8, beban lateral diuraikan menjadi komponen aksial tekan pada tiang miring, sehingga momen lentur dan deformasi lateral menjadi lebih kecil. Mekanisme ini menyebabkan

fondasi dengan Tipe 8 memiliki kekakuan lateral yang lebih tinggi dan kinerja yang lebih baik terhadap beban horizontal dibandingkan Tipe 1.

Hasil menunjukkan bahwa variasi kemiringan tiang pancang mempengaruhi distribusi gaya dalam pada fondasi. Pada model dengan tiang pancang miring, gaya aksial maksimum pada tiang cenderung meningkat dibandingkan dengan model tiang tegak. Sebaliknya, momen lentur maksimum pada tiang pancang dan *pile cap* menunjukkan kecenderungan menurun seiring bertambahnya sudut kemiringan tiang. Pola ini mengindikasikan adanya perubahan mekanisme penyaluran beban, di mana sebagian beban lateral dialihkan menjadi gaya aksial pada tiang pancang miring[17].

3.2. Analisis Hasil Output SAP2000

Pada Tabel 3 variasi kemiringan tiang pancang memberikan perubahan yang sangat jelas terhadap mekanisme kerja fondasi dermaga. Pada Tipe 1, gaya aksial sebesar 6.471,024 kN. Nilai ini merupakan kondisi dasar ketika tiang bekerja dominan sebagai elemen lentur. Pada Tipe 2 hingga Tipe 4, gaya aksial meningkat hingga 6.496,062 kN. Kenaikan ini menunjukkan bahwa penambahan kemiringan mulai mengubah mekanisme kerja tiang. Beban lateral tidak lagi sepenuhnya ditahan oleh lentur, tetapi mulai disalurkan sebagai gaya tekan aksial. Puncak gaya aksial terjadi pada Tipe 6 sebesar 6.496,89 kN. Kondisi ini menandakan titik paling efektif pengalihan beban lateral menjadi gaya aksial. Setelah Tipe 6, gaya aksial menurun secara bertahap hingga 6.490,715 kN pada Tipe 10. Penurunan ini menunjukkan bahwa kemiringan yang semakin besar tidak lagi meningkatkan kontribusi aksial secara signifikan.

Tabel 3. Output pemodelan

Tipe	Parameter Respons			
	Gaya Aksial Tiang	Gaya Geser	Momen Lentur	Perpindahan Lateral
1	6471.024	123.187	5661.734	0.147146
2	6494.677	219.995	5665.708	0.134106
3	6495.387	238.459	5665.623	0.133845
4	6496.062	261.657	5665.491	0.13362
5	6496.581	288.733	5665.302	0.133317
6	6496.89	323.572	5665.005	0.133561
7	6496.828	364.443	5664.577	0.134016
8	6496.155	422.734	5663.839	0.134882
9	6494.436	501.778	5662.554	0.136401
10	6490.715	616.155	5660.085	0.13919

Gaya geser meningkat hampir linier dari Tipe 1 hingga Tipe 10. Pada Tipe 1, gaya geser hanya 123,187 kN. Nilai ini meningkat menjadi 288,733 kN pada Tipe 5 dan mencapai 616,155 kN pada Tipe 10. Peningkatan lebih dari lima kali lipat ini menunjukkan bahwa kemiringan tiang menyebabkan komponen horizontal beban semakin besar diteruskan sebagai gaya geser internal. Hal ini memberi implikasi langsung pada kebutuhan kapasitas geser tiang, *pile cap*, dan sambungan struktur.

Momen lentur tertinggi terjadi pada Tipe 2 sebesar 5.665,708 kNm. Setelah itu, momen lentur menurun secara konsisten hingga 5.660,085 kNm pada Tipe 10. Penurunan ini menunjukkan bahwa kemiringan tiang mengurangi dominasi mekanisme lentur. Meskipun penurunannya tidak drastis, tren ini konsisten dan memperlihatkan peningkatan kekakuan lateral sistem fondasi.

Perpindahan lateral terbesar terjadi pada Tipe 1 sebesar 0,147146 m. Ketika kemiringan ditambahkan, perpindahan lateral menurun tajam. Nilai minimum tercapai pada Tipe 5 sebesar 0,133317 m. Penurunan ini menunjukkan peningkatan kekakuan lateral paling efektif. Setelah Tipe 5, perpindahan lateral kembali meningkat hingga 0,13919 m pada Tipe 10. Peningkatan ini menandakan bahwa kemiringan berlebih mulai menurunkan efisiensi sistem dalam mengendalikan deformasi.

Data menunjukkan adanya perubahan mekanisme kerja fondasi secara bertahap. Pada tipe awal, struktur bekerja dominan melalui lentur. Pada tipe menengah, khususnya Tipe 5 dan Tipe 6, terjadi keseimbangan antara gaya aksial tinggi, momen lentur rendah, dan perpindahan lateral minimum. Pada tipe lanjut, peningkatan kemiringan justru meningkatkan gaya geser dan deformasi lateral. Hal ini membuktikan bahwa sudut kemiringan optimum berada pada Tipe 5 sampai Tipe 6, bukan pada kemiringan maksimum.

Secara mekanika struktur, beban lateral yang bekerja pada dermaga akan diteruskan ke fondasi tiang pancang. Pada tiang pancang tegak, beban lateral terutama ditahan oleh momen lentur dan reaksi tanah lateral. Pada tiang pancang miring, komponen beban lateral diuraikan menjadi gaya aksial dan gaya lateral sepanjang sumbu tiang. Gaya aksial lebih efektif ditahan oleh elemen tiang dibandingkan momen lentur, sehingga respons struktur menjadi lebih kaku dan deformasi lateral berkurang. Mekanisme ini sejalan dengan konsep perilaku *batter pile* yang dijelaskan dalam literatur fondasi tiang pancang [3].

Hasil penelitian ini konsisten dengan temuan penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa penggunaan tiang pancang miring dapat meningkatkan ketahanan lateral struktur dermaga dan mengurangi perpindahan horizontal akibat beban layanan [18]. Selain itu, hasil ini juga mendukung studi numerik yang menunjukkan bahwa peningkatan sudut kemiringan tiang berpengaruh terhadap distribusi gaya aksial dan momen lentur pada fondasi tiang pancang [11].

Namun demikian, perlu dicatat bahwa hasil yang diperoleh dalam penelitian ini terbatas pada respons awal struktur berdasarkan asumsi perilaku elastis linier. Analisis kapasitas ultimit, perilaku nonlinier tanah, dan kemungkinan degradasi kekakuan belum dipertimbangkan. Oleh karena itu, hasil pemodelan ini lebih tepat digunakan sebagai dasar evaluasi awal dan pembandingan antar konfigurasi fondasi, bukan sebagai penentu kelayakan desain akhir struktur dermaga.

Penurunan momen lentur dan perpindahan lateral pada tiang pancang miring menunjukkan bahwa sistem fondasi menjadi lebih kaku terhadap beban lateral. Secara praktis, kondisi ini mengindikasikan potensi pengurangan risiko kerusakan struktur atas akibat deformasi berlebih pada

dermaga. Namun demikian, peningkatan gaya aksial yang signifikan pada kemiringan besar perlu menjadi perhatian dalam perencanaan, karena dapat berpengaruh terhadap kapasitas tekan tiang pancang. Oleh sebab itu, hasil penelitian ini menegaskan pentingnya keseimbangan antara peningkatan kinerja lateral dan kontrol gaya aksial dalam pemilihan sudut kemiringan tiang pancang.

Keterbatasan penelitian ini terletak pada pendekatan pemodelan yang masih menggunakan asumsi perilaku elastis linier untuk material dan tanah. Interaksi tanah dan tiang dimodelkan menggunakan pegas linear sehingga pengaruh nonlinieritas tanah, degradasi kekakuan, dan efek plastisitas tiang belum diperhitungkan. Selain itu, analisis yang dilakukan hanya terbatas pada kondisi pembebanan layanan dan belum mencakup evaluasi kapasitas ultimit, kondisi ekstrem, maupun pengaruh siklus beban berulang. Data tanah yang digunakan juga disederhanakan berdasarkan nilai N SPT sehingga variasi sifat tanah secara lebih rinci belum sepenuhnya terwakili. Oleh karena itu, hasil penelitian ini lebih tepat digunakan sebagai dasar evaluasi awal dan perbandingan antar konfigurasi kemiringan tiang, dan bukan sebagai penentu akhir kelayakan desain struktur dermaga.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pemodelan numerik struktur dermaga dengan variasi kemiringan tiang pancang, dapat disimpulkan bahwa kemiringan tiang memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respons struktur akibat pembebanan layanan. Konfigurasi tiang tegak menghasilkan perpindahan lateral terbesar dan momen lentur yang relatif tinggi, yang menunjukkan bahwa sistem fondasi bekerja lebih fleksibel dalam menahan beban lateral.

Peningkatan kemiringan tiang menyebabkan perubahan mekanisme penyaluran beban, di mana sebagian beban lateral dialihkan menjadi gaya aksial tekan. Hal ini ditunjukkan oleh peningkatan gaya aksial dari 6.471,024 kN hingga mencapai nilai maksimum 6.496,89 kN pada kemiringan menengah. Pada kondisi ini, momen lentur menurun dan perpindahan lateral dermaga berkurang secara signifikan hingga mencapai nilai minimum sebesar 0,133 m, yang menunjukkan peningkatan kekakuan lateral sistem fondasi.

Namun, pada kemiringan yang lebih besar, meskipun momen lentur terus menurun, gaya geser dan perpindahan lateral kembali meningkat. Kondisi ini menunjukkan bahwa kemiringan tiang yang terlalu besar tidak selalu memberikan kinerja struktur yang lebih baik secara keseluruhan. Oleh karena itu, kemiringan tiang pancang pada tingkat menengah memberikan respons paling seimbang antara peningkatan gaya aksial, penurunan momen lentur, dan pengendalian perpindahan lateral. Hasil penelitian ini menegaskan bahwa penggunaan tiang pancang miring efektif dalam meningkatkan kinerja lateral fondasi dermaga dan dapat digunakan sebagai dasar awal dalam evaluasi dan pengembangan desain struktur dermaga selanjutnya.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan analisis lanjutan yang mencakup evaluasi kapasitas ultimit

tiang pancang serta perilaku nonlinier tanah dan material. Selain itu, pengaruh beban dinamis seperti gempa dan beban siklik sandar kapal perlu dikaji untuk memperoleh gambaran kinerja struktur yang lebih komprehensif. Penelitian lanjutan juga dapat mempertimbangkan variasi kondisi tanah dan konfigurasi grup tiang yang berbeda guna mendukung penerapan hasil penelitian pada perencanaan dermaga secara lebih luas.

Daftar Pustaka

- [1] J.P. Smith-Pardo and G.Y. Firat, "Lateral Load Analysis of Waterfront Structures Supported on Plumb Piles", *14th World Conference on Earthquake Engineering*, pp. 12-17, 2008.
- [2] Standar Nasional Indonesia, *Persyaratan Perancangan Geoteknik*, Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2017.
- [3] W. Hidayat, *Menggunakan Tiang Miring (Batter Piles) Pada Jembatan Dermaga*, Jakarta: Universitas Pertamina, 2023.
- [4] B.J. Nugroho, "Pemodelan Beban Pada Struktur Dermaga Multipurpose dengan SAP2000", *Jurnal Teknik Sipil Unaya*, vol. 8, no. 1, pp. 98-107, 2022.
- [5] R. Lestari, H. Hariyadi, and H. Hamdani, "Analisis Kapasitas Fondasi Tiang Pancang di Dermaga Labuhan Lombok", *Spektrum Sipil*, vol. 11, no. 2, pp. 139-148, 2024. <http://dx.doi.org/10.29303/spektrum.v11i2.364>
- [6] M.Y. Abu-Farsakh, A. Souri, and M. Amirmojahedi, "Finite Element Analysis of the Lateral Load Test on Battered Pile Group at I-10 Twin Span Bridge", *ROSA P*, vol. 12, no. 2, pp. 1-14, 2019. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/61209>
- [7] D. Oktaferdian and D.S. Leman, "Analisis Kinerja Tiang dengan Variasi Kemiringan di Dermaga 'Sj' Bandar Lampung", *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, vol. 4, no. 4, pp. 823-836. 2021. <https://doi.org/10.24912/jmts.v4i4.12614>
- [8] H.S. Chore and R.K. Ingle, "Soil-Structure Interaction Analyses of Pile Supported Building Frame", *ASEAN Journal on Science and Technology for Development*, vol. 25, no. 2, pp. 457-467, 2008. <https://doi.org/10.29037/ajstd.276>
- [9] M.J. Tomlinson and J. Woodward, *Pile Design and Construction Practice*, New Jersey: CRC Press, 2015.
- [10] N. Xuan Tran, S.-R. Kim, and J.-S. Lee, *Dynamic Analysis of A Pile-Supported Wharf Utilizing A Three-Dimensional Numerical Method*, London: International Society for Soil Mechanics And Geotechnical Engineering, 2025.
- [11] D.M. Taborda, L. Zdravković, D.M. Potts, H.J. Burd, B.W. Byrne, K.G., Gavin, G.T, Houlsby, R.J., Jardine, T. Liu, C.M. Martin, and R.A. McAdam, R.A., "Finite-Element Modelling of Laterally Loaded Piles in A Dense Marine Sand at Dunkirk", *Geotechnique*, vol. 70, no. 11, pp. 1014-1029, 2020. <https://doi.org/10.1680/jgeot.18.PISA.006>
- [12] P. Deb and S.K. Pal, *Numerical Analysis of Piled Raft Foundation under Combined Vertical and Lateral Loading Numerical Analysis of Piled Raft Foundation under Combined Vertical*, Perth: National Institute of Technology, 2023.
- [13] BSN, Standar Nasional Indonesia (SNI) 1726:2019: Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung, Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2019.
- [14] ABE. Tomohisa, *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*, Japan: National Institute for Land and Infrastructure Management Port Facilities Division, 2022.
- [15] M.F.R. Andolph, *Design Methods for Pile Groups and Piled Rafts Methodes De Conception Pour Groupes De Pieux Et Radiers De Pieux*, London: International Society for Soil Mechanics And Geotechnical Engineering, 2025.
- [16] WBDG, *Unified Facilities Criteria (UFC) Approved for Public Release: Distribution Unlimited Piers and Wharves*, Washington: National Institute of Building Sciences, 2017.
- [17] M.S. Al-Tememy, M.A. Al-Neami, and M.F. Asswad, "A Numerical Analysis on the Behavior of Single Battered Pile under Pullout Loading", *E3S Web of Conferences*, vol. 318, no. 01010 pp. 1-14, 2021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131801010>
- [18] P.J. Hannigan, G.G. Goble, G. Thendean, G.E., Likins, and F. Rausche, *Design and Construction of Driven Pile Foundations*, New York: Federal Highway Administration, 2016.

This page is intentionally left blank