

THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS
530 N. Dearborn Avenue
Chicago, Illinois 60610

1991

Published by the University of Chicago Press
in association with the American Library Association

1991
Published by the University of Chicago Press
in association with the American Library Association



UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS
530 N. Dearborn Avenue
Chicago, Illinois 60610
1991

**PENENTUAN KUAT TEKAN JANGKA PANJANG PILAR
BATUBARA SILICIFIED DENGAN UJI RAYAPAN
BEBAN BERTAHAP DI LABORATORIUM**



Nama : Pantjanita Novi Hartami

NIM : 221964001



Pembimbing I

Dr. Ir. Made Astawa Rai

Pembimbing II

Dr. Ir. Suseno Kramadibrata

*Sekalipun aku mempunyai karunia untuk bermubuat,
dan aku mengetahui segala rahasia,
dan memiliki seluruh pengetahuan,
dan sekalipun aku memiliki iman yang sempurna
untuk memindahkan gunung,
tetapi jika aku tidak mempunyai kasih,
aku sama sekali tidak berguna*

(1. Korintus 13 : 2)

*Kupersembahkan untuk yang terkasih,
Mami, saudara-saudaraku, dan Mas Yudi
Terima kasih atas doa, kasih, dan dukungannya*



DETERMINATION OF LONGTERM STRENGTH OF SILICIFIED COAL PILAR BY MULTI STAGE CREEP TEST IN LABORATORIUM

Abstract

The stability of an underground opening is influenced by a number of factors, including creep behavior of rock. Creep on pillar will take place due to the long term load applied. Consequently, it would be interesting to understand the time dependent behaviour of coal pillar by creep tests.

Samples of the creep test were obtained from Bukit Asam coal mining, in Tanjung Enim, South Sumatra. The sample prepared in form of cylindrical specimens with slenderness ratio of 1 : 1 and diameters were 54 mm, 70 mm, 100 mm, and 150 mm.

The creep tests were carried out based on multi stage constant load method (Vyakov, 1986). Sample was subject to a constant load for certain period of time, and after which another constant load, higher than that of the previous one was applied until failure took place. During the test period, axial and lateral deformations were monitored using two dial gauge electronics and connected to a computer from which continuous data collecting could be obtained

Axial strain-time curves revealed that the behavior of the coal samples followed Burger model. The rheological constants recorded from the creep tests are as follows :

Diameter (mm)	Longterm Strength (% σ_c)	E_1 10^2 (MPa)	E_2 10^3 (MPa)	η_1 10^3 (MPa.hour)	η_2 10^3 (MPa.hour)
54	100	3.17 - 4.27	130 - 600	930 - 6090	67.9 - 1150
70	95	2.96 - 5.35	16.9 - 372	2060 - 42900	26.5 - 1210
100	85	2.91 - 12.5	197 - 4590	9300 - 223000	178 - 212000
150	80	1.52 - 2.82	151 - 1500	2000 - 110000	761 - 32700

Scale factor was obtained to extrapolate laboratory data to the real condition by means dimensional analysis. When the area of the real pillar was x times of that of the model, the scale factors of the pillar height, uniaxial compression strength, longterm strength, modulus of elasticity, and delayed elasticity were the same, i.e. $x^{0.5}$, whereas that of rate of viscous flow and rate of delayed elasticity being $x^{1.5}$.

PENENTUAN KUAT TEKAN JANGKA PANJANG PILAR BATUBARA SILICIFIED DENGAN UJI RAYAPAN BEBAN BERTAHAP DI LABORATORIUM

Ringkasan

Pembebanan yang berlangsung pada waktu yang lama dan pada kenyataannya bersifat dinamik akan mengakibatkan terjadinya rayapan pada pilar batubara sehingga mempengaruhi kestabilan lubang bukaan. Oleh karena itu, sangat penting untuk mengetahui perilaku deformasi pada pilar batubara akibat pembebanan yang terus menerus selama umur penambangan, dengan uji rayapan.

Penelitian ini merupakan penelitian awal untuk mengamati perilaku batubara, oleh karena itu contoh diambil dari Tambang Batubara Bukit Asam Tanjung Enim Sumatra Selatan, dengan 4 ukuran diameter, yaitu diameter 54 mm, 70mm, 100 mm, dan 150 mm. Contoh berbentuk silinder dengan perbandingan diameter terhadap tingginya sekitar 1 : 1.

Metode pengujian yang diterapkan adalah uji rayapan beban bertahap (Vyalov, 1986). Uji ini dilakukan dengan memberikan beban konstan selama waktu tertentu, setelah perpindahannya konstan, beban dinaikkan dan perpindahannya diamati kembali.

Grafik-grafik regangan-waktu hasil pengujian menunjukkan bahwa contoh cenderung mengikuti model Burger. Konstanta rheologi yang diperoleh sesuai model Burger adalah sebagai berikut :

Diameter (mm)	Kuat Tekan Jangka Pjg (% σ_c)	E_1 10^3 (MPa)	E_2 10^3 (MPa)	η_1 10^3 (MPa.jam)	η_2 10^3 (MPa.jam)
54	100	3.17 - 4.27	130 - 600	930 - 6090	67.9 - 1150
70	95	2.96 - 5.35	16.9 - 372	2060 - 42900	26.5 - 1210
100	85	2.91 - 12.5	187 - 4590	9300 - 223000	178 - 212000
150	80	1.52 - 2.82	151 - 1500	2000 - 110000	761 - 32700

Untuk menghubungkan hasil laboratorium dan keadaan sebenarnya digunakan analisis dimensi. Faktor skala untuk luas sebenarnya sebesar x kali luas model adalah : $x^{0.5}$ untuk tinggi pilar, kuat tekan uniaksial, kuat tekan jangka panjang, modulus elastisitas dan elastisitas tertunda, $x^{1.5}$ untuk laju aliran viskos dan laju elastisitas tertunda.



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat rahmat-Nya penyusunan Thesis ini dapat terselesaikan.

Penelitian dilakukan di Laboratorium Mekanika Batuan dan Laboratorium Permodelan Jurusan Teknik Pertambangan ITB, dengan pengambilan contoh batubara di tambang batubara PT. Tambang Batubara Bukit Asam unit Penambangan Tanjung Enim, Sumatra Selatan.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Direktur, Ir. Rivai, Bapak Doner dan segenap staf dan karyawan PT. Tambang Batubara Bukit Asam.
2. Dr. Ir. Suseno Kramadibrata dan Dr. Ir. Made Astuwa Rai, sebagai Pembimbing.
3. Bapak Ramon Kopa, Bapak Sudibyo, Bapak Suparman dan Cipto Prayitno.
4. Segenap staf pengajar, karyawan tata usaha dan perpustakaan di Jurusan Teknik Pertambangan ITB.
5. Semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian Thesis ini.

Semoga apa yang tersusun dalam tulisan ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua.

Bandung, Oktober 1998

Penulis

(Pantjarita Novi Hartami)



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR LAMPIRAN	x
BAB.	
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang Penelitian	1
1.2. Tujuan Penelitian	2
1.3. Ruang Lingkup Penelitian	2
1.4. Metodologi Penelitian	3
1.5. Manfaat Penelitian	4
1.6. Diagram Alir Penelitian	5
II. LATAR BELAKANG TEORI	6
2.1. Rayapan (Creep)	6
2.2. Faktor-faktor yang mempengaruhi Uji Rayapan	7
2.2.1. Tingkat Tegangan	7
2.2.2. Tegangan Konstan	8
2.2.3. Temperatur	9
2.2.4. Kandungan Air dan Kelembaban	9
2.2.5. Struktur batuan	10
2.3. Persamaan Empiris rayapan	10
2.4. Model Rheologi dan Persamaannya	11
2.4.1. Model Rheologi Sederhana	12
2.4.2. Model Kompleks	16
2.5. Penentuan Kuat Tekan Jangka Panjang	17
2.5.1. Metode Langsung	17
2.5.2. Volume Dilation Method	18
2.5.3. Metode Kurva Tegangan - Regangan	18
2.5.4. Metode Regangan Kumulatif Kritis	20
2.5.5. Metode Tegangan - Relaksasi	21
2.6. Pilar	21
2.6.1. Size Effect	22

2.6.2.	Shape Effect	24
2.7.	Faktor Skala	24
2.7.1.	Analisis Dimensi	24
2.7.2.	Produk Tak Berdimensi	26
2.7.3.	Kesamaan (Similarity)	30
2.7.4.	Faktor Skala	30
III.	PERALATAN UJI RAYAPAN DI LABORATORIUM	31
3.1.	Tipe-tipe Alat Uji Rayapan	31
3.1.1.	Pengujian dengan Bending	31
3.1.2.	Pengujian dengan Torsi	32
3.1.3.	Pengujian dengan Tekanan / Tarikan	32
3.2.	Alat yang Digunakan Dalam Pengujian	33
3.2.1.	Perhitungan Gaya-gaya yang Bekerja	36
3.2.2.	Perhitungan Ukuran Rangka	39
3.2.3.	Perhitungan kekakuan Rangka	42
IV.	ANALISIS DATA UJI RAYAPAN	43
4.1.	Contoh Batubara	43
4.2.	Perhitungan Kekakuan Contoh	44
4.3.	Akuisisi Data	44
4.4.	Pengujian Sifat Fisik, Dinamik dan Mekanik	46
4.4.1.	Sifat Fisik	46
4.4.2.	Sifat Dinamik	47
4.4.3.	Sifat Mekanik	47
4.5.	Uji Rayapan	48
4.5.1.	Ruangan	48
4.5.2.	Beban	48
4.5.3.	Perpindahan	49
4.5.4.	Prosedur Pengujian	51
4.5.5.	Data Uji Rayapan	51
4.5.6.	Penggambaran Kurva Rayapan	
4.6.	Perhitungan Parameter Rheologi	55
4.6.1.	Laju Aliran Viskos	55
4.6.2.	Elastisitas Tertunda	56
4.6.3.	Laju Elastisitas Tertunda	57
4.6.4.	Modulus Elastisitas	57
4.7.	Hasil Perhitungan	58

4.8.	Persamaan Rheologi	58
4.9.	Penentuan Kuat Tekan Jangka Panjang	59
V.	PERMODELAN UJI RAYAPAN	62
5.1.	Data Masukan	62
5.1.1.	Geometri Contoh	62
5.1.2.	Sifat Fisik	63
5.1.3.	Modulus Elastisitas Bergantung Waktu $E(t)$	64
5.2.	Kondisi Batas	65
5.2.1.	Pembebaran	65
5.2.2.	Kondisi Batas	65
5.3.	Hasil Permodelan	68
5.3.1.	Regangan	68
5.3.2.	Distribusi Tegangan	68
5.3.3.	Distribusi Perpindahan	69
VI.	PEMBAHASAN	76
6.1.	Kuat Tekan Uniaxial	76
6.2.	Pengujian Rayapan	78
6.3.	Persamaan Rayapan	79
6.4.	Kuat Tekan Jangka Panjang	81
6.5.	Hubungan Tingkat Tegangan dan Waktu Failure	81
6.6.	Hubungan Kuat Tekan Jangka Panjang dan Diameter	82
6.7.	Hubungan Konstanta Rheologi dan Tingkat Tegangan	83
6.8.	Analisis Dimensi Contoh dan Pilar	85
6.7.1.	Produk Tak Berdimensi	87
6.7.2.	Faktor Skala	88
6.9.	Permodelan	91
VII.	KESIMPULAN DAN SARAN	93
7.1.	Kesimpulan	93
7.2.	Saran	94
	DAFTAR PUSTAKA	96
	LAMPIRAN	100



DAFTAR GAMBAR

Gambar	Hal.
1.1. Diagram Alir Penelitian	5
2.1. Proses Rayapan	6
2.2. Material Hookean	12
2.3. Material Newtonian	13
2.4. Material Plastik	14
2.5. Material St. Venant	14
2.6. Material Maxwell	15
2.7. Material Kelvin	15
2.8. Model Generalized Kelvin	16
2.9. Model Burger	17
2.10. Kurva Tegangan-Regangan Volumetrik untuk Batuan Keras yang Menunjukkan Proses Fracturing	19
2.11. Kurva Tegangan-Regangan dalam Logaritma dari Marmer Silician (C-2), Marmer Wombeyan (W-7), Bijih North Broken Hill (NBH-3)	19
2.12. Kurva Rayapan dan Relaksasi	20
3.1. Alat Uji Rayapan Sistem Bending (Phillips, 1931)	31
3.2. Alat Uji Rayapan Sistem Torsi (Lomnitz, 1956)	32
3.3. Peralatan Pembebanan (Wawernik & Brown, 1971)	33
3.4. Alat Uji Rayapan Kapasitas 25 ton	35
3.5. Skema Beban pada Alat Uji Rayapan	36
3.6. Skema Beban Balok 1	37
3.7. Skema Beban Balok 2	37
3.8. Skema Beban Balok 3	38
3.9. Skema Beban pada Kerekan	39
4.1. Skema Akuisisi Data	45
4.2. Skema Pengukuran Perpindahan	50
4.3. Kurva Rayapan untuk Contoh C4 dan D6	54
4.4. Penggambaran Regresi Linier pada Kurva Regangan Aksial terhadap Waktu	55
4.5. Kurva Log. η terhadap Waktu	56
4.6. Kurva Tingkat Tegangan terhadap Waktu Failure	60
4.7. Kurva Tingkat Tegangan terhadap Waktu Failure	61

5.1.	Bagan Alir Permodelan Uji Rayapan	63
5.2.	Penomoran Titik Simpul dan Konklusi Batas	66
5.3.	Penggambaran dan Penomoran Elemen	67
5.4.	Distribusi Tegangan pada Contoh untuk $t = 0$ jam	70
5.5.	Distribusi Tegangan pada Contoh untuk $t = 48$ jam	71
5.6.	Kontur Tegangan pada Contoh untuk $t = 0$ jam	72
5.7.	Kontur Tegangan pada Contoh untuk $t = 48$ jam	73
5.8.	Distribusi Perpindahan pada Contoh untuk $t = 0$ jam	74
5.9.	Distribusi Perpindahan pada Contoh untuk $t = 48$ jam	75
6.1.	Kurva Kuat Tekan Uniaksial terhadap Diameter Contoh	77
6.2.	Kurva Kuat Tekan Jangka Panjang - Diameter Contoh	83
6.3.	Kurva Konstanta Rheologi terhadap Tingkat Tegangan untuk Diameter 54 mm	86



DAFTAR TABEL

Tabel	Hal.
2.1. Model Rheologi untuk Tipe Batuan yang Berbeda	11
2.2. Faktor Reduksi Kekuatan (Wilson, 1980)	23
2.3. Contoh Persamaan Homogen, Homogen Terbatas, dan Tidak Homogen	26
3.1. Kekakuan Rangka	42
4.1. Kekakuan Contoh	44
4.2. Sifat Fisik dan Dinamik Contoh Batubara Silicified	46
4.3. Sifat Mekanik Contoh Batubara Silicified	48
4.4. Data Uji Rayapan untuk Contoh C2 (Tegangan 42.5 MPa)	52
4.5. Konstanta Persamaan Rheologi Hasil Perhitungan	58
4.6. Persamaan Rheologi Hasil Pengujian	59
4.7. Nilai Kuat Tekan Jangka Panjang untuk Masing-masing Diameter Contoh	60
5.1. Nilai $E(t)$ untuk 0 jam, 15 menit, 1 jam, 5 jam, 24 jam dan 48 jam	65
5.2. Regangan Hasil Uji Laboratorium dan Permodelan	68
6.1. Jumlah Contoh Batubara Silicified dan Selang Kuat Tekan Uniaksial Hasil Pengujian	76
6.2. Perbandingan Hasil Pengujian Beban Bertahap dan Beban Konstan untuk Contoh B Berdiameter 70 mm dan Tingkat Tegangan 100%	78
6.3. Konstanta Persamaan Rheologi	80
6.4. Klasifikasi Hubungan Koefisien Determinasi dengan Derajat Asosiasi	84
6.5. Nilai R^2 dan Derajat Asosiasi antara Konstanta Rheologi dan Tingkat Tegangan untuk Contoh Berdiameter 54 mm	84
6.6. Variabel-variabel pada Analisis Dimensi	87
6.7. Faktor Skala yang Dipilih Secara Bebas untuk Luas Sebenarnya Sebesar x Luas kali Model	89
6.8. Faktor Skala untuk Luas Sebenarnya x kali Luas Model Pilar Sesungguhnya	90

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Hal.
A. Kurva-kurva Hasil Uji Rayapan dengan Beban Konstan	100
B. Kurva-kurva Hasil Uji Rayapan dengan Beban Bertahap	105
C. Kurva Konstanta Rheologi terhadap Tingkat Tegangan	136
D. Perhitungan Analisis Dimensi	141



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG PENELITIAN

Kestabilan penambangan bawah tanah, khususnya batubara harus diamati dan dipantau, terutama yang menyangkut ukuran lubang bukaan dan pilar. Pada sistem penambangan batubara *room and pillar*, pembebanan yang berlangsung pada waktu yang lama akan mengakibatkan terjadinya rayapan pada pilar batubara sehingga mempengaruhi kestabilan lubang bukaan. Oleh karena itu, sangat penting untuk mengetahui perilaku deformasi pada pilar batubara akibat pembebanan yang terus menerus selama umur penambangan.

Untuk mengevaluasi laju deformasi pada beban konstan dalam waktu lama, perlu dilakukan uji rayapan (*creep*). Uji rayapan dapat dilakukan di laboratorium dan secara insitu. Pada umumnya uji di laboratorium menghasilkan kuat tekan yang lebih besar daripada uji insitu. Fenomena ini disebabkan contoh pada uji insitu mempunyai lebih banyak bidang diskontinu daripada uji laboratorium. Hasil dari uji di laboratorium akan disesuaikan untuk kondisi di lapangan dengan menggunakan faktor skala (*scale factor*)

Selain perilaku tegangan - regangan, dari uji rayapan akan diperoleh nilai kuat tekan jangka panjang. Diharapkan dengan diketahuinya kuat tekan jangka panjang dan perilaku deformasinya, maka akan didapatkan model

rheologinya. Hal ini diperlukan untuk menentukan berapa lama lubang bukaan akan bertahan dengan dimensi pilar tertentu.

Penelitian mengenai uji rayapan sudah banyak dilakukan, tetapi penelitian mengenai kuat tekan jangka panjang dan dimensi pilar dengan ukuran contoh yang berbeda hanya sedikit dilakukan. Jadi, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam menentukan rancangan pilar batubara.

1.2. TUJUAN PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Mempelajari perilaku tegangan - regangan dan regangan - waktu contoh batubara dengan uji rayapan di laboratorium dalam upaya memperoleh parameter rheologinya, yang selanjutnya dapat dipakai sebagai pedoman untuk menentukan kuat tekan jangka panjang dari batubara.
2. Menentukan hubungan antara ukuran contoh batubara, kuat tekan jangka panjang, dan ukuran pilar sesungguhnya.

1.3. RUANG LINGKUP PENELITIAN

Ruang lingkup penelitian adalah :

1. Pembuatan alat yang akan digunakan untuk uji rayapan batubara di laboratorium sebagai perbaikan dari alat uji rayapan yang ada sebelumnya.

2. Sistem akuisisi data untuk uji rayapan.
3. Prosedur pengujian rayapan di laboratorium, termasuk penentuan sifat fisik, mekanik dan dinamik (sonic velocity) dari contoh batubara. Uji rayapan akan menggunakan contoh batubara dengan diameter yang bervariasi dan perbandingan diameter terhadap tinggi 1:1.
4. Evaluasi dan analisis data untuk menentukan parameter rheologi batubara.
5. Menentukan hubungan contoh batubara dengan dimensi pilar sesungguhnya

1.4. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian ini meliputi :

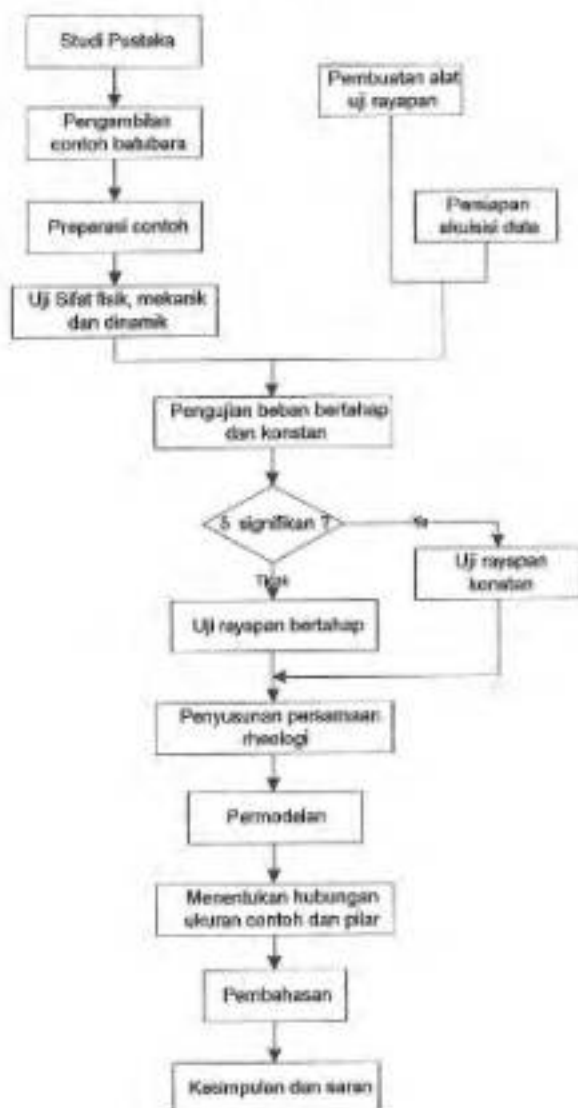
1. Metode Eksperimentasi
Melakukan pengujian yang meliputi uji sifat fisik, mekanik, dinamik dan uji rayapan contoh batubara di laboratorium.
2. Metode Analitis
Melakukan permodelan uji rayapan dengan menggunakan metode elemen hingga.
3. Analisis Dimensi dan Efek Skala
Menghubungkan dimensi dan kuat tekan jangka panjang pilar sesungguhnya dengan dimensi dan kuat tekan jangka panjang contoh batubara di laboratorium

1.5. MANFAAT PENELITIAN

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Dapat diketukannya ukuran pilar-pilar di dalam tambang secara empirik dan lebih tepat berdasarkan perilaku bergantung waktu batuan pembentuk pilar dengan uji di laboratorium.
2. Memberikan masukan untuk perencanaan penambangan bawah tanah dan pemantauannya.

1.6. DIAGRAM ALIR PENELITIAN



Gambar 1.1. Bagan Alir Penelitian



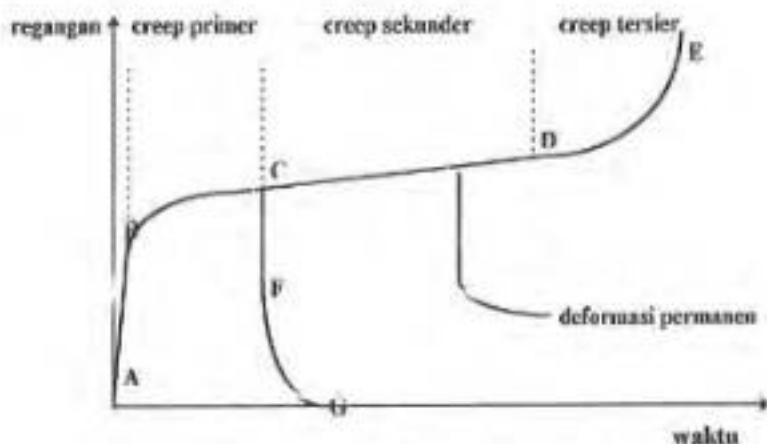
BAB II

LATAR BELAKANG TEORI

2.1. RAYAPAN (*CREEP*)

Studi mengenai perilaku sebagai fungsi waktu pada umumnya disebut sebagai *creep*, yang merupakan bagian penting dalam mekanika batuan. Dalam pekerjaan bawah tanah, rayapan akan terjadi sesudah penggalian dan membutuhkan suatu rumusan yang dapat memperkirakan perilaku batuan selanjutnya.

Rayapan menurut ASTM (American Standard and Testing Materials) adalah deformasi yang terjadi akibat tegangan aksial konstan selama waktu tertentu. Proses rayapan terbagi menjadi tiga bagian yang dapat dijelaskan dengan gambar 1.



Gambar 2.1. Proses Rayapan

Regangan elastik seketika (AB) terjadi setelah batuan diberi beban, yang diikuti rayapan primer (*primary creep* atau *transient creep*) dengan laju rayapan mengalami perlambatan sejalan dengan waktu. Rayapan primer ini disebut deformasi elastik tertunda jika contoh dibebaskan dari tegangan sebelum titik (C), akan terjadi *instantaneous recovery* (CF) yang diikuti dengan *elastic delayed recovery* (FG).

Jika tegangan masih berlangsung setelah (C), akan terjadi rayapan sekunder (*secondary creep*) dengan laju rayapan konstan dan contoh mengalami deformasi permanen. Jika contoh mengalami pembebasan tegangan pada daerah di antara CD, akan terjadi deformasi permanen. Besarnya deformasi permanen ini akan diikuti oleh laju regangan tetap.

Jika tegangan tidak dibebaskan pada titik D, laju regangan akan meningkat dan contoh akan hancur. Fase ini (DE) disebut sebagai rayapan tersier (*tertiary creep*) dan berlangsung dalam waktu yang sangat singkat sehingga sulit untuk diamati. Rayapan tersier tidak menggambarkan proses deformasi melainkan penghancuran secara cepat. Proses ini berbeda dari dua proses deformasi sebelumnya.

Ketiga tahap rayapan tersebut dapat diamati pada tingkat tegangan yang tinggi.

2.2. FAKTOR YANG MEMPENGARUHI UJI RAYAPAN

2.2.1. Tingkat tegangan

Pengujian rayapan mempunyai beberapa kesulitan. Salah satunya adalah pemberian tegangan, di mana jika pemberian tegangan terlalu rendah,

hanya akan terlihat sedikit pengaruh. Sementara jika tegangan yang diberikan terlalu besar, kecepatan rayapan akan meningkat dan *failure* akan terjadi dengan segera.

Afrizal dan Harvey (1974) menguji batuan yang berbeda dengan tingkat tegangan yang berbeda dan mendapatkan bahwa pada tingkat tegangan yang lebih besar dua kali, laju rayapan sekunder membesar sekitar 90 % dan rayapan seketika meningkat sekitar 50 - 80 %.

Berikut ini beberapa pedoman dalam pemberian tegangan :

- < 50 % σ_c : regangan yang terjadi terlalu kecil dan kurva akan didominasi oleh daerah I dan II
- 50% - 80 % : kurva mencakup semua daerah rayapan
- > 80 % : kurva langsung menuju tahap tersier yang akan disusul dengan pecahnya batuan.

2.2.2. Tegangan Konstan

Selain kesulitan dalam menentukan tegangan yang akan diberikan, menjaga beban selalu konstan selama pengujian dalam waktu yang lama juga merupakan salah satu kendala. Karenanya beberapa peneliti terdahulu menggunakan tingkat laju regangan dalam pengujianya. Serdengecti dan Boozer (1961) menggunakan tingkat laju regangan 10^{-2} - 10^{-3} miliregangan/detik, sedangkan Heard (1963) menggunakan tingkat laju regangan 0.3×10^{-3} - 0.4×10^{-3} miliregangan/detik.

2.2.3. Temperatur

McClain dan Beadshaw (1970) melakukan penyelidikan pengaruh panas pada pilar batu garam, dan mendapatkan hasil bahwa pemanasan akan meningkatkan laju regangan sekitar 100 kali.

Kuznetsov dan Vashchillin (1970) menguji batupasir pada temperatur yang berbeda pada tegangan 70 - 80 % kekuatan jangka pendeknya mendapatkan bahwa deformasi rayapan sekunder akan meningkat dengan meningkatnya temperatur.

2.2.4. Kandungan air dan kelembaban

Laju rayapan akan meningkat pada batuan yang mengandung air (Phillips, 1931)¹⁴. Wawersik dan Brown (1973) dalam penelitiannya pada granit dan batu pasir menunjukkan bahwa deformasi bergantung waktu akan meningkat dengan meningkatnya kandungan air.

Pengukuran regangan rayapan pada porphiri dan slate dalam kondisi kering dan basah (Kanagawa dan Nakazai, 1970) menunjukkan bahwa regangan awal untuk contoh basah 2 - 5 kali lebih tinggi. Tetapi setelah 20 - 100 hari, laju rayapan sekunder cenderung sama. Periode stabil ini bergantung pada tipe batuan, tingkat tegangan dan kandungan air.

Batuan yang berbeda akan mempunyai kemampuan untuk menyerap air yang berbeda khususnya pada batuan sedimen. Afrouz dan Harvey (1974) menyatakan pada batuan lunak jenuh (softrock), laju rayapan meningkat sebesar tiga kali pada batubara dan 8 kali pada shale.

2.2.5. Struktur batuan

LeComte (1965) mempelajari pengaruh ukuran butir terhadap perilaku rayapan batu garam dan mendapatkan bahwa laju rayapan akan menurun pada ukuran butir yang lebih besar. Hasil yang didapatkannya memperlihatkan bahwa peningkatan ukuran butir dari 0.1 - 0.63 mm akan mengurangi laju rayapan sebesar 2 kali.

Wüid (1966) mendukung bahwa struktur batuan merupakan faktor penting yang sangat mempengaruhi rayapan. Pengaruh orientasi butir yang diteliti pada marmer Yule (Griggs dkk., 1953, 1960) menunjukkan bahwa tegangan yang dibutuhkan untuk rayapan tersier lebih besar pada saat marmer ditekan sejajar dengan arah sumbu optiknya daripada ditekan tegak lurus sumbu optiknya.

2.3. PERSAMAAN EMPIRIS RAYAPAN

Kurva rayapan (Gambar 2.1.) untuk tegangan konstan dari sejumlah material dapat dinyatakan dalam suatu persamaan umum sebagai berikut :

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_1(t) + At + \epsilon_3(t) \quad (2.1)$$

Keterangan :

- ϵ = regangan total
- ϵ_e = regangan elastik instantaneous
- $\epsilon_1(t)$ = regangan pada rayapan transient
- At = fungsi linear terhadap waktu yang menyatakan rayapan steady state, konstanta A bergantung pada kondisi test.
- $\epsilon_3(t)$ = rayapan tersier.

Sejumlah persamaan empiris dikembangkan untuk menyatakan rayapan primer dan sekunder, tetapi belum ada persamaan sederhana untuk menyatakan rayapan tersier.

2.4. MODEL RHEOLOGI DAN PERSAMAANNYA

Teori model rheologi menggunakan kombinasi beberapa elemen mekanik (seperti pegas, dashpot, tahanan gesek) yang dihubungkan secara seri, paralel atau kombinasi keduanya. Tabel 2.1. berikut ini memberikan gambaran beberapa model rheologi untuk tipe batuan yang berbeda.

Tabel 2.1. Model Rheologi untuk Tipe Batuan yang Berbeda

<i>Jenis Batuan</i>	<i>Model Rheologi</i>	<i>Perilaku</i>	<i>Sumber</i>
Batuan Keras	Hookean	Elastik	Obert dan Duvall, 1967
Batuan pada umumnya	Kelvin	Viskoelastik	Salustowicz, 1958
Batuan pada kedalaman yang cukup besar	Maxwell	Viskoelastik	Salustowicz, 1958
Batuan yang dibebani untuk jangka pendek	Generalized Kelvin atau Nakamura	Viskoelastik	Nakamura, 1949
Sandstone, Limestone, dan batuan lain	Model Hooke diparalel dgn Maxwell	Viskoelastik	Ruppenel & Libermann, 1960
Batubara	Modified Burger	Viskoelastik	Hardy, 1959 ; Bobrov, 1970
Dolomit, Claystone, dan Anhydrite	Model Hooke + sejumlah model Kelvin secara seri	Viskoelastik	Langer, 1966, 1969
Batuan Carboniferous	Kelvin	Viskoelastik	Kadybinski, 1966
Batuan Carboniferous	St. Venant paralel dgn Newtonian	Elasto-viskoplasitik	Loonen dan Hafer, 1954

2.4.1. Model rheologi sederhana

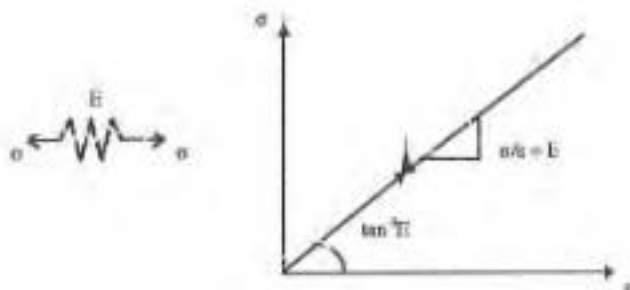
2.4.1.1. Elastik sempurna atau Hookean

Hubungan uniaksial antara tegangan (σ) dan regangan (ϵ) untuk material elastik sempurna adalah :

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2.2)$$

dengan E = modulus Young.

Model mekanik untuk Hookean adalah pegas sederhana, dengan grafik tegangan - regangan berupa garis lurus dengan kemiringan E .



Gambar 2.2. Material Hookean

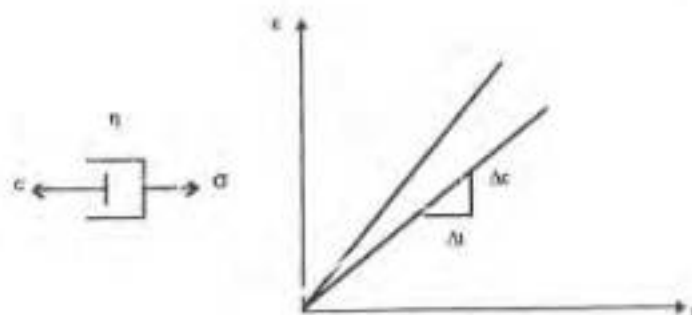
2.4.1.2. Material viscous atau Newtonian

Model matematik material Newton merupakan tegangan geser (τ) yang berbanding lurus dengan perubahan regangan.

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (2.3)$$

dengan η = koefisien viskositas dan $\dot{\gamma}$ = turunan terhadap waktu.

Model mekanik material Newtonian adalah dashpot dan grafik tegangan - regangannya merupakan garis lurus yang mempunyai kemiringan $\sigma/3\eta$.



Gambar 2.3. Material Newtonian

2.4.1.3. Material Plastik sempurna

Material plastik sempurna tidak akan rusak jika tegangan yang diberikan $< \sigma_0$ dan akan berubah secara permanen dan tak terbatas jika tegangan $= \sigma_0$. Jika tegangan $> \sigma_0$ material plastik sempurna tidak terbentuk. Material ini mempunyai model matematik sebagai berikut

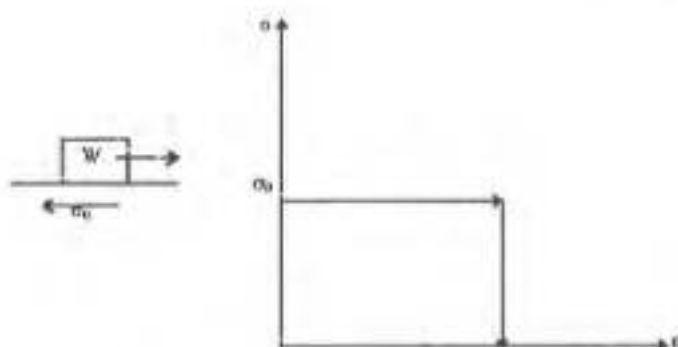
$$\sigma = \mu \cdot W \quad (2.4)$$

dengan μ = koefisien gesek dan W = beban

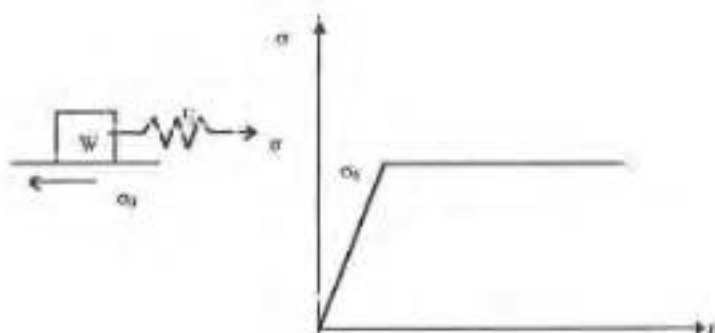
Sedangkan model mekaniknya berupa *frictional contact* dan grafik tegangan - regangan merupakan garis lurus sejajar dengan sumbu regangan dan memotong sumbu tegangan pada σ_0 .

2.4.1.4. Material Elastoplastik atau St. Venant

Material St. Venant merupakan material elastik untuk tegangan $< \sigma_0$ dan menjadi plastik untuk tegangan $= \sigma_0$. Model mekaniknya adalah pegas yang dipasang seri dengan *frictional contact*.



Gambar 2.4. Material Plastik

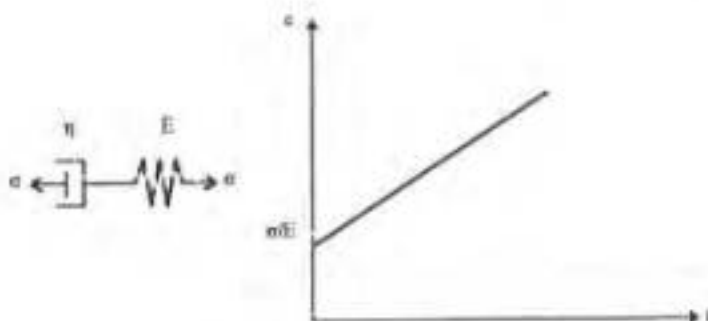


Gambar 2.5. Material St. Venant

2.4.1.5. Material Viskoelastik atau Maxwell

Material ini merupakan kombinasi dari elemen elastik yang disertai dengan elemen viskos. Total regangan merupakan penjumlahan regangan elastik dan regangan viskos.

$$\epsilon = \left(\frac{\sigma}{k} \right) + \left(\frac{\sigma}{\eta} \right) \quad (2.5)$$

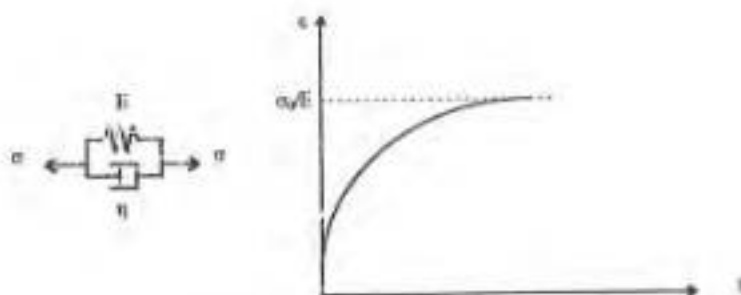


Gambar 2.6. Material Maxwell

2.4.1.6. Material Firmo-Viskos atau Kelvin

Material Kelvin dapat dinyatakan dalam pegas dan dashpot yang diparalelkan. Untuk model ini, regangan pada elemen elastik harus sama dengan regangan elemen viskos. Total tegangan adalah penjumlahan tegangan elastik dan tegangan viskos, dengan hubungan sebagai berikut :

$$\sigma = E \cdot \epsilon + 3\eta \dot{\epsilon} \quad (2.6)$$



Gambar 2.7. Material Kelvin

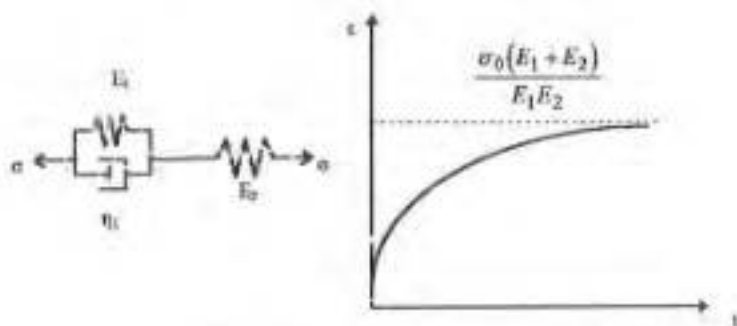
2.4.2. Model Kompleks

Material sebenarnya mempunyai perilaku yang lebih kompleks daripada model sederhana. Bagaimanapun dengan menggabungkan dua atau lebih elemen dasar, sifat-sifat yang bervariasi lebih mudah didekati.

2.4.2.1. Model Kelvin yang Umum

Model generalized Kelvin terdiri dari model Kelvin dan Hooke yang disusun secara seri. Model ini mempunyai persamaan matematik sebagai berikut :

$$\sigma = \eta_1 \left(\dot{\epsilon} - \frac{\dot{\sigma}}{E_2} \right) + E_1 \left(\epsilon - \frac{\sigma}{E_2} \right) \quad (2.7)$$



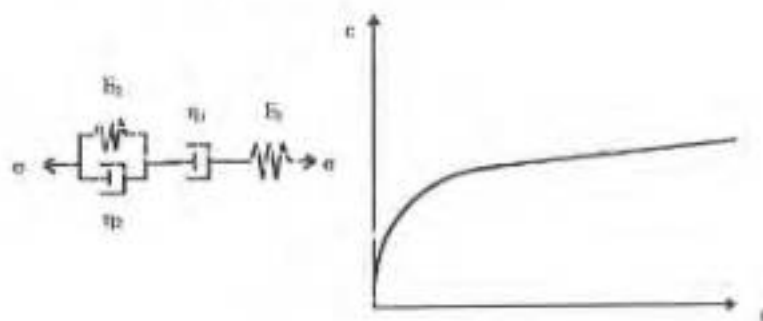
Gambar 2.8. Model Generalized Kelvin

2.4.2.2. Model Burger

Model Burger merupakan model Kelvin dan Maxwell yang disusun secara paralel. Ketika model dibebani tegangan konstan (σ_0) pada waktu t ,

regangan yang dihasilkan merupakan penjumlahan regangan dalam model Maxwell dan model Kelvin.

$$\epsilon_1(t) = \frac{\sigma_1}{E_2} + \frac{\sigma_1}{E_1} - \frac{\sigma_1}{E_1} e^{-(E_1/\eta_1)t} + \frac{\sigma_1}{\eta_2} t \quad (2.8)$$



Gambar 2.9. Model Burger

Model ini merupakan representasi yang paling sederhana dari material batuan (Nishihara, 1957; Matsushima, 1960; Price, 1964; Hardy 1967).

2.5. PENENTUAN KUAT TEKAN JANGKA PANJANG

Kuat tekan jangka panjang atau rayapan didefinisikan sebagai tegangan maksimum yang masih dapat ditahan oleh batuan tanpa terjadi failure. Ada beberapa metode untuk menentukan kuat tekan jangka panjang ini.

2.5.1. Metode Langsung

Pada metode uji rayapan secara langsung, contoh dibebani dengan beban yang bervariasi, dan nilai beban terbesar di mana tidak terjadi failure ditentukan sebagai kuat tekan jangka panjangnya.

Alternatifnya, adalah metode rayapan transient, yang mengasumsikan bahwa kuat tekan jangka panjang dinyatakan dengan tingkat tegangan di mana hanya terjadi rayapan transient (primer). Kedua metode ini memerlukan waktu yang sangat lama dan sulit untuk diterapkan, karenanya dalam prakteknya ada kecenderungan untuk menggunakan metode tidak langsung yang didasarkan pada uji kuat tekan uniaksial.

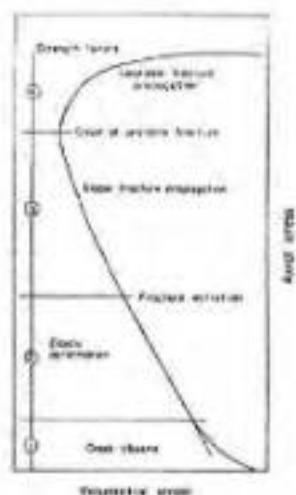
2.5.2. *Volume Dilation Method*

Bieniawski (1967) menetapkan bahwa *creep fracture level*, atau kuat tekan jangka panjang adalah tegangan di mana propagasi rekahan tidak stabil mulai terjadi, yang dinyatakan dengan suatu titik pada kurva tegangan - regangan di mana regangan volume mulai meningkat dan berlanjut hingga mengalami penurunan (Gambar 2.10)

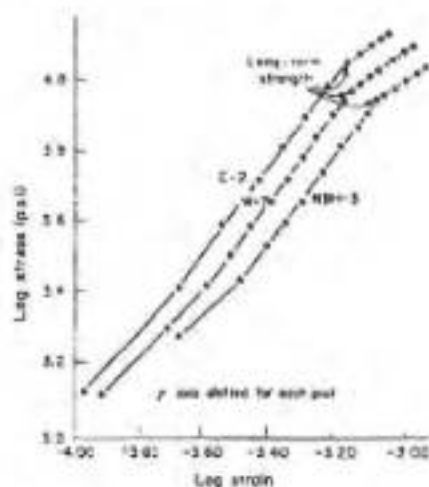
Menurut Wüid (1970), lebih baik menggunakan titik awal inisiasi rekahan untuk menentukan awal rayapan daripada titik perkembangan rekahan tidak stabil.

2.5.3. *Metode Kurva Tegangan - Regangan*

Kurva tegangan - regangan yang digambarkan pada grafik logaritma oleh Desayi dan Viswanatha untuk beton, dan Singh dan Bamford untuk batuan menggambarkan tiga garis lurus dengan kemiringan yang berbeda dan dua bagian (Gambar 2.11). Mereka mengidentifikasi bagian pertama (15-25% dari *fracture strength*) adalah penutupan rekahan, dan bagian kedua (70-90% dari *fracture strength*) menggambarkan propagasi rekahan tidak stabil, yang akan berlanjut hingga runtuh.



Gambar 2.10. Kurva Tegangan-Regangan Volumetrik Batuan Keras yang Menunjukkan Proses Fracturing (Vutukuri & Lama, 1978)



Gambar 2.11. Kurva Tegangan - Regangan dalam Logaritma dari Marmer Sicilian (C-2), Marmer Wombeyan (W-7), Bijih North Broken Hill (NBH-3) (Singh & Bamford, 1971)

2.5.5. Metode Tegangan - Relaksasi

Dalam uji kuat tekan uniaksial, sesudah tingkat tegangan tertentu regangan dijaga konstan, akan terjadi relaksasi tegangan sampai kesetimbangan dicapai antara tegangan eksternal dan internal. Pada Gambar 2.12, posisi uji relaksasi adalah garis vertikal (AG) dari sembarang titik pada kurva tegangan - regangan. Jika batuan benar-benar mengalami rayapan, laju relaksasi tegangan akan mengalami penurunan dan berhenti saat rayapan (garis TU) dicapai.

2.6. PILAR

Pilar batubara adalah batubara yang ditinggalkan (tidak ditambang) untuk menyangga lapisan penutup (*overburden*) dan menjaga keberadaan lubang bukaan. Karena fungsinya sebagai penyangga, keruntuhan pilar sangat berperan pada masalah kestabilan lubang bukaan. Proses merancang pilar termasuk menentukan ukuran pilar sesuai dengan bebannya.

Ada dua cara mengevaluasi beban yang akan menyebabkan keruntuhan pilar. Teori *Ultimate Strength* menyatakan bahwa pilar akan runtuh segera sesudah beban ultimatanya tercapai, dengan mengasumsikan daya dukung pilar akan berkurang hingga nol.

Teori *Progressive Failure* menekankan distribusi tegangan yang tidak seragam pada pilar karena adanya cacat batuan (*defects*). Keruntuhan dimulai pada titik yang paling kritis dan berpropagasi secara bertahap hingga mencapai keruntuhan ultimate.

Hampir semua rancangan pilar menggunakan Teori *Ultimate Strength*. Teori *Progressive Failure* membutuhkan pengembangan yang lebih jauh sebelum digunakan di dalam praktek. Kekuatan pilar batubara bergantung pada ukuran (*Size Effect*) dan bentuk (*Shape Effect*) pilar.

2.6.1. *Size Effect*

Kekuatan pilar dapat ditentukan dengan uji laboratorium dan insitu. Kekuatan batubara yang diperoleh di laboratorium biasanya lebih besar karena ukuran sampelnya yang lebih kecil. Ini disebabkan adanya kenyataan bahwa semakin besar ukuran contoh, semakin banyak terdapat bidang diskontinyu yang menyebabkan menurunnya kekuatan pilar. Uji insitu pada pilar bawah tanah dapat mengurangi masalah ukuran dan hasilnya lebih representatif, tetapi itu lebih mahal dan memerlukan waktu yang lama. Banyak usaha dilakukan untuk memperkirakan kekuatan pilar insitu dari hasil uji laboratorium.

Bieniawski (1969) melakukan pengukuran insitu dan memperoleh hasil bahwa untuk contoh pilar berbentuk kubus, kekuatan akan menurun dengan membesarnya ukuran contoh dan menjadi konstan saat mencapai ukuran kritis, yaitu sekitar 1.5 meter. Ini berarti bahwa kekuatan contoh kritis akan menggambarkan kekuatan insitu pilar batubara.

Pendekatan lain untuk ekstrapolasi kekuatan pilar batubara insitu dari kekuatan hasil uji laboratorium dapat dinyatakan dengan persamaan berikut (Hustrulid, 1976) :

$$S_i = \frac{k_1}{\sqrt{36}} \quad (\text{tinggi contoh} > 36 \text{ inch}) \quad (2.9)$$

$$S_h = \frac{k_1}{\sqrt{H}} \quad (\text{tinggi contoh (H) < 36 inci}) \quad (2.10)$$

Besarnya nilai k dapat ditentukan dengan rumus Gaddy (1956) :

$$k = \sigma_c \sqrt{D} \quad (2.11)$$

dengan : σ_c = kuat tekan uniaksial contoh.

D = diameter contoh atau ukuran contoh jika berbentuk kubus.

Greenwald (1941) melakukan eksperimen dengan menggunakan pilar berbentuk kubus dengan ukuran 1 - 60 inci. Hasilnya menunjukkan bahwa kekuatan dari uji laboratorium kira-kira 7 kali kekuatan insitunya. Hasil yang sama juga didapat Bieniawski dan Van Heeden (1965).

Wilson (1980) menyatakan bahwa faktor reduksi kekuatan, f , dari nilai laboratorium bergantung pada tipe batuan seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Faktor Reduksi Kekuatan (Wilson, 1980)

<i>Jenis Batuan</i>	<i>Faktor Reduksi, f</i>
Batuan masif	1
Batuan dgn spasi bid. diskontinyu lebar, atau batuan berlapis	1/2
Batuan dgn banyak bid. diskontinyu tapi masih masif	1/3
Batuan terkekarkan dan lemah	1/4
Batubara dan seatearths tidak stabil	1/5
Batuan daerah patahan	1/6 dan 1/7

2.6.2. Shape Effect

Selain *size effect*, kekuatan batubara juga bergantung pada geometri contoh atau *shape effect*, yaitu perbandingan diameter atau lebar terhadap tinggi contoh (Evans dkk. 1961; Obert dan Duval, 1967). Banyak rumusan kekuatan pilar *ultimate* dengan memasukkan unsur *shape* yang terbagi dalam 2 kelompok :

$$S_2 = S_1 \left(A + B \frac{W_p}{H} \right) \quad (2.12)$$

$$S_2 = S_1 \frac{W_p^a}{H^b} \quad (2.13)$$

dengan: S_2 = kekuatan pilar

S_1 = kuat tekan uniaxial dari pilar kubus

A, B, a, b = konstanta yang bergantung pada karakteristik lapisan batubara

W_p = lebar pilar

H = tinggi pilar

2.7. FAKTOR SKALA

2.7.1. Analisis Dimensi

Eksperimentasi dengan menggunakan model skala berarti menetapkan suatu faktor yang dapat digunakan dalam merancang kondisi sebenarnya. Modifikasi model lebih mudah dan murah dibandingkan modifikasi pada keadaan sebenarnya. Selain itu perubahan pada model dapat lebih aman dan lebih cepat meskipun mempunyai beberapa keterbatasan.

Salah satu contoh penggunaan model skala adalah pada rancangan tambang batubara sistem longwall di Universitas Newcastle Upon Tyne (Inggris), yang menggunakan model skala 1/4 kondisi sebenarnya. Di Australia, contoh model skala dalam penelitian adalah model fisik untuk mengetahui perilaku lapisan batuan yang digunakan oleh The Australian Coal Industry Research Laboratory Ltd. (ACIRL)

Studi model ini didasarkan pada analisis dimensi, sehingga hasil eksperimentasi model skala dapat ditransformasikan pada kondisi sebenarnya. Analisis dimensi adalah suatu aplikasi matematika yang digunakan oleh para ahli rancangan untuk menentukan hubungan antara model dan kondisi sebenarnya.

Prinsip-prinsip dari analisis dimensi adalah sebagai berikut :

1. Mengubah persamaan atau data dari satu sistem ke sistem lain.
2. Mengembangkan hubungan antara variabel.
3. Merangkum pengumpulan data dan mengurangi sejumlah variabel yang harus dikaji dalam eksperimentasi.
4. Menetapkan prinsip-prinsip rancangan model dan interpretasi data pengujian.

Dimensi dasar adalah massa, panjang dan waktu yang dinotasikan dengan M, L, dan T. Sistem alternatif dari dasar dimensi adalah gaya, panjang dan waktu, yang dinotasikan dengan F, L, dan T. Dalam beberapa masalah statik, hanya digunakan gaya dan panjang. Dimensi dari semua besaran fisik dapat diturunkan dari dimensi dasar dan disebut sebagai dimensi fisik. Analisis dimensi hanya dapat diaplikasikan pada persamaan yang

berdimensi homogen (dimensionally homogeneous equations). Jika semua bagian dalam persamaan yang diberikan mempunyai dimensi yang sama dan tidak mengandung konstanta dimensional, persamaan tersebut dapat dikatakan homogen.

Contoh tipe-tipe persamaan dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Contoh Persamaan Homogen, Homogen Terbatas, dan Tidak Homogen

Persamaan	Tipe
$s = 0.5 (g \cdot t^2)$	Homogen
$s = 4.90 \cdot t^2$	Homogen Terbatas
$v = a \cdot t$	Homogen
$s + v = 0.5(g \cdot t^2) + a \cdot t$	Tidak Homogen

2.7.2. Produk Tak Berdimensi

Jika terdapat n variabel ,

$$(Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n) \quad (2.14)$$

Sejumlah tertentu produk pangkat dari variabel-variabel ini dapat dibentuk:

$$U_i = Q_1^{x_1} \cdot Q_2^{x_2} \cdot \dots \cdot Q_n^{x_n} \quad (2.15)$$

Dimensi pangkat tersebut dapat diperoleh dengan mengganti Q_i dengan simbol dimensinya. Jika M , L , dan T adalah dimensi dasar, persamaan umum untuk dimensi U_i di atas adalah :

$$U_i = (M^{a_{i1}} L^{b_{i1}} T^{c_{i1}}) \cdot (M^{a_{i2}} L^{b_{i2}} T^{c_{i2}}) \cdot \dots \cdot (M^{a_{in}} L^{b_{in}} T^{c_{in}}) \quad (2.16)$$

$$U_i = (M^{a_{i1}+a_{i2}+\dots+a_{in}} L^{b_{i1}+b_{i2}+\dots+b_{in}} T^{c_{i1}+c_{i2}+\dots+c_{in}}) \cdot (L^{b_{i1}+b_{i2}+\dots+b_{in}}) \quad (2.17)$$

Produk pangkat dari variabel akan tidak berdimensi jika pangkat M , L , dan T dalam persamaan di atas mengikuti persamaan berikut :

$$[M] : a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n = 0 \quad (2.18)$$

$$[L] : b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n = 0 \quad (2.19)$$

$$[T] : c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n = 0 \quad (2.20)$$

Jika jumlah variabel Q_n dan jumlah pangkat x_i lebih banyak dari jumlah dimensi, akan ada sejumlah kombinasi pangkat x_i yang memenuhi persamaan di atas. Jika ada sejumlah tertentu produk tak berdimensi, maka akan ada sejumlah tertentu produk pangkat tak berdimensi, atau bentuk π . Semua bentuk π tidak berdiri sendiri dan saling berhubungan.

Beberapa metode yang ada untuk menyelesaikan persamaan tak berdimensi itu antara lain *Rayleigh* atau *Indicial Method*, *Matrix Method*, dan *Buckingham Pi Method*.

2.7.2.1. *Buckingham Pi Method*

Tecrema Buckingham Pi menetapkan suatu bentuk persamaan umum :

$$f(Q_1, Q_2, \dots, Q_k, \dots, Q_n) = 0 \quad (2.21)$$

dengan Q adalah besaran fisik, dapat dikurangi menjadi $n-k$ variabel tak berdimensi, dengan k adalah jumlah dimensi, sehingga menjadi :

$$f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k, \dots, \pi_n) = 0 \quad (2.22)$$

Prosedur untuk mereduksi persamaan asli menjadi persamaan yang produk tak berdimensi adalah sebagai berikut :

1. Menetapkan sejumlah bentuk π
2. Memilih variabel berulang dengan ketentuan sebagai berikut :

- i. Variabel berulang harus mencakup semua dimensi dasar.
 - ii. Variabel bebas selarasnya tidak digunakan sebagai variabel berulang
3. Tentukan nilai π untuk bentuk Q yang berbeda (tidak termasuk variabel berulang).
 4. Cari nilai pangkat dalam masing-masing bentuk π .
 5. Susun kembali persamaan dalam bentuk π .

2.7.2.2. Matrix Method

Jika terdapat banyak persamaan simultan, metode terbaik yang digunakan adalah metode matrik. Persamaan [M], [L], [T] dapat ditulis dalam bentuk matrik, dengan penjumlahan masing-masing kolomnya sama dengan nol.

$$\sum_{i=1}^n q_{ji} x_i = 0 \quad (2.23)$$

di mana $j = 1, 2, 3$ (hanya 3 dimensi dasar M, L, T) dan hubungan nilai q adalah dimensi dari parameter Q. Dalam matrik dimensi, j adalah jumlah baris dan i adalah jumlah kolom, yang banyaknya sama dengan jumlah unit dasar dan jumlah variabel yang dicari.

	(Q_1)	(Q_2)	(Q_3)	(Q_{3+i})		(Q_n)	
	x_1	x_2	x_3	x_{3+i}		x_n	
<i>M</i>	$a_1 x_1$	$+ a_2 x_2$	$+ a_3 x_3$	$+ a_{3+i} x_{3+i}$		$+ a_n x_n$	$= 0$
<i>L</i>	$b_1 x_1$	$+ b_2 x_2$	$+ b_3 x_3$	$+ b_{3+i} x_{3+i}$		$+ b_n x_n$	$= 0$
<i>T</i>	$c_1 x_1$	$+ c_2 x_2$	$+ c_3 x_3$	$+ c_{3+i} x_{3+i}$		$+ c_n x_n$	$= 0$
		L			R		

(2.24)

Bagian L (kiri) dapat dinyatakan sebagai hasil dari dua matrik :

$$\begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \text{ atau } [M_{ij}] [X_i] \quad (2.25)$$

dengan : $[M_{ij}]$ adalah matrik $(3 \times n)$ dari q_{ij} , $i = 1, 2, 3$

$[X_i]$ adalah vektor kolom dari x .

Dengan cara yang sama bagian R (kanan) dapat dinyatakan sebagai :

$$\begin{pmatrix} a_4 & a_5 & \dots & a_n \\ b_4 & b_5 & \dots & b_n \\ c_4 & c_5 & \dots & c_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_4 \\ x_5 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \text{ atau } [N_{ip}] [X_p] \quad (2.26)$$

dengan : $[N_{ip}] =$ matrik $[3 \times (n-3)]$ dari q_{ip} , $i = 1, 2, 3$; $p = 4, 5, \dots, n$

$[X_p] =$ vektor kolom dari x

Sehingga persamaan matrik di atas dapat ditulis kembali menjadi :

$$[M_{ij}] [X_i] + [N_{ip}] [X_p] = 0 \quad (2.27)$$

Persamaan tersebut dapat diselesaikan jika jika $[M_{ij}]$ mempunyai inverse, di mana matrik ini harus matriks non-singular dan $n \times n$, sehingga :

$$[M_{ij}] [X_i] = (-1) [N_{ip}] [X_p] \quad (2.28)$$

Karena $[M_{ij}]$ adalah $n \times n$ dan non singular, maka terdapat matrik inverse $[M^{-1}_{ij}]$, sehingga :

$$[M^{-1}_{ij}] [M_{ij}] [X_i] = (-1) [M^{-1}_{ij}] [N_{ip}] [X_p] \quad (2.29)$$

$$[X_i] = (-1) [M^{-1}_{ij}] [N_{ip}] [X_p] \quad (2.30)$$

Persamaan yang mengandung n bilangan yang tidak diketahui diselesaikan dari 3 persamaan bebas, yang akan membentuk $[X_p]$, sehingga menjadi :

$$[X_i] = (-1) [M^{-1}_{ij}] [N_{ip}] \quad (2.31)$$

2.7.3. Similarity

Analisis dimensi menghasilkan satu set produk tak berdimensi :

$$\pi = f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-r}) \quad (2.32)$$

Jika hasil model diaplikasikan pada kondisi sebenarnya, maka nilai π model dan kondisi sebenarnya harus sama. Hal ini hanya mungkin jika terdapat kesamaan (*similarity*) antara model dan kondisi sebenarnya. Idealnya, hal ini akan mungkin jika model dan kondisi sebenarnya mempunyai kesamaan geometri, kinematik dan dinamik.

1. Geometric Similarity

Kesamaan geometri terjadi jika model diperkecil geometrianya sehingga perbandingan dari semua dimensi yang berhubungan adalah sama.

2. Kinematic Similarity

Kesamaan kinematik terjadi saat terdapat kesamaan kecepatan di semua titik pada posisi yang sama.

3. Dynamic Similarity

Kesamaan dinamik ditentukan dari perbandingan gaya-gaya yang sama.

2.7.4. Faktor Skala

Jika model dan kondisi sebenarnya mempunyai kesamaan, hubungan antara besaran dapat dihubungkan dengan faktor skala. Faktor skala ditentukan dari produk tak berdimensi. Jika terdapat n variabel, maka terdapat n faktor skala. Karena hanya terdapat $(n-r)$ hasil tak berdimensi, maka hanya terdapat r faktor skala yang dapat dipilih secara bebas.



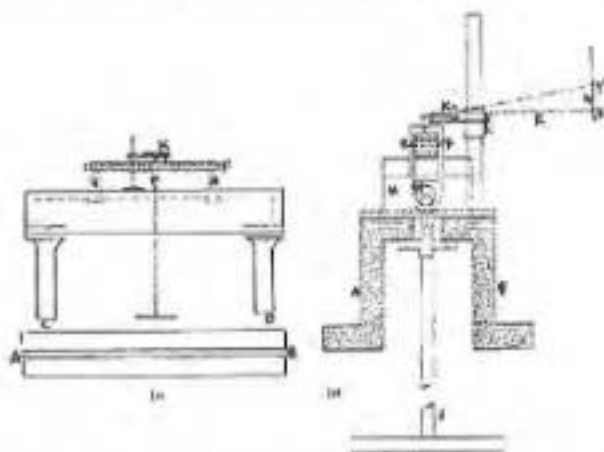
BAB III

PERALATAN Uji RAYAPAN DI LABORATORIUM

3.1. TIPE-TIPE ALAT Uji RAYAPAN

3.1.1. Pengujian dengan bending

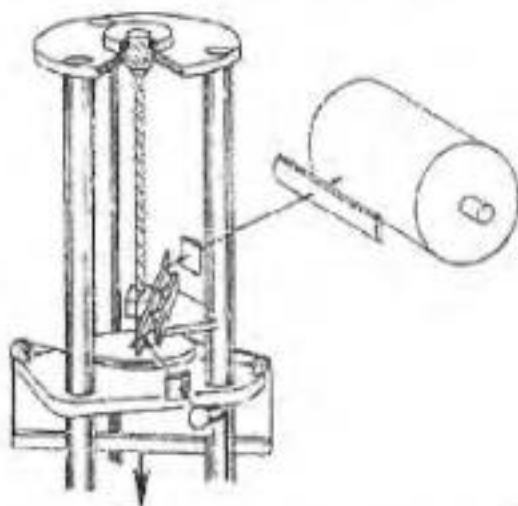
Phillips (1931) melakukan pengujian rayapan dengan menggunakan sistem bending (Gambar 3.1). Alat terdiri dari meja besi tuang (AB) panjang 61 cm yang disangga dua kaki besi (CD). Batang batuan (EF) diletakkan pada dua penyangga (GH) yang dijepit pada meja dan dapat diatur. Contoh dibebani dengan beban yang digantung (J). Tuas optik (K) mempunyai dua penyangga pada pelat (N), penyangga ketiga melalui lubang pada (M) dan berujung di atas permukaan batang. Alat ini digunakan untuk melihat pengaruh bending pada batuan.



Gambar 3.1. Alat Uji Rayapan Sistem Bending (Phillips, 1931)

3.1.2. Pengujian dengan torsi

Lomnitz (1956) melakukan pengujian rayapan dengan sistem torsi. Alat terdiri dari rangka baja yang dapat digunakan sampai panjang contoh 45.72 cm (Gambar 3.2.). Kopel torsi diletakkan lebih rendah dari contoh melewati *pulley* berdiameter 38.1 cm. Sistem pengukuran regangan adalah optikal dan terdiri dari dua cermin yang berhadapan.



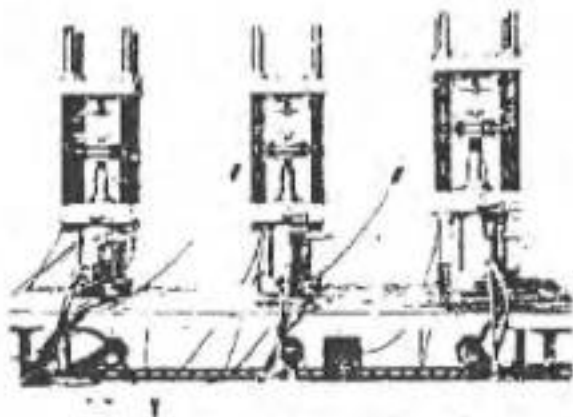
Gambar 3.2. Alat Uji Rayapan Sistem Torsi (Lomnitz, 1956)

3.1.3. Pengujian dengan Tekanan / Tarikan

Wawersik dan Brown (1971, 1973) menggambarkan pengujian rayapan dengan tekanan / tarikan uniaksial di bawah kondisi tekanan pengukungan. Pengujian ini menggunakan mesin pembebanan hidrolik (Gambar 3.3.), yang terdiri dari dua silinder hidrolik, 4 batang pengikat dan *cross head*.

Perpindahan dan pembebanan diberikan oleh piston hidrolik yang dikontrol oleh regulator tekanan hidrolik.

Untuk menjaga beban konstan, digunakan akumulator gas tekanan tinggi pada masing-masing silinder hidrolik sebagai kontrol beban.



Gambar 3.3. Peralatan Pembebanan (Wawersik dan Brown, 1971)

3.2. ALAT YANG DIGUNAKAN DALAM PENGUJIAN

Ada dua kondisi alat yang harus dipenuhi dalam uji rayapan, yaitu :

1. Alat yang digunakan harus dapat menyediakan beban konstan dalam jangka waktu yang lama.
2. Deformasi atau alat pengukur regangan harus stabil dan tidak boleh menyimpang selama pengujian.

Pada penelitian terdahulu (Bagus, 1996) digunakan alat untuk uji rayapan yang berkapasitas 4.5 ton dengan alat ukur perpindahan yang mempunyai

ketelitian 2.54×10^{-3} mm. Pemberi beban pada alat ini menggunakan mekanisme putar (*screw driven mechanism system*).

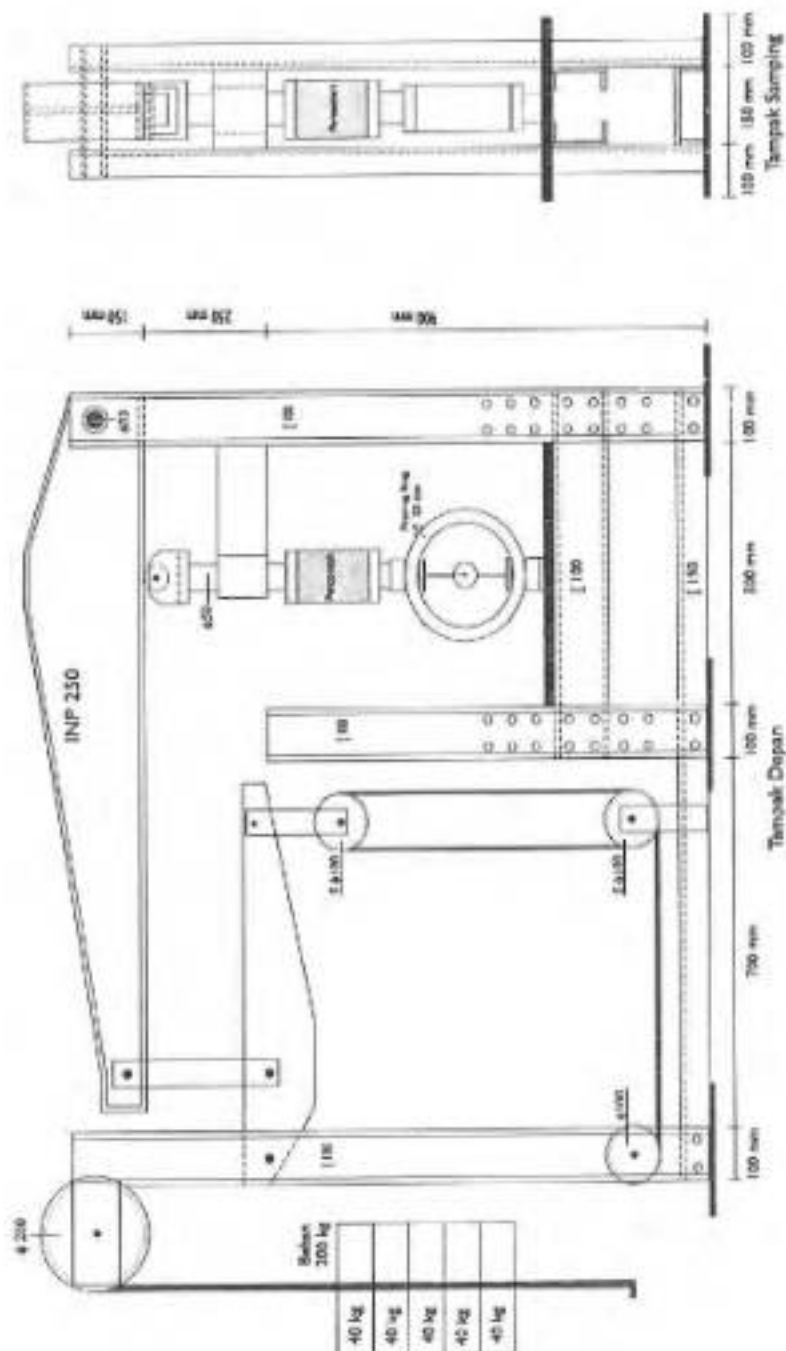
Alat ini mempunyai kelemahan, yaitu :

1. Sistem pembangkit bebannya menyebabkan :
 - Ketidaknampuannya untuk menjaga beban konstan
 - Kesulitan memberikan tegangan sesuai dengan yang dikehendaki
 - Contoh sering hancur karena secara tidak sengaja melewati kekuatan contoh
 - Contoh kadang-kadang ikut berputar sewaktu memutar lengan pembangkit beban
2. Kemampuannya kecil dan terbatas, untuk tegangan 50 MPa ukuran percontoh maksimum hanya dengan diameter 3,4 cm.
3. Kedudukan mesin yang terlalu rendah sehingga menyulitkan pembacaan dial gauge pada beban dan deformasi.

Untuk meminimalkan kelemahan, dirancang suatu alat uji rayapan yang merupakan perkembangan dan perbaikan dari alat yang telah ada (Gambar 3.4.). Spesifikasi alat ini adalah sebagai berikut :

- Kapasitas alat : 25 ton
- Pemberi beban : sistem bandul
- Ketelitian dial gauge proving ring : 1.0×10^{-3} mm

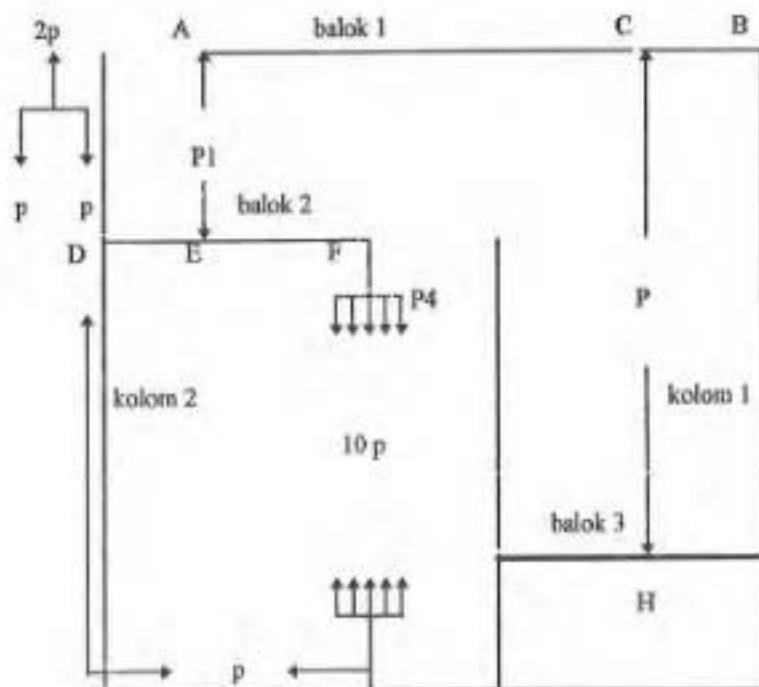
Untuk pembacaan deformasi, baik aksial maupun lateral, digunakan dial gauge elektronik dengan ketelitian pembacaan 1.0×10^{-2} mm



Chamber 3.4. Alat Uji Kuant Tekan Jangka Panjang Kapasitas 25 ton

3.2.1. Perhitungan Gaya-gaya yang Bekerja

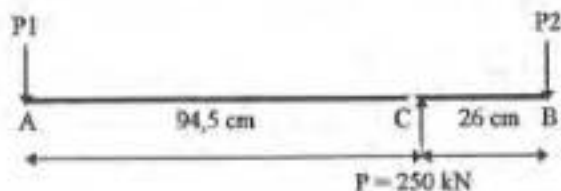
Perhitungan gaya-gaya yang bekerja pada alat didasarkan pada kapasitas maksimum alat yaitu $P = 250 \text{ kN}$ (25 ton) Gambar 3.5, menunjukkan skema gaya-gaya yang bekerja pada alat. Gaya-gaya yang dihitung adalah gaya yang bekerja pada balok 1, balok 2, kolom 1, dan kerekan.



Gambar 3.5. Skema Beban pada Alat Uji Raynpan

3.2.1.1. Balok 1

Skema beban pada Balok 1 dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6. Skema Beban Balok 1

Dengan mengabaikan berat sendiri, maka perhitungan gayunya adalah sebagai berikut :

$$\Sigma M_B = 0, \text{ maka} \quad (3.1)$$

$$- P_1 \times 120,5 + 250 \times 26 = 0 \quad P_1 = 53,942 \text{ kN}$$

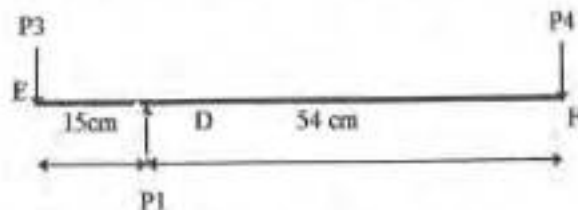
$$\Sigma F_y = 0, \text{ maka} \quad (3.2)$$

$$250 - P_1 - P_2 = 0 \quad P_2 = 196,058 \text{ kN}$$

$$\text{Momen C} = P_1 \times 94,5 = 5097,519 \text{ kN.cm} \quad (3.3)$$

3.2.1.2. Balok 2

Skema beban pada Balok 2 dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7. Skema Beban Balok 2

Dengan mengabaikan berat sendiri, maka perhitungannya adalah sebagai berikut :

$$\sum M.F = 0, \text{ maka} \quad (3.4)$$

$$- P3 \times 69 + P1 \times 54 = 0 \quad P3 = 42,215 \text{ kN}$$

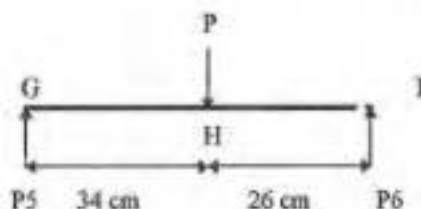
$$\sum M.D = 0, \text{ maka} \quad (3.5)$$

$$P4 \times 69 - P1 \times 15 = 0 \quad P4 = 11,727 \text{ kN}$$

$$\text{Momen E} = 11,727 \times 54 = 633,258 \text{ kN.cm} \quad (3.6)$$

3.2.1.3. Balok 3

Skema beban pada Balok 3 dapat dilihat pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8. Skema Beban Balok 3

Dengan mengabaikan berat sendiri, maka gayanya dapat dihitung sebagai berikut :

$$\sum M.I = 0, \text{ maka} \quad (3.7)$$

$$- P5 \times 60 + P \times 26 = 0 \quad P5 = 108,333 \text{ kN}$$

$$\sum M.G = 0, \text{ maka} \quad (3.8)$$

$$P6 \times 60 - P \times 34 = 0 \quad P4 = 141,667 \text{ kN}$$

Karena tumpuan G dan I adalah jepit, maka :

$$\text{Momen tumpuan} = 0,125 \times P \times L \quad (3.9)$$

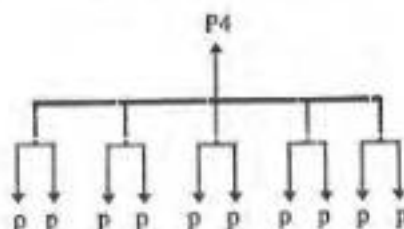
$$= 0,125 \times 250 \times 60$$

$$= 1875 \text{ kN.cm}$$

$$\text{Momen H} = P_5 \times 34 - 1875 = 1808,322 \text{ kN.cm} \quad (3.10)$$

3.2.1.4. Kerekan

Skema beban pada kerekan dapat dilihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9. Skema Beban pada Kerekan

Lima buah kerekan digabungkan, masing-masing kerekan mempunyai dua buah tali baja ($2p$). Besarnya gaya yang diterima bandul adalah sama dengan gaya yang diterima oleh tali baja (p), yaitu :

$$\sum F_y = 0, \text{ maka} \quad (3.11)$$

$$- P_4 + 10 p = 0 \quad p = 1,1727 \text{ kN}$$

3.2.2. Perhitungan Ukuran Rangka

Bahan yang digunakan untuk alat ini adalah baja ST 37 yang mempunyai kekuatan yield 37 kN/cm^2 (370 MPa) dan elastisitas $E = 21000 \text{ kN/cm}^2$

(210000 MPa). Jika faktor keamanan yang digunakan adalah 2,5, maka tegangan ijinnya adalah :

$$\begin{aligned}\text{Tegangan Ijin} &= \frac{\text{Teg. yield}}{FK} = \frac{3700}{2,5} \\ &= 14,80 \text{ kN/cm}^2\end{aligned}\quad (3.12)$$

3.3.1. Balok 1

Bahan yang digunakan adalah baja INP 250, dengan momen inersia sumbu xx (I_{xx}) = 5160 cm⁴. Tegangan yang timbul :

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{M_c \cdot y}{I_{xx}} = \frac{509751,2 \times 12,5}{5160} \\ &= 12,3486 \text{ kN/cm}^2 < \sigma_{\text{ijin}}\end{aligned}\quad (3.13)$$

Lendutan maksimum yang terjadi :

$$\begin{aligned}\Delta Y &= \frac{P \cdot (L - a)(2 \cdot L \cdot a^2 - 2 \cdot a^3)}{6 \cdot L \cdot E \cdot I_{xx}} \\ \Delta Y &= \frac{25000 \times (120,5 - 94,5)(2 \times 120,5 \times 94,5^2 - 2 \times 94,5^3)}{6 \times 120,5 \times 2100000 \times 5160} = 0,0385 \text{ cm}\end{aligned}\quad (3.14)$$

3.3.2. Balok 2

Bahan yang digunakan adalah baja INP 10 yang mempunyai momen inersia sumbu xx (I_{xx}) = 283 cm⁴. Tegangan yang timbul :

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{M_F \cdot y}{I_{xx}} = \frac{63325,8 \times 5}{283} \\ &= 11,1883 \text{ kN/cm}^2 < \sigma_{\text{ijin}}\end{aligned}\quad (3.15)$$

3.2.3. Balok 3

Balok 3 terdiri dari dua buah baja kanal 100, dengan momen inersia sumbu xx (I_{xx}) = 382 cm⁴. Tegangan yang timbul :

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{M_{H-Y}}{I_{xx}} = \frac{180832,2 \times 5}{2 \times 382} \\ &= 11,835 \text{ kN/cm}^2 < \sigma_{ijin}\end{aligned}\quad (3.16)$$

Lendutan maksimum yang terjadi :

$$\begin{aligned}\Delta Y &= \frac{P \cdot L^3}{96 \cdot E \cdot I_{xx}} \\ &= \frac{25000 \times 60^3}{96 \times 2100000 \times 382} = 0,07 \text{ cm}\end{aligned}\quad (3.17)$$

3.2.4. Kolom 1

Kolom 1 menggunakan dua baja kanal 100, dengan luas penampang bersih (A_{netto}) = 27,48 cm². Tegangan yang timbul :

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{P_2}{2 \times A_{netto}} = \frac{19605,8}{2 \times 27,48} \\ &= 3,567 \text{ kN/cm}^2 < \sigma_{ijin}\end{aligned}\quad (3.18)$$

Lendutan maksimum yang terjadi :

$$\begin{aligned}\Delta Y &= \frac{P_2 \cdot L}{2 \cdot A \cdot E} \\ &= \frac{19605,8 \times 100}{2 \times 27,48 \times 2100000} = 0,017 \text{ cm}\end{aligned}\quad (3.19)$$

3.3.3. Perhitungan Kekakuan Rangka

Rumus kekakuan yang digunakan :

$$K = \frac{F}{\Delta y} \quad (3.20)$$

dengan : K = kekakuan (kN/cm)

F = gaya (kN)

y = perpindahan (cm)

Tabel 3.1. Kekakuan Rangka

	Gaya (kN)	Deformasi (cm)	Kekakuan (kN/cm)
Proving Ring	250	0,2	1250,00
Balok I	250	0,039	6410,26
Balok III	250	0,07	3571,43
Kolom I	196,058	0,017	11532,82
Alat Uji Creep	250	0,326	766,871



BAB IV

PROSEDUR PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA UJI RAYAPAN

Penentuan kekuatan jangka panjang di laboratorium sampai saat ini belum memiliki standard uji yang baku. Oleh karenanya, selama uji berlangsung, faktor-faktor yang mempengaruhinya, seperti jenis dan besar bahan, temperatur, kelembaban, dan porositas contoh harus diperhatikan dengan seksama.

4.1. CONTOH BATUBARA

Penelitian yang dilakukan merupakan suatu penelitian awal untuk mengetahui perilaku dari contoh batubara. Oleh karenanya, untuk keperluan ini tidak menjadi masalah jika contoh batubara diambil berasal dari tambang terbuka.

Contoh batubara diambil dari penambangan batubara PT. Tambang Batubara Bukit Asam, Tanjung Enim, Sumatra Selatan. Lapisan batubara yang diambil adalah *silicified coal* yang merupakan lapisan A-2 top.

Dari hasil pengamatan terhadap contoh batubara, dapat dijelaskan bahwa hampir 70 % dari contoh adalah pengotor yang sebagian besar adalah lempung dan silika. Oleh karenanya, batubara ini lebih tepat jika digolongkan sebagai *silicified coal* daripada batubara murni.

Pengujian dilakukan menggunakan contoh batubara berbentuk silinder dengan empat macam diameter, yaitu 54 mm, 70 mm, 100 mm dan 150

mm. Semua contoh mempunyai perbandingan diameter terhadap tinggi mendekati 1 : 1. Arah cleat pada contoh tegak lurus terhadap arah beban.

4.2. PERHITUNGAN KEKAKUAN CONTOH

Rumus kekakuan yang digunakan :

$$K = \frac{AE}{L} \quad (4.1)$$

dengan : K = kekakuan (kN/cm)

A = luas (cm²)

E = modulus young (kN/cm²)

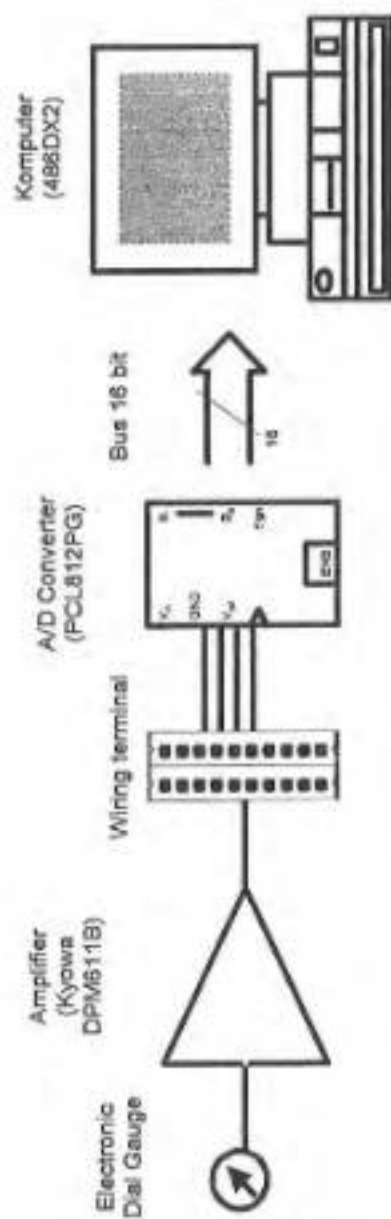
L = panjang contoh (cm)

Tabel 4.1. Kekakuan Contoh

Diameter Contoh (cm)	Luas Contoh (cm ²)	Tinggi Contoh (cm)	Modulus Young (kN/cm ²)	Kekakuan (kN/cm)
5,4	91,6	5,4	601,273	10199,372
7,0	153,9	7,0	603,810	17672,337
10,0	314,0	10,0	823,890	25870,146
15,0	706,5	15,0	79,000	3720,90

4.3. AKUISISI DATA

Pengambilan data penefitian uji rayapan di laboratorium dilakukan dengan menggunakan sistem akuisisi data. Software yang digunakan adalah PCL-812PG. Gambar 4.1. menunjukkan skema akuisisi data.



Gambar 4.1. Skema Akuisisi Data

4.4. PENGUJIAN SIFAT FISIK, MEKANIK, DAN DINAMIK

Sebelum uji rayapan, dilakukan pengujian sifat fisik dan sifat mekanik contoh batubara tersebut.

4.4.1. Sifat Fisik

Sifat fisik yang diuji dalam penelitian ini adalah bobot isi (natural, kering, jenuh), berat jenis, kandungan air, derajat kejenuhan, porositas, dan void ratio. Hasil pengujian sifat fisik dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2. Sifat Fisik dan Dinamik Contoh Batubara Silicified

Bobot isi asli (gr/cm ³)	Bobot isi kering (gr/cm ³)	Bobot isi jenuh (gr/cm ³)	Kadar air (%)	Porositas (%)	Void ratio (%)	Vp (m/det)
1.95	1.87	1.96	4.17	7.78	8.44	2896.28
2.02	1.98	2.03	2.00	3.95	4.11	3102.38
1.92	1.85	1.96	3.57	6.63	7.09	3462.73
1.95	1.88	1.97	3.47	6.53	6.96	3226.47
1.99	1.96	2.03	1.70	3.33	3.44	3127.19
1.96	1.93	1.99	1.46	2.82	2.91	3455.22
Rata-rata						
1.96	1.91	1.99	2.73	5.17	5.50	3211.71

Pada Tabel 4.2. terlihat bahwa bobot isi contoh sekitar 1,96 gr/cm³, yang lebih besar dari seharusnya (1,3 gr/cm³). Hal ini disebabkan oleh kondisi contoh yang hampir 70 % nya merupakan pengotor yang terdiri dari lempung dan silika.

4.4.2. Sifat Dinamik

Sifat dinamik batuan ditentukan dengan pengujian ultrasonic velocity. Uji ultrasonik dilakukan sebelum uji kuat tekan uniaksial. Dari uji ultrasonik didapatkan besarnya cepat rambat gelombang dalam contoh.

4.4.3. Sifat Mekanik

Pengujian yang dilakukan untuk menentukan sifat mekanik batuan adalah pengujian kuat tekan uniaksial.

Dari uji kuat tekan uniaksial dengan mesin hidrolik akan diperoleh kurva tegangan - regangan. Sifat mekanik yang didapatkan dari pengujian ini adalah :

1. Kuat tekan uniaksial (σ_c)
2. Batas elastik (σ_e)
3. Modulus Young (E)
4. Poisson's ratio (ν)

Uji kuat tekan uniaksial ini merupakan dasar untuk menentukan besarnya beban konstan yang akan diberikan selama uji rayapan berlangsung. Selain itu uji ini dapat digunakan untuk menentukan kuat tekan jangka panjang secara tidak langsung. Hasil uji kuat tekan uniaksial dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3. Sifat Mekanik Contoh Batubara Silicified

Contoh	Diameter (mm)	Kuat Tekan Uniaksial rata-rata (MPa)	Modulus Young rata-rata (MPa)
A	54	43,783	6012,73
B	70	41,917	8038,10
C	100	46,23	8238,90
D	150	11,75	790,00

Dari Tabel 4.3. terlihat bahwa semakin besar diameter, semakin kecil kuat tekannya. Tetapi terjadi satu anomali pada contoh C dengan diameter 100 mm. Seharusnya kuat tekan contoh C lebih kecil dari contoh B, tetapi ternyata lebih besar dari contoh B. Penjelasan mengenai anomali ini diberikan pada Sub bab 6.1.

4.5. UJI RAYAPAN

4.5.1. Ruangan

Ruangan tempat uji rayapan berlangsung harus dijaga kestabilan suhu dan kelembabannya. Perubahan suhu tidak boleh lebih besar dari $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Pada penelitian ini suhu ruangan berkisar antara 26°C - 28°C .

4.5.2. Beban

Besarnya beban yang diberikan mengacu pada pengujian kuat tekan (σ_c). Gaya pembangkit beban diberikan oleh beton yang digantungkan pada alat uji rayapan. Besarnya beban dapat dibaca pada dial gauge yang terdapat dalam proving ring, dengan ketelitian pembacaan 0,01 mm. Dari grafik

kalibrasi proving ring, dapat diketahui pembacaan dial gauge pada proving ring sebesar 0,01 mm adalah sama dengan beban 1,1844 kN (118,44 kgf).

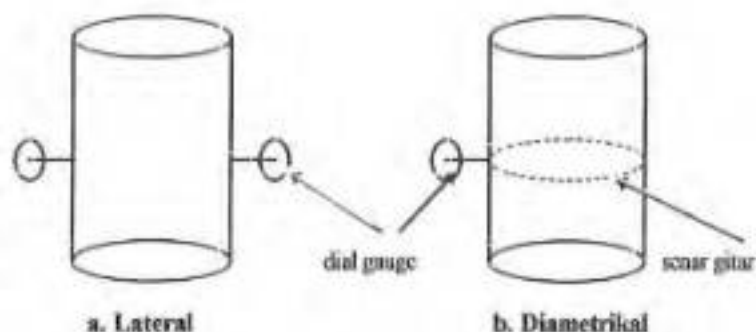
Prosedur pemberian beban dalam uji rayapan yang didasarkan pada dua prinsip :

1. Memberikan beban konstan (75 % σ_c) selama waktu tertentu hingga percontoh failure atau kecepatan regangan konstan. (ASTM)
2. Memberikan beban awal tertentu (50 % σ_c) selama waktu tertentu. Setelah kecepatan regangan konstan, tegangan dinaikkan. Peningkatan tegangan dilakukan terus hingga percontoh failure. (Vyalof, 1986)

4.5.3. Perpindahan

Selama beban diberikan, besarnya perpindahan aksial maupun diametrikal diamati dan dicatat. Pada awal pembebanan, dilakukan pencatatan setiap 5 menit, kemudian dilanjutkan dengan pencatatan setiap 1 jam.

Pencatatan perpindahan diametrikal belum pernah dilakukan. Selama ini perpindahan yang tercatat adalah perpindahan lateral dengan menggunakan dua dial gauge, yang berarti hanya mengukur perpindahan pada 2 titik tersebut. Perpindahan diametrikal mencatat perubahan keliling dari contoh pada saat dibebani. Untuk mencatat perpindahan diametrikal, contoh dilingkari dengan senar gitar yang ujungnya dihubungkan dengan dial gauge (Gambar 4.2). Senar ini akan membesar dan mengecil sesuai dengan perubahan yang terjadi pada contoh.



Gambar 4.2. Skema Pengukuran Perpindahan

Untuk mendapatkan nilai regangan aksial dan lateralnya digunakan rumus regangan sebagai berikut

Regangan aksial :

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta l}{l} \quad (4.2)$$

Regangan diametrical :

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta k}{k} = \frac{\pi(d'' - d)}{\pi d l} \quad (4.3)$$

dengan : Δl = selisih tinggi contoh awal dan akhir pengujian

l = tinggi contoh awal

Δk = selisih keliling contoh awal dan akhir pengujian

k = keliling contoh awal

d'' = diameter contoh akhir

d = diameter contoh awal

4.5.4. Prosedur pengujian

4.5.4.1. Contoh batuan

Permukaan contoh yang akan diuji harus rata dan tegak lurus. Pemasangan contoh pada alat juga harus memperhatikan kesentrisan (kelurusan) antara sumbu beban yang diberikan dan sumbu contoh.

4.5.4.2. Pengujian

Setelah contoh dipasang dan tidak bergerak lagi, atur posisi dial gauge pada posisi nol dan berikan beban konstan.

Pencatatan regangan dilakukan oleh komputer setelah beban diberikan dan diatur dengan software. Pada awal pengujian dilakukan pengambilan data setiap 5 menit (1/300 Hertz). Setelah memasuki kecepatan regangan yang relatif konstan pengambilan data dilakukan setiap 60 menit.

Hasil pencatatan akan diolah menjadi bentuk grafik regangan - waktu dan dicari persamaan rayapannya dengan pendekatan model rheologi.

4.5. 5. Data Uji Rayapan

Data hasil uji rayapan di laboratorium berupa nilai perpindahan aksial, perpindahan lateral dan waktu. Dari data tersebut, dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai regangan aksial dan lateral dengan menggunakan persamaan (4.2) dan persamaan (4.3)

Tabel 4.4. berikut ini menunjukkan pengolahan data uji rayapan untuk contoh C2, dengan tegangan 42.5 MPa.

Tabel 4.4. Data Uji Rayapan untuk Contoh C2
 (diameter = 100 mm, tinggi = 101,65 mm, tegangan 42.5 MPa)

Waktu (jam)	Regangan Aksial (10^{-4})	Regangan Lateral (10^{-4})
0.00	111.53	15.96
0.05	111.63	16.00
0.08	111.72	16.35
0.167	111.82	16.67
0.250	111.82	16.99
0.42	112.81	30.45
0.50	112.81	30.77
0.58	112.91	31.09
0.75	113.01	31.41
1.00	113.01	32.06
1.25	113.10	32.38
1.50	113.10	32.54
1.75	113.10	32.69
2.50	113.10	33.34
3.00	113.20	33.66
3.25	113.20	33.82
4.25	113.20	34.14
5.25	113.20	34.46
22.00	113.20	36.19
23.00	113.20	36.48
24.00	113.49	36.83
25.00	113.49	36.86
26.00	113.49	36.86
27.00	113.49	37.18
28.00	113.59	37.18

Lanjutan

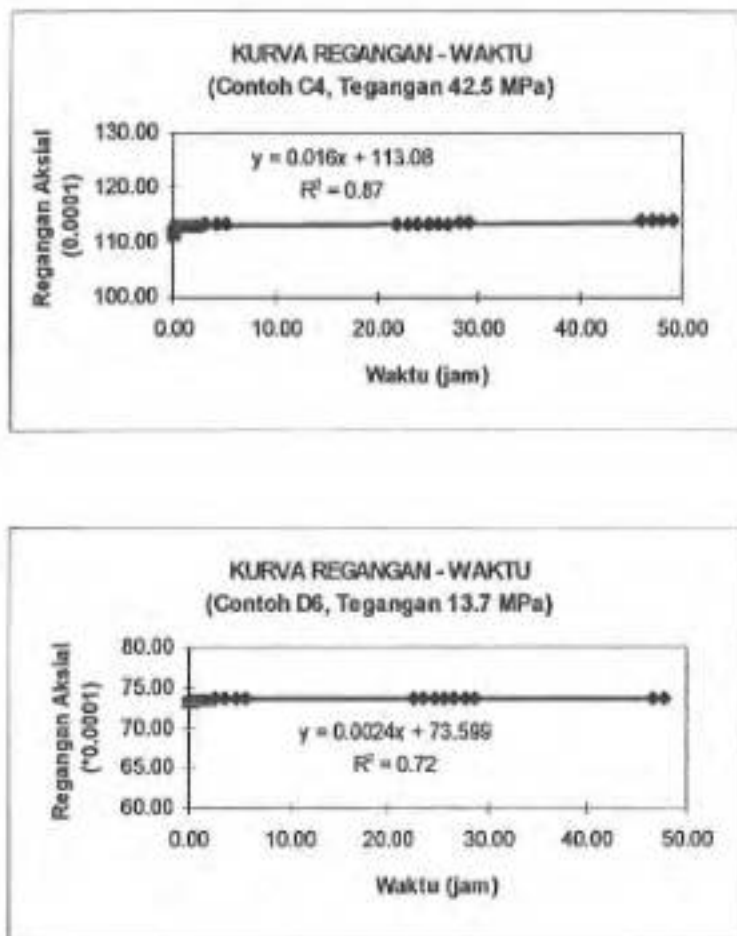
Waktu (jam)	Regangan Aksial (10^{-4})	Regangan Lateral (10^{-4})
29.00	113.59	37.25
46.00	113.89	38.47
47.00	113.89	38.63
48.00	113.89	39.11
49.00	113.89	39.11

4.5.6. Penggambaran Kurva Rayapan

Untuk mendapatkan persamaan rheologi, langkah selanjutnya dari analisis data adalah melakukan penggambaran kurva regangan aksial terhadap waktu yang didasarkan atas data yang didapatkan dari pengujian.

Gambar 4.3. menunjukkan kurva rayapan untuk contoh C4 dan D6. Untuk contoh-contoh yang lain, dapat dilihat pada Lampiran B.

Untuk contoh C4, terlihat dengan jelas proses terjadinya regangan elastik seketika yang diikuti dengan proses rayapan primer dan rayapan sekunder. Sedangkan pada contoh D6, batas antara regangan elastik dan proses rayapan primer tidak terlihat dengan jelas. Regangan elastik yang terjadi pada contoh C4 lebih besar daripada contoh D6. Sedangkan waktu terjadinya rayapan primer pada contoh D6 lebih kecil daripada contoh C4.



Gambar 4.3. Kurva Rayapan untuk Contoh C4 dan D6

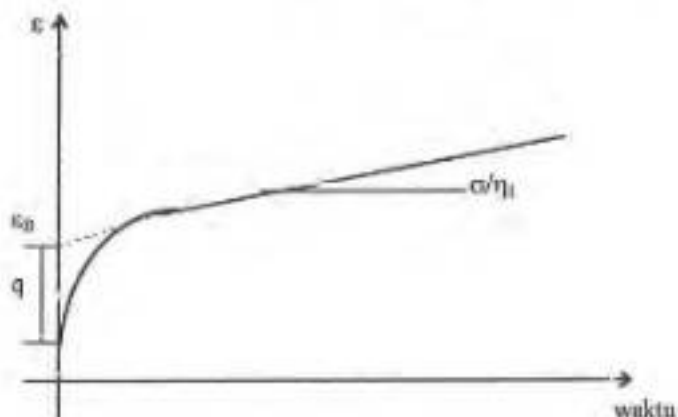
4.6. PERHITUNGAN PARAMETER RHEOLOGI

Kurva rayapan hasil pengujian memperlihatkan regangan seketika pada awal pembebanan yang diikuti rayapan primer dan sekunder, sehingga dapat disimpulkan bahwa data pengujian cenderung mengikuti model rheologi Burger (lihat di 2.4.2.2).

Persamaan rheologi tersusun dari parameter rheologinya. Model rheologi kompleks memerlukan parameter modulus elastisitas (E_1), elastisitas tertunda (E_2), laju aliran viscous (η_1) dan laju elastisitas tertunda (η_2).

4.6.1. Laju aliran viskos (η_1)

Dari kurva regangan - waktu yang terbentuk, dilakukan regresi secara linier terhadap titik-titik yang terdapat pada bagian yang membentuk suatu garis lurus (Gambar 4.4.). Regresi linier tersebut akan menghasilkan suatu persamaan untuk mendapatkan nilai laju aliran viskos.



Gambar 4.4. Penggambaran Regresi Linier pada Kurva Regangan Aksial terhadap Waktu

Persamaan regresi yang didapat adalah

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\eta_1} t + \varepsilon_B \quad (4.4)$$

Jadi besarnya laju aliran viskos adalah :

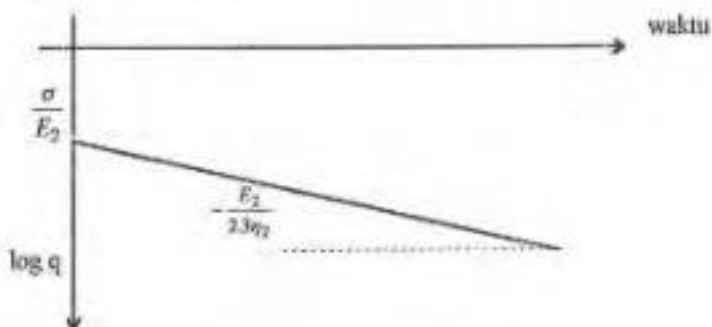
$$\eta_1 = \frac{\sigma \cdot t}{(\varepsilon - \varepsilon_B)} \quad (4.5)$$

4.6.2. Elastisitas Tertunda (E_2)

Parameter elastisitas tertunda (E_2) didapatkan dengan mencari jarak antara garis regresi dengan titik-titik yang berada pada daerah rayapan primer (q).

Jarak q ini digambarkan dalam kurva $\log q$ terhadap waktu (Gambar 4.5.).

Dari titik-titik yang terbentuk ditarik lagi suatu regresi linier, sehingga didapatkan kembali suatu persamaan.



Gambar 4.5. Kurva Log. q terhadap Waktu

Persamaan regresi yang didapat adalah :

$$\log q = \log \frac{\sigma}{E_2} - \frac{E_2}{2.3\eta_2} t \quad (4.6)$$

dengan kemiringan garis regresi $-\frac{E_2}{2.3\eta_2}$

Pada saat $t = 0$,

$$\log q = \log \frac{\sigma}{E_2} \quad (4.7)$$

sehingga besarnya nilai elastisitas tertunda (E_2) =

$$E_2 = \frac{\sigma}{10^q} \quad (4.8)$$

4.6.3. Laju elastisitas tertunda (η_2)

Besarnya laju elastisitas tertunda dihitung dengan menggunakan kemiringan garis regresi dari grafik $\log q$ terhadap waktu :

$$-\frac{E_2}{2.3\eta_2} = \frac{\log q_1 - \log q_2}{t_1 - t_2} \quad (4.9)$$

sehingga besarnya laju elastisitas tertunda (η_2) adalah :

$$\eta_2 = \frac{E_2 (t_1 - t_2)}{2.3 (\log q_1 - \log q_2)} \quad (4.10)$$

4.6.4. Modulus elastisitas (E_1)

Modulus elastisitas (E_1) didapatkan dengan menggunakan persamaan :

$$\frac{\sigma}{E_1} = \epsilon_B - \frac{\sigma}{E_2} \quad (4.11)$$

$$E_1 = \frac{\sigma}{\epsilon_B - \frac{\sigma}{E_2}} \quad (4.12)$$

4.7. HASIL PERHITUNGAN

Dengan melakukan prosedur perhitungan di atas, nilai-nilai konstanta rheologi untuk masing-masing diameter dan tingkat tegangan dapat dilihat pada tabel 4. 5

Tabel 4.5. Konstanta Persamaan Rheologi Hasil Perhitungan

Diameter sampel	Tegangan MPa	E1 MPa	E2 MPa	η_1 MPa.jam	η_2 MPa.jam
54	38.0	4.27E+03	600E+03	4710E+03	1150E+03
	47.0	3.59E+03	261E+03	5320E+03	188E+03
	54.0	3.17E+03	271E+03	6090E+03	221E+03
	56.0	3.46E+03	130E+03	930E+03	67.9E+03
70	23.5	4.51E+03	167E+03	11700E+03	745E+03
	28.0	3.87E+03	153E+03	20700E+03	90.0+03
	33.0	3.76E+03	75.4E+03	2060E+03	162E+03
	42.0	2.99E+03	16.9E+03	4770E+03	1210E+03
100	29.0	6.53E+03	643E+03	78200E+03	7490E+03
	34.0	3.26E+03	1860E+03	45000E+03	5350E+03
	39.0	4.44E+03	3080E+03	35600E+03	14100E+03
	47.0	4.63E+03	197E+03	9300E+03	17800E+03
150	8.8	2.32E+03	240E+03	29800E+03	9520E+03
	9.9	2.11E+03	691E+03	63200E+03	750E+03
	11.0	2.01E+03	1030E+03	44500E+03	10300E+03
	12.0	1.74E+03	793E+03	44600E+03	12700E+03

4.8. PERSAMAAN RHEOLOGI

Persamaan rheologi disusun dengan memasukkan konstanta-konstanta rheologi hasil perhitungan ke dalam persamaan Burger sebagai berikut :

$$\varepsilon_1(t) = \frac{\sigma_1}{E_2} + \frac{\sigma_1}{E_1} - \frac{\sigma_1}{E_1} e^{-(E_1/E_2)\eta_1 t} + \frac{\sigma_1}{\eta_2} t \quad (4.13)$$

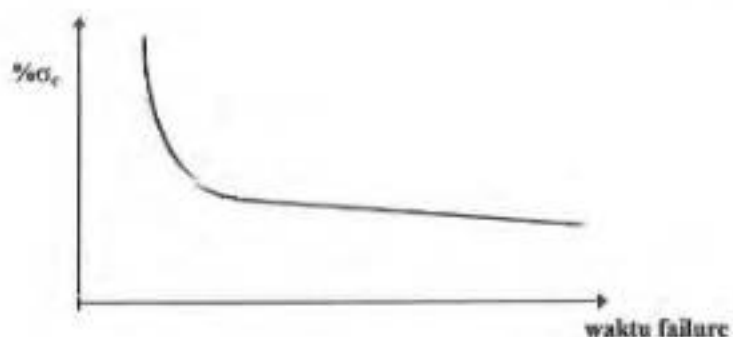
Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.6

Tabel 4.6. Persamaan Rheologi Hasil Pengujian

Diameter sampel	Tegangan MPa	Persamaan Rheologi $\varepsilon(t) = \sigma/E1 + \sigma/E2 - \sigma/E2 * e^{-(E2*\eta/2)} + \sigma.\eta/\eta1$
54 mm	38	$\varepsilon(t) = 8.90E-03 + 6.33E-05(1 - e^{-(5.22E-01*t)}) + 80.7E-07t$
	47	$\varepsilon(t) = 13.1E-03 + 18.0E-05(1 - e^{-(15.7E-01*t)}) + 88.3E-07t$
	54	$\varepsilon(t) = 17.0E-03 + 19.8E-05(1 - e^{-(12.3E-01*t)}) + 89.7E-07t$
	56	$\varepsilon(t) = 18.2E-03 + 43.1E-05(1 - e^{-(19.1E-01*t)}) + 602E-07t$
70 mm	23.5	$\varepsilon(t) = 5.21E-03 + 14.1E-05(1 - e^{-(2.24E-01*t)}) + 20.1E-07t$
	28	$\varepsilon(t) = 7.24E-03 + 18.3E-05(1 - e^{-(17.0E-01*t)}) + 13.5E-07t$
	33	$\varepsilon(t) = 8.76E-03 + 43.8E-05(1 - e^{-(4.56E-01*t)}) + 160E-07t$
	42	$\varepsilon(t) = 14.0E-03 + 249E-05(1 - e^{-(0.14E-01*t)}) + 88.1E-07t$
100 mm	29	$\varepsilon(t) = 4.44E-03 + 3.44E-05(1 - e^{-(1.13E-01*t)}) + 3.71E-07t$
	34	$\varepsilon(t) = 10.4E-03 + 1.83E-05(1 - e^{-(3.48E-01*t)}) + 7.56E-07t$
	39	$\varepsilon(t) = 8.78E-03 + 1.27E-05(1 - e^{-(2.18E-01*t)}) + 11.0E-07t$
	47	$\varepsilon(t) = 10.2E-03 + 23.9E-05(1 - e^{-(0.11E-01*t)}) + 50.5E-07t$
150 mm	8.8	$\varepsilon(t) = 3.79E-03 + 3.67E-05(1 - e^{-(0.25E-01*t)}) + 2.95E-07t$
	9.9	$\varepsilon(t) = 4.69E-03 + 1.43E-05(1 - e^{-(9.21E-01*t)}) + 1.57E-07t$
	11.0	$\varepsilon(t) = 5.47E-03 + 1.07E-05(1 - e^{-(1.0E-01*t)}) + 2.47E-07t$
	12.0	$\varepsilon(t) = 6.90E-03 + 1.51E-05(1 - e^{-(0.624E-01*t)}) + 2.69E-07t$

4.9. PENENTUAN KUAT TEKAN JANGKA PANJANG

Kuat tekan jangka panjang didapatkan dengan melakukan penggambaran nilai tingkat tegangan terhadap waktu failurennya (Gambar 4.6)



Gambar 4.6. Kurva Tingkat Tegangan terhadap Waktu Failure

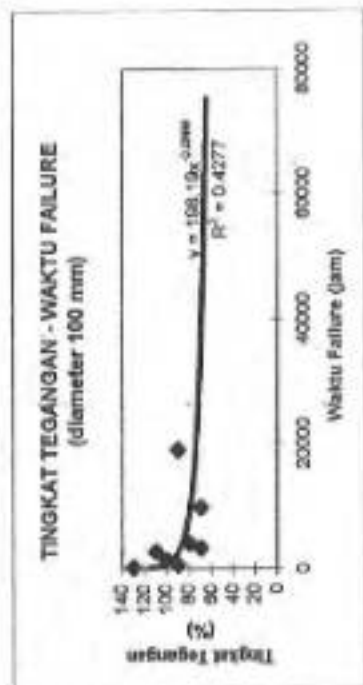
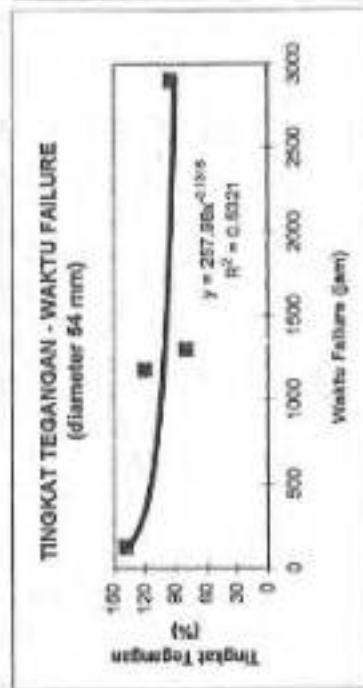
Bagian kurva di mana mulai terjadi pembelokan ditentukan sebagai nilai kuat tekan jangka panjang.

Gambar 4.7. menunjukkan kurva tingkat tegangan terhadap waktu failure. Besarnya kuat tekan jangka panjang untuk masing-masing diameter contoh dapat dilihat pada Tabel 4.7

Tabel 4.7 Nilai Kuat Tekan Jangka Panjang untuk Masing-masing Diameter Contoh

Contoh	Diameter (mm)	% σ_c
A	54	100 *
B	70	95
C	100	85
D	150	80

* Penjelasan mengenai kuat tekan jangka panjang hingga 100 % ada pada Sub Bab. 6.4.





BAB V

PERMODELAN UJI RAYAPAN

Permodelan dilakukan dengan menggunakan paket program Rheostaub yang berasal dari Department of Rock Engineering, Federal Institute of Technology, Zurich Swiss. Program ini menggunakan metoda elemen hingga (finite element).

Tujuan permodelan ini adalah memberikan gambaran mengenai distribusi tegangan dan arah perpindahan dalam contoh batubara silicified yang ditekan dengan beban tertentu. Perpindahan yang dihasilkan dari permodelan akan dibandingkan dengan perpindahan hasil pengujian laboratorium dan hasil perhitungan dengan persamaan Burger.

Tahapan-tahapan permodelan dapat dilihat pada Gambar 5.1.

5.1. DATA MASUKAN

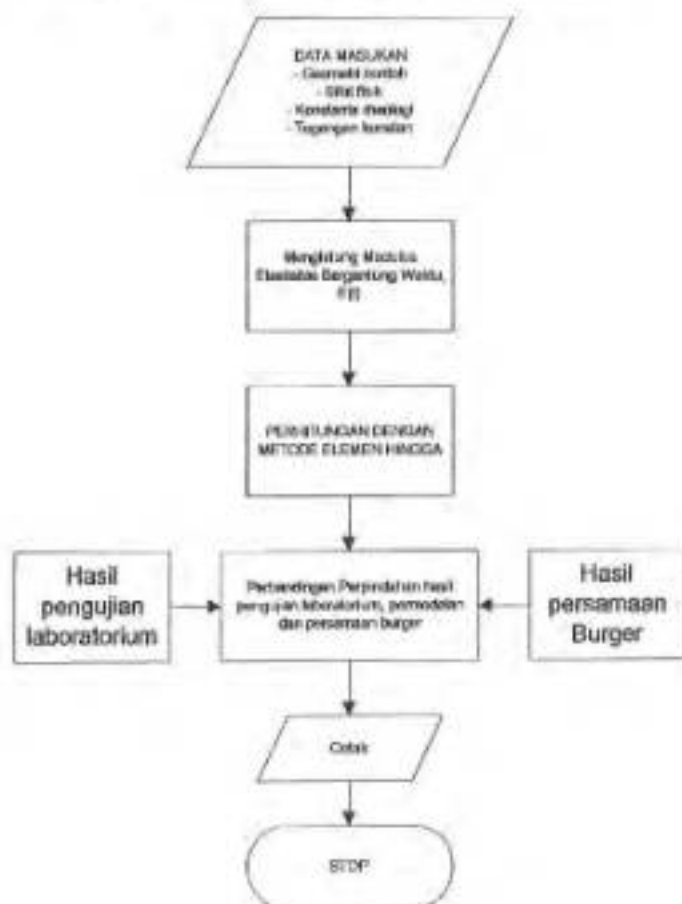
5.1.1. Geometri contoh

Geometri model mengikuti geometri contoh batubara di laboratorium, yaitu contoh C12 yang mempunyai diameter 99,35 mm dan tinggi 101,5 mm. Jumlah node (titik simpul) yang digunakan adalah 221 dengan 400 elemen.

Penggambaran dan penomoran mesh dan elemen yang dihasilkan dari permodelan dapat dilihat pada Gambar 5.2 dan Gambar 5.3.

5.1.2. Sifat Fisik

Yang menjadi masukan untuk sifat fisik dalam permodelan adalah berat jenis. Berat jenis hasil dari uji laboratorium adalah sebesar 1.96



Gambar 5.1. Bagan Alir Permodelan Uji Rayapan

5.1.3. Modulus Elastisitas Bergantung Waktu $E(t)$

Analisis dari uji rayapan di laboratorium menunjukkan bahwa contoh *sulfified coal* mengikuti model rheologi Burger dan berperilaku viskoelastik.

Konstanta-konstanta persamaan Burger yang didapatkan dari perhitungan digunakan untuk menghitung modulus elastisitas bergantung waktu $E(t)$ yang akan digunakan sebagai masukan dalam perhitungan regangan pada waktu tertentu (t jam).

Rumusan untuk menghitung modulus elastisitas bergantung waktu, $E(t)$ diturunkan dari persamaan Burger adalah sebagai berikut :

$$\frac{\sigma_1}{E(t)} = \frac{\sigma_1}{E_2} + \frac{\sigma_1}{E_1} - \frac{\sigma_1}{E_1} e^{-(E_1 t / \eta_1)} + \frac{\sigma_1}{\eta_2} t \quad (5.1)$$

$$E(t) = \frac{E_1 E_2 \eta_2}{E_1 \eta_2 + E_2 \eta_2 - E_2 \eta_2 e^{-\frac{E_1 t}{\eta_1}} + E_1 E_2 t} \quad (5.2)$$

Modulus elastisitas bergantung waktu yang akan dicari adalah sesuai dengan waktu pengamatan di laboratorium.

Pada model ini akan dicari nilai $E(t)$ pada waktu 0 jam, 15 menit, 0.5 jam, 1 jam, 5 jam, 24 jam, dan 48 jam. Tabel 5.1. menunjukkan nilai $E(t)$ untuk waktu-waktu tersebut :

Tabel 5.1. Nilai $E(t)$ untuk 0 jam, 15 menit, 0,5 jam, 1 jam, 5 jam, 24 jam dan 48 jam

t jam	E (t) MPa
0	3817.682
0.25	3816.863
0.5	3815.256
1	3812.909
5	3795.777
24	3755.606
48	3734.336

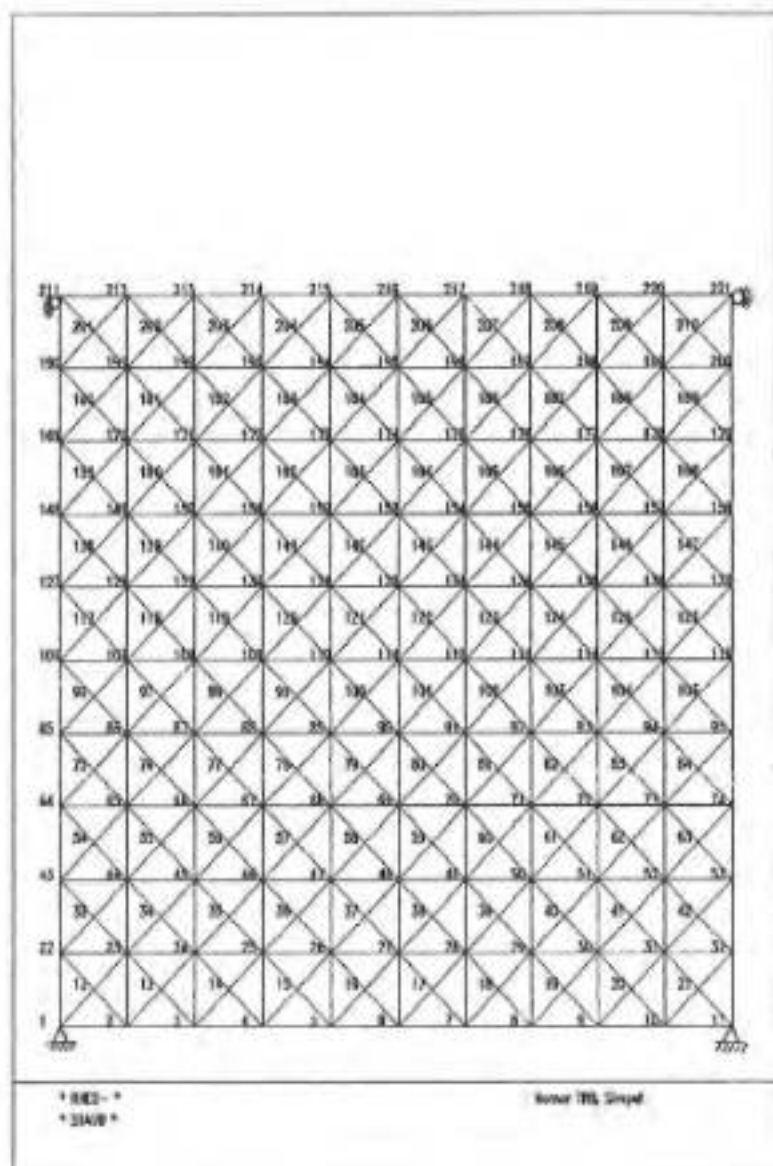
5.2. KONDISI BATAS

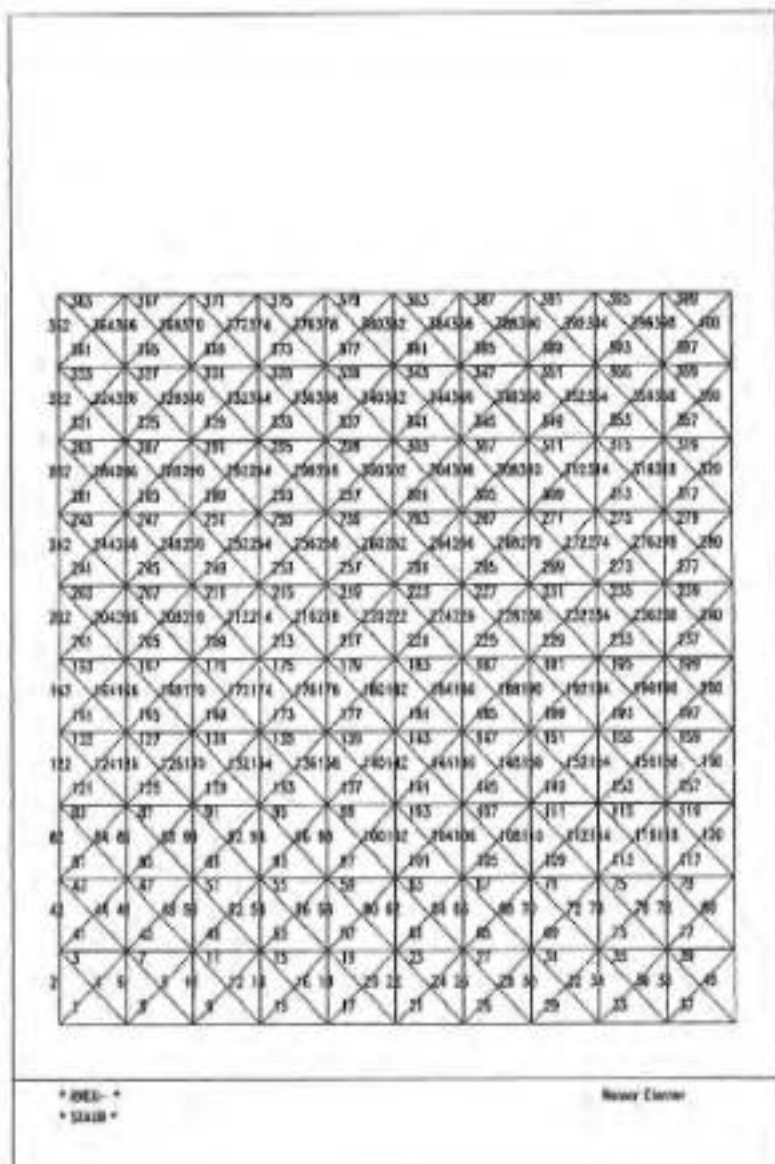
5.2.1. Pembebanan

Pemberian tegangan pada model sama dengan pada uji laboratorium. Dalam hal ini adalah sebesar 42,5 MPa (80 % σ_c) dengan kondisi pembebanan secara uniaksial.

5.2.2. Kondisi Batas

1. Bagian atas contoh model tidak terjadi perpindahan arah horisontal.
2. Bagian bawah contoh tidak terjadi perpindahan dalam arah horisontal dan vertikal.





Gambar 5.3. Penggambaran dan Penomoran Elemen

5.3. HASIL PERMODELAN

5.3.1. Regangan

Tabel 5.2. menunjukkan regangan hasil perhitungan permodelan dan laboratorium.

Tabel 5.2. Regangan Hasil Uji Laboratorium dan Permodelan

Waktu (jam)	Regangan Aksial (0.001)			
	Laboratorium	Persamaan Burger	Permodelan	Koreksi Permodelan
0	11.153	11.132	10.729	10.707
0.25	11.182	11.136	10.731	10.735
0.5	11.281	11.139	10.736	10.829
1	11.301	11.146	10.743	10.849
5	11.320	11.197	10.791	10.867
24	11.349	11.316	10.906	10.896
48	11.389	11.381	10.969	10.934

5.3.2. Distribusi Tegangan

Dari hasil permodelan (Gambar 5.4.) dapat dilihat bahwa pada $t = 0$ tegangan terbesar terkonsentrasi di sekitar kondisi batas, dengan arah tegangan prinsipalnya searah pembebanan. Sedangkan pada $t = 48$ jam (Gambar 5.5.) konsentrasi dan arah tegangan prinsipal tidak mengalami perubahan.

Kontur tegangan pada $t = 0$ (Gambar 5.6.) dan $t = 48$ jam (Gambar 5.7.) tidak menunjukkan adanya perbedaan. Hal ini disebabkan perbedaan

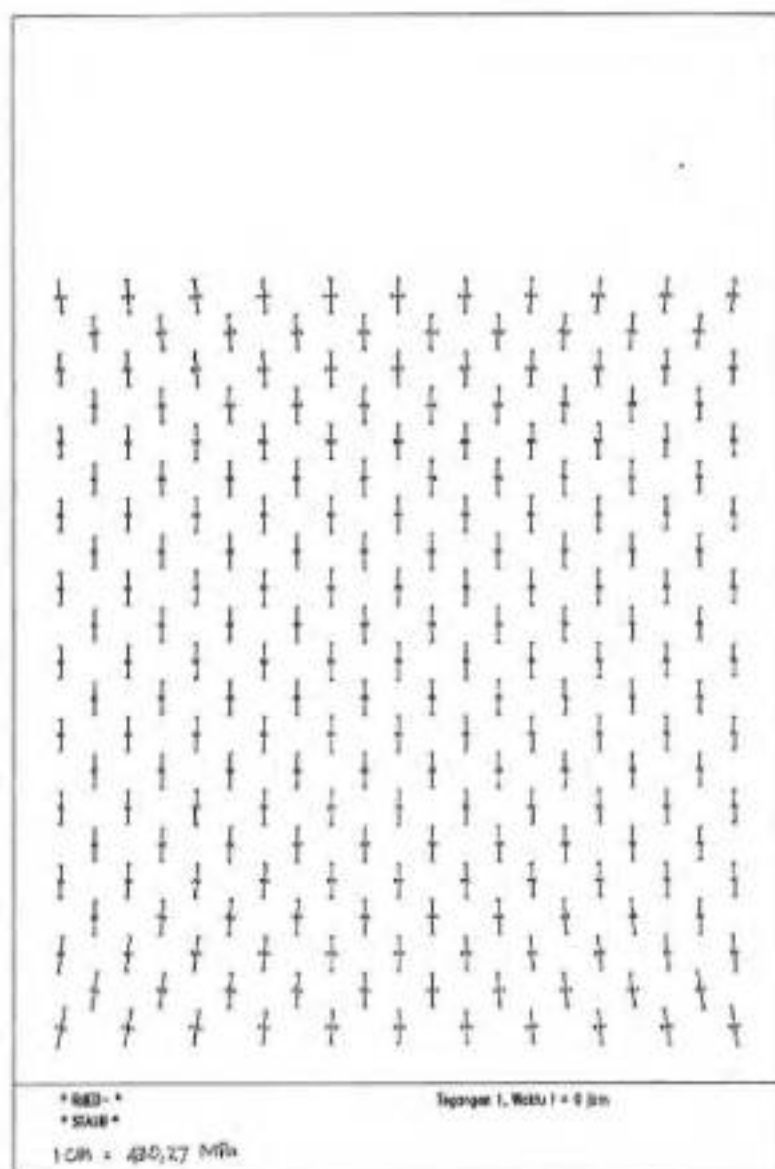
tegangan hasil permodelan untuk $t = 0$ jam dan $t = 48$ jam hanya mengalami sedikit perubahan nilai tegangan pada elemen-elemen yang sama, yang nilainya berkisar antara 0,0001 - 0,0002 MPa. Secara umum, dapat dikatakan bahwa perbedaan nilai tegangan pada $t = 0$ jam dan $t = 48$ jam tidak signifikan.

5.3.3. Distribusi Perpindahan

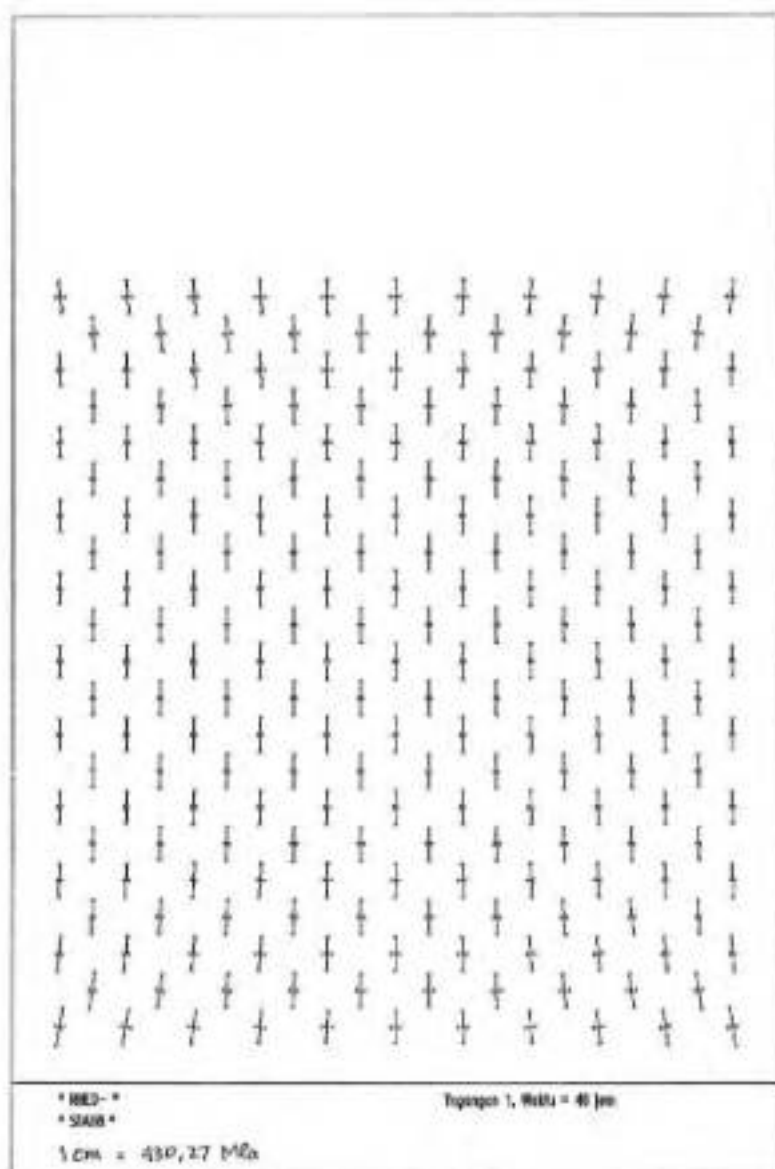
Vektor perpindahan yang dihasilkan pada awal pembebanan dan selama pembebanan 2 hari (48 jam) dapat dilihat pada Gambar 5.8. dan Gambar 5.9. Terlihat bahwa perpindahan maksimum terjadi pada daerah di tengah contoh, yaitu pada titik simpul 216, yang makin mengecil ke arah kanan kirinya.

Karena kondisi batas pada titik simpul 1 - 11 tidak terjadi perubahan ke arah vertikal dan horisontal, maka perpindahan yang terjadi pada titik simpul 1 - 11 adalah 0.

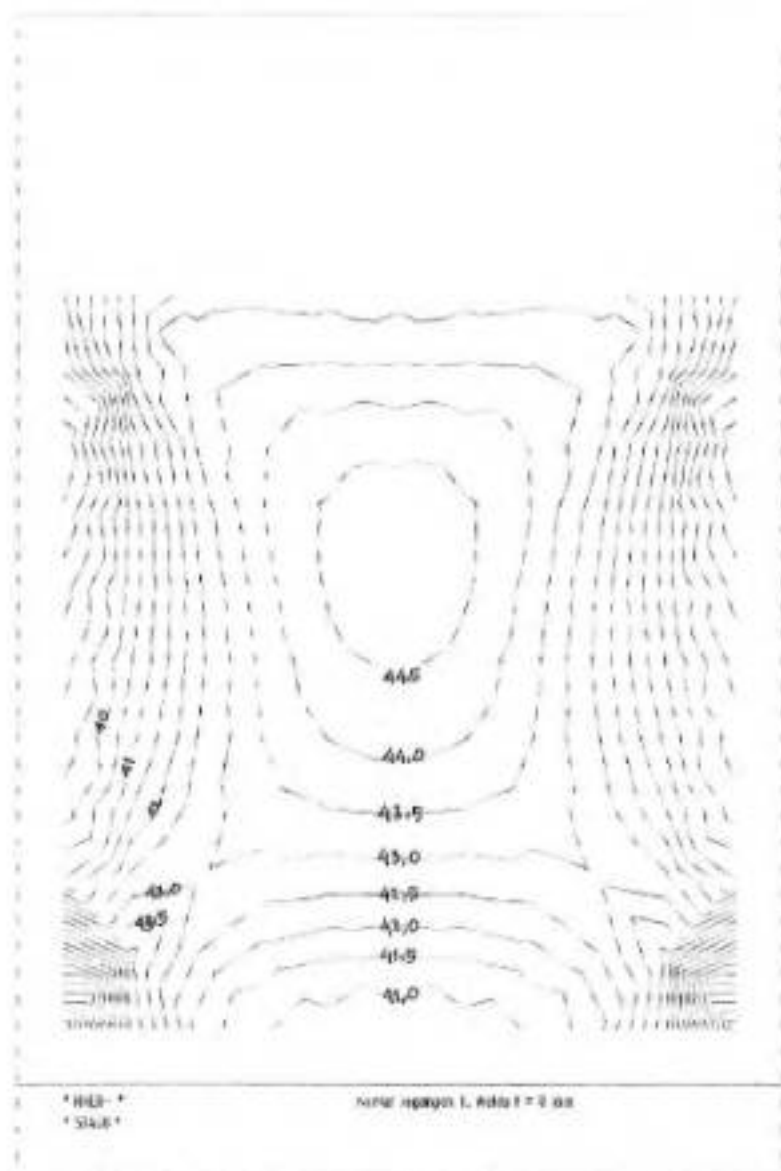
Besarnya perpindahan maksimum untuk permodelan pada $t = 0$ adalah 0.00109 m dan pada $t = 48$ jam adalah 0.00111 m.



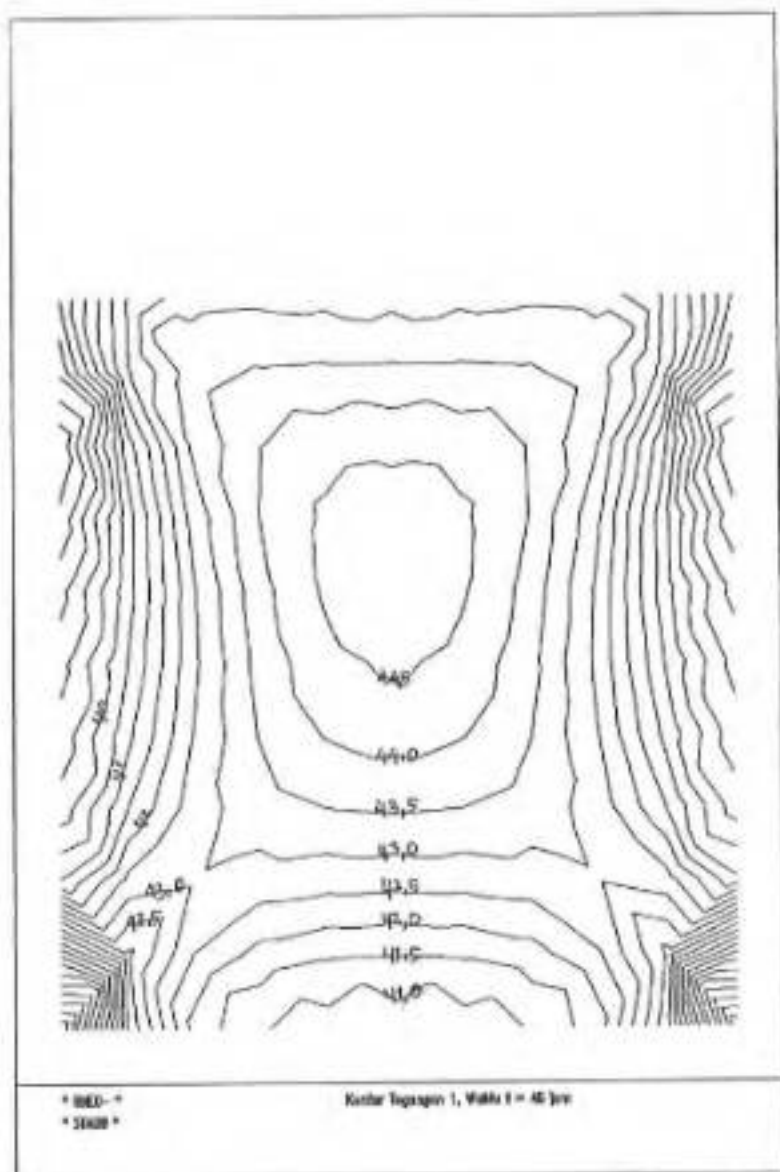
Gambar 5.4. Distribusi Tegangan pada Contoh untuk $t = 0$ jam



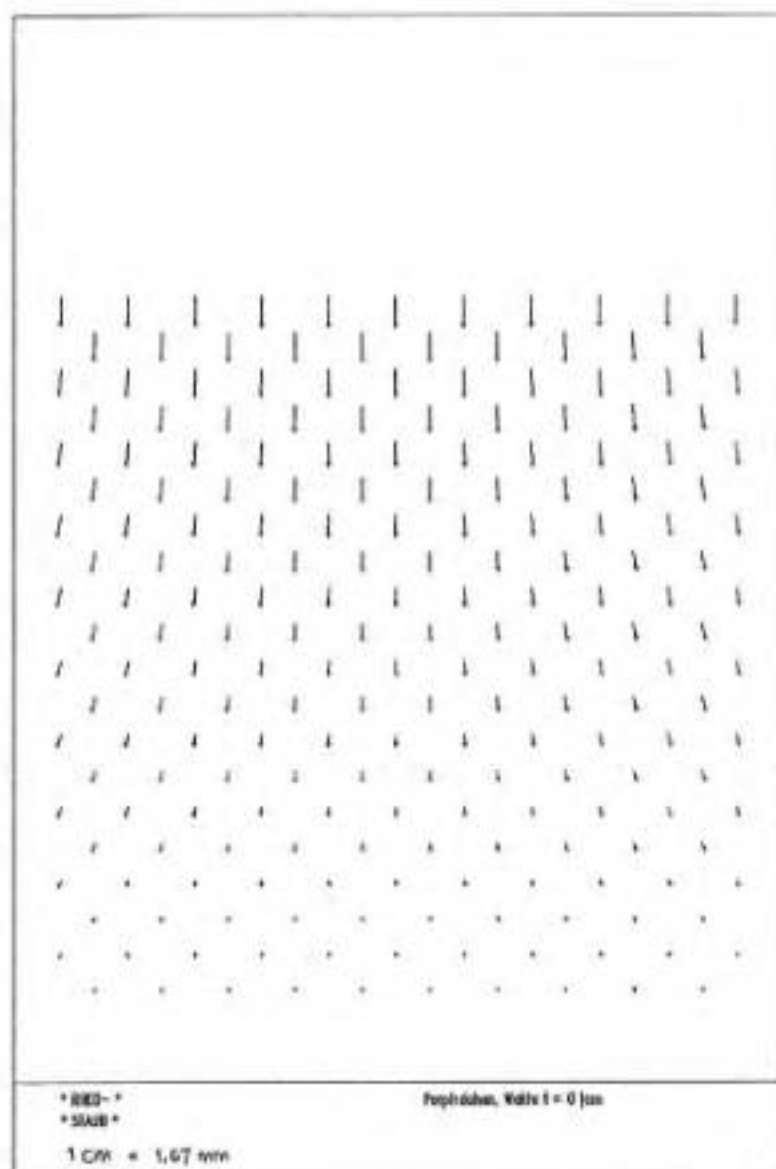
Gambar 5.5. Distribusi Tegangan pada Contoh untuk $t = 48$ jam



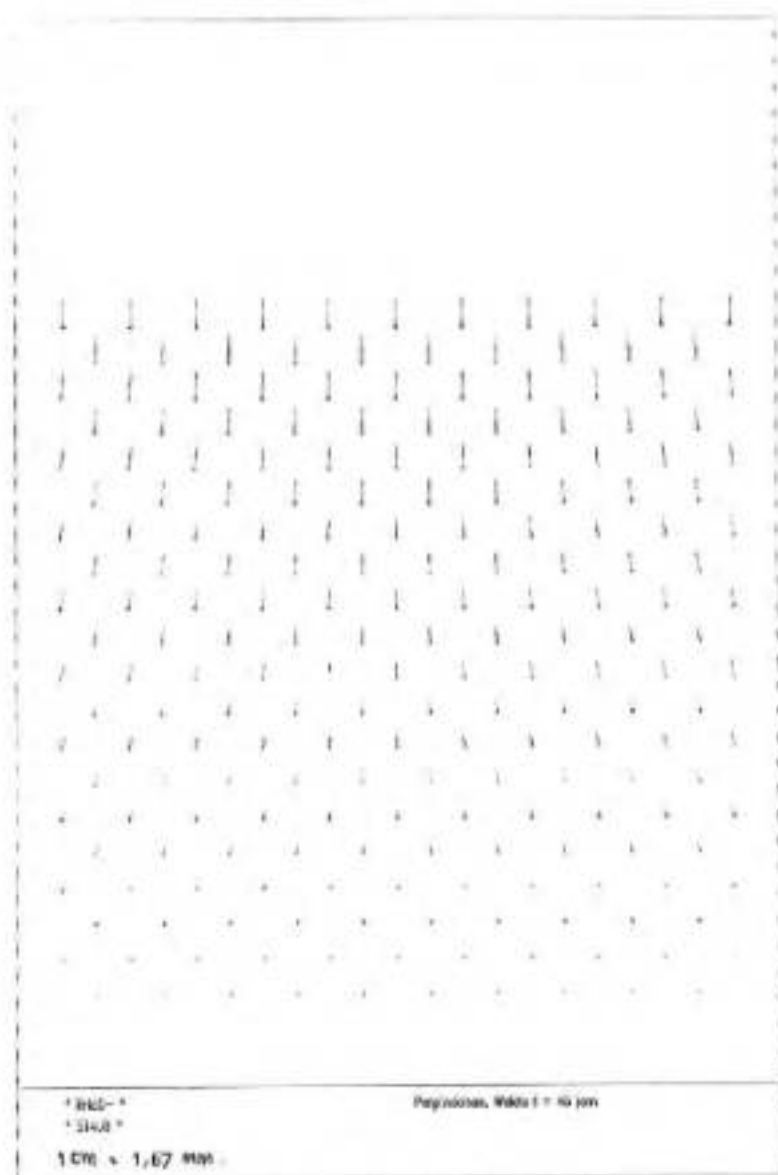
Gambar 5.6. Kontur Tegangan pada Contoh untuk $t = 0$ jam



Gambar 5.7. Kontur Tegangan pada Contoh untuk $t = 48$ jam



Gambar 5.8. Distribusi Perpindahan pada Contoh untuk $t = 0$ jam



Gambar 5.9. Distribusi Perpindahan pada Contoh untuk $t = 48$ jam



BAB VI

PEMBAHASAN

6.1. KUAT TEKAN UNIAKSIAL

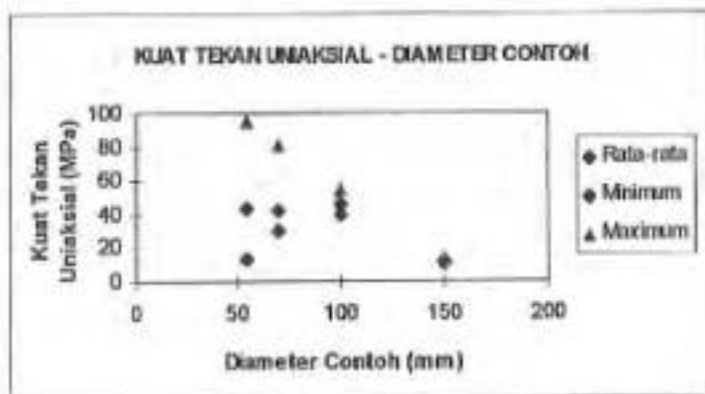
Nilai kuat tekan uniaksial suatu batuan digunakan sebagai dasar dalam menentukan tegangan yang akan diberikan dalam pengujian uniaksial.

Pengambilan contoh untuk uji kuat tekan uniaksial dilakukan secara acak. Karena jumlah contoh yang sangat terbatas, maka banyaknya contoh yang diuji tidak memenuhi kriteria jumlah contoh secara statistik. Hasil Pengujian kuat tekan uniaksial juga memberikan selang nilai kuat tekan yang sangat besar (Tabel 6.1). Terlihat bahwa semakin kecil diameter contoh, selang kuat tekan uniaksialnya semakin besar. Hal ini terjadi karena semakin kecil diameternya, keberadaan bidang diskontinu semakin bervariasi (ada contoh dengan bidang diskontinu sedikit, banyak, bahkan tidak mengandung bidang diskontinu). Jadi semakin besar diameter contoh, keberadaan bidang diskontinu dalam contoh lebih seragam.

Tabel 6.1. Jumlah Contoh Batubara Silicified dan Selang Kuat Tekan Uniaksial Hasil Pengujian

Contoh	Diameter (mm)	Jumlah Contoh	Selang Kuat Tekan Uniaksial (MPa)
A	54	5	13,42 - 94,88
B	70	3	29,70 - 80,70
C	100	3	39,81 - 53,93
D	150	2	10,47 - 13,23

Dari pengujian kuat tekan uniaksial yang telah dilakukan, dapat dilihat nilai kuat tekan uniaksial rata-rata untuk masing-masing kelompok diameter (lihat Tabel 3.2), yang secara grafis dapat dilihat dalam Gambar 6.1. Terlihat kecenderungan bahwa semakin besar diameter contoh, maka semakin kecil nilai kuat tekan uniaksialnya. Hal ini dikarenakan semakin besar ukuran contoh, akan semakin banyak terkandung bidang-bidang diskontinu, yang mempengaruhi kekuatan batuan



Gambar 6.1. Kurva Kuat Tekan Uniaksial terhadap Diameter Contoh

Satu anomali terlihat pada contoh dengan diameter 100 mm. Seharusnya nilai kuat tekannya lebih kecil dibandingkan contoh berdiameter 70 mm, tetapi pada kenyataannya nilai kuat tekannya lebih besar. Kejadian ini mungkin dapat disebabkan oleh beberapa hal :

1. Contoh berdiameter 100 mm dan 70 mm diambil dari lokasi berbeda.
2. Contoh berdiameter 100 mm lebih homogen dari contoh berdiameter 70 mm.

3. Pengamatan secara visual menunjukkan bahwa contoh dengan diameter 100 mm mengandung bidang diskontinu yang jauh lebih sedikit dibandingkan contoh lainnya.

6.2. PENGUJIAN RAYAPAN

Pengujian rayapan dapat dilakukan dengan 2 cara, yaitu dengan beban konstan (ASTM) dan beban bertahap (Vyakof, 1986). Pengujian dengan beban konstan membutuhkan jumlah contoh yang banyak, tetapi pengujiannya tidak terpengaruh oleh pembebanan sebelumnya. Sedangkan pengujian dengan beban bertahap dapat menghemat jumlah contoh, tapi hasilnya dapat dipengaruhi oleh pembebanan sebelumnya.

Perbandingan hasil kedua pengujian tersebut dapat dilihat pada Tabel 6.2. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa konstanta-konstanta rheologi hasil pengujian beban bertahap dan beban konstan menunjukkan adanya perbedaan, walaupun pada E_1 , E_2 , dan η_1 tidak signifikan. Perbedaan tersebut dapat disebabkan oleh beberapa hal yaitu adanya pengaruh beban sebelumnya pada pengujian beban bertahap dan sangat bervariasinya contoh yang digunakan.

Tabel 6.2. Perbandingan Hasil Pengujian Beban Bertahap dan Beban Konstan Contoh B Berdiameter 70 mm dan Tingkat Tegangan 100%

Pengujian	E_1 10^3 (MPa)	E_2 10^3 (MPa)	η_1 10^3 (MPa.jam)	η_2 10^3 (MPa.jam)
Bertahap	3.30 - 5.35	19.0 - 68.1	11900 - 191000	26.5 - 60.4
Konstan	6.14	18.9	122000	8.26

Penelitian ini membutuhkan jumlah contoh yang banyak, sedangkan dalam kenyataannya contoh yang ada sangat terbatas. Oleh karena itu, dengan mempertimbangkan hasil pengujian beban bertahap dan beban konstan di atas, maka dalam penelitian ini pengujian dilakukan dengan menggunakan beban bertahap.

6.3. PERSAMAAN RAYAPAN

Dari data yang didapatkan dari uji rayapan dapat dinyatakan suatu persamaan rheologi tertentu yang menyatakan hubungan antara regangan, tegangan dan waktu. Persamaan rayapan contoh batubara silicified diperoleh dengan menggambarkan kurva antara regangan aksial terhadap waktu. Kurva yang terbentuk menunjukkan adanya suatu regangan seketika yang diikuti dengan rayapan primer dan rayapan sekunder. Dapat dikatakan kurva tersebut cenderung mengikuti model Burger.

Pada contoh batubara silicified yang diuji, rayapan primer terjadi dalam waktu yang sangat singkat (10 menit - 2,5 jam). Dalam hal ini faktor bervariasinya contoh yang digunakan dan besarnya tingkat tegangan yang diberikan sangat berperan.

Model Burger terdiri atas material Maxwell dan Kelvin yang tersusun secara seri. Dari elemen-elemen penyusun model tersebut, dapat dikatakan bahwa perilaku dari contoh batubara silicified yang diuji adalah viskoelastik (lihat Gambar 2.9)

Kurva rayapan yang terbentuk dapat dianalisis dengan menggunakan persamaan empiris dan persamaan rheologi. Persamaan empiris hanya menggambarkan tahapan regangan seketika dan rayapan primer.

Sedangkan persamaan rheologi dapat digunakan hingga rayapan sekunder dan memberikan nilai modulus dan viskositas. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, kurva rayapan yang terbentuk dianalisis dengan persamaan rheologi.

Diharapkan dengan diketahuinya persamaan rheologi dan konstanta-konstanta pembentuk persamaan tersebut maka akan dapat digunakan untuk memprediksi regangan selama waktu tertentu.

Pengujian rayapan yang dilakukan dengan beban bertahap terhadap 12 contoh batubara silicified menghasilkan konstanta penyusun persamaan rheologi untuk masing-masing kelompok diameter (Tabel 6.3.)

Tabel 6.3. Konstanta Persamaan Rheologi

Diameter (mm)	Variasi Tegangan (MPa)	E_1 10^3 (MPa)	E_2 10^3 (MPa)	η_1 10^3 (MPa.jam)	η_2 10^3 (MPa.jam)
54	38.4 - 50.3	3.17 - 4.27	130 - 600	930 - 6090	67.9 - 1150
70	25.0 - 41.8	2.96 - 5.35	16.3 - 372	2000 - 42900	26.5 - 1210
100	29.7 - 55.6	2.91 - 12.5	197 - 4590	9300 - 223000	178 - 212000
150	9.9 - 16.9	1.52 - 2.82	151 - 1500	2000 - 110000	761 - 32700

Tabel 6.3. di atas menunjukkan range nilai konstanta rheologi yang sangat besar. Hal ini disebabkan contoh sangat heterogen, baik keberadaan bidang diskontinyu yang sangat berbeda, maupun komposisi pengotor dan batubaranya.

6.4. PENENTUAN KUAT TEKAN JANGKA PANJANG

Secara teoritis, besarnya kuat tekan jangka panjang harus lebih kecil dari nilai kuat tekan uniaksialnya. Dalam penelitian ini ditemukan nilai kuat tekan jangka panjang yang melebihi atau sama dengan kuat tekan uniaksialnya (tingkat tegangan 100 %). Penjelasan mengenai hal ini sangat berhubungan dengan sangat bervariasinya contoh batubara silicified yang diuji.

Pemilihan contoh untuk pengujian kuat tekan uniaksial dan pengujian rayapan diambil secara acak. Ada kemungkinan, kondisi contoh yang digunakan untuk uji kuat tekan uniaksial mempunyai bidang diskontinu yang lebih banyak daripada contoh untuk uji rayapan. Atau dapat dikatakan bahwa contoh untuk uji kuat tekan uniaksial mempunyai nilai kuat tekan uniaksial yang lebih kecil dibandingkan contoh untuk uji rayapan. Dengan demikian, standar nilai kuat tekan uniaksial yang digunakan untuk menentukan tingkat tegangan dalam uji rayapan jauh lebih kecil dari kuat tekan contoh itu sendiri. Sehingga, nilai kuat tekan jangka panjangnya dapat melampaui nilai kuat tekan uniaksialnya.

6.5. HUBUNGAN TINGKAT TEGANGAN DAN WAKTU FAILURE

Kajian teoritis menyatakan bahwa semakin besar tingkat tegangan yang diterima oleh suatu material, semakin kecil waktu *failure*-nya. Dari persamaan rheologi yang tersusun dan regangan *failure* tertentu, dapat dijelaskan hubungan antara waktu failure dan tingkat tegangan.

Gambar 4.7 menunjukkan kurva antara tingkat tegangan terhadap waktu *failure* untuk masing-masing diameter. Secara garis besar, kurva-kurva pada tersebut menunjukkan kecenderungan yang sama, yaitu berkurangnya waktu *failure* dengan semakin besarnya tingkat tegangan yang diberikan. Adanya nilai-nilai yang berlawanan dengan teori dapat disebabkan oleh sangat heterogennya contoh-contoh yang diuji dan adanya kesalahan-kesalahan saat preparasi dan pengujian.

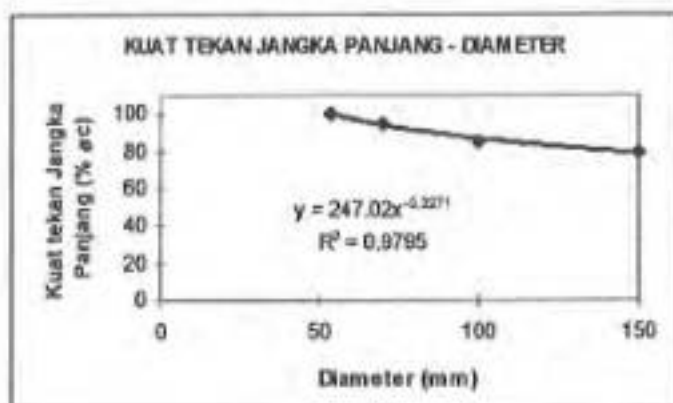
Persamaan regresi dari Gambar 4.7. tersebut dapat digunakan untuk menentukan waktu *failure* dari suatu contoh berdiameter tertentu yang dibebani dengan tegangan tertentu.

6.6. HUBUNGAN KUAT TEKAN JANGKA PANJANG DAN DIAMETER

Dari kurva tingkat tegangan dan waktu *failure*, didapatkan nilai kuat tekan jangka panjang (σ_{∞}) untuk masing-masing diameter (Gambar 4.7).

Gambar 6.2. menunjukkan hubungan kuat tekan jangka panjang dan diameter contoh yang didapatkan dengan membuat kurva antara kuat tekan jangka panjang terhadap diameter contoh. Kurva tersebut memberikan gambaran bahwa semakin besar diameter contoh, maka akan semakin kecil kuat tekan jangka panjangnya, yang dihubungkan oleh suatu persamaan tertentu.

Dalam penerapannya, kurva-kurva tersebut dapat digunakan untuk menentukan diameter pilar untuk tingkat tegangan tertentu.



Gambar 6.2. Kurva Kuat Tekan Jangka Panjang terhadap Diameter Contoh

6.7. HUBUNGAN KONSTANTA RHEOLOGI DAN TINGKAT TEGANGAN

Konstanta-konstanta penyusun persamaan rheologi dicoba untuk digambarkan dalam bentuk kurva tingkat tegangan terhadap konstanta rheologi. Gambar 6.3 merupakan kurva yang menghubungkan konstanta rheologi dan tingkat tegangan untuk diameter 54 mm. Garis regresi dalam *power law* menyatakan hubungan antara konstanta rheologi terhadap besarnya tingkat tegangan dengan nilai R^2 (koefisien determinasi) untuk masing-masing konstanta.

Menurut Locker (1973), persamaan regresi linier atau non linier akan memberikan informasi penting, tetapi yang lebih penting dalam suatu perhitungan statistik adalah menentukan derajat asosiasi di antara variabel yang disebut koefisien determinasi atau R^2 . Nilai R^2 ini sering dijadikan

indikator dari derajat asosiasi dengan klasifikasi untuk geometrials seperti pada Tabel 6.4.

Tabel 6.4. Klasifikasi Hubungan Koefisien Determinasi dengan Derajat Asosiasi (Locker, 1973)

R	R^2	Derajat Asosiasi
0.35	0.13	Rendah
0.50	0.25	Sedang
0.71	0.50	Tinggi
1.00	1.00	

Besarnya nilai R^2 yang menghubungkan masing-masing konstanta terhadap tingkat tegangan untuk diameter 54 mm dapat dilihat dalam Tabel 6.5.

Tabel 6.5. Nilai R^2 dan Derajat Asosiasi antara Konstanta Rheologi dan Tingkat Tegangan untuk Contoh Berdiameter 54 mm

Konstanta Rheologi	R^2	Derajat Asosiasi
E_1	0.825	Tinggi
E_2	0.876	Tinggi
η_1	0.229	Rendah
η_2	0.894	Tinggi

Tabel 6.5. menunjukkan hampir semua konstanta rheologi (selain η_1) mempunyai derajat asosiasi yang tinggi. Ini berarti bahwa nilai konstanta rheologi sebagian besar dipengaruhi oleh tingkat tegangan.

Hasil pengujian menunjukkan suatu kecenderungan semakin tinggi tingkat tegangan yang diberikan, semakin kecil nilai konstanta rheologinya.

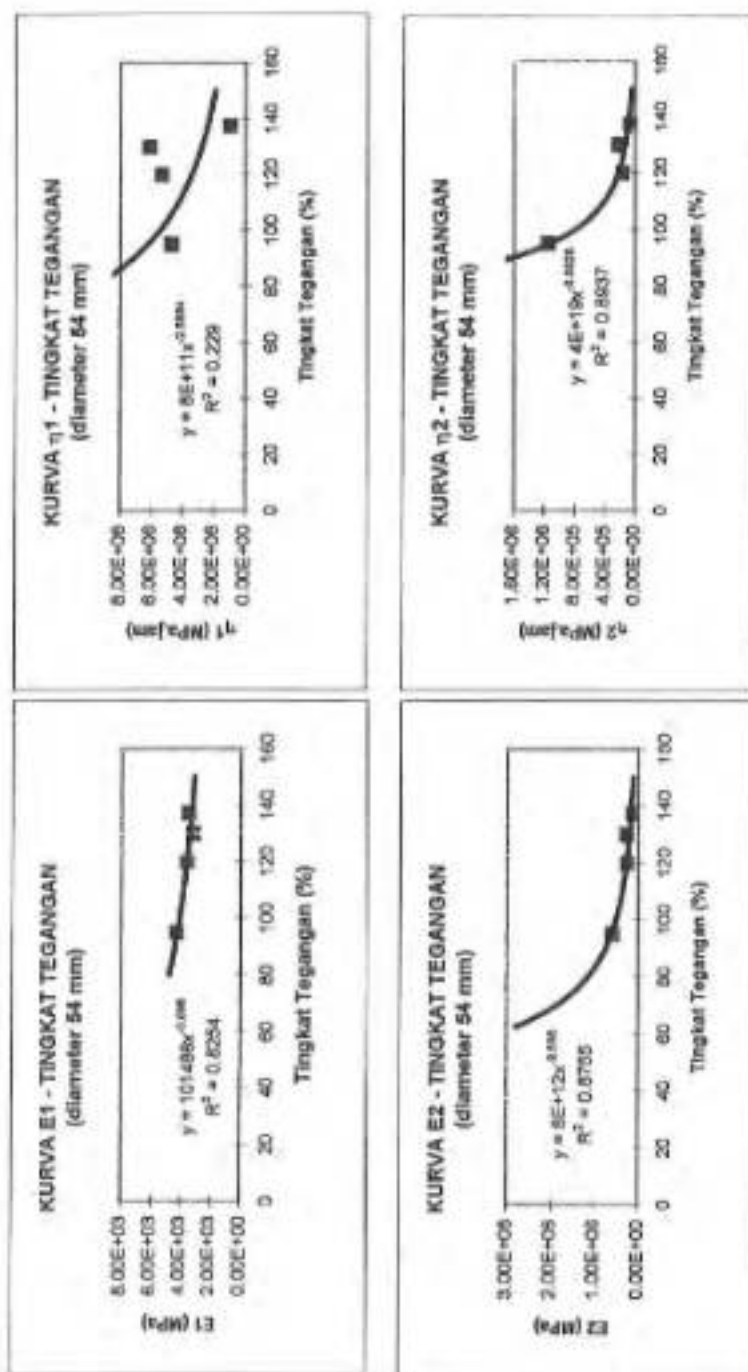
6.8. ANALISIS DIMENSI CONTOH DAN PILAR

Penelitian di laboratorium menghasilkan variabel-variabel yang dapat digunakan untuk analisis dimensi. Analisis dimensi ini bertujuan untuk menerapkan data yang diperoleh di laboratorium pada keadaan sebenarnya dengan memperhitungkan faktor skala. Oleh karena itu, variabel-variabel yang akan dianalisis harus berdasarkan variabel yang diperoleh dari hasil penelitian di laboratorium.

Variabel yang akan dianalisis ada $n = 10$ buah seperti yang tercantum pada Tabel 6.6. Variabel-variabel ini diperoleh dari hasil penelitian di laboratorium, antara lain dari kondisi fisik contoh diambil variabel luas permukaan (A) dan tinggi contoh (h), dari sifat fisiknya digunakan bobot isinya (γ), dari sifat mekaniknya diambil nilai kuat tekan uniaksial (σ_c), dari perilaku bergantung waktunya dapat diperoleh kuat tekan jangka panjang (σ_1), dan dari persamaan Burger didapatkan 4 (empat) variabel, yaitu E_1 , E_2 , η_1 , dan η_2 .

Analisis dimensi akan dilakukan dengan menggunakan metode Matrik, dengan fungsi umum persamaannya adalah :

$$f(A, h, \gamma, g, \sigma_c, \sigma_1, E_1, E_2, \eta_1, \eta_2) \quad (6.1)$$



Gambar 6.3. Kurva Konstanta Rheologi terhadap Tingkat Tegangan untuk Diameter 54 mm

Tabel 6.6. Variabel-variabel pada Analisis Dimensi

Variabel	Symbol	Dimensi
Luas Pilar	A	L ²
Tinggi Pilar	h	L
Bobot Isi	γ	ML ⁻³
Gravitasi	g	LT ⁻²
Kuat Tekan Uniaksial Pilar	σ_c	ML ⁻¹ T ⁻²
Kuat Tekan Jangka Panjang Pilar	σ_1	ML ⁻¹ T ⁻²
Modulus Elastisitas	E ₁	ML ⁻¹ T ⁻²
Modulus Elastisitas Tertunda	E ₂	ML ⁻¹ T ⁻²
Laju Aliran Viskos	η_1	ML ⁻¹ T ⁻¹
Laju Elastisitas Tertunda	η_2	ML ⁻¹ T ⁻¹

6.8.1. Produk Tak Berdimensi

Variabel berulang (*repeating variabel*) yang digunakan adalah kuat tekan uniaksial (σ_c), gravitasi (g), dan bobot isi (γ). Dengan 3 dimensi dasar (M, L, T), banyaknya nilai π (produk tak berdimensi) yang terbentuk adalah $n - k = 10 - 3 = 7$ buah.

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7) = 0 \quad (6.2)$$

Produk Tak Berdimensi 1 (π_1)

$$\pi_1 = \frac{\gamma^2 g^2 A}{\sigma_c^2}$$

Produk Tak Berdimensi 2 (π_2)

$$\pi_2 = \frac{\gamma g h}{\sigma_c}$$

$$\text{Produk Tak Berdimensi 3 } (\pi_3) \quad \pi_3 = \frac{\sigma_l}{\sigma_c}$$

$$\text{Produk Tak Berdimensi 4 } (\pi_4) \quad \pi_4 = \frac{E_1}{\sigma_c}$$

$$\text{Produk Tak Berdimensi 5 } (\pi_5) \quad \pi_5 = \frac{E_2}{\sigma_c}$$

$$\text{Produk Tak Berdimensi 6 } (\pi_6) \quad \pi_6 = \frac{\eta_1 g \sqrt{\gamma}}{\sqrt{\sigma^3 c}}$$

$$\text{Produk Tak Berdimensi 7 } (\pi_7) \quad \pi_7 = \frac{\eta_2 g \sqrt{\gamma}}{\sqrt{\sigma^3 c}}$$

Jadi persamaan produk tak berdimensinya adalah :

$$f\left(\frac{\gamma^2 g^2 A}{\sigma_c^2}, \frac{\gamma g h}{\sigma_c}, \frac{\sigma_l}{\sigma_c}, \frac{E_1}{\sigma_c}, \frac{E_2}{\sigma_c}, \frac{\eta_1 g \sqrt{\gamma}}{\sqrt{\sigma^3 c}}, \frac{\eta_2 g \sqrt{\gamma}}{\sqrt{\sigma^3 c}}\right) = 0 \quad (6.3)$$

6.8.2. Faktor Skala

Produk-produk tak berdimensi yang dihasilkan, dapat digunakan untuk mencari faktor skala antara model dan keadaan sebenarnya di mana nilai produk tak berdimensi model (π_m) dan keadaan sebenarnya (π) harus sama.

Untuk mencari faktor skala, dipilih 3 faktor skala secara bebas, yaitu luas pilar (A), gravitasi (g), dan bobot isi (γ). Faktor luas pilar dipilih karena faktor ini berhubungan langsung dengan ukuran pilar, sementara gravitasi dan bobot isi tidak akan berubah baik pada model maupun skala sesungguhnya (faktor skalanya = 1)

Jika luas model dibuat x kali lebih kecil dari sebenarnya, maka 3 faktor skala yang dipilih dapat dilihat pada Tabel 6.7.

Tabel 6.7. Faktor Skala yang Dipilih Secara Bebas untuk Keadaan Sebenarnya Sebesar x kali Model

Variabel	Faktor Skala
Luas Permukaan Pilar (A)	x
Gravitasi (g)	1
Bobot isi (γ)	1

Faktor Skala untuk Kuat Tekan Uniaxial

$$\pi_m = \pi \quad (6.4)$$

$$\frac{\gamma^2 m g^2 m A_m}{\sigma_{cm}^2} = \frac{\gamma^2 g^2 A}{\sigma_c^2} \quad (6.5)$$

$$\frac{\gamma^2 m}{\gamma^2} \cdot \frac{g^2 m}{g^2} \cdot \frac{A_m}{A} = \frac{\sigma_{cm}^2}{\sigma_c^2} \quad (6.6)$$

$$1 \cdot 1 \cdot \frac{1}{x} = \frac{\sigma_{cm}^2}{\sigma_c^2} \quad (6.7)$$

$$\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_c} = \sqrt{\frac{1}{x}} \quad (6.8)$$

$$\sigma_c = \sigma_{cm} \sqrt{x} \quad (6.9)$$

Faktor Skala untuk Tinggi Pilar

$$\frac{h_m}{h} = \sqrt{\frac{1}{x}} \rightarrow h = h_m \sqrt{x} \quad (6.10)$$

Faktor Skala untuk Kuat Tekan Jangka Panjang (σ_1), Modulus Elastisitas (E_1) dan Elastisitas Tertunda (E_2)

$$\frac{E_{lm}}{E_1} = \sqrt{\frac{1}{x}} \Rightarrow E_1 = E_{lm} \sqrt{x} \quad (6.11)$$

Faktor Skala untuk Laju Aliran Viskos (η_1) dan Laju Elastisitas Tertunda (η_2)

$$\frac{\eta_{lm}}{\eta_1} = \frac{1}{x \cdot \sqrt{x}} \Rightarrow \eta_1 = \eta_{lm} \cdot x \cdot \sqrt{x} \quad (6.12)$$

Hasil selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 6.8.

**Tabel 6.8. Faktor Skala untuk Kondisi Sebenarnya
Sebesar x kali Model**

Variabel	Symbol	Faktor Skala
Luas Pilar	A	x
Tinggi Pilar	h	$\sqrt{x}$
Bobot Isi	γ	1
Gravitasi	g	1
Kuat Tekan Uniaxial Pilar	σ_c	$\sqrt{x}$
Kuat Tekan Jangka Panjang Pilar	σ_1	$\sqrt{x}$
Modulus Elastisitas	E_1	$\sqrt{x}$
Modulus Elastisitas Tertunda	E_2	$\sqrt{x}$
Laju Aliran Viskos	η_1	$x \sqrt{x}$
Laju Elastisitas Tertunda	η_2	$x \cdot \sqrt{x}$

6.9. PERMODELAN

Dari tabel 5.2. terlihat bahwa terjadi perbedaan nilai regangan antara hasil uji dan permodelan yang berkisar antara 0.00042 - 0.00056. Perbedaan ini kemungkinan disebabkan perbedaan perhitungan dalam permodelan dan pengujian.

Dalam Rheostaub, perhitungan dilakukan dengan kondisi regangan bidang (Plane Strain) dan permodelan hanya memodelkan untuk dua dimensi saja, sedangkan dimensi ketiga tidak diperhitungkan.

Pengaruh kondisi regangan bidang terhadap hasil perhitungan dapat dijelaskan dari persamaan tegangan - regangan benda elastik (Hukum Hooke) :

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \left[\left(\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z) \right) \right] \quad (6.13)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \left[\left(\sigma_y - \nu (\sigma_x + \sigma_z) \right) \right] \quad (6.14)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \left[\left(\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y) \right) \right] \quad (6.15)$$

Pada regangan bidang, $\varepsilon_z = 0$, sehingga :

$$0 = \frac{1}{E} \left[\left(\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y) \right) \right] \quad (6.16)$$

$$\sigma_z = \nu (\sigma_x + \sigma_y) \quad (6.17)$$

Dengan memasukkan nilai σ_z ke dalam persamaan ε_x dan ε_y , maka diperoleh :

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} \left[\left(\sigma_x - \nu (\sigma_y + \nu (\sigma_x + \sigma_y)) \right) \right] \quad (6.18)$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} \left[\left(\sigma_y - \nu (\sigma_x + \nu (\sigma_x + \sigma_y)) \right) \right] \quad (6.19)$$

Untuk penekanan uniaksial, $\sigma_x = 0$, sehingga untuk regangan arah x :

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} \left(-\nu \sigma_y - \nu^2 \sigma_y \right) = -\frac{\nu \sigma_y}{E} (1 + \nu) \quad (6.20)$$

$$\epsilon_{x \text{ model}} = \epsilon_{x \text{ lab}} (1 + \nu) \quad (6.21)$$

dan untuk regangan arah y :

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} \left(\sigma_y - \nu (\nu \sigma_y) \right) = \frac{\sigma_y}{E} (1 - \nu^2) \quad (6.22)$$

$$\epsilon_{y \text{ model}} = \epsilon_{y \text{ lab}} (1 - \nu^2) \quad (6.23)$$

Jadi perhitungan yang dilakukan oleh Rheostaub akan menghasilkan perpindahan yang selalu lebih kecil dari uji laboratorium. Untuk memperkecil perbedaan antara permodelan dan uji laboratorium harus dilakukan koreksi pada hasil permodelan.

Perbedaan regangan antara hasil uji laboratorium dan hasil permodelan yang sudah dikoreksi berkisar antara 0,00044 - 0,00046. Dan nilai ini dapat dianggap tidak signifikan.



BAB VII

KESIMPULAN DAN SARAN

7.1. KESIMPULAN

1. Dari analisis data hasil pengujian rayapan, dapat dilihat bahwa contoh batubara silicified mengalami rayapan primer dan sekunder, dan kurva rheologinya cenderung mengikuti model Burger.
2. Besarnya kuat tekan jangka panjang dan konstanta Burger untuk masing-masing kelompok diameter adalah sebagai berikut :

Diameter (mm)	Kuat Tekan Jangka Pjg (% σ_c)	E_1 10^3 (MPa)	E_2 10^3 (MPa)	η_1 10^3 (MPa.jam)	η_2 10^3 (MPa.jam)
54	100	3.17 - 4.27	130 - 600	930 - 6090	67.9 - 1150
70	95	2.96 - 5.35	16.9 - 372	2060 - 42900	26.5 - 1210
100	85	2.91 - 12.5	197 - 4590	9300 - 223000	178 - 212000
150	80	1.52 - 2.82	151 - 1500	2000 - 110000	761 - 32700

3. Arah cleat pada batubara dan rekahan-rekahan yang ada sangat mempengaruhi kuat tekan uniaksial dan kuat tekan jangka panjang batubara, dan fenomena ini jelas ditunjukkan pada hasil eksperimen.
4. Ukuran contoh tidak saja berperan dalam menentukan kuat tekan uniaksial tetapi juga kuat tekan jangka panjang batuan. Semakin besar diameter contoh, semakin kecil kuat tekan jangka panjangnya (% σ_c).

5. Konstanta Burger juga mengalami perubahan dengan berubahnya tingkat tegangan. Semakin besar tingkat tegangan, nilai E_1 , E_2 , η_1 dan η_2 cenderung semakin kecil.
6. Faktor skala untuk luas permukaan pilar sesungguhnya sebesar x kali luas permukaan pilar model dapat adalah :

Variabel	Faktor Skala
Luas Pilar	x
Tinggi Pilar	$\sqrt{x}$
Bobot Isi	1
Gravitasi	1
Kuat Tekan Uniaksial Pilar	$\sqrt{x}$
Kuat Tekan Jangka Panjang Pilar	$\sqrt{x}$
Modulus Elastisitas	$\sqrt{x}$
Modulus Elastisitas Tertunda	$\sqrt{x}$
Laju Aliran Viskos	$x\sqrt{x}$
Laju Elastisitas Tertunda	$x\sqrt{x}$

7.2. SARAN

1. Disarankan agar pengujian rayapan dilakukan pada lokasi atau ruangan yang bebas getaran dengan temperatur dan kelembaban yang dapat dijaga konstan.
2. Dial gauge elektronik yang digunakan (0.01 mm) kurang sensitif, untuk uji rayapan diperlukan dial gauge dengan ketelitian minimal 0.001 mm.

3. Untuk menghindari bahaya ledakan batuan pada saat pengujian, perlu ditambahkan pelindung pada alat uji rayapan.
4. Perlu dilakukan modifikasi peralatan dengan menggunakan load cell dengan kekakuan yang lebih besar daripada kekakuan contoh untuk mencegah terjadinya ledakan contoh batuan.
5. Perlu dilakukan penelitian mengenai rayapan pilar batubara dengan menggunakan contoh batubara yang diambil dari tambang bawah tanah, misalnya dari Tambang Batubara Bawah Tanah Ombilin.
6. Perlu penelitian mengenai pengaruh bentuk pilar (*shape effect*) dengan menggunakan contoh berbentuk segi empat.



DAFTAR PUSTAKA

1. Afrouz, dan Harvey, J.M, "Rheology of Rocks Within The Soft to Medium Strength Range", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.11, No.7, July, 1974, hal. 281-290.
2. Arif, Irwandi, "Permodelan Struktur Alamiah", Program Rekayasa Pertambangan Bidang Khusus Geomekanika, ITB, 1996.
3. Bieniawski, 1967, in Nicolae D.C., "Rock Rheology", in *Comprehensive Rock Engineering*, Vol. I, ed. J.A. Hudson & E. T. Brown, Pergamon Press, 1993.
4. Brown, E.T., "Analitical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics", Imperial College of Science and Technology, Allen and Unwin, London, 1987.
5. D. Cristescu, Nicolae., "Rock Rheology", in *Comprehensive Rock Engineering*, Vol. I, ed. J.A. Hudson & E.T. Brown, Pergamon Press, 1993.
6. Dusseault, Maurice B., "Time Dependent Behavior of Rocks", in *Comprehensive Rock Engineering*, Vol. III, ed. J.A. Hudson, Pergamon Press, 1993.
7. Evans, 1961, "The Compressive Strength of Coal", in S.S.Peng, "Coal Mine Ground Control", John Willey & Sons Inc., New York, 1986.
8. Fritz, P., "Rheo-Staub (user manual)", Department of Rock Engineering Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland, 1989.
9. Goodman, R.E., "Introduction to Rock Mechanics", 2nd Ed., John Willey & Sons, 1989.
10. Greenwald, "Experiments on Strength of Small Pillars of Coal in The Pittsburgh Bed - Progress Report", US Bureau of Mines, RI 3575, 1941.
11. Griggs, D., Turner, F.J., Borg, I. dan Sosoka, J. "Deformation of Yule Marble, part 5", *Geol.Soc.Am.Bull.*, Vol.64, 1953, hal. 1327-1342.
12. Griggs, D., Turner, F.J., dan Heard, H.C., "Deformation of Rocks at 500° to 800° C", *Geol.Soc.Am.Mem.*, 79, 1960, hal. 39-104.
13. Hardy, H.R., "Determination of The Inelastic Parameters of Geologic Material from Incremental Creep Experiments", *Proc.3rd Conf. Drilling and Rock Mech.*, Austin, Texas, 1967.

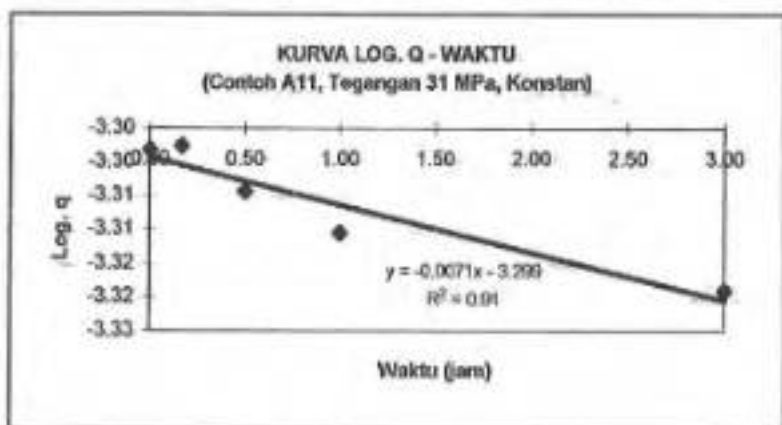
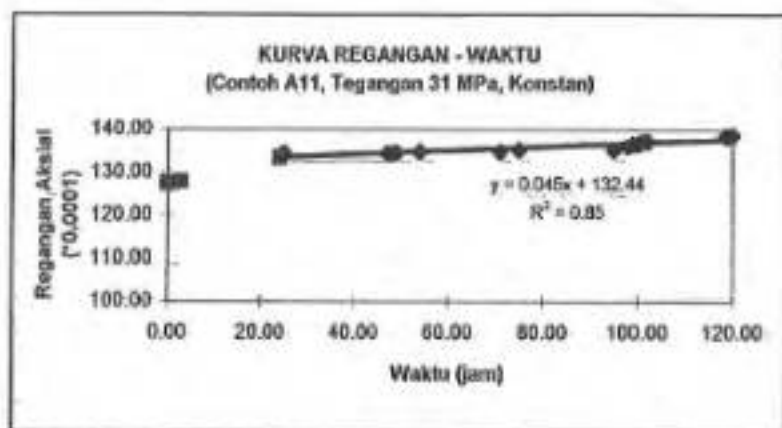
14. Hoek E., dan Brown E.T., "Underground Excavation in Rock", The Institution of Mining and Metallurgy, London, 1980
15. Hustrulid, 1976, "A Review of Coal Strength Formula", in S.S.Peng, "Coal Mine Ground Control", John Willey & Sons Inc., New York, 1986.
16. Ito, Hidebumi, "The Phenomenon and Examples of Rock Creep", in Comprehensive Rock Engineering, Vol. III, ed. J.A. Hudson, Pergamon Press, 1993.
17. Jaeger, J.C., dan Cook, N.G.W. "Fundamental of Rock Mechanics", Second edition, Science Paperback, 1976.
18. Kanagawa, T., Nakaarai, K., "Restraint of Swelling Creep and Effect of Absorption of Water on Triaxial Strength and Deformability of Rocks", Rock Mechanics in Japan, Vol.1, 1970, hal 74-76.
19. Kidybinski, A., "Rheological Models of Upper Silesian Carboniferous Rocks", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.3, No.4, Nov., 1966, hal. 279-306.
20. Kramadibrata, Suseno, "Rock Cutting", Jurusan Teknik Pertambangan, ITB, Bandung.
21. Kuznetsov, Y.U.V, dan Vashchëlin, V.A., "Rock Creep at High Temperature", Sov. Min. Sci., No.5, Sept.-Oct., 1970, hal.586-588.
22. Ladanyi, Branko "Time Dependent Response of Rock Around Tunnels", in Comprehensive Rock Engineering, Vol.II, ed. J.A. Hudson & C. Fairhurst, Pergamon Press, 1993.
23. Lama R.D., Vutukuri V.S., "Handbook on Mechanical Properties of Rocks", Vol.III, Trans Tech Publication, 1978.
24. Langer, 1966, 1969 in Lama & Vutukuri, "Handbook on Mechanical Properties of Rocks", Vol.III, Trans Tech Publication, 1978.
25. Langhaar, Henry L., "Dimensional Analysis and Theory of Models", John Willey and Sons, Inc., 1951.
26. Le Conte, P., "Creep in Rock Salt", J. Geol., Vol.73, No.3, May, 1965, hal.469-484.
27. Locker, J.G., "Petrographic and Engineering Properties of Fine-Grained Rock of Central Alberta", Research Council Alberta.
28. Loonen, H.E., dan Hofer, K.H., "Proc. 6th Meeting", Int. Bur. Rock Mech., Leipzig, 1964.

29. Matsushima, S., "On The Flow and Fracture of Igneous Rocks", Kyoto Univ. Disaster Prevent. Res. Inst. Bull., Vol. 10, No. 36, 1960, hal. 2-9.
30. McClain, W.C, dan Bradshaw, R.L., "Deformation and Stress Transference in a Salt Mine Resulting from The Application of Heat", Proc. 2nd Cong. Int. Soc. Rock Mech., Belgrade, 1970, Vol. 1, hal. 559-565.
31. Nakamura, S.T., "On Visco-elastic Medium", Sci. Rep. Tokyo Univ., 5th Series, Geophysics, Vol. 1, No. 2, 1949, hal. 91-95.
32. Nishihara, M., "Stress-Strain Time Relation of Rocks", Doshima Eng. Rev., Vol. 8, No. 3, Nov., 1957, hal. 85 - 115.
33. Obert, L., dan Duvall W.T., "Rock Mechanics and The Design of Structure in Rocks", John Wiley and Sons Inc., 1967.
34. Peng, S.S., "Coal Mine Ground Control", John Wiley & Sons Inc., New York, 1986.
35. Phillips, D.W., "The Nature and Physical Properties of Some Coal Measure Strata", Trans. Inst. Min. Eng., Vol. 80, Part 4, Jan, 1931, hal. 212 - 239.
36. Price, N.J., "A Study of The Time Strain Behaviour of Coal Measure Rocks", Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., Vol. 1, No. 2, March, 1964, hal. 277-303.
37. Rai, Made A., "Mekanika Batuan", Laboratorium Geoteknik PAU-ITB, Bandung, 1988.
38. Rai, Made A., " Perilaku Batuan Viscous Elastic", Laboratorium Geoteknik PAU-ITB, Bandung, 1988.
39. Roxborough, F. F., dan Eskikaya, S., " Dimensional Considerations in The Design of a Scale Model for Coal Face Production System Research", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 11, 1974, p. 129 - 137.
40. Ruppeneit, K.V., dan Libermann, Y.M., 1960 in Lama & Vutukuri., "Handbook on Mechanical Properties of Rocks", Vol. III, Trans Tech Publication, 1978.
41. Salustowicz, A., "Rock as an Elastic Viscous Medium" , Archiwum Gornictwa, Vol. 3, 1958, hal. 141 - 172.
42. Serdengecti, 1961, in Lama & Vutukuri., "Handbook on Mechanical Properties of Rocks", Vol. III, Trans Tech Publication, 1978.

43. Sheorey, Prakash R., "Design of Coal Pillar Arrays and Chain Pillars", in *Comprehensive Rock Engineering*, Vol. II, ed. J. A. Hudson & C. Fairhurst, Pergamon Press, 1993.
44. Singh, D.P., dan Bamford, 1971, "The Prediction and Measurement of The Long Term Strength of Rock", in Branko Ladanyi, "Time Dependent Response of Rock Around Tunnels", in *Comprehensive Rock Engineering*, Vol. II, ed. J. A. Hudson & C. Fairhurst, Pergamon Press, 1993.
45. Vyakov, S.S., "Rheological Fundamental of Soil Mechanics", Elsevier, 1986.
46. Wilson, A.H., "Soft Rock Properties and Strata Control", in *Comprehensive Rock Engineering*, Vol. II, ed. J.A. Hudson & C. Fairhurst, Pergamon Press, 1993.
47. Wilson, A. H., "The Stability of Underground Workings in the Soft Rocks of The Coal Measures", Thesis submitted to the University of Nottingham for the Degree of Doctor Philosophy, April, 1980
48. Wewersik, W.R., dan Brown, W.S., "Creep Fracture in Rock in Uniaxial Compression", report No. UTEC-ME-71-242, Mech. Eng. Dept., Univ. Utah, Salt Lake City, Utah, Dec. 1971.
49. Wiid, B.L., "The Time Dependent Behaviour of Rock; Considerations with Regard to a Research programme", Rep. S. African C.S.I.R., No.MEG 514, 1966.
50. Wiid, B.L., 1970, in Nicolae D., "Rock Rheology", in *Comprehensive Rock Engineering*, Vol. I, ed. J.A. Hudson & E.T. Brown, Pergamon Press, 1993.
52. Wiyono, B., "Analisis Perilaku Rayapan Batulansu dengan Uji Rayapan di Laboratorium", Thesis S-2, ITB, Bandung, 1997.
52. _____, "The Use of Scale Models in Longwall Coal Mining and Shearer Drum Research".



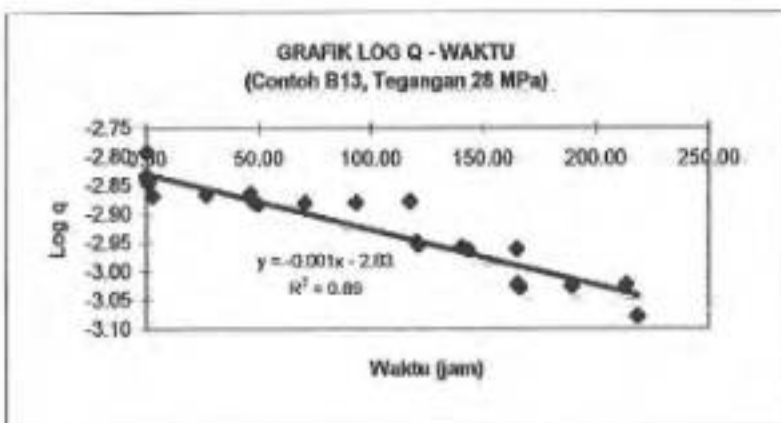
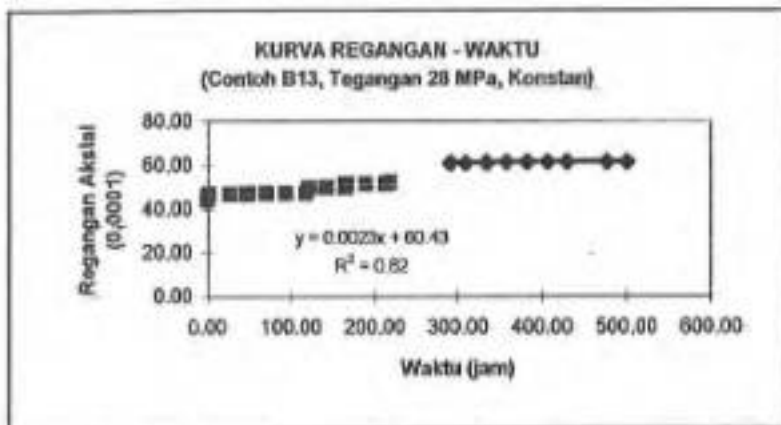
LAMPIRAN A
KURVA-KURVA HASIL UJI RAYAPAN
DENGAN BEBAN KONSTAN



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	η_1 MPa.jam	η_2 MPa.jam
31	80	4367	2.43E+03	61.8E+03	6950E+03	28.2E+03

Persamaan :

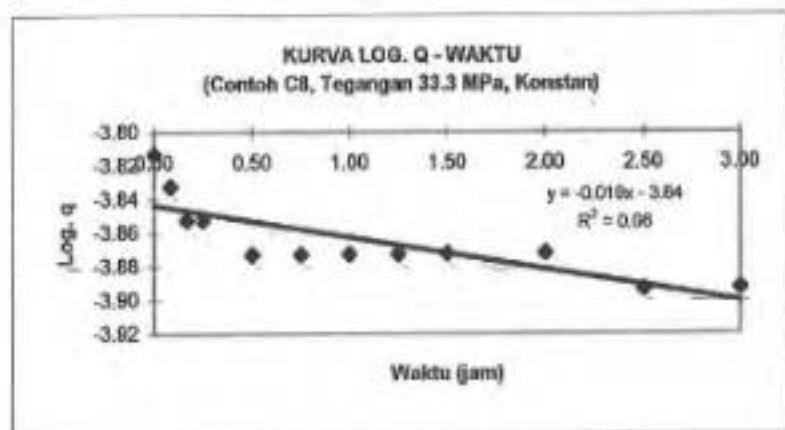
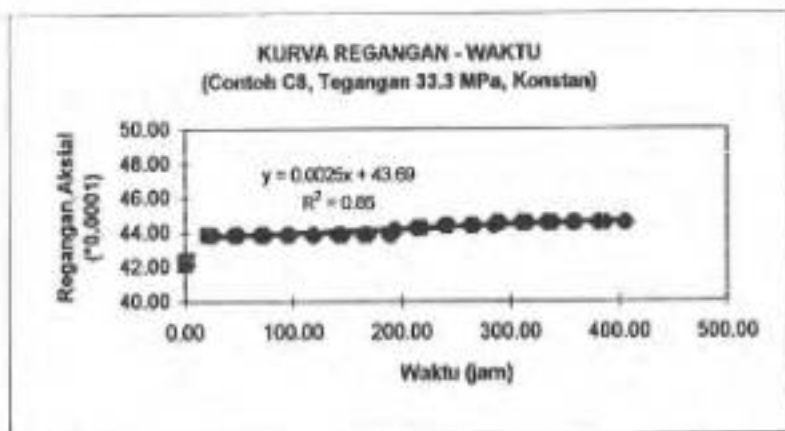
$$s(t) = 1.27E-02 + 5.02E-04(1 - e^{-(2.19E-00 \cdot t)}) + 4.46E-06t$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	η_1 MPa.jam	η_2 MPa.jam
28	100	28725	6.14E+03	18.8E+03	122000E+03	8.26E+03

Persamaan :

$$\epsilon(t) = 4.56E-03 + 1.48E-03(1 - e^{(-2.28E-00 \cdot t)}) + 2.3E-07t$$

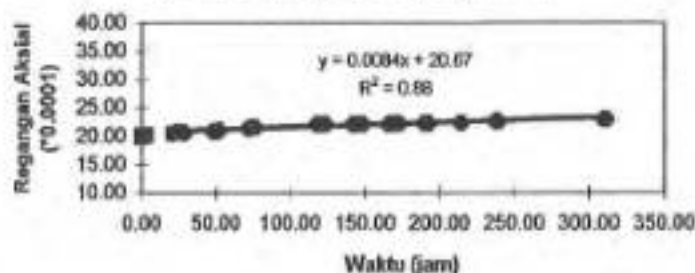


Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	$\eta 1$ MPa.jam	$\eta 2$ MPa.jam
33.3	80	50500	7.88E+03	232E+03	133000E+03	110E+03

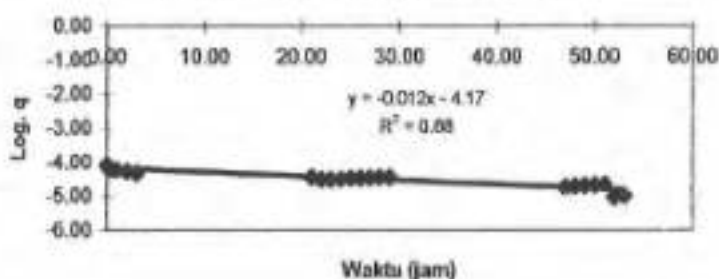
Persamaan :

$$\epsilon(t) = 4.23E-03 + 1.44E-04(1 - e^{-(2.11E-00t)}) + 2.53E-07t$$

KURVA REGANGAN - WAKTU
(Contoh D5, Tegangan 5.5 MPa, Konstan)



KURVA LOG. Q - WAKTU
(Contoh D5, Tegangan 5.5 MPa, Konstan)

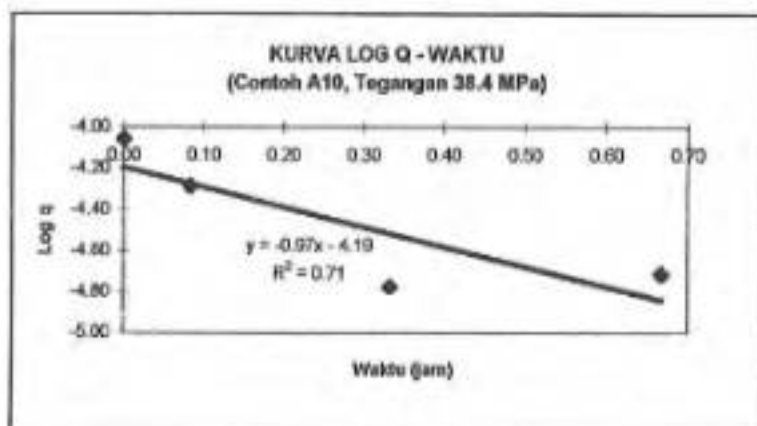
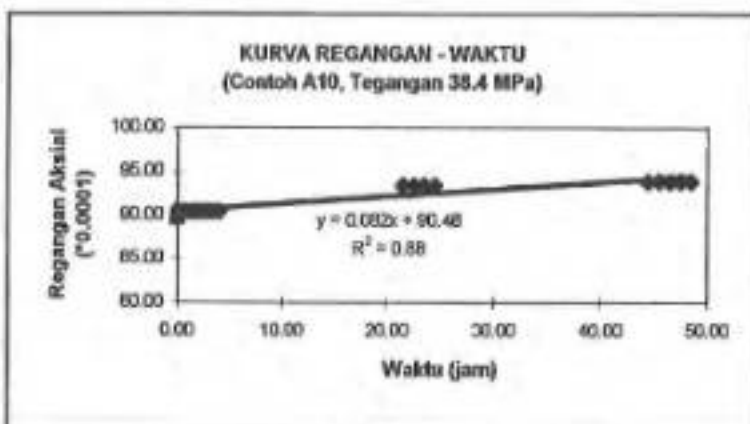


Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	$\eta 1$ MPa.jam	$\eta 2$ MPa.jam
5.5	50	14540	2.50E+03	73.4E+03	5950E+03	34.3E+03

Persamaan :

$$\epsilon(t) = 2.00E-03 + 6.81E-05(1 - e^{-(2.14E-00 \cdot t)}) + 8.4E-07t$$

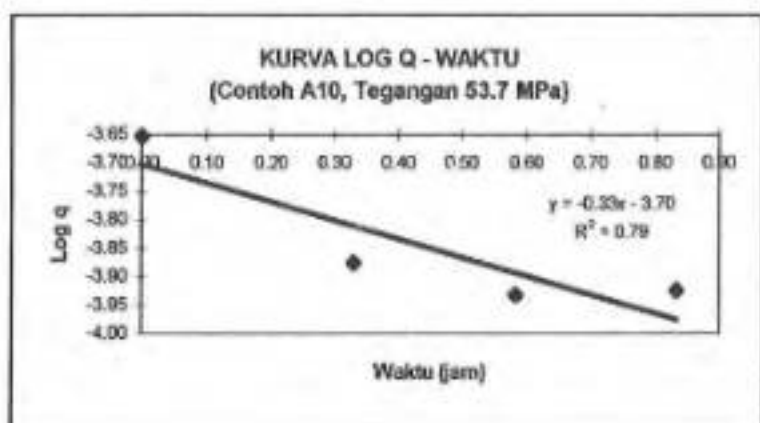
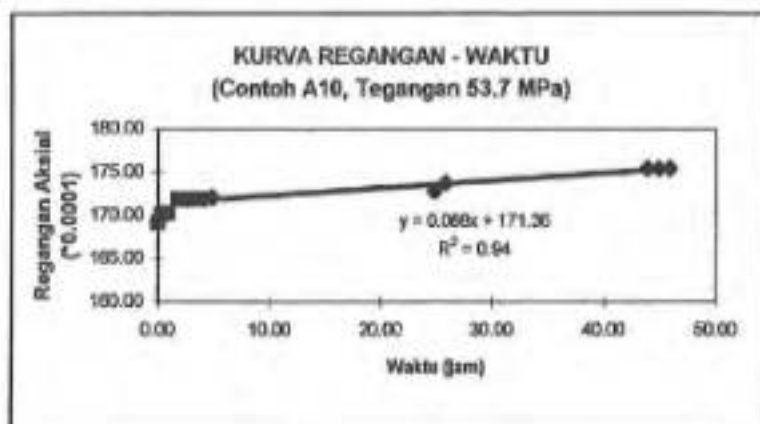
LAMPIRAN B
KURVA-KURVA HASIL UJI RAYAPAN
DENGAN BEBAN BERTAHAP



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	$\eta 1$ MPa.jam	$\eta 2$ MPa.jam
38.4	95	2905	4.27E+03	600E+03	4710E+03	1150E+03

Persamaan :

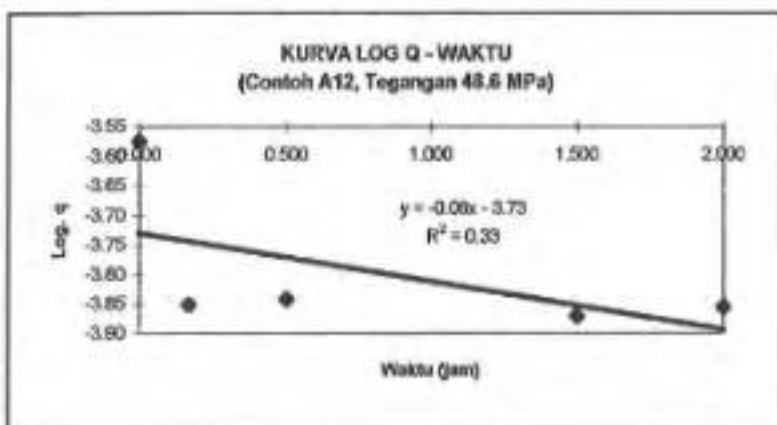
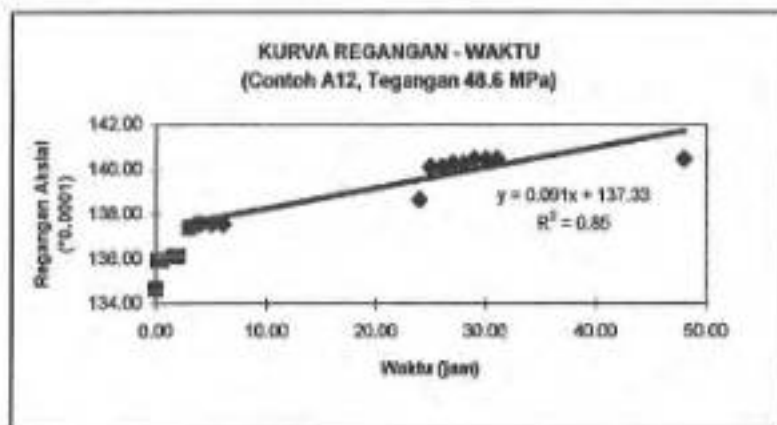
$$\varepsilon(t) = 8.98E-03 + 6.40E-05(1 - e^{(-5.20E-01 \cdot t)}) + 8.15E-06t$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	$\eta 1$ MPa.jam	$\eta 2$ MPa.jam
53.7	130	1767	3.17E+03	271E+03	6090E+03	221E+03

Persamaan :

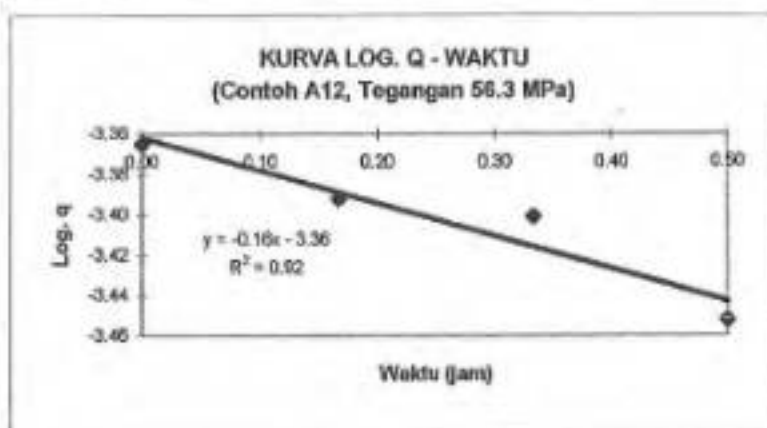
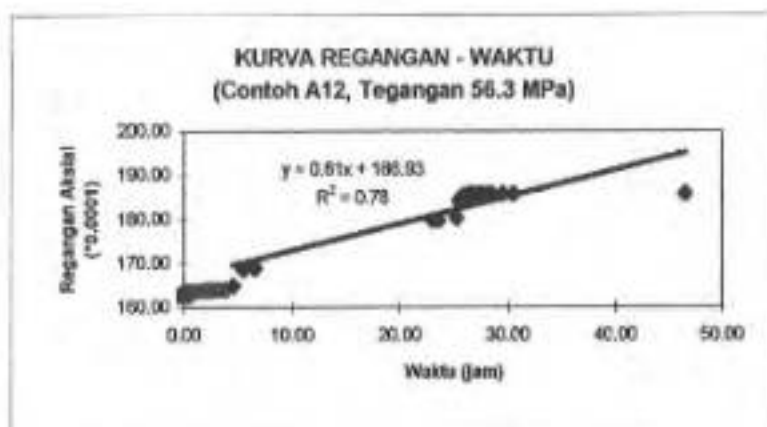
$$\varepsilon(t) = 1.69E-02 + 1.96E-04(1 - e^{(-1.23E-00*t)}) + 8.82E-06t$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu salure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	$\eta 1$ MPa.jam	$\eta 2$ MPa.jam
48.6	120	1179	3.59E+03	261E+03	5320E+03	166E+03

Persamaan :

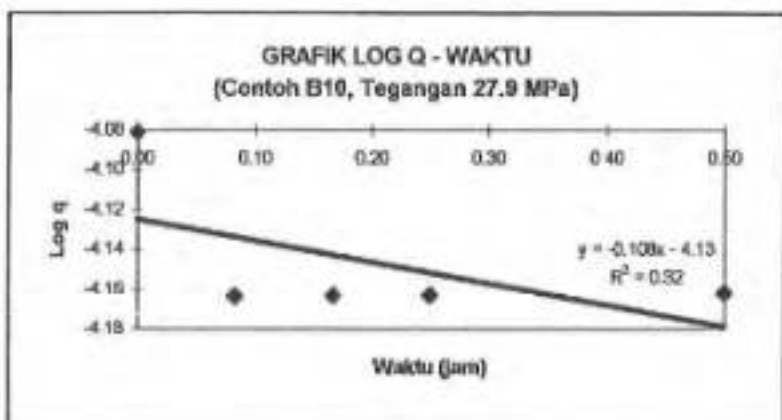
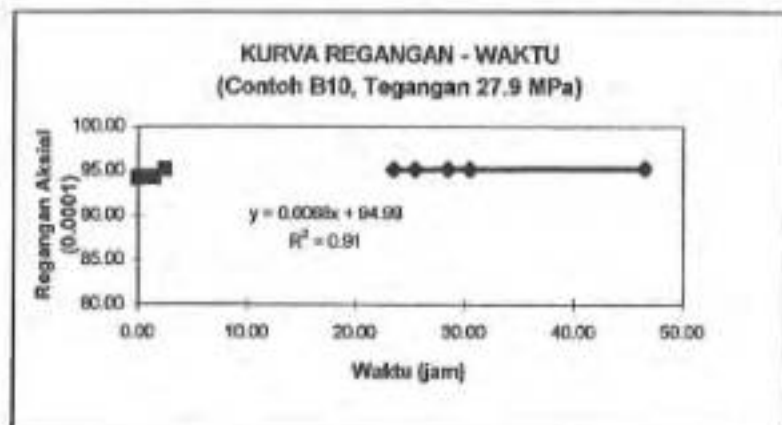
$$\epsilon(t) = 1.35E-02 + 1.86E-04(1 - e^{-(1.58E-00 \cdot t)}) + 9.13E-08t$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	η_1 MPa.jam	η_2 MPa.jam
56.3	137.5	129	3.46E+03	130E+03	930E+03	67.9E+03

Persamaan :

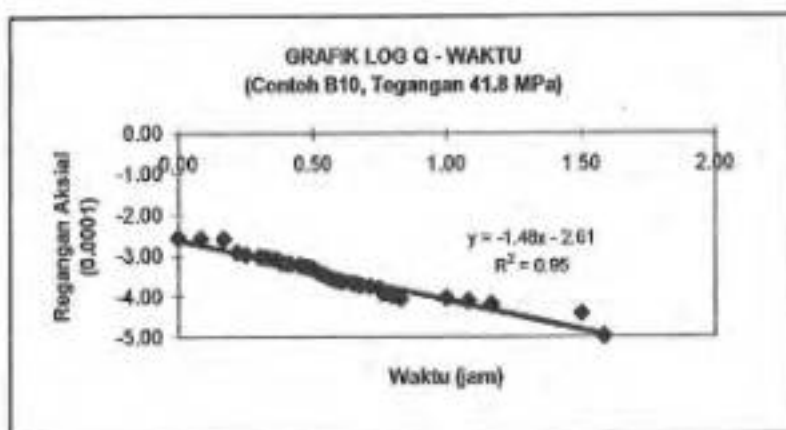
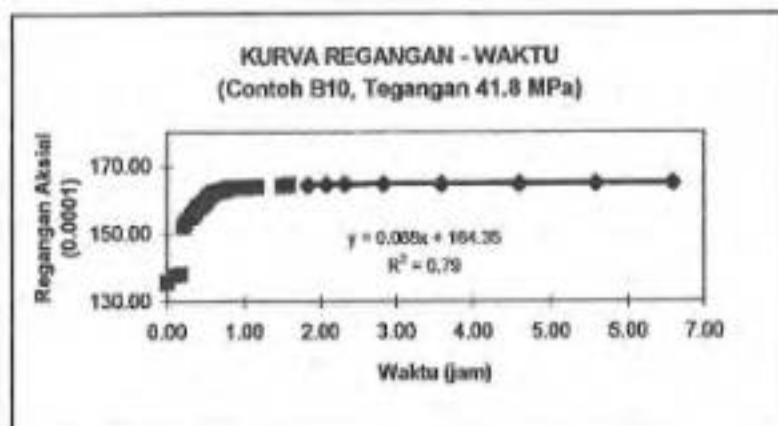
$$\epsilon(t) = 1.63E-02 + 4.35E-04(1 - e^{(-1.91E-00 \cdot t)}) + 6.05E-05t$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	η_1 MPa.jam	η_2 MPa.jam
27.9	100	10610	2.86E+03	372E+03	42900E+03	183E+03

Persamaan :

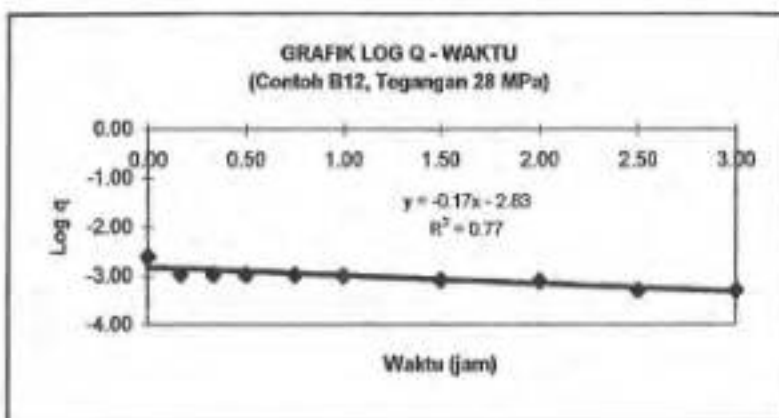
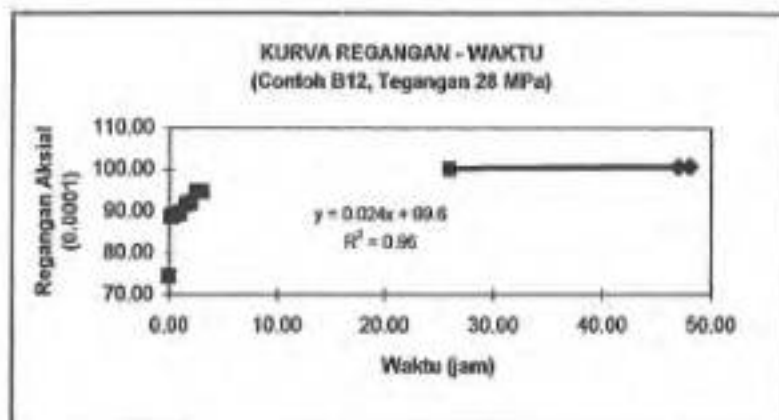
$$\epsilon(t) = 9.42E-03 + 7.50E-05(1 - e^{-(2.03E-00 \cdot t)}) + 6.50E-07t$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	η_1 MPa.jam	η_2 MPa.jam
41.8	130	90.5	2.99E+03	16.9E+03	4770E+03	1210E+03

Persamaan :

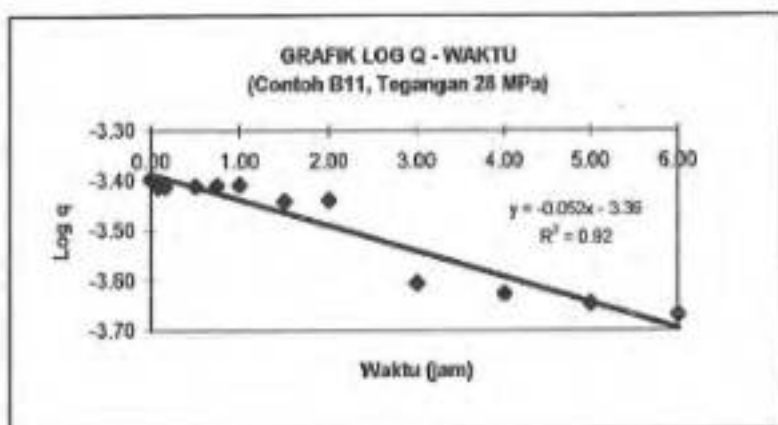
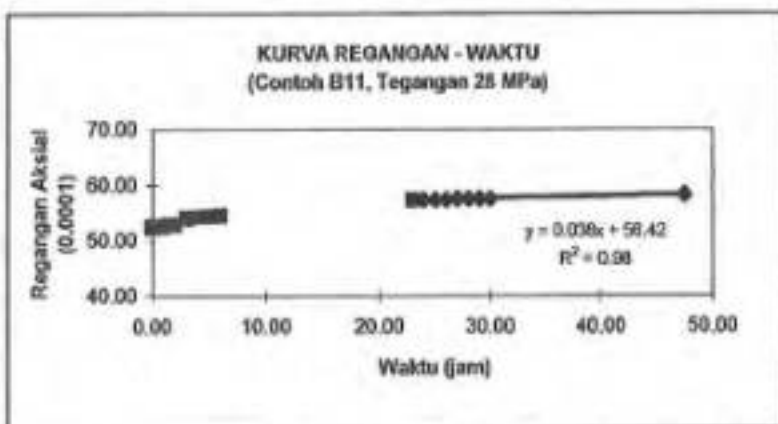
$$\varepsilon(t) = 1.40E-02 + 2.48E-03(1 - e^{-(1.40E-02)t}) + 8.77E-06t$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	η_1 MPa.jam	η_2 MPa.jam
28	100	1145	3.30E+03	18.00E+03	11900E+03	26.50E+03

Persamaan :

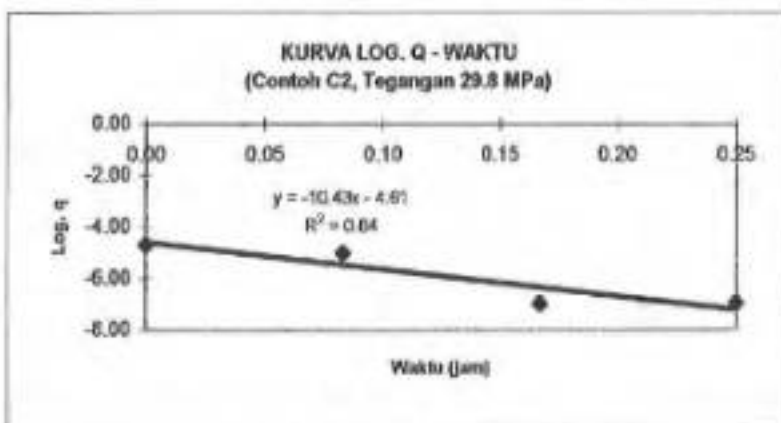
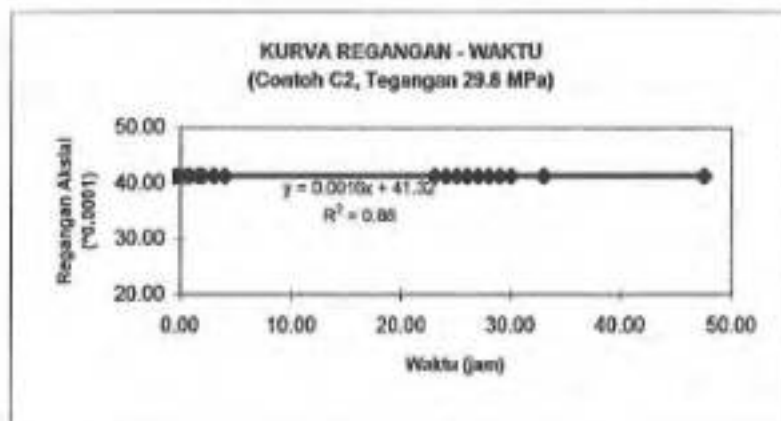
$$\epsilon(t) = 8.48E-03 + 1.48E-03(1 - e^{(-7.16E-01 \cdot t)}) + 2.35E-06t$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	η_1 MPa.jam	η_2 MPa.jam
28	100	3740	5.35E+03	68.1E+03	7310E+03	60.40E+03

Persamaan :

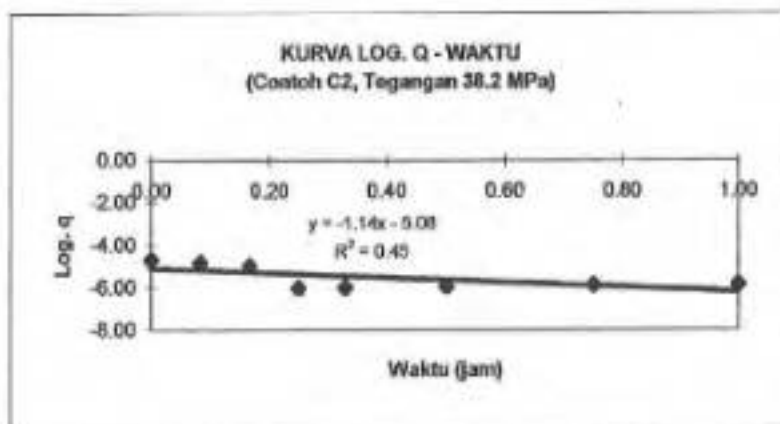
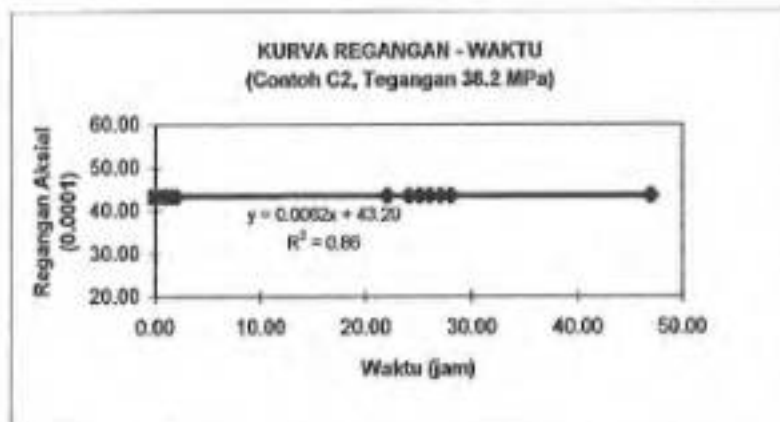
$$\varepsilon(t) = 5.23E-03 + 4.11E-04(1 - e^{-(1.13E-00 \cdot t)}) + 3.63E-06t$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	η_1 MPa.jam	η_2 MPa.jam
29.8	70	75300	4.19E+03	1200E+03	186000E+03	212000E+03

Persamaan :

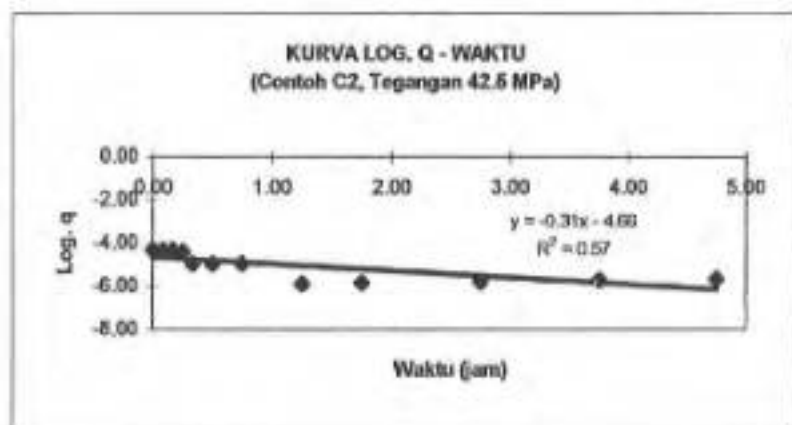
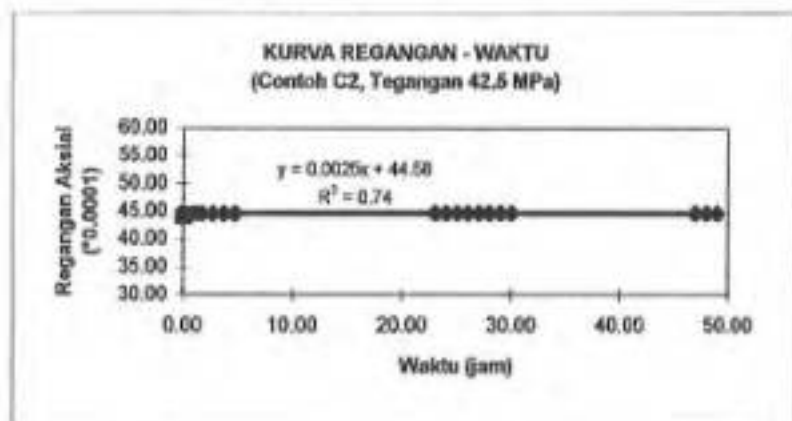
$$\epsilon(t) = 7.11E-03 + 2.48E-05(1 - e^{(-5.67E-03 \cdot t)}) + 1.6E-07t$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	$\eta 1$ MPa.jam	$\eta 2$ MPa.jam
38.2	90	19075	5,22E+03	4590E+03	61600E+03	27300E+03

Persamaan :

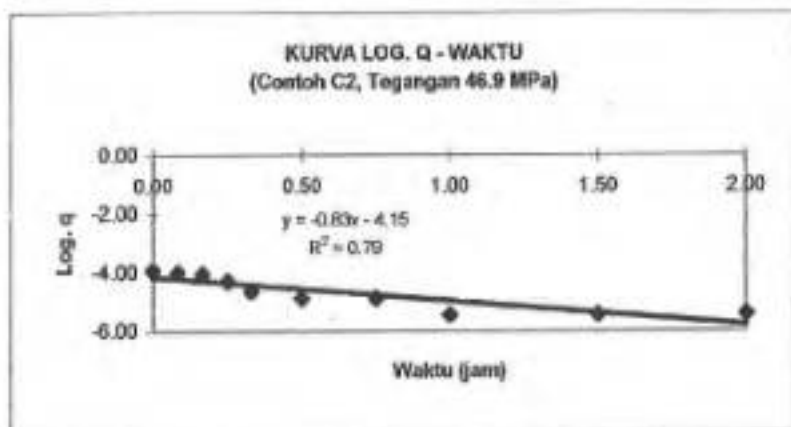
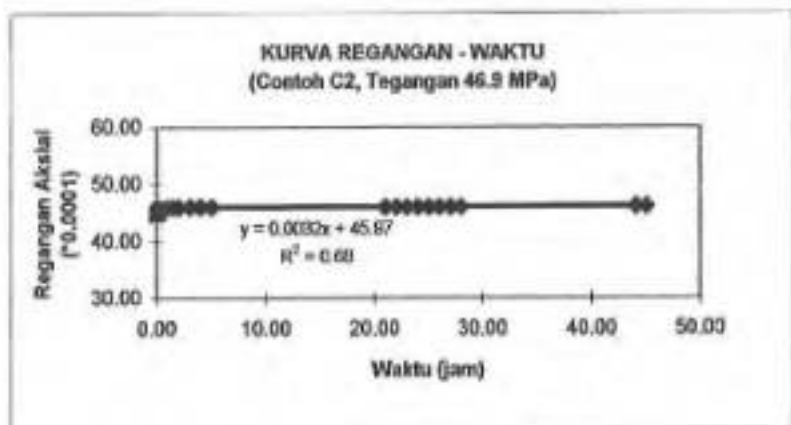
$$\epsilon(t) = 7.32E-03 + 6.31E-06(1 - e^{(-1.68E-01t)}) + 6.2E-07t$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	η_1 MPa.jam	η_2 MPa.jam
42.5	100	56800	9.56E+03	1930E+03	170000E+03	25800E+03

Persamaan :

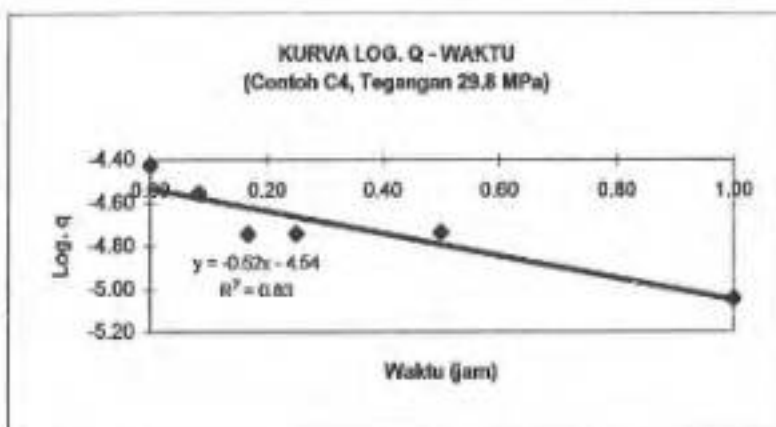
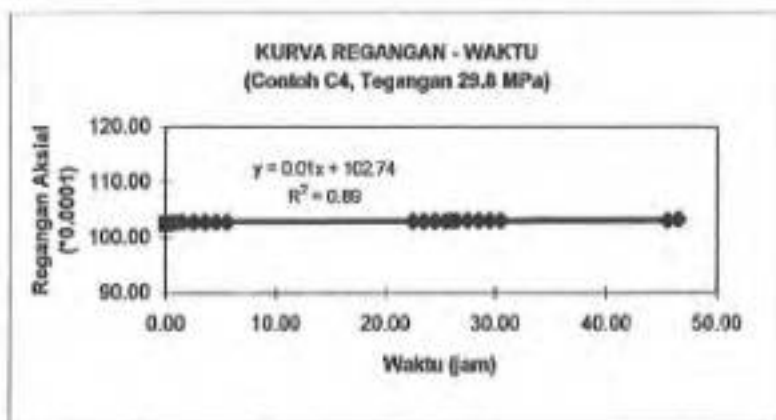
$$\epsilon(t) = 4.44E-03 + 2.21E-05(1 - e^{-(7.46E-02)t}) + 2.5E-07t$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	$\eta 1$ MPa.jam	$\eta 2$ MPa.jam
46.9	110	45500	1.04E+04	659E+03	147000E+03	13000E+03

Persamaan :

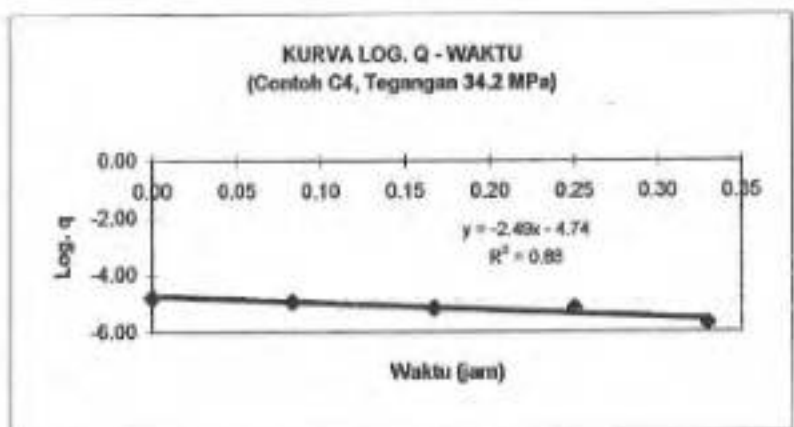
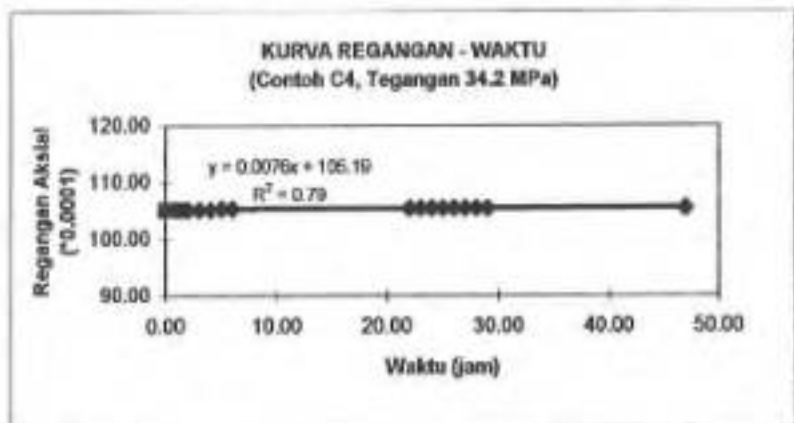
$$\epsilon(t) = 4.53E-03 + 7.12E-05(1 - e^{(-5.08E-02t)}) + 3.2E-07t$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	$\eta 1$ MPa.jam	$\eta 2$ MPa.jam
29.8	70	3370	2.91E+03	1020E+03	29800E+03	1470E+03

Persamaan :

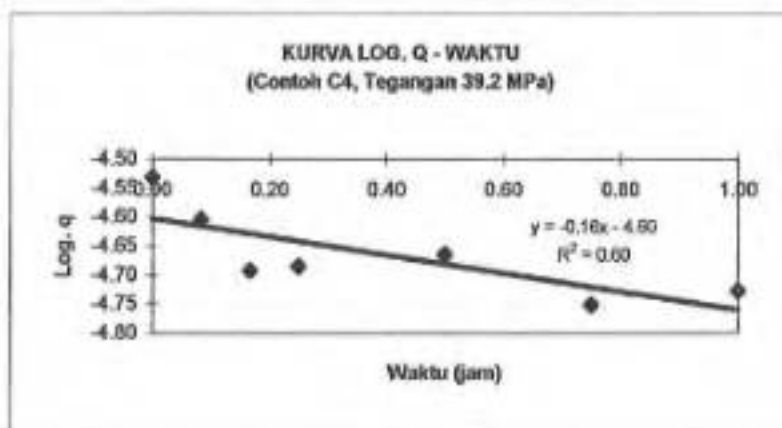
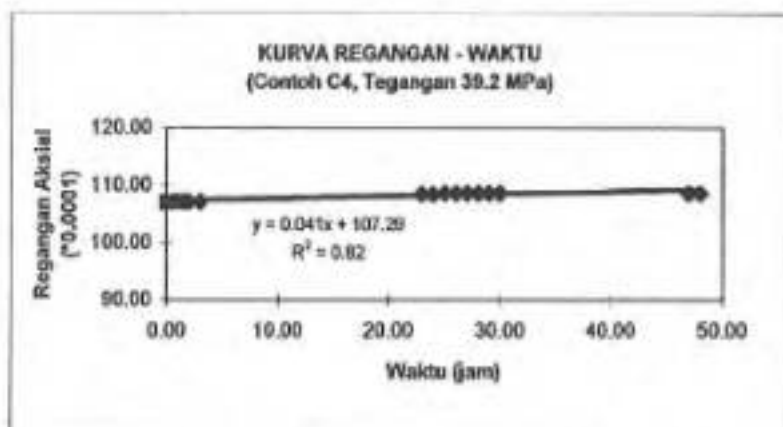
$$\epsilon(t) = 1.02E-02 + 2.91E-05(1 - e^{-(6.96E-01 \cdot t)}) + 1.0E-06t$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	η_1 MPa.jam	η_2 MPa.jam
3.42	80	4125	3,26E+03	1860E+03	45000E+03	5350E+03

Persamaan :

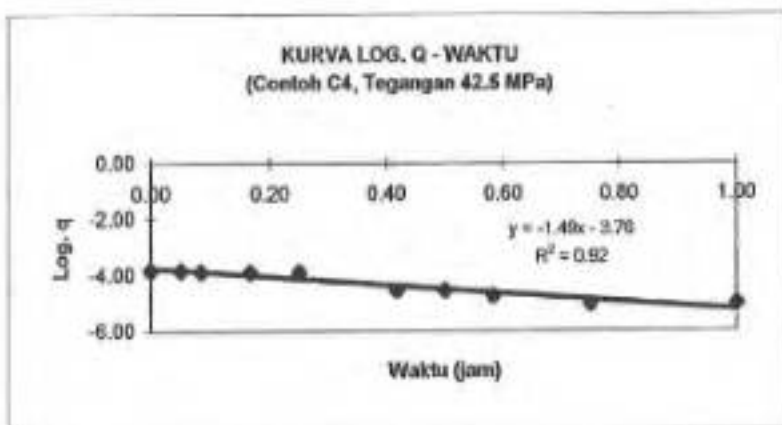
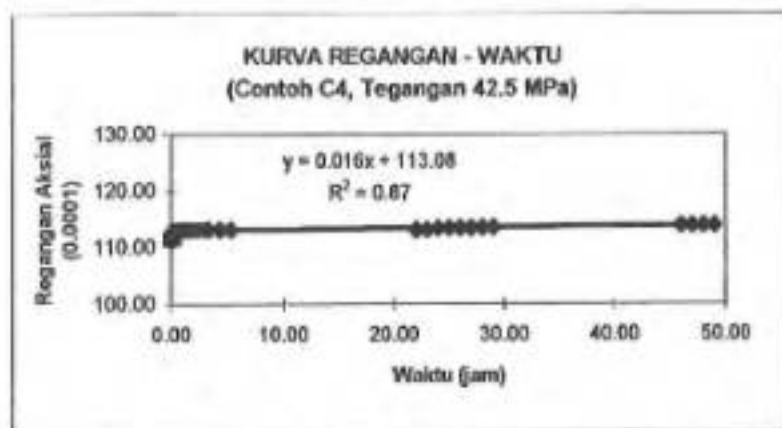
$$\epsilon(t) = 1.05E-02 + 1.84E-05(1 - e^{-(3.48E-01)t}) + 7.6E-07t$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	η_1 MPa.jam	η_2 MPa.jam
39.2	90	715	3.66E+03	1570E+03	9360E+03	981E+03

Persamaan :

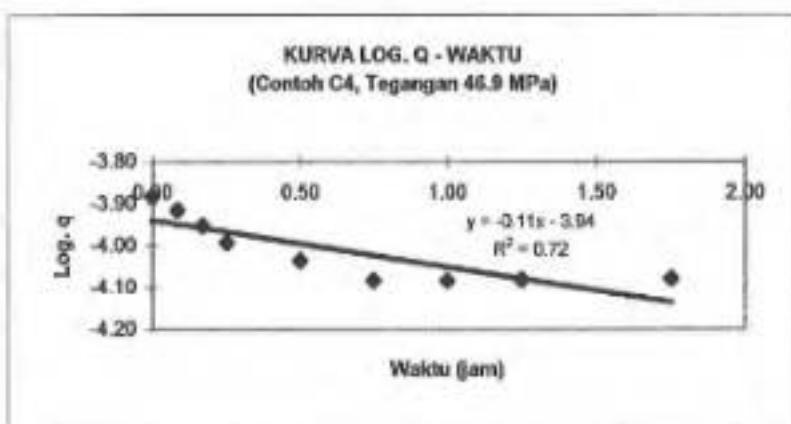
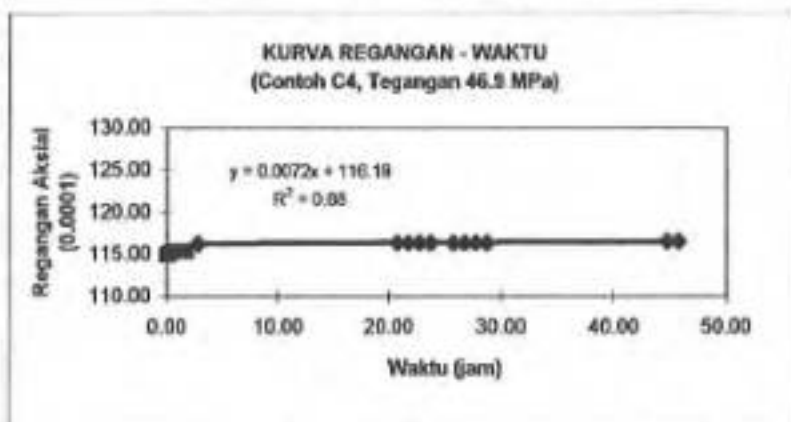
$$\epsilon(t) = 1.07E-02 + 2.50E-05(1 - e^{-(1.60E-00 \cdot t)}) + 4.07E-06t$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	η_1 MPa.jam	η_2 MPa.jam
42.5	100	1435	3.82E+03	242E+03	26100E+03	3330E+03

Persamaan :

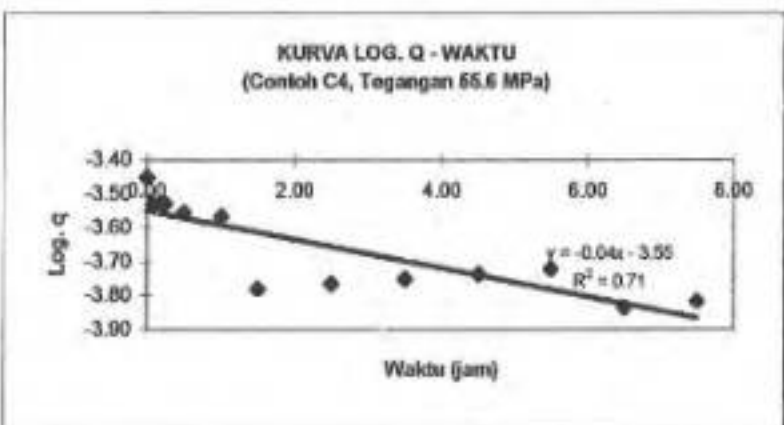
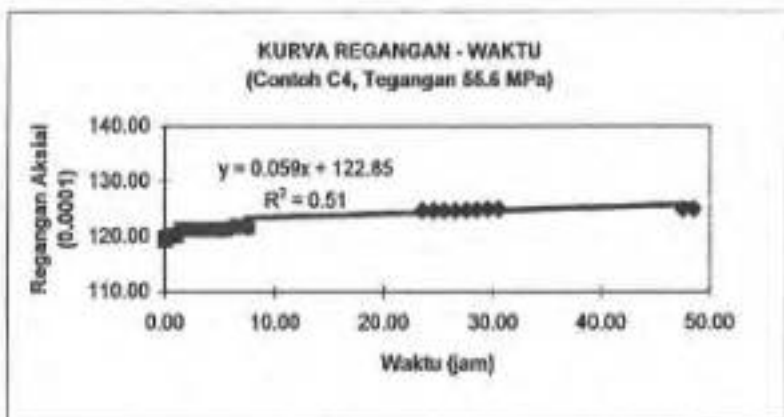
$$\epsilon(t) = 1.11E-02 + 1.76E-04(1 - e^{(-7.28E-02 \cdot t)}) + 1.63E-06t$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	$\eta 1$ MPa.jam	$\eta 2$ MPa.jam
46.9	110	2800	4.08E+03	408E+03	65100E+03	279E+03

Persamaan :

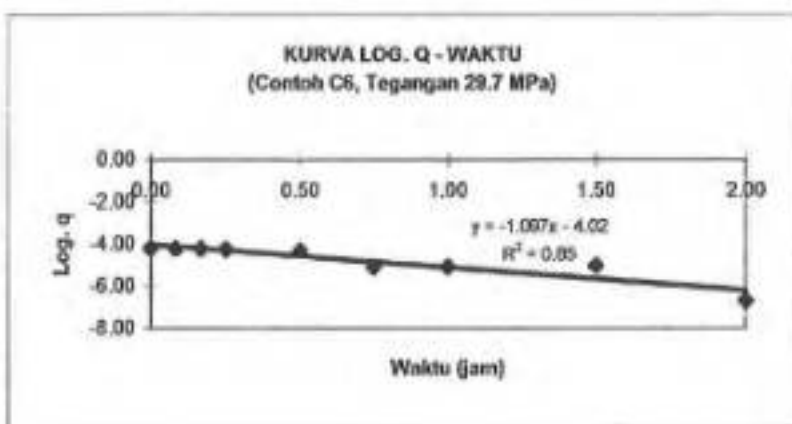
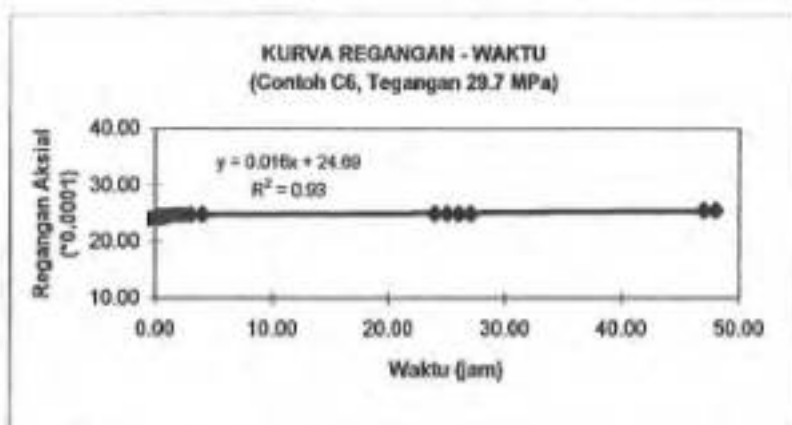
$$\epsilon(t) = 1.15E-02 + 1.15E-04(1 - e^{(-1.46E-00 \cdot t)}) + 7.2E-07t$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	$\eta 1$ MPa.jam	$\eta 2$ MPa.jam
55.6	130	227	4.63E+03	197E+03	9300E+03	178E+03

Persamaan :

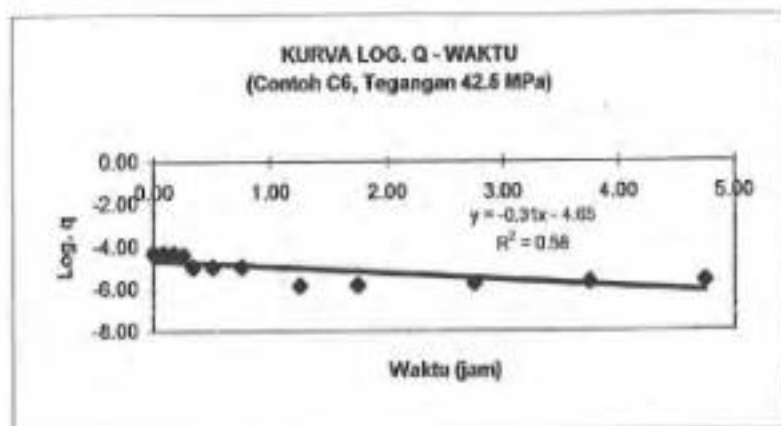
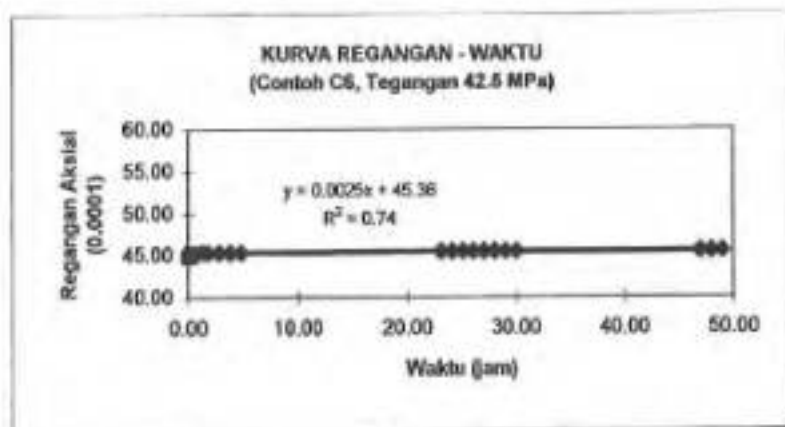
$$\epsilon(t) = 1.20E-02 + 2.82E-04(1 - e^{-(1.11E-00)t}) + 5.98E-06t$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	η_1 MPa.jam	η_2 MPa.jam
29.7	70	9870	12.5E+03	308E+03	18700E+03	21000E+03

Persamaan :

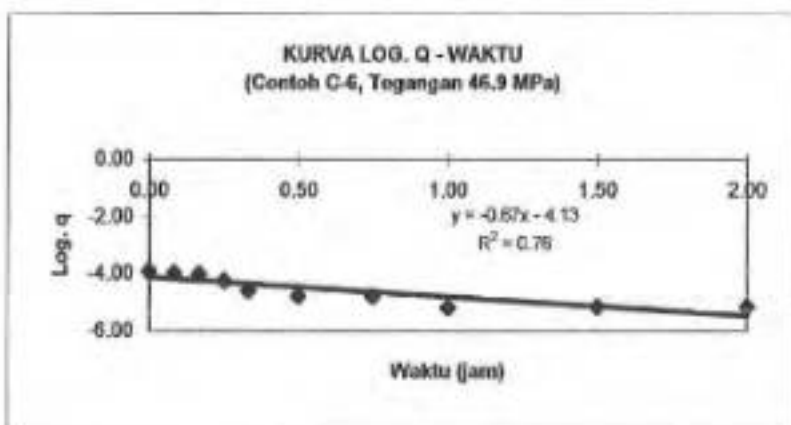
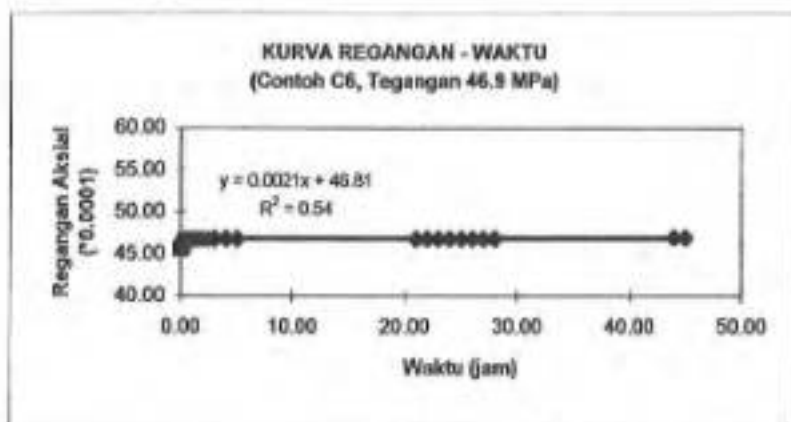
$$\epsilon(t) = 2.37E-03 + 9.64E-05(1 - e^{-(1.47E-02)t}) + 1.59E-06t$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	η_1 MPa.jam	η_2 MPa.jam
42.5	100	54500	9.42E+03	1890E+03	170000E+03	25400E+03

Persamaan :

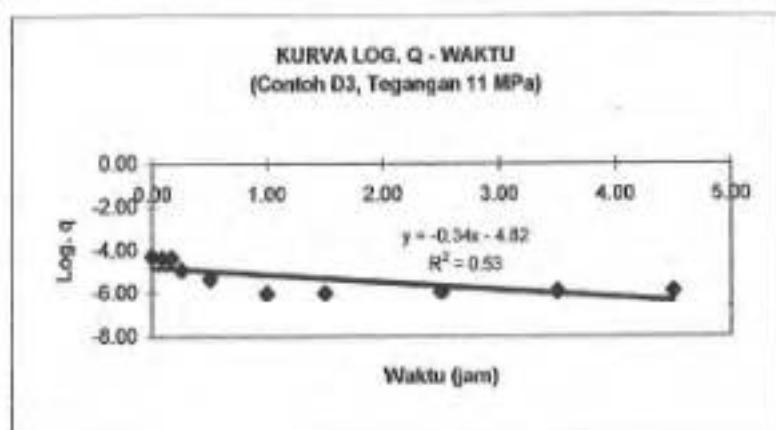
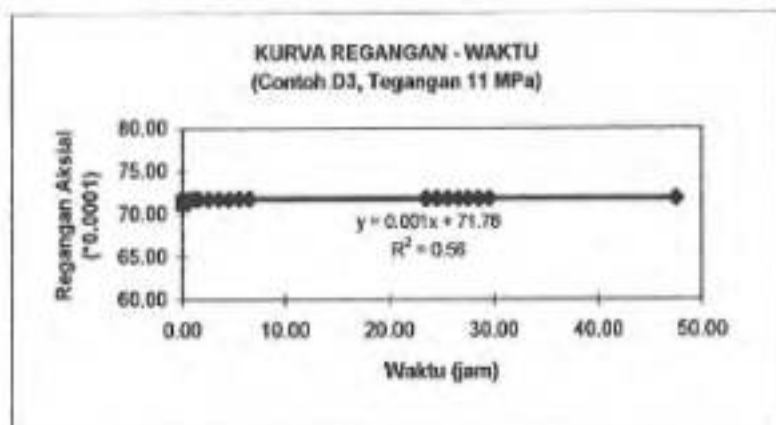
$$\sigma(t) = 4.51E-03 + 2.25E-05(1 - e^{-(7.45E-02 \cdot t)}) + 2.5E-07t$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	η_1 MPa.jam	η_2 MPa.jam
46.9	110	64200	1.02E+04	631E+03	223000E+03	6030E+03

Persamaan :

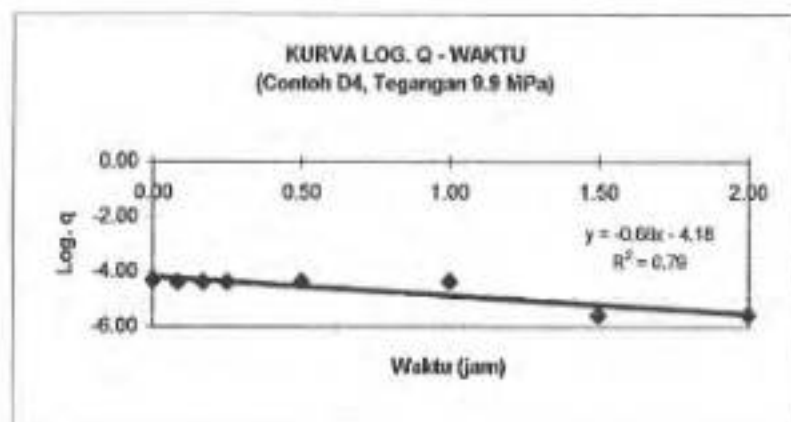
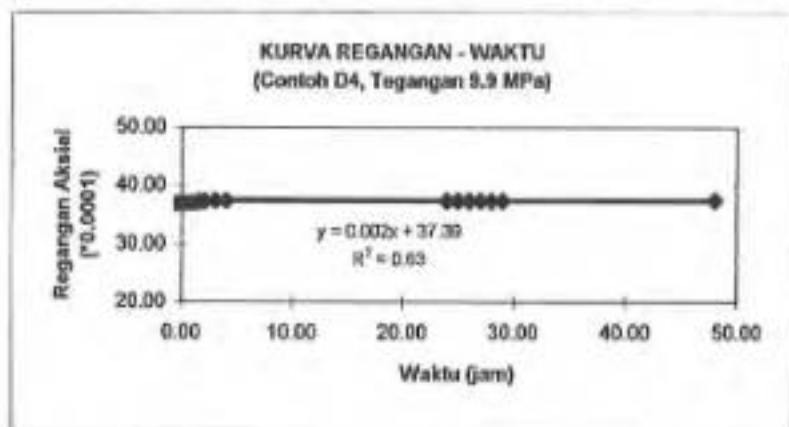
$$\varepsilon(t) = 4.81E-03 + 7.44E-05(1 - e^{-(1.05E-01)t}) + 2.1E-07t$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	η_1 MPa.jam	η_2 MPa.jam
11	100	72650	1.54E+03	730.0E+3	110000E+03	11100E+03

Persamaan :

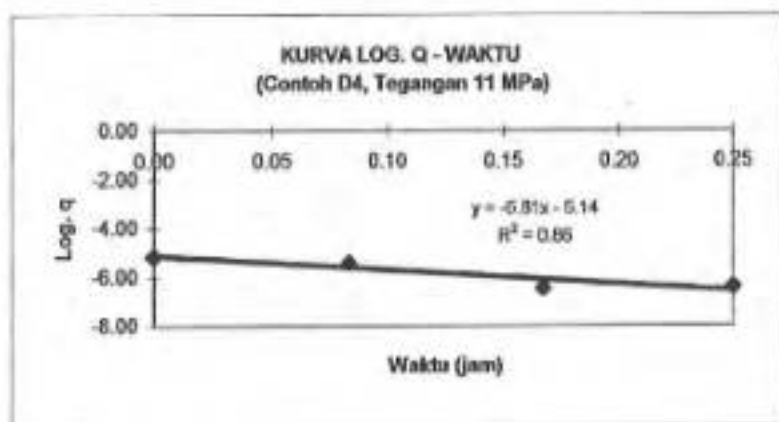
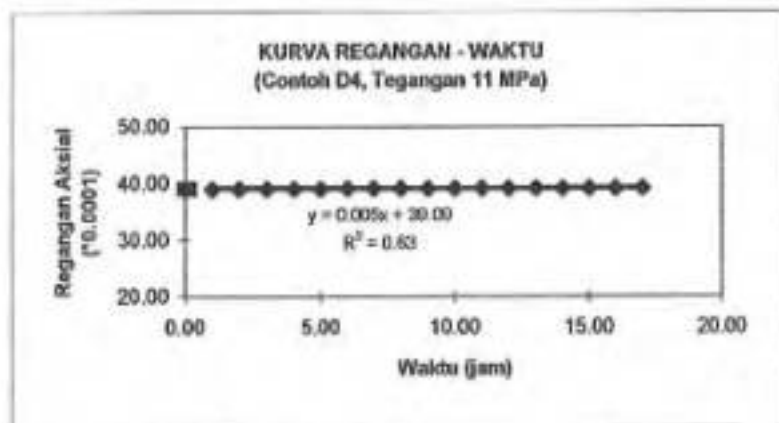
$$\epsilon(t) = 7.16E-03 + 1.51E-05(1 - e^{-(6.57E-02 \cdot t)}) + 1.0E-071$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	$\eta 1$ MPa.jam	$\eta 2$ MPa.jam
9.9	90	52100	2.70E+03	151E+0.3	49500E+03	1500E+03

Persamaan :

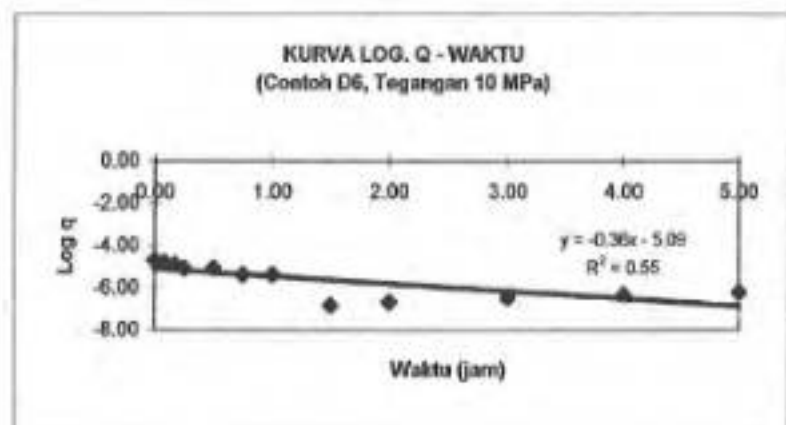
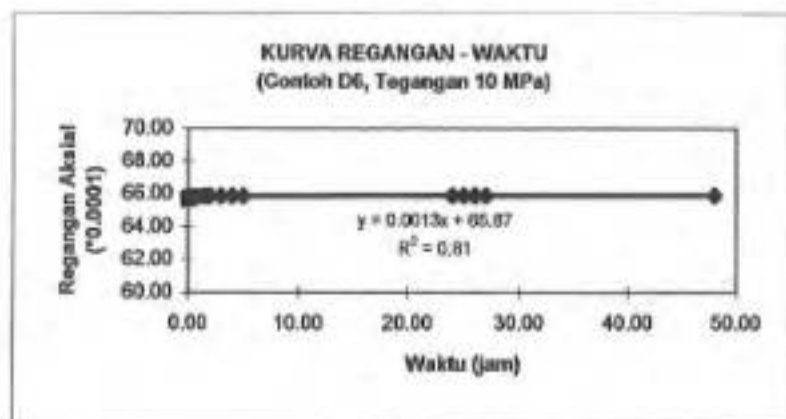
$$\epsilon(t) = 3.67E-03 + 6.56E-05(1 - e^{-(1.01E-01)t}) + 2.0E-07t$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	η_1 MPa.jam	η_2 MPa.jam
11	100	20120	2.82E+03	1560E+03	21600E+03	18400E+03

Persamaan :

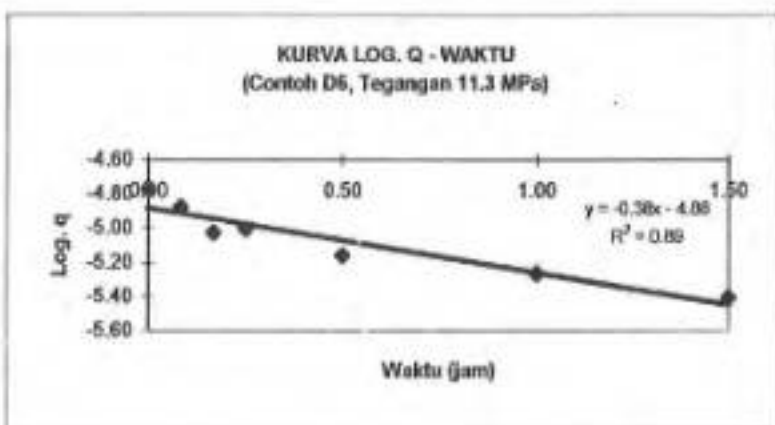
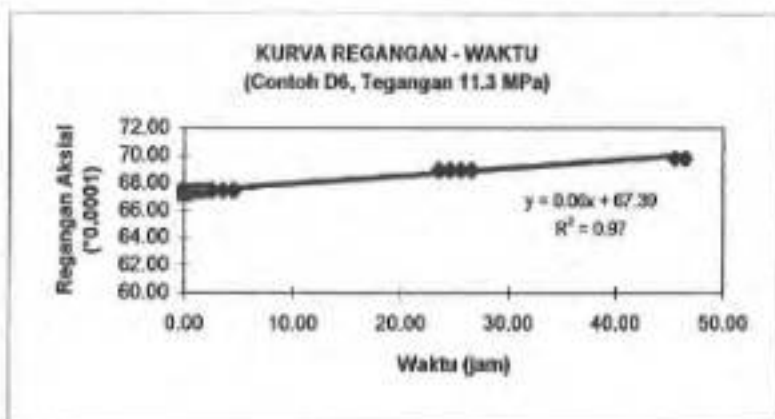
$$\epsilon(t) = 3.90E-03 + 7.33E-06(1 - e^{-(8.14E-02 \cdot t)}) + 5.1E-07t$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	η_1 MPa.jam	η_2 MPa.jam
10	90	59200	1.52E+03	1230E+03	76900E+03	32700E+03

Persamaan :

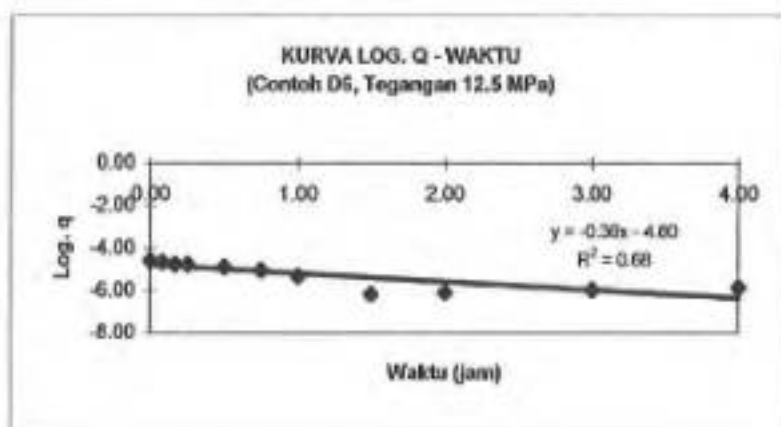
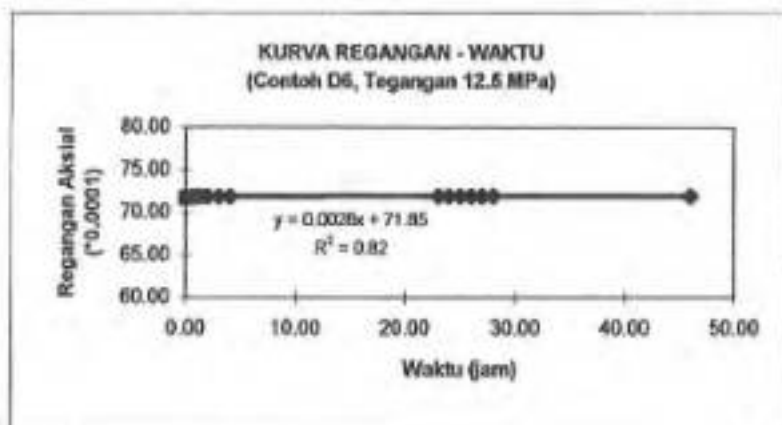
$$\epsilon(t) = 6.56E-03 + 8.11E-06(1 - e^{-(3.77E-02 \cdot t)}) + 1.3E-07t$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	η_1 MPa.jam	η_2 MPa.jam
11.3	100	1333	1.68E+03	853E+03	2000E+03	1390E+03

Persamaan :

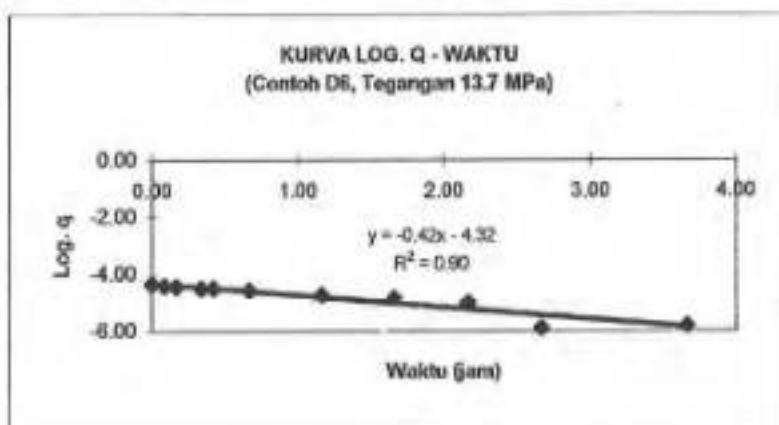
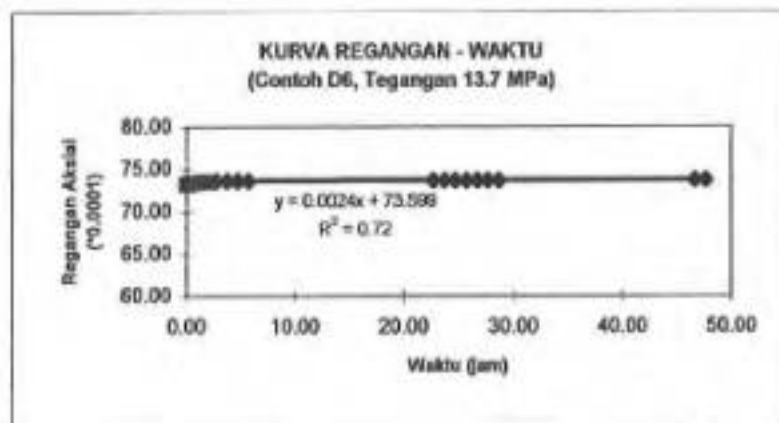
$$\epsilon(t) = 6.73\text{E-}03 + 1.32\text{E-}05(1 - e^{(-6.19\text{E-}01 \cdot t)}) + 5.66\text{E-}06t$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	η_1 MPa.jam	η_2 MPa.jam
12.5	110	25350	1.74E+03	793E+03	44600E+03	12700E+03

Persamaan :

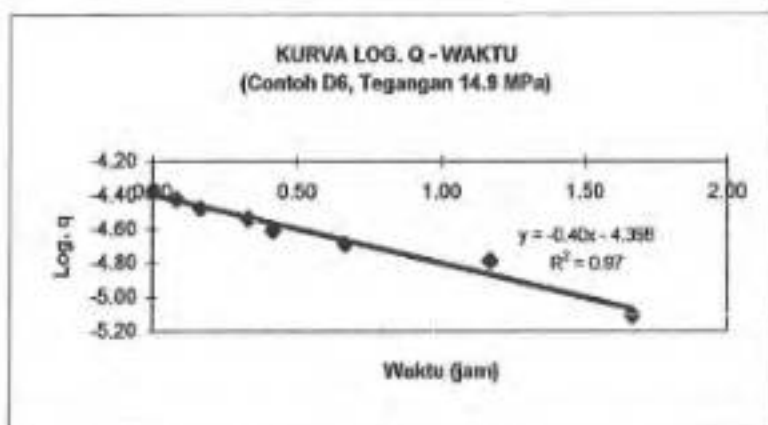
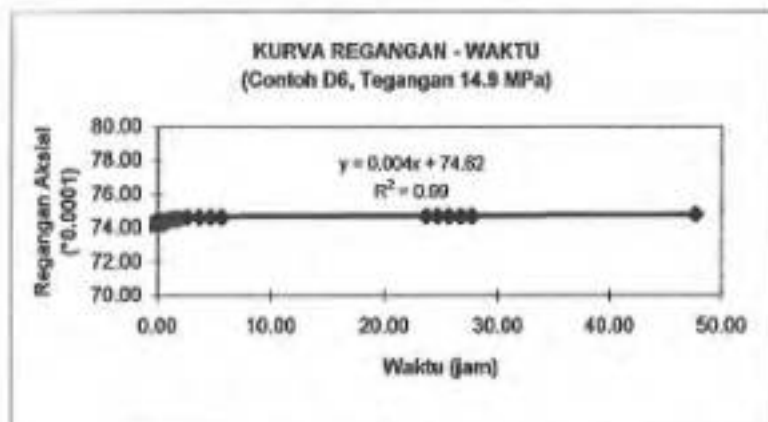
$$\epsilon(t) = 7.17E-03 + 1.58E-05(1 - e^{-(6.26E-02 \cdot t)}) + 2.8E-07t$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	η_1 MPa.jam	η_2 MPa.jam
13.7	120	20850	1.87E+03	268E+03	57100E+03	4480E+03

Persamaan :

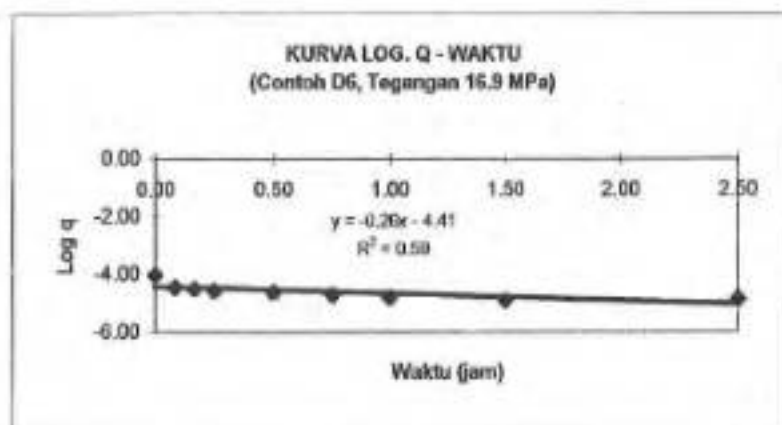
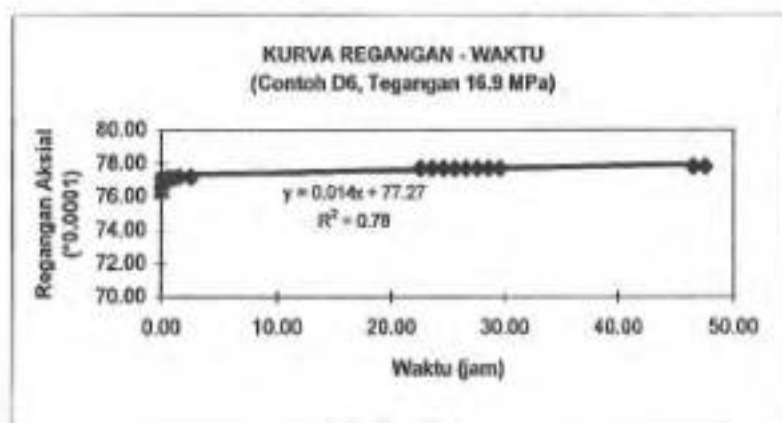
$$\epsilon(t) = 7.31E-03 + 4.76E-05(1 - e^{-(6.43E-02 \cdot t)}) + 2.4E-07t$$



Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	η_1 MPa.jam	η_2 MPa.jam
14.9	130	17050	2.01E+03	373E+03	37300E+03	761E+03

Persamaan :

$$\epsilon(t) = 7.42E-03 + 4.00E-05(1 - e^{(-4.90E-01 \cdot t)}) + 4.0E-07t$$

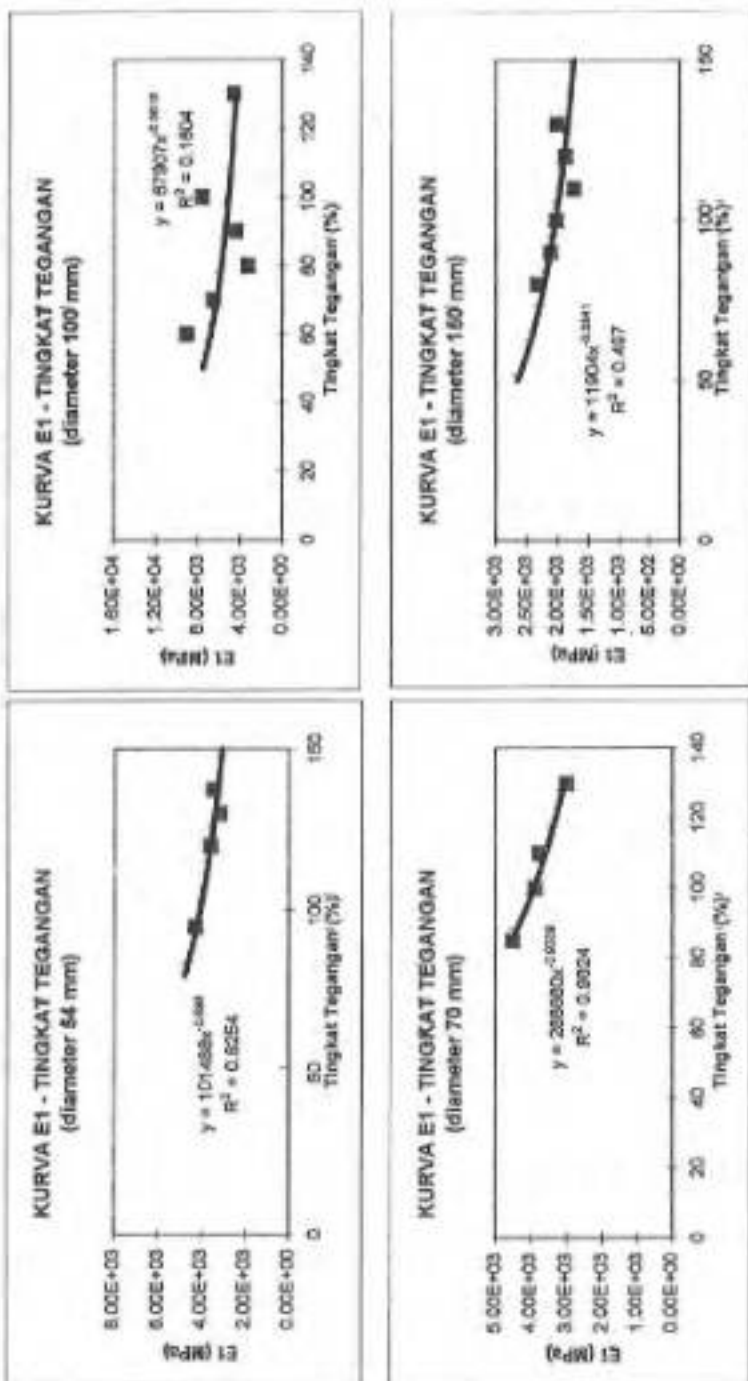


Tegangan MPa	Tingkat Tegangan (%)	Waktu failure (jam)	E1 MPa	E2 MPa	η_1 MPa.jam	η_2 MPa.jam
16.9	150	4780	2.20E+03	429E+03	12300E+03	822E+03

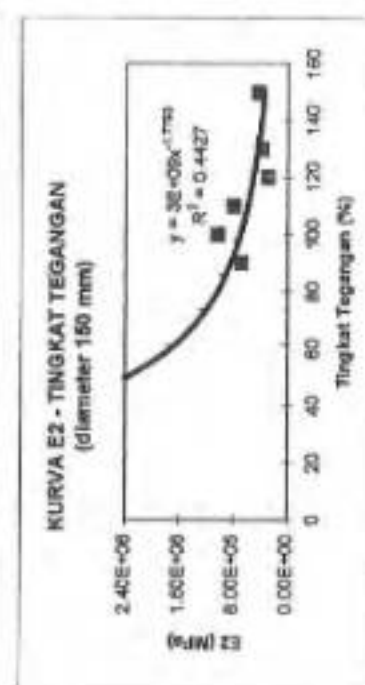
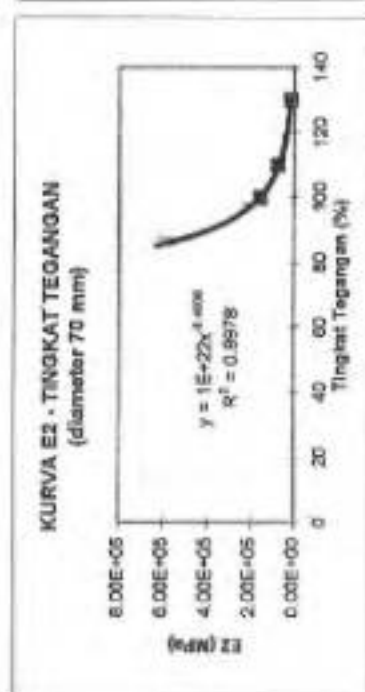
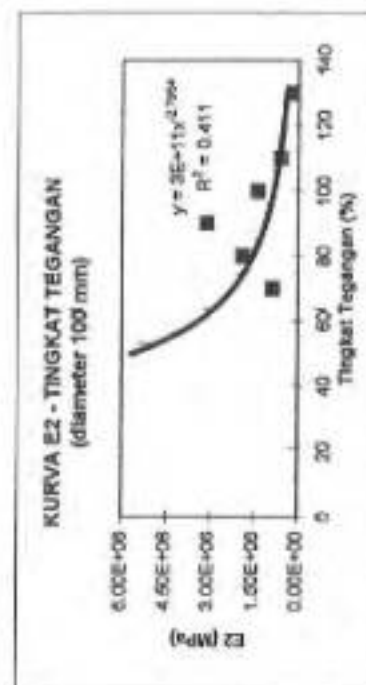
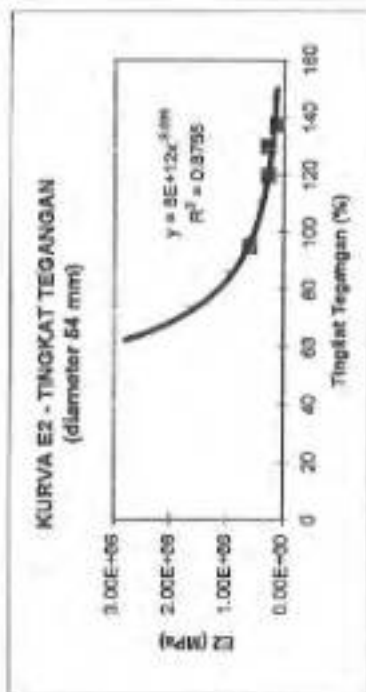
Persamaan :

$$\epsilon(t) = 7.69E-03 + 3.94E-05(1 - e^{-(5.22E-01 \cdot t)}) + 1.37E-06t$$

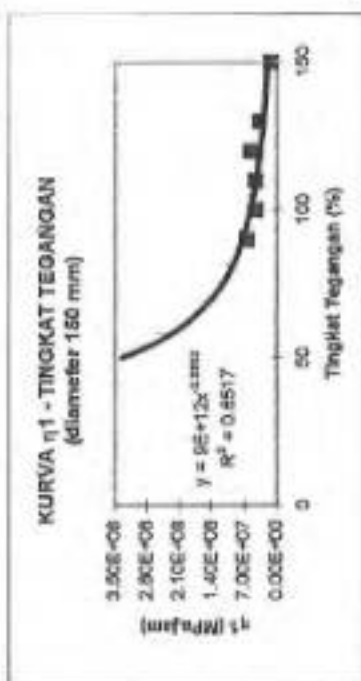
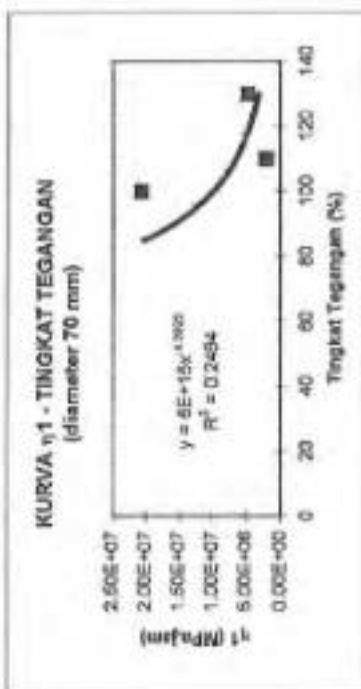
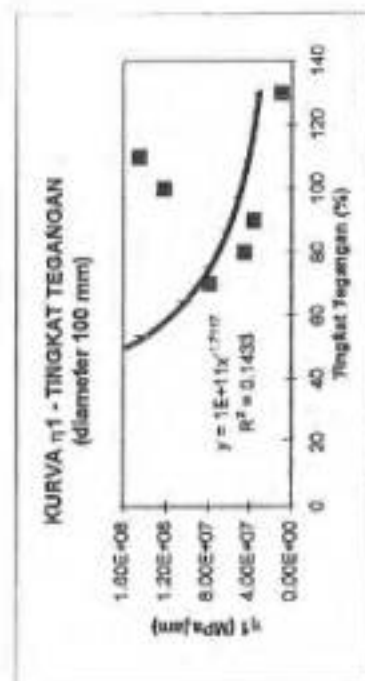
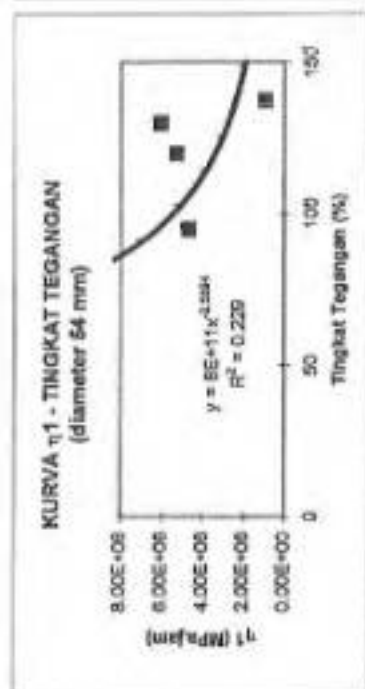
LAMPIRAN C
KURVA-KURVA KONSTANTA RHEOLOGI
TERHADAP TINGKAT TEGANGAN



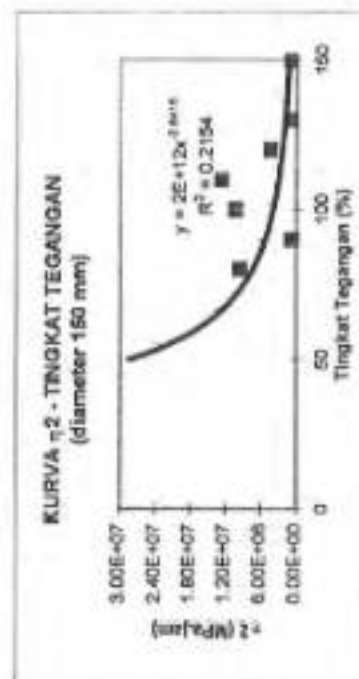
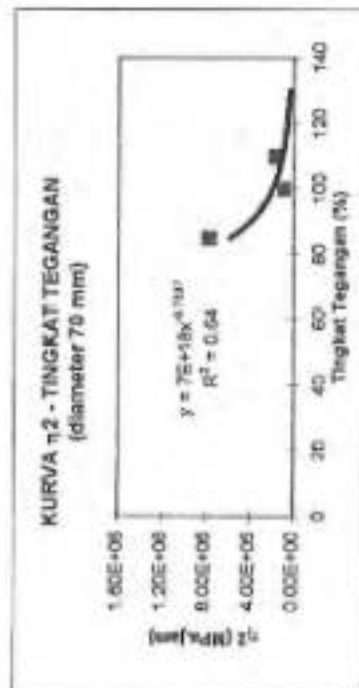
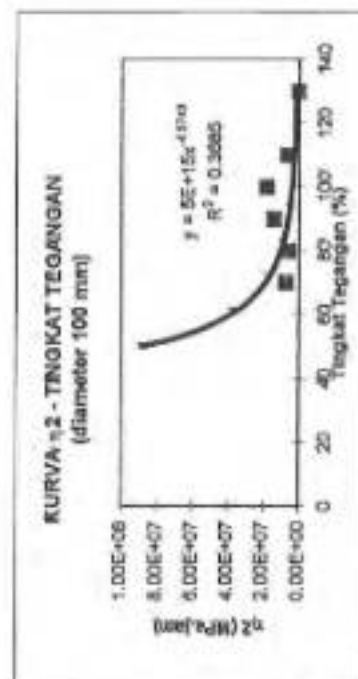
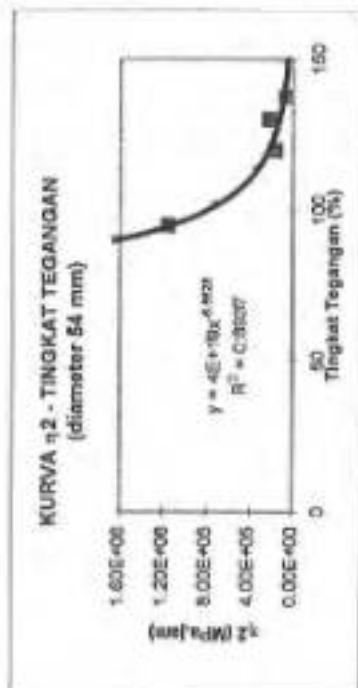
Gambar Kurva Modulus Elastisitas (E1) terhadap Tingkat Tegangan



Gambar Kurva Elastisitas Tertunda (E2) terhadap Tingkat Tegangan



Gambar Kurva Laju Aliran Viskos (η_1) terhadap Tingkat Tegangan



Gambar Kurva Laju Elastisitas Tertunda (η_2) terhadap Tingkat Tegangan

LAMPIRAN D
PERHITUNGAN ANALISIS DIMENSI

Metode yang digunakan dalam analisis dimensi adalah metode Matrik, dengan variabel yang dianalisis $n = 10$ buah (Tabel D.1)

Tabel D.1. Variabel-variabel pada Analisis Dimensi

Variabel	Symbol	Dimensi
Luas Pilar	A	L^2
Tinggi Pilar	h	L
Bobot Isi	γ	ML^{-3}
Gravitasi	g	LT^{-2}
Kuat Tekan Uniaksial Pilar	σ_c	$ML^{-1}T^{-2}$
Kuat Tekan Jangka Panjang Pilar	σ_l	$ML^{-1}T^{-2}$
Modulus Elastisitas	E_1	$ML^{-1}T^{-2}$
Modulus Elastisitas Tertunda	E_2	$ML^{-1}T^{-2}$
Laju Aliran Viskos	η_1	$ML^{-1}T^{-1}$
Laju Elastisitas Tertunda	η_2	$ML^{-1}T^{-1}$

Fungsi umum persamaannya adalah :

$$f(A, h, \gamma, g, \sigma_c, \sigma_l, E_1, E_2, \eta_1, \eta_2) = 0$$

D.1. Mencari Produk Tak Berdimensi

Matrik dimensi dari 10 variabel yang akan dianalisis adalah:

	σ_c	γ	g	A	h	σ_l	E_1	E_2	η_1	η_2
M	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1
L	-1	-3	1	2	1	-1	-1	-1	-1	-1
T	-2	0	-2	0	0	-2	-2	-2	-1	-1

Variabel kuat tekan uniaksial (α_c), gravitasi (g), dan bobot isi (γ) dipilih sebagai matrik yang pertama dan non-singular.

$$[M_{ij}] = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -1 & -3 & 1 \\ -1 & 0 & -2 \end{pmatrix} \text{ dan } [N_{ip}] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -2 & -2 & -2 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

$$[X_i] = (-1) [M_{ij}]^{-1} [N_{ip}]$$

B.1.1. Mencari inverse matriks $[M_{ij}]$

1. Determinan

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -1 & -3 & 1 \\ -2 & 0 & -2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -1 & -3 & 1 \\ -2 & 0 & -2 \end{vmatrix}$$

$$(1 \cdot -3 \cdot -2) + (1 \cdot 1 \cdot -2) + (0 \cdot -1 \cdot 0) - [(0 \cdot -3 \cdot -2) + (1 \cdot 1 \cdot 0) + (1 \cdot -1 \cdot -2)] = 2$$

2. Transposisi :

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 & -2 \\ 1 & -3 & 0 \\ 0 & 1 & -2 \end{pmatrix}$$

3. Kofaktor :

$$\begin{array}{lll} a_{11} = +(6-0) = 6 & a_{21} = -(2-(-2)) = -4 & a_{31} = +(0-(-6)) = 6 \\ a_{12} = -(-2+0) = 2 & a_{22} = +(-2-0) = -2 & a_{32} = -(0-(-2)) = -2 \\ a_{13} = +(1-0) & a_{23} = -(1-0) = -1 & a_{33} = +(-3-(-1)) = -2 \end{array}$$

Jadi matriks inverse $[M_{ij}]$ adalah :

$$\frac{\begin{pmatrix} 6 & 2 & 1 \\ -4 & -2 & -1 \\ -6 & -2 & -2 \end{pmatrix}}{2} = \begin{pmatrix} 3 & 1 & \frac{1}{2} \\ -2 & -1 & -\frac{1}{2} \\ -3 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

D.1.2. Mencari $[X_d]$

$$\begin{aligned}
 [X_d] &= (-1) [M_d^{-1}] [N_d] \\
 [X_d] &= (-1) \begin{pmatrix} 3 & 1 & \frac{1}{2} \\ -2 & -1 & -\frac{1}{2} \\ -2 & -1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -2 & -2 & -2 & -1 & -1 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} -2 & -1 & -1 & -1 & -1 & -\frac{3}{2} & -\frac{3}{2} \\ 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & \frac{2}{1} & \frac{2}{1} \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Matrik produk tak berdimensi yang didapatkan adalah sebagai berikut :

	π_1	π_2	π_3	π_4	π_5	π_6	π_7
A	h	σ_I	E_1	E_2	η_1	η_2	
σ_e	-2	-1	-1	-1	-1	$-\frac{3}{2}$	$-\frac{3}{2}$
γ	2	1	0	0	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
g	2	1	0	0	0	$\frac{2}{1}$	$\frac{2}{1}$
A	1	0	0	0	0	0	0
h	0	1	0	0	0	0	0
σ_I	0	0	1	0	0	0	0
E_1	0	0	0	1	0	0	0
E_2	0	0	0	0	1	0	0
η_1	0	0	0	0	0	1	0
η_2	0	0	0	0	0	0	1

Produk Tak Berdimensi 1 (π_1)

$$\pi_1 = \frac{\gamma^2 g^2 A}{\sigma_e^2}$$

$$\text{Produk Tak Berdimensi 2 } (\pi_2) \quad \pi_2 = \frac{\gamma \cdot g \cdot h}{\sigma_c}$$

$$\text{Produk Tak Berdimensi 3 } (\pi_3) \quad \pi_3 = \frac{\sigma_l}{\sigma_c}$$

$$\text{Produk Tak Berdimensi 4 } (\pi_4) \quad \pi_4 = \frac{E_1}{\sigma_c}$$

$$\text{Produk Tak Berdimensi 5 } (\pi_5) \quad \pi_5 = \frac{E_2}{\sigma_c}$$

$$\text{Produk Tak Berdimensi 6 } (\pi_6) \quad \pi_6 = \frac{\eta_1 \cdot g \cdot \sqrt{\gamma}}{\sqrt{\sigma_c^3}}$$

$$\text{Produk Tak Berdimensi 7 } (\pi_7) \quad \pi_7 = \frac{\eta_2 \cdot g \cdot \sqrt{\gamma}}{\sqrt{\sigma_c^3}}$$

Jadi fungsi produk tak berdimensi adalah :

$$f\left(\frac{\gamma^2 \cdot g^2 \cdot A}{\sigma_c^2}, \frac{\gamma \cdot g \cdot h}{\sigma_c}, \frac{\sigma_l}{\sigma_c}, \frac{E_1}{\sigma_c}, \frac{E_2}{\sigma_c}, \frac{\eta_1 \cdot g \cdot \sqrt{\gamma}}{\sqrt{\sigma_c^3}}, \frac{\eta_2 \cdot g \cdot \sqrt{\gamma}}{\sqrt{\sigma_c^3}}\right) = 0$$

D.2. Mencari Faktor Skala

Produk-produk tak berdimensi yang dihasilkan, dapat digunakan untuk mencari faktor skala antara model dan keadaan sebenarnya di mana nilai produk tak berdimensi model (π_m) dan keadaan sebenarnya (π) harus sama.

Untuk mencari faktor skala, dipilih 3 faktor skala secara bebas, yaitu luas pilar (A), gravitasi (g), dan bobot isi (γ). Jika luas model dibuat x kali lebih kecil dari sebenarnya, maka 3 faktor skala yang dipilih dapat dilihat pada Tabel D.2.

Tabel D.2. Faktor Skala yang Dipilih Secara Bebas untuk Keadaan Sebenarnya Sebesar x kali Model

Variabel	Faktor Skala
Luas Permukaan Pilar (A)	x
Gravitasi (g)	1
Bobot isi (γ)	1

Faktor Skala untuk Kuat Tekan Uniaksial

$$\pi_m = \pi$$

$$\frac{\gamma^2 m g^2 m \cdot A_m}{\sigma_{cm}^2} = \frac{\gamma^2 g^2 \cdot A}{\sigma_c^2}$$

$$\frac{\gamma^2 m}{\gamma^2} \cdot \frac{g^2 m}{g^2} \cdot \frac{A_m}{A} = \frac{\sigma_{cm}^2}{\sigma_c^2}$$

$$1 \cdot 1 \cdot \frac{1}{x} = \frac{\sigma_{cm}^2}{\sigma_c^2}$$

$$\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_c} = \sqrt{\frac{1}{x}}$$

Faktor Skala untuk Tinggi Pilar

$$\frac{\gamma^2 m g^2 m \cdot h_m}{\sigma_{cm}^2} = \frac{\gamma^2 g^2 \cdot h}{\sigma_c^2}$$

$$\frac{\gamma^2}{\gamma^2 m} \cdot \frac{g^2}{g^2 m} \cdot \frac{\sigma_{cm}^2}{\sigma_c^2} = \frac{h_m}{h}$$

$$\frac{h_m}{h} = \sqrt{\frac{1}{x}}$$

Faktor Skala untuk Kuat Tekan Jangka Panjang (σ_1), Modulus Elastisitas (E_1) dan Elastisitas Tertunda (E_2)

$$\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_c} = \frac{E_{1m}}{E_1}$$

$$\frac{E_{1m}}{E_1} = \sqrt{x}$$

Faktor Skala untuk Laju Aliran Viskos (η_1) dan Laju Elastisitas Tertunda (η_2)

$$\frac{\eta_{1m} \cdot g_m \cdot \sqrt{f_m}}{\sqrt{\sigma_{cm}^3}} = \frac{\eta_1 \cdot g \cdot \sqrt{f}}{\sqrt{\sigma_c^3}}$$

$$\frac{g}{g_m} \cdot \sqrt{\frac{f}{f_m}} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{cm}^3}{\sigma_c^3}} = \frac{\eta_{1m}}{\eta_1}$$

$$\frac{\eta_{1m}}{\eta_1} = \frac{\sigma_{cm}}{\sigma_c} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_c}} = \frac{1}{x \cdot \sqrt{x}}$$