

Koinonia Septrosha Vera Nelwan
Sjachrul Balamba, Alva N. Sarayar

Universitas Sam Ratulangi Fakultas Teknik Jurusan Sipil Manado
Email: n.koinonia@gmail.com

ABSTRAK

Kelelahan struktur adalah salah satu jenis kerusakan atau kegagalan yang bisa berakibat keruntuhan yang sering dialami oleh suatu struktur seperti dermaga, yang menerima beban berulang. Pondasi yang merupakan struktur bawah dari suatu konstruksi pun bisa mengalami masalah kelelahan struktur akibat menerima beban berulang yang ada. Jika pondasi telah mencapai proses fatigue akhir, yakni kegagalan (failure) maka keseluruhan konstruksi tersebut bisa runtuh. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kelelahan yang terjadi pada struktur dermaga di Belang khususnya bagian pondasi dari dermaga tersebut. Analisis kelelahan dilakukan dengan metode *Fracture Mechanics (FM)* atau mekanika retakan yang hasilnya digunakan untuk menghitung umur kelelahan akibat beban berulang yang terjadi. Dan diperoleh umur kelelahan untuk tinggi gelombang Hz = 0,79 m, 1,13 m, 1,47 m, 1,81 m, 2,15 dan 3,0 m umur bangunan adalah 146052,3 tahun, 26856,6 tahun, 5905,1 tahun, 1405,1 tahun, 373,9 tahun dan 21,99 tahun.

Kata kunci: *fatigue*, pondasi, gelombang

I. PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Setiap bangunan teknik sipil mempunyai pondasi sebagai sesuatu yang mendukungnya. Pondasi didefinisikan sebagai struktur bagian bawah bangunan yang berhubungan langsung dengan tanah, atau bagian bangunan yang terletak di bawah permukaan tanah yang mempunyai fungsi memikul beban bagian bangunan lainnya di atasnya. Pondasi harus diperhitungkan untuk dapat menjamin kestabilan bangunan terhadap beratnya sendiri, beban-beban bangunan (beban isi bangunan), gaya-gaya luar seperti: tekanan angin, gempa bumi, pengaruh gelombang, dan lain-lain.

Secara umum ada 2 jenis pondasi, yakni pondasi dangkal dan pondasi dalam. Pondasi dangkal digunakan bila bangunan yang di atasnya tidak terlalu besar, seperti rumah sederhana. Yang termasuk pondasi dangkal yakni pondasi batu kali setempat, pondasi lajur batu kali, pondasi tapak/pelat setempat (beton), pondasi lajur beton, pondasi stropile dan pondasi tiang pancang kayu. Sedangkan pondasi dalam ialah pondasi yang dipakai pada bangunan di atas tanah yang lembek. Pondasi ini juga dipakai pada bangunan dengan bentangan yang sangat lebar dan bangunan bertingkat. Yang termasuk didalamnya antara lain pondasi tiang pancang (kayu, beton, besi, pipa dan baja), pondasi sumuran, pondasi borpile dan lain-lain.

Banyak masalah yang terjadi dalam setiap bangunan teknik sipil. Baik di bagian struktur atas maupun struktur bawahnya. Salah satunya yakni kelelahan struktur. Kelelahan struktur yang dimaksud adalah salah satu jenis kerusakan atau kegagalan yang di

akibatkan oleh beban berulang yang bisa berakibat kegagalan atau keruntuhan struktur tersebut.

Pondasi yang merupakan struktur bawah dari suatu konstruksi pun bisa mengalami masalah kelelahan struktur akibat menerima beban berulang yang ada, meskipun beban tersebut relatif kecil. Jika pondasi telah mencapai proses fatigue akhir, yakni kegagalan (failure) maka keseluruhan konstruksi tersebut bisa runtuh.

Indonesia yang berada dekat persilangan rute perdagangan dunia dan dilalui jalur pelayaran internasional timur-barat dan utara-selatan, serta menganut konsep negara maritim memiliki dermaga sebagai sarana transportasi kelautan. Dan kelelahan struktur merupakan satu moda keruntuhan yang patut diwaspadai pada bangunan laut seperti dermaga, karena beban gelombang yang ada dan terus menerus terjadi bisa menjadi salah satu sebab suatu dermaga, terlebih khusus pondasinya mengalami kelelahan struktur.

Oleh karena itu, perlu dianalisis dengan seksama mengenai kelelahan struktur yang terjadi pada bangunan dermaga yang ada akibat menerima beban berulang (beban dinamis), yakni beban gelombang.

I.2 Tujuan Penelitian

Maksud dari penelitian ini adalah untuk menganalisis kelelahan struktur bagian bawah suatu konstruksi.

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Untuk mengetahui pengaruh kelelahan struktur pada pondasi tiang pancang baja suatu konstruksi dermaga.
2. Untuk menghitung usia struktur dari dermaga dengan menggunakan metode *Fracture Mechanics*.

II. LANDASAN TEORI

II.1 Gelombang

Gaya gelombang yang bekerja pada anjungan atau struktur lepas pantai dapat dihitung dengan 3 cara, yakni dengan teori Morison, Teori Froude – Krylov dan teori Difraksi. Dalam penelitian ini digunakan teori Morison. Persamaan Morison tepat jika diterapkan pada kasus struktur dimana gaya hambatan signifikan, yakni ketika pada struktur yang ukurannya (diameter=D) relatif kecil jika dibandingkan dengan panjang gelombang (L). Persamaan Morison adalah sebagai berikut:

$$F = \int_0^d \left[\frac{1}{2} C_D \frac{\rho}{g} D u |u| + \frac{\pi}{4} C_m \frac{\rho}{g} D^2 \frac{du}{dt} \right] dz$$

Dimana:

dF = Gaya gelombang per satuan panjang elemen dy

dF_D = Gaya drag

dF_m = Gaya inersia

ρ = Kerapatan massa air laut

C_D, C_m = Koefisien drag, koefisien inersia

u = Kecepatan

$\frac{du}{dt}$ = percepatan

II.2 Tegangan Akibat Gaya Gelombang

$$\sigma = \frac{M_I}{2I} D + \frac{M_D}{2I} D = (M_I + M_D) \frac{D}{2I}$$

Komponen momen akibat gaya inersia

$$M_I = \int_{-L}^0 (L+z) \frac{\rho}{g} C_m A \frac{du}{dt} dz$$

Komponen momen akibat gaya seret

$$M_D = \int_{-L}^0 (L+z) \frac{1}{2} \frac{\rho}{g} C_D D u |u| dz$$

Dimana:

M_I = Komponen momen akibat gaya inersia

M_D = Komponen momen akibat gaya seret (drag)

D = Diameter tiang pancang

I = Inersia penampang = $\frac{\pi}{64} D^4$

A = Luas penampang

II.3 Daya Dukung Tiang Pancang Tunggal

Rumus umum untuk menghitung daya dukung tiang pancang tunggal adalah sebagai berikut:

$$Q_u = Q_p + Q_s$$

Dimana:

Q_u = Ultimate Bearing Capacity

Q_p = Daya Dukung Ujung Tiang

Q_s = Daya Dukung Selimut Tiang

II.4 Daya Dukung Tiang Pancang Kelompok

Persamaan untuk menghitung efisiensi kelompok tiang adalah sebagai berikut :

Conversi – Labarre

$$E_g = 1 - \theta \frac{(n-1)m + (m-1)n}{90mn}$$

dimana :

E_g = Efisiensi kelompok tiang

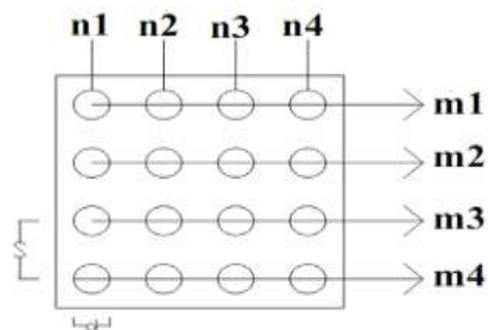
θ = arctg (d/s), dalam derajat

m = Jumlah baris tiang

n = Jumlah tiang dalam satu baris

d = Diameter tiang

s = Jarak pusat ke pusat tiang



Gambar 1 Baris kelompok tiang

Setelah mendapatkan nilai E_g (Efisiensi tiang pancang kelompok), maka dihitung kapasitas daya dukung tiang pancang kelompok dengan rumus:

$$Q_u = n \times P_{ult} \times E_g$$

dimana :

P_{ult} = daya dukung tiang pancang tunggal

n = jumlah tiang pancang

$$E_g = 1 - \theta \frac{(n-1)m + (m-1)n}{90 \times m \times n}$$

(persamaan Converse-Labarre)

II.5 Analisis Fatigue

Fatigue atau kelelahan struktur akibat beban berulang merupakan salah satu moda keruntuhan bangunan lepas pantai yang harus diwaspadai. Secara umum kegagalan fatigue dapat ditentukan dengan dua metode yaitu Metode S-N Curve dan metode Fracture Mechanics (Bai 2003). Dalam penelitian ini metode yang akan digunakan adalah metode Fracture Mechanics.

II.6 Mekanika Retak

Mekanika retak (*fracture mechanics*) adalah studi dari respon dan kegagalan struktur sebagai akibat inisiasi dan perambatan retak atau suatu metode untuk menggambarkan karakter dari perilaku retak dalam parameter-parameter struktural seperti tegangan dan ukuran retak. Dengan *fracture mechanics* dapat ditentukan apakah retak dengan ukuran tertentu dalam suatu bahan dengan ketangguhan patah (*fracture toughness*) yang sudah diketahui, berbahaya atau tidak karena dapat merambat sehingga terjadi perpatahan pada tingkat beban tertentu. Metode yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah metode *Linier Elastic Fracture Mechanics* (LEFM).

II.7 Faktor Intensitas Tegangan

Faktor intensitas tegangan dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$K = \sigma\sqrt{\pi a}$$

Dimensi K adalah $MPa\sqrt{m}$.

Untuk keadaan umum faktor intensitas tegangan, K, dapat dihitung sebagai berikut:

$$K = \alpha\sigma\sqrt{\pi a}$$

Dimana α adalah parameter yang tergantung pada geometri benda uji dan retak.

II.8 Ketangguhan Perpatahan

Fracture Toughness atau K_{IC} adalah capaian kritis dari faktor intensitas tegangan dimana retak pada baja akan menjalar dengan cepat sampai runtuh. K_{IC} dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{B}{2,5}} \sigma_{ys}$$

Dimana B adalah tebal penampang.

II.9 Umur Kelelahan

Penyebaran retak fatigue dengan fluktuasi beban beramplitudo konstan

$$\frac{da}{dN} = A (\Delta K)^m$$

Dimana:

- a = panjang retak
- N = jumlah siklus
- ΔK = perubahan faktor intensitas tegangan
- A dan m = konstanta untuk material tertentu

Penyebaran retak fatigue dengan fluktuasi beban beramplitudo berubah-ubah

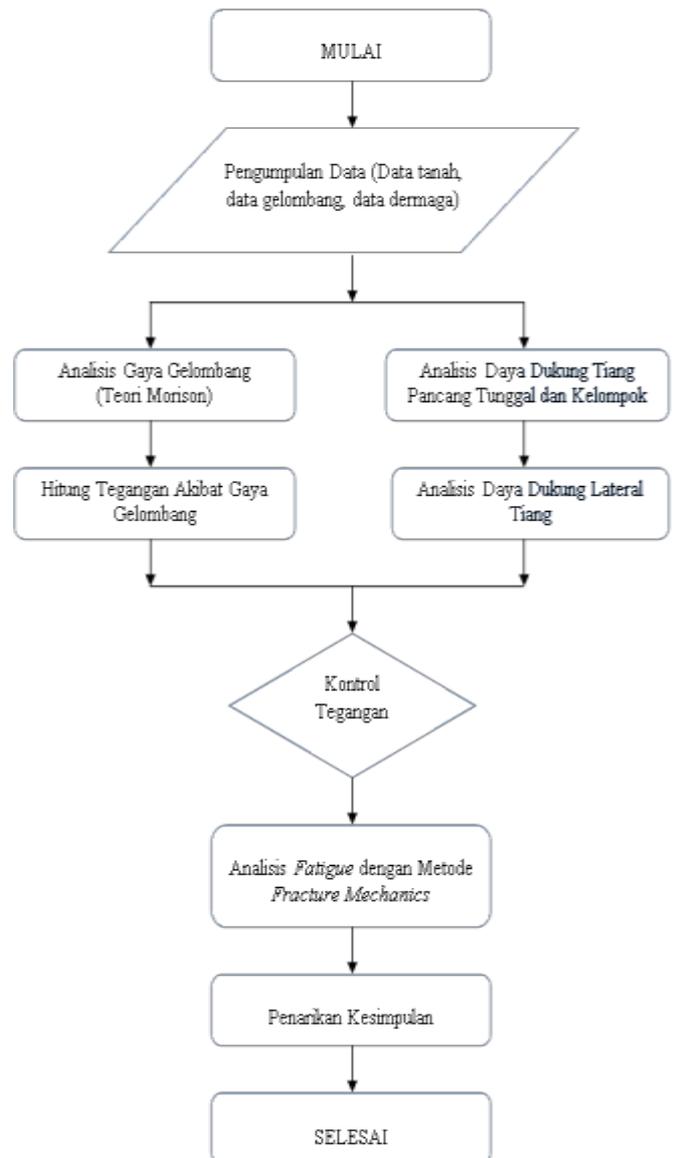
$$\frac{da}{dN} = A (\Delta K_{rms})^m$$

Dimana A dan m adalah konstanta, dan

$$\Delta K_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k \Delta K_i^2}{n}}$$

III. METODOLOGI PENELITIAN

III.1 Diagram Alir Penelitian



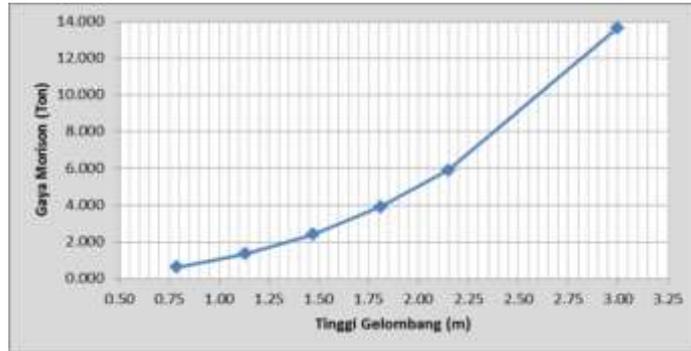
IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

IV.1 Analisis Gaya Gelombang

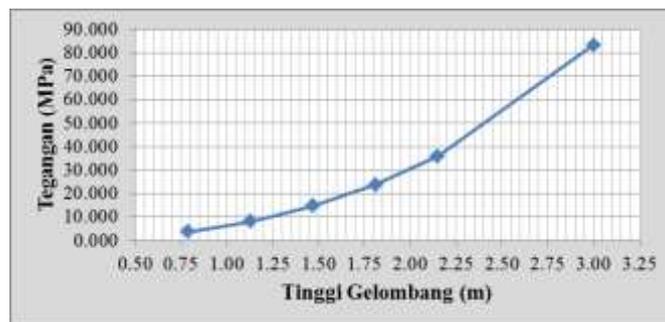
Dihitung dengan persamaan Morison didapatkan hasil sebagai berikut:

Tabel 1 Perhitungan Gaya Gelombang dan Tegangan dengan Variasi Tinggi Gelombang

H _z (m)	T _z (s)	u _z (m/s)	du/dt (m/s ²)	F (ton)	σ (ton/m ²)	(Mpa)
0.79	4.67	2.2796	0.1682	0.6250	388.661	3.813
1.13	4.67	3.3808	0.2494	1.3439	835.770	8.199
1.47	4.67	4.5603	0.3364	2.4152	1502.005	14.735
1.81	4.67	5.8223	0.4295	3.9066	2429.483	23.833
2.15	4.67	7.1713	0.5290	5.8954	3666.337	35.967
3.00	4.67	10.9569	0.8083	13.6535	8491.062	83.297



Gambar 2 Grafik Hubungan Antara Tinggi Gelombang dan Gaya Morison



Gambar 3 Grafik Hubungan Antara Tinggi Gelombang (H) dan Tegangan (σ)

IV.2 Analisis Daya Dukung Tiang Pancang Tunggal

1. Menghitung Daya Dukung Ujung Tiang Pancang

Menurut Meyerhof:

$$Q_p = A_p q' N_q^* \leq A_p (0,5 p_a N_q^* \tan \phi)$$

Diketahui:

$$p_a = 100 \text{ kN/m}^2 = 10 \text{ ton/m}^2$$

Penyelesaian:

Untuk $\phi = 35^\circ$, didapat nilai $N_q^* = 143$.

Dan, nilai $q' = \gamma \times L = 1,8 \times 28 = 50,4 \text{ t/m}^2$.

$$A_p q' N_q^* = \pi \left(\frac{0,508}{2} \right)^2 \times 50,4 \times 143 = 1460,78 \text{ ton}$$

$$A_p (0,5 p_a N_q^* \tan \phi) = \pi \left(\frac{0,508}{2} \right)^2 \times 0,5 \times 10 \times 143 \times \tan 35 = 101,47 \text{ ton}$$

Maka, $Q_p = 101,47 \text{ ton}$

2. Menghitung Daya Dukung Friksi Tiang Pancang

$$Q_s = \sum f p \Delta l$$

Dimana:

$$p = \pi(D + t) = \pi \times (0,508 + 0,012) = 1,634 \text{ m}$$

$$L' = 15D = 15(0,508) = 7,62 \text{ m}$$

$$\delta = 0,8\phi = 0,8 \times 35^\circ = 28^\circ$$

$$K = 1 - \sin \phi = 1 - \sin 35^\circ = 0,43$$

Penyelesaian:

➤ Untuk $z = 0$

$$\sigma'_0 = 0$$

$$f = 0$$

• Untuk $z = 7,62 \text{ m}$

$$\sigma'_0 = 7,62 \times 1,8 = 13,716 \text{ ton/m}^2$$

$$f = K \sigma'_0 \tan \delta$$

$$= 0,43 \times 13,716$$

$$\times \tan(28^\circ)$$

$$= 3,14 \text{ ton/m}^2$$

Maka,

$$Q_s = \left(\frac{f_{z=0} + f_{z=7,62}}{2} \right) pL' + f_{z=7,62} p(L - L')$$

$$Q_s = \left(\frac{0 + 3,14}{2} \right) \times 1,634 \times 7,62 + 3,14 \times 1,634 \times (17 - 7,62) = 67,67 \text{ ton}$$

- Jadi, daya dukung tiang pancang tunggal adalah sebagai berikut:

$$Q_u = Q_p + Q_s = 101,47 + 67,67 = 169,14 \text{ ton}$$

- Daya dukung ijin:

$$Q_{ijin} = \frac{Q_p + Q_s}{SF}$$

Dimana: SF = 3

$$Q_{ijin} = \frac{Q_p + Q_s}{SF} = \frac{169,14}{3} = 56,38 \text{ ton}$$

Jumlah beban yang diterima 1 tiang adalah 19,79 ton < Q_{ijin} . Jadi, tiang mampu untuk menopang beban yang ada.

Berdasarkan data SPT

- Menghitung daya dukung ujung tiang pancang tunggal:

$$Q_p = A_p 0,4 p_a \bar{N} \frac{L}{D} \leq A_p 4 p_a \bar{N}$$

dimana: $p_a = 100 \text{ kN/m}^2 = 10 \text{ ton/m}^2$

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{\sum_{i=1}^m \frac{t_i}{N}} = \frac{2 + 2 + 2 + 2 + 2}{\left(\frac{2}{28,6}\right) + \left(\frac{2}{68,9}\right) + \left(\frac{2}{78}\right) + \left(\frac{2}{78}\right) + \left(\frac{2}{78}\right)} = \frac{10}{0,176} = 56,82$$

Jadi, daya dukung ujung tiang pancang tunggal :

$$A_p 0,4 p_a \bar{N} \frac{L}{D} = \pi \left(\frac{0,508}{2} \right)^2 \times 0,4 \times 10 \times 56,82 \times \frac{17}{0,508} = 1541,57 \text{ ton}$$

$$A_p 4 p_a \bar{N} = \pi \left(\frac{0,508}{2} \right)^2 \times 4 \times 10 \times 56,82 = 460,66 \text{ ton}$$

Jadi, $Q_p = 460,66 \text{ ton}$

- Menghitung daya dukung friksi:

$$Q_s = pL f_{av}$$

Tabel 2 Perhitungan Nilai N60 Rata-Rata

Kedalaman (m)	Tebal Lapisan (m)	N _i	t _i /N _i
1	1	3,9	0,256
3	2	6,5	0,308
5	2	2,6	0,769
7	2	14,3	0,140
9	2	19,5	0,103
11	2	28,6	0,070
13	2	68,9	0,029
15	2	78,0	0,026
17	2	78,0	0,026
Jumlah	17		1,726

dimana : $\bar{N} = \frac{17}{1,726} = 9,85$

$$f_{av} = 0,02 p_a \bar{N} = 0,02 \times 10 \times 9,85 = 1,97 \text{ ton/m}^2$$

Jadi, $Q_s = \pi \times 0,508 \times 17 \times 1,97 = 53,448 \text{ ton}$

- Jadi, daya dukung tiang pancang tunggal (Q_u):

$$Q_u = Q_p + Q_s = 460,66 + 53,448 = 514,108 \text{ ton}$$

- Daya dukung ijin:

$$Q_u = \frac{Q_p + Q_s}{SF}$$

SF (Safety Factor) = 3

$$Q_u = \frac{514,108}{3} = 171,369 \text{ ton}$$

Jumlah beban yang diterima 1 tiang adalah 19,79 ton < Q_{ijin} . Jadi, tiang mampu untuk menopang beban yang ada.

IV.3 Daya Dukung Tiang Pancang Kelompok

$$Q_u = n \times P_{ult} \times E_g$$

dimana :

P_{ult} = daya dukung tiang pancang tunggal

n = 39

E_g =

$$E_g = 1 - \theta \frac{(n-1)m + (m-1)n}{90 \times m \times n}$$

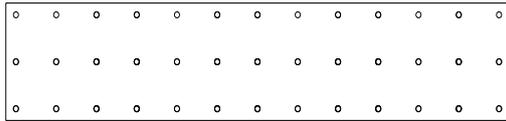
(persamaan Converse-Labare)

n = 13

m = 3

s = 4 m

D = 0,508 m



Gambar 4 Kelompok Tiang Pancang Dermaga Belang

$$\tan^{-1} \frac{D}{s} = \tan^{-1} \frac{0,508}{4} = 7,24$$

$$Eg = 1 - \theta \frac{(n-1)m + (m-1)n}{90 \times m \times n}$$

$$= 1 - 7,24 \frac{(13-1)3 + (3-1)13}{90 \times 3 \times 13}$$

$$= 0,872114$$

Jadi, kapasitas daya dukung tiang pancang kelompok:

$$Q_u = n \times P_{ult} \times Eg$$

$$= 39 \times 228,02 \times 0,872114$$

$$= 7755,52 \text{ ton}$$

$$Q_u = \frac{7755,52}{3} = 2585,17 \text{ ton}$$

$$Q_u \text{ 1 tiang} = \frac{2585,17}{39} = 71,8 \text{ ton}$$

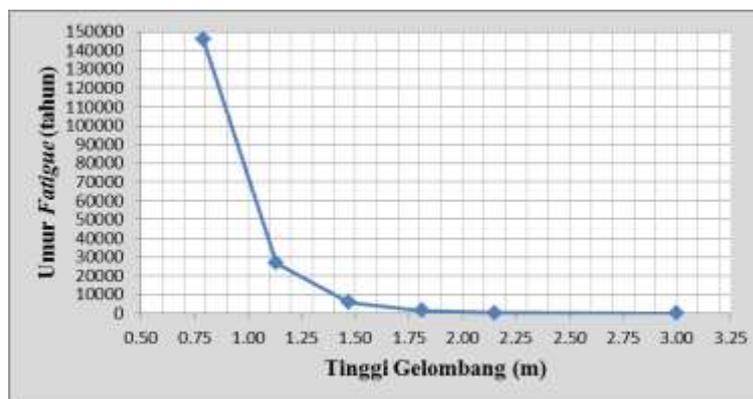
Jumlah beban yang diterima 1 tiang adalah 19,79 ton < Q_{ijin}. Jadi, tiang mampu untuk menopang beban yang ada.

IV.2 Analisis Fatigue dengan Metode Fracture Mechanics

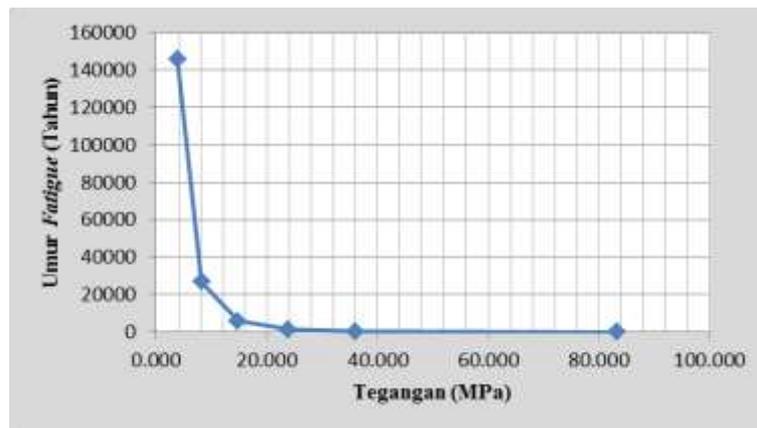
Hasil perhitungan umur kelelahan struktur dengan metode *Fracture Mechanics* (integrasi numerik) untuk berbagai variasi tinggi gelombang disajikan dalam tabel berikut ini:

Tabel 3 Umur Kelelahan Struktur

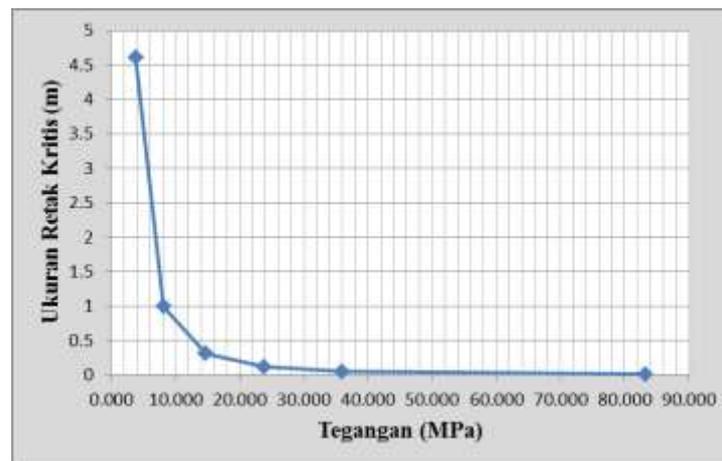
Hz	σ		acr	N	Gelombang 9 tahun	Umur Kelelahan
(m)	(ton/m ²)	(Mpa)	(m)	(siklus)	(siklus)	(tahun)
0.79	388.66	3.813	4.6010	214615756	13225	146052.3102
1.13	835.77	8.199	0.9950	39464298	13225	26856.61135
1.47	1502.01	14.735	0.3081	8677187.8	13225	5905.080566
1.81	2429.48	23.833	0.1178	2064751.3	13225	1405.123741
2.15	3666.34	35.967	0.0517	549408.27	13225	373.8884263
3.00	8491.062	83.297	0.0096	32315.072	13225	21.99135346



Gambar 5 Grafik Hubungan Antara Tinggi Gelombang dan Umur Kelelahan



Gambar 4 Grafik Hubungan Antara Tegangan dan Umur Kelelahan



Gambar 6 Grafik Hubungan Antara Tegangan dan Retak Kritis

V. PENUTUP

Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diperoleh dari berbagai analisis dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Dengan persamaan Morison didapatkan hasil gaya gelombang untuk Hz = 0,79 m adalah 0,625 ton, Hz = 1,13 m adalah 0,224 ton, Hz = 1,47 adalah 2,415 ton, Hz = 1,81 m adalah 3,91 ton, Hz = 2,15 m adalah 5,895 ton dan Hz = 3 m adalah ton.
2. Dengan analisis *fatigue* (kelelahan) dapat diketahui bahwa umur dari tiang pancang baja akibat *fatigue* ntuk Hz = 0,79 m, 1,13 m, 1,47 m, 1,81 m, 2,15 dan 3,0 m umur bangunan adalah

146052,3 tahun, 26856,6 tahun, 5905,1 tahun, 1405,1 tahun, 373,9 tahun dan 21,99 tahun.

3. Dari analisis *fatigue* dapat di ketahui bahwa semakin besar Hz maka semakin pendek umur bangunan.

Saran

1. Perlu dilakukan penelitian yang lebih lanjut mengenai pengaruh luar terhadap analisis *fatigue* pada baja seperti korosi dan temperatur.
2. Perlu dilakukan penelitian yang lebih lanjut tentang hubungan antara defleksi dari tiang pancang dan retakan yang terjadi.

DAFTAR PUSTAKA

- API (2000), *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design*, 21st Ed., American Petroleum Institute, Washington D.C
- Barsom, John. M & Rolfe, Stanley T. 1987. *Fracture and Fatigue Controls in Structures*, New Jersey: Prentice – Hall. Inc. Engelwood Cliffs.
- Bowles, Joseph E. 1997. *Foundation Analysis and Design*, McGraw-Hill, Singapura.
- Broek D.B. (1988), *The Practical Use of Fracture Mechanics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Das, Braja. M. 1998. *Principles Of Foundation Engineering 4th Edition*, Cole Publishing Company, California.
- Djabbar, Alham; Juswan; Sabaruddin R. 2012. *Bahan Ajar Mekanika Gelombang*, Universitas Hasanuddin, Makasar.
- Hardiyatmo, H. Christady. 2008. *Teknik Fondasi 2*. Beta Offset, Yogyakarta.
- MANUAL OF STEEL CONSTRUCTION. 1989. *Allowable Stress Design Ninth Edition*, AISC, Inc.
- Quedarusman, George. 2012. *Analisa Kelelahan Struktur Pada Sambungan Antar Tiang Pancang Akibat Beban Horizontal*. Universitas Sam Ratulangi, Manado.
- Ratulangi, Remmy Jean. 2004. *Perkiraan Siklus Runtuh Akibat Faigue Pada Struktur Baja Dengan Konsep Mekanika Retak*. Universitas Sam Ratulangi, Manado.
- Rohayati, Yeti & Siswadi, Cecil. 1994. *Analisa Fatigue Pada Drilling Conductor Guide Dari Anjungan Tipe Jacket Ditinjau Secara Deterministik dan Probabilistik*. Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Schijve, Jaap. 2001. *Fatigue Of Structures And Materials*, Kluwer Academic Publishers.
- Triatmodjo, Bambang. 2010. *Perencanaan Pelabuhan*, Beta Offset, Yogyakarta.