

PENGARUH DEVIASI MUTU TULANGAN MASTER STEEL TERHADAP DESAIN BALOK BERTULANGAN LEMAH DI IKN

Ruminsar Simbolon¹⁾

¹⁾ Pengajar Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mulawarman, Jl.Sambaliung No.9
Kampus Gunung Kelua, Samarinda
e-mail: ruminsar_15@yahoo.co.id

ABSTRAK

Beton bertulang merupakan material komposit yang memanfaatkan beton dan baja tulangan untuk menahan gaya tarik dan lentur. Rasio tulangan pada balok beton bertulang sangat memengaruhi kekuatan, deformasi, dan pola keruntuhan struktur. Penelitian ini menganalisis pengaruh deviasi mutu tulangan terhadap perilaku keruntuhan balok beton bertulang kondisi *under reinforced*. Metode yang digunakan adalah pengujian tarik baja tulangan di laboratorium dengan memperhatikan batas deviasi sesuai SNI. Analisis dilakukan dengan membandingkan kapasitas lentur rencana menggunakan tegangan leleh $f_y=420$ MPa terhadap kapasitas lentur realisasi berdasarkan hasil pengujian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa balok yang direncanakan mengalami keruntuhan *under reinforced* cenderung beralih menjadi *over reinforced* akibat deviasi mutu tulangan yang lebih tinggi dari target perencanaan, sehingga perilaku duktail berubah menjadi keruntuhan getas. Temuan ini menegaskan pentingnya mempertimbangkan kemungkinan deviasi mutu tulangan dalam tahap perencanaan agar target balok bertulangan lemah tetap terpenuhi.

ABSTRACT

Reinforced concrete is a composite material that utilizes concrete and reinforcing steel to withstand tensile and flexural forces. The reinforcement ratio in reinforced concrete beams significantly affects strength, deformation, and structural collapse patterns. This study analyzes the effect of reinforcement quality deviations on the planned collapse behavior of reinforced concrete beams under under-reinforced conditions. The research employs a laboratory experimental approach through tensile testing on reinforcing steel, considering deviation limit values per SNI standards. Data analysis compared the flexural capacity of under-reinforced beams using a planned yield stress of $f_y = 420$ MPa against actual flexural capacity based on laboratory results. Findings indicate that beams designed for under-reinforced failure tend to shift toward over-reinforced behavior, causing the expected ductile failure to become brittle. This confirms that flexural reinforcement ratio selection must account for potential quality deviations exceeding planning targets, ensuring under-reinforced beam design objectives are still achieved.

Keywords: Up to six keywords should also be included.

1. PENDAHULUAN

Beton bertulang merupakan kombinasi antara beton dan baja. Kombinasi keduanya membentuk suatu elemen struktur dimana dua macam komponen saling bekerjasama dalam menahan beban yang bekerja/dibebankan ke elemen tersebut, dimana beton menahan gaya tekan dan geser yang terjadi, sedangkan tulangan baja mempunyai fungsi menahan gaya tarik (lentur).

Beton bertulang tidak homogen, karena terbentuk dari dua material yang berbeda. Metode-metode yang dipakai dalam analisis beton bertulang berbeda

dengan metode yang dipakai dalam perencanaan atau dalam penyelidikan yang hanya terdiri dari baja, kayu ataupun material struktur lainnya. Pada setiap penampang beton bertulang, terdapat gaya-gaya dalam yang dapat diuraikan menjadi komponen-komponen yang saling tegak lurus dan menyinggung terhadap penampang beton bertulang itu sendiri. Komponen-komponen yang tegak lurus terhadap penampang beton bertulang tersebut merupakan tegangan-tegangan lentur (tarik pada satu sisi dari sumbu netral dan tekan pada sisi lainnya). Fungsi dari komponen-komponen ini adalah untuk memikul momen lentur pada penampang beton bertulang

tersebut. Komponen-komponen tersebut memikul gaya-gaya geser atau transversal.

Balok adalah elemen struktur yang menyalurkan beban-beban dari pelat ke kolom penyangga yang vertikal. Dalam kontruksi gedung biasanya balok dibagi menjadi tiga penampang yaitu balok L, T dan persegi.

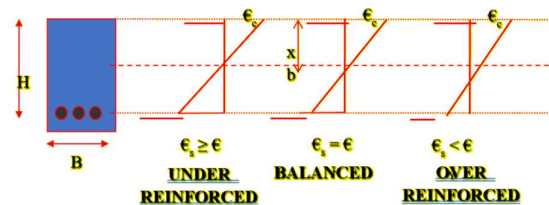
Ada 3 kemungkinan jenis keruntuhan yang mungkin terjadi yaitu Keruntuhan tarik (*Under-Reinforced*), Keruntuhan tekan (*Over-reinforced*) dan Keruntuhan balance. Keruntuhan tarik terjadi bila jumlah tulangan baja tarik sedikit sehingga tulangan tersebut akan leleh terlebih dahulu sebelum betonnya pecah, yaitu apabila regangan baja (ϵ_s) lebih besar dari regangan beton (ϵ_c). Keruntuhan tekan terjadi bila jumlah tulangan vertikal banyak maka keruntuhan dimulai dari beton sedangkan tulangan bajanya masih elastis, yaitu apabila regangan baja (ϵ_s) lebih kecil dari regangan beton (ϵ_c), dan Keruntuhan balance terjadi jika baja dan beton tepat mencapai kuat batasnya, yaitu apabila regangan baja (ϵ_s) sama besar dengan regangan beton (ϵ_c).

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Balok Bertulang Lemah (*Under Reinforced*)

Balok bertulangan lemah (*under-reinforced*) adalah balok beton bertulang di mana baja tulangan tarik leleh terlebih dahulu sebelum beton tekan mencapai batas keruntuhan. Desain ini diwajibkan dalam struktur beton bertulang agar keruntuhan terjadi secara daktail (melentur/memberi peringatan) bukan getas (tiba-tiba).

Pada Saat Beton Mencapai Kekuatan Nominal Hingga Runtuh, Maka Regangan Didalam Tulangan As kemungkinan lebih besar, sama Atau lebih kecil dari regangan leleh $\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s}$, tergantung kepada perbandingan relatif tulangan terhadap beton.



Gambar 1. Diagram distribusi regangan balok beton bertulang pada kondisi *under reinforced*, *balanced*, dan *over reinforced* (Sumber ;)

Berdasarkan Gambar 1, perbedaan ketiga kondisi keruntuhan balok beton bertulang dapat dilihat dari

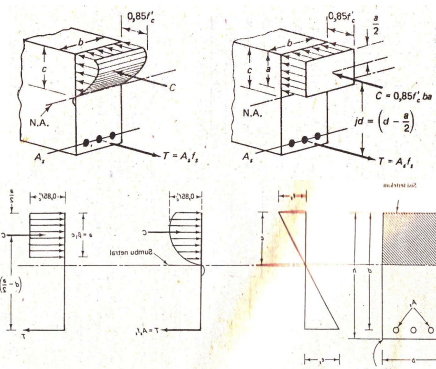
perbandingan regangan baja (ϵ_s) terhadap regangan leleh (ϵ_y) dan regangan beton (ϵ_c).

1. Jika jumlah tulangan sedikit, maka tulangan tersebut akan lebih dahulu meleleh sebelum beton mengalami kehancuran berarti kegagalan terjadi pada tulangan $\epsilon_c < 0,003$ sedangkan $\epsilon_s > \epsilon_y = \frac{f_y}{E_s}$. Keruntuhan seperti ini merupakan keruntuhan yang daktail, yaitu keruntuhan yang didahului deformasi yang besar. keruntuhan seperti ini disebut keruntuhan *under reinforced* ($a < a_b$)
2. Jika jumlah tulangan sedang, maka beton dan tulangan akan mengalami kehancuran bersamaan, yaitu pada saat beton mencapai regangan $\epsilon_c = 0,003$, maka baja tulangan juga mencapai regangan leleh $\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s}$. keruntuhan seperti ini disebut keruntuhan *balanced* (berimbang) ($a = a_b$)
3. Jika jumlah tulangan banyak, maka keruntuhan terjadi akibat hancurnya beton yang tertekan, sedangkan tulangan masih kondisi elastis $\epsilon_c > 0,003$ sedangkan $\epsilon_s < \epsilon_y = \frac{f_y}{E_s}$. keruntuhan seperti ini disebut keruntuhan *over reinforced*, yang terjadi bila jumlah tulangan melebihi tulangan pada kondisi *balanced* ($a > a_b$)

Karena keruntuhan pada beton adalah keruntuhan yang getas (*over reinforced*), artinya tanpa adanya gejala peringatan terlebih dahulu, maka hampir semua peraturan perencanaan merekomendasikan perencanaan balok dengan penampang yang *under reinforced*

2.2. Analisis Balok Bertulangan Lemah (*Under Reinforced*)

Berdasarkan Gambar 2, Whitney mengusulkan distribusi tegangan persegi ekuivalen dengan tegangan rata-rata $0,85f_c$ untuk menyederhanakan analisis lentur balok beton bertulang.



Gambar 2. Distribusi tegangan persegi ekuivalen (*whitney stress block*) pada balok beton bertulang (Sumber:)

Blok Tegangan Persegi ini

1. Mempunyai tegangan rata-rata $0.85 f'c$ (didasarkan pengujian tekan laboratorium umur 28 hari)
2. Tinggi blok tegangan $a = \beta_1 c \dots\dots\dots(1)$
3. Regangan maksimum beton, $\epsilon_c = 0,003$
4. Whitney menetapkan nilai β_1 ,
 $\beta_1 = 0.85$ untuk $f'c \leq 30$ Mpa
 $\beta_1 = 0.85 - 0.008 (f'c - 30)$ untuk $f'c > 30$ Mpa

Perlu diperhatikan bahwa β_1 hanya diperlukan untuk menetapkan letak garis netral didalam penentuan regangan tulangan. selama regangan tulangan ϵ_s melampaui nilai regangan leleh ϵ_y , maka momen nominal (mm) tidak dipengaruhi β_1 .

Berdasarkan keseimbangan gaya horizontal ($C = T$), tinggi blok tegangan ekivalen diperoleh melalui persamaan:

$$a = \frac{A_s \cdot f_s}{0.85 \cdot f'c \cdot b} \dots\dots\dots(2)$$

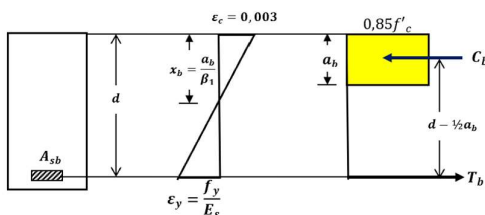
Sehingga momen nominal balok dapat dihitung dengan:

$$Mn = A_s \cdot f_s \left(d - \frac{a}{2} \right) \dots\dots\dots(3)$$

Dimana

- a = Tinggi balok tegangan ekivalen (mm)
- As = Luas penampang tulangan tarik (mm²)
- fs = Tegangan baja tulangan (MPa)
- f'c = Kuat tekan beton (Mpa)
- b = lebar penampang balok (mm)
- Mn = Momen nominal balok (N.mm)
- d = Tinggi efektif balok (mm)

Pada saat beton mencapai kekuatan nominal hingga runtuh, regangan pada tulangan kemungkinan lebih besar, sama, atau lebih kecil dari regangan leleh $\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s}$, tergantung pada perbandingan relatif tulangan terhadap beton. Untuk membatasi kondisi keruntuhan getas, terdapat dua pendekatan dalam menentukan tulangan maksimum, menurut ACI 10.3.3 $\rho_{max} = 0,75 \rho_{balanced}$ (cara tidak langsung), kemudian menurut Chu Kia Wang $x_{max} = 0,75 x_{balanced}$ (Cara langsung).



Gambar 3. Diagram regangan dan tegangan balok beton bertulang pada kondisi *balanced*

Berdasarkan Gambar 3, posisi garis netral pada kondisi *balanced* (x_b) diperoleh dari hubungan kompatibilitas regangan antara regangan beton $\epsilon_c =$

$0,003$ di sisi tekan dan regangan leleh tulangan $\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s}$ di sisi tarik, sehingga:

$$\frac{d}{x_b} = \frac{\epsilon_c + \epsilon_s}{\epsilon_c} \dots\dots\dots(4)$$

Maka,

$$x_b = \frac{0,003d}{(0,003 + \frac{f_y}{E_s})} \dots\dots\dots(5)$$

Dengan mengasumsikan nilai modulus elastisitas baja $E_s = 200.000$ Mpa, persamaan di atas disederhanakan menjadi:

$$x_b = \frac{600d}{(600 + f_y)} \dots\dots\dots(6)$$

Dimana

- d = Tinggi efektif balok (mm)
- x_b = Jarak garis netral kondisi *balanced* (mm)
- ϵ_c = Regangan beton 0,003
- ϵ_s = Regangan baja tulangan
- f_y = Tegangan leleh baja tulangan (Mpa)
- E_s = Modulus elastisitas baja = 200.000 Mpa

3. METODOLOGI

3.1. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini dilakukan di Ibu Kota Nusantara, Kalimantan timur.



Gambar 4 Lokasi penelitian di Ibu Kota Nusantara (ikn), Kalimantan Timur

3.2. Data pengujian baja tulangan $f_y = 420$ Mpa

Data pengujian baja tulangan diperoleh dari hasil uji tarik yang dilakukan di laboratorium oleh PT. Sucofindo dengan Sertifikat No. M01197/COEKAT tanggal 26 Januari 2026. Pengujian dilakukan pada tulangan produk Master Steel dengan mutu MS 420 dalam berbagai diameter. Hasil pengujian selengkapnya disajikan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Hasil pengujian kuat tarik baja tulangan MS 420 (Master steel)

No	Kode Sampel	Ø (mm)	Luas (mm ²)	fy (MPa)	fu (MPa)	Elongasi (%)
22	D19-MS 420 TS (1)	19	283.5	505	668	26.5
23	D19-MS 420 TS (2)	19	283.5	496	658	28.5
24	D22-MS 420 TS (1)	22	380.1	519	693	27
25	D22-MS 420 TS (2)	22	380.1	521	680	28
26	D29-MS 420 TS (1)	29	660.5	457	630	22.5
27	D29-MS 420 TS (2)	29	660.5	461	632	16
39	D32-MS 420 TS (1)	32	804.3	472	635	24.5
40	D32-MS 420 TS (2)	32	804.3	470	636	25
43	D32-CBS 420 TS (1)	32	804.3	469	679	24
44	D32-CBS 420 TS (2)	32	804.3	455	676	23

3.2.1 Resume data properties Tanah

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium mekanika tanah, resume data properties tanah pada lokasi penelitian IKN disajikan pada Tabel 2 dan Tabel 3 berikut.

Tabel 2. Resume data properties tanah berdasarkan kedalaman lokasi IKN

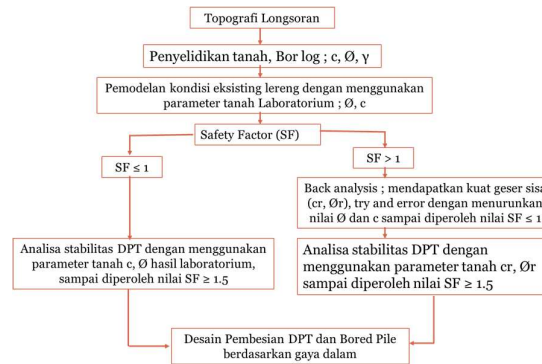
Kedalaman	Jenis Tanah	Cohesi kN/m ²	Sudut Geser	Berat Isi kN/m ³	N-SPT
0 - 4	Lempung Lunak Berpasir	17,29	20,2	17	5
4 - 8	Batu+Lempung Berpasir	50	50	17	60
8 - 12	Batu Bara				60

Tabel 3. Resume data properties tanah hasil pengujian laboratorium (BH01 & BH02)

Kind of Test	BH02 36+100	BH01 36+300	BH01 88+140	BH02 88+140
Natural Water Content (w) %	16.197	15.124	27.89	22.44
Specific Gravity (Gs)	2.672	2.6621	2.6679	2.6567
Cohesion (c) Kg/cm ²	0.376	0.3995	0.1729	0.1264
Internal Friction Angle (φ) ^o	41.4	41.153	20.204	13.784
Soil Classification (USCS)	ML			

3.3. Bagan alir proses penelitian

Adapun bagan alir para penelitian dilampirkan sebagai berikut.



Gambar 5. 1. Bagan alir penelitian

3.4. Faktor keamanan dan pembebanan

Merujuk pada pedoman Rekayasa Penanganan Keruntuhan Lereng pada Tanah Residual dan Batuan (Pd T-09-2005-B), kriteria perencanaan meliputi faktor keamanan dan pembebanan dilampirkan pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel 4. Rekomendasi nilai faktor keamanan untuk lereng (Sumber : Pd T-09-2005-B)

Resiko ekonomis	Resiko terhadap nyawa	Rekomendasi nilai faktor keamanan terhadap resiko kehilangan nyawa manusia		
		Diabaikan	Rendah	Tinggi
rekomendasi nilai faktor keamanan terhadap resiko kehilangan secara ekonomis	Diabaikan	1.1	1.2	1.5
	rendah	1.2	1.2	1.5
	tinggi	1.4	1.4	1.5

Tabel 5. Beban lalu lintas untuk analisis stabilitas lereng (Sumber : Pd T-09-2005-B)

Kelas Jalan	Beban Lalu Lintas (kPa)	Beban di luar jalan (kPa)
I	15	10
II	12	10
III	12	10

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Deviasi mutu baja tulangan

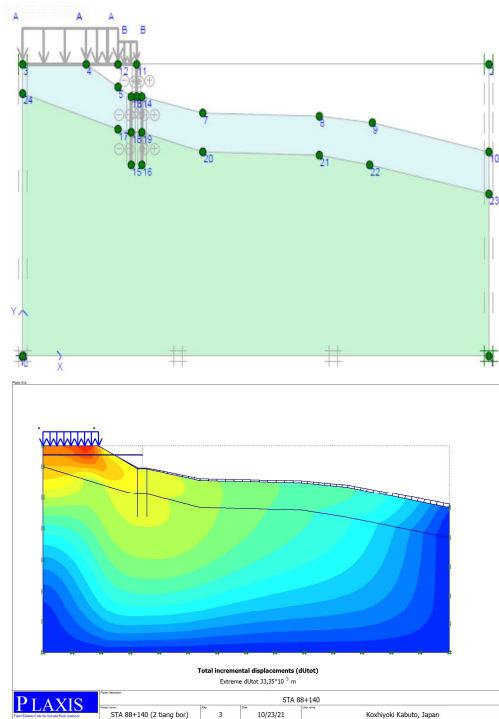
Analisis kondisi geometri lereng sebelum terjadi kelongsoran memiliki tinggi 25 m dengan kemiringan lereng 310. Kondisi lereng yang tidak stabil membuat lereng mencari kondisi stabil dengan kesetimbangan baru pada kemiringan lereng yang semula 310 berubah menjadi 260. Dalam penelitian ini, analisis kestabilan lereng eksisting sebelum terjadi longsor dilakukan dengan menggunakan metode Finite

Elemen dibantu dengan software PLAXIS 2D, dilihat pada Tabel 6 dan Gambar 2. Parameter tanah yang digunakan adalah parameter hasil laboratorium. Sedangkan beban yang bekerja adalah beban kendaraan sebesar 15 kN/m².

Berdasarkan hasil analisis diperoleh faktor keamanan (FK) lereng kondisi eksisting (sebelum terjadi longsor) sebesar 1,507, nilainya lebih besar 1,00 yang menunjukkan bahwa lereng awalnya masih dalam keadaan aman.

Tabel 6 Parameter geoteknik hasil penyelidikan tanah

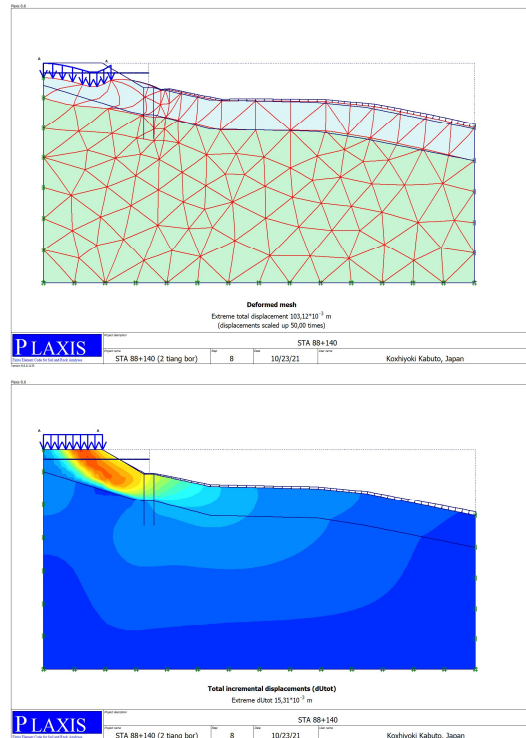
Jenis Tanah	Bobot Isi Asli kN/m ³	Kohesi kN/m ²	Friction Angle (°)	Faktor Keamanan (FK)
Lempung Lunak	18	17,29	20,2°	1,507



Gambar 5. Bidang gelincir dan model keruntuhan lereng eksisting

4.2. Analisa balok beton bertulang bertulangan tunggal

Zydron (2011) menyatakan bahwa kuat geser tanah yang terdiri dari sudut geser dalam dan kohesi merupakan parameter dasar yang menggambarkan karakteristik mekanik tanah terhadap aspek kestabilannya. Kuat geser sisa yang merupakan kuat geser tanah setelah mencapai kuat geser maksimum menjadi sangat penting diperhitungkan dalam stabilitas lereng. Untuk menghitung stabilitas lereng yang aman disarankan untuk menggunakan parameter kuat geser sisa pada kadar air maksimum.



Gambar 6. Bidang gelincir dan model keruntuhan residual

Berdasarkan Gambar 6 faktor keamanan yang diperoleh dari Analisa kestabilan lereng sebelum terjadi longsor lebih besar dari 1,00 yaitu sebesar 1,507 maka perlu dilakukan analisis balik terhadap lereng untuk mendapatkan parameter sudut geser tanah yang baru. Dari hasil analisis balik, diperoleh parameter tanah dengan nilai kohesi (c) = 12,64 kN/m² dan sudut geser tanah (Ø) = 3,000 dengan nilai faktor keamanan SF=1,043. Dapat dilihat rekapitulasi pada Tabel 7.

Tabel 7. Parameter geoteknik hasil *back analysis*

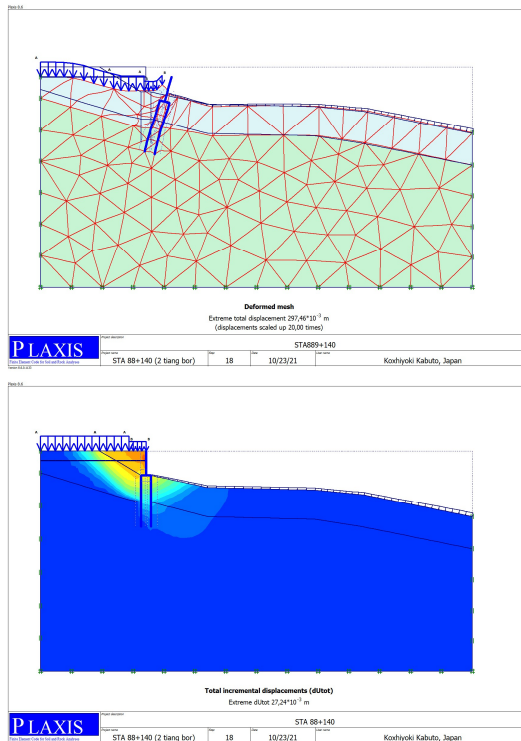
Jenis Tanah	Bobot Isi Asli kN/m ³	Kohesi kN/m ²	Friction Angle (°)	Faktor Keamanan (FK)
Lempung Lunak	18	12,64	3,00	1,043

4.3. Analisis kestabilan lereng dengan konstruksi dinding penahan tanah kantilever tanpa geomembrane

Memperhatikan faktor keamanan yang diperoleh dari Analisa kestabilan lereng kondisi residual, maka diperlukan konstruksi dinding penahan tanah untuk meningkatkan nilai factor keamanan dengan menggunakan parameter geoteknik hasil back analisis. Dengan menggunakan konstruksi DPT cantilever wall dengan Bored Pile, didapatkan nilai factor keamanan sebesar 1,43 masih lebih kecil dari 1,5 sesuai yang dipersyaratkan pada Pedoman Rekayasa Penanganan

Keruntuhan Lereng pada Tanah Residual dan Batuan (Pd T-09-2005-B) sebesar 1,5 untuk resiko terhadap nyawa manusia yang tinggi.

Dari hasil analisa menggunakan bantuan program Plaxis, diperoleh nilai faktor keamanan SF=1,43, masih lebih kecil dari 1,5, sehingga perlu dilakukan usaha untuk meningkatkan nilai factor keamanan ke angka 1,5 tersebut. Dilampirkan hasil permodelan pada Gambar 7.



Gambar 7. Hasil analisis stabilitas lereng dengan konstruksi dinding penahan tanah kantilever tanpa geomembrane (Plaxis 2D)

4.4. Analisis kestabilan lereng dengan konstruksi dinding penahan tanah kantilever dengan menambah geomembrane

Memperhatikan data penyelidikan tanah yang menunjukkan lapisan batubara di kedalaman 8 meter, maka usaha untuk meningkatkan nilai factor keamanan lereng tidak dilakukan dengan menambah panjang tiang, namun dengan memasang geotextile dengan jarak tiap lapisan 50 cm.

Dari hasil analisa menggunakan bantuan program Plaxis, diperoleh nilai faktor keamanan sebesar SF=1,53, meningkat sebesar 0.1 atau sekitar $\pm 7\%$, sehingga konstruksi penahan longsor yang dipergunakan pada Jalan Nasional ruas Tanjung Selor-Malinau pada STA 88+140 adalah menggunakan struktur DPT kantilever dengan pondasi bored pile, dikombinasi dengan Geotextile

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Adapun kesimpulan sebagai berikut.

1. Berdasarkan hasil analisa diperoleh perbedaan antara pemodelan sebagai balok beton bertulang bertulangan lemah (*under reinforced*) dengan realisasi pada saat pelaksanaan sebagai balok beton bertulang bertulangan kuat (*over reinforced*).
2. Regangan pada tulangan sesuai rencana yang nilainya lebih kecil dari regangan leleh, realisasi dalam pelaksanaan lebih besar dari regangan leleh

5.2. Saran

Saran yang dapat diberikan dari analisis yang telah dilakukan yaitu, pada tahap perencanaan perlu dilakukan kajian pembatasan regangan pada tulangan seminimum mungkin supaya target desain sebagai balok beton bertulang bertulangan lemah dapat terpenuhi pada waktu pelaksanaan.

6. DAFTAR PUSTAKA

1. Mau, J., Rasidi, N., & Hanggara, I. (2017). Studi Penentuan Faktor Keamanan Stabilitas Lereng Menggunakan Metode Fellinius Dan Bishop Pada Dinding Penahan Batu Kali Di Jl. Raya Beji Puskesmas Kota Baru. EUREKA: Jurnal Penelitian
2. Gati, B. M., & Purwanto, E. (2018). Analisis Stabilitas Lereng Timbunan Badan Jalan dan Prediksi Timbunan yang Terjadi Menggunakan Program Plaxis. Universitas Islam Indonesia
3. Christine, R., Suroso, & Munawir, A. (2014). Pengaruh Lebar Pondasi dan Jumlah Lapisan Geotekstil Terhadap Daya Dukung Pondasi pada Pemodelan Fisik Lereng Pasir dengan Kemiringan Universitas Brawijaya, Malang
4. Fauzi, I. M., & Hamdhan, I. N. (2019). Analisis Stabilitas Lereng Dengan Perkuatan Geotekstil Woven Akibat Pengaruh Termal Menggunakan Metode Elemen Hingga. RekaRacana: Jurnal Teknil Sipil, 5(2), 61–72