TUGAS AKHIR – MO 184804

ANALISIS UMUR KELELAHAN SISTEM TAMBAT AKIBAT PENGARUH KETIDAKSIMETRISAN KONFIGURASI *MOORING SYSTEM* 4X1 PADA *SINGLE POINT MOORING*

REVY MAGHRIZA
NRP. 04311640000064

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D
Murdjito, M.Sc.Eng

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya

2020

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS UMUR KELELAHAN SISTEM TAMBAT AKIBAT PENGARUH KETIDAKSIMETRISAN KONFIGURASI *MOORING SYSTEM* 4X1 PADA *SINGLE POINT MOORING*

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar sarjana teknik pada program studi S-1 Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

Oleh :

Revy Maghriza (NRP. 04311640000064)

Disetujui oleh :

1. Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D. (Pembimbing 1)

   .....

2. Murdjito, M.Sc.Eng. (Pembimbing 2)

   .....

3. Rudi Waluyo Prastianto, S.T., M.T., Dr.Eng. (Penguji 1)

   .....

4. Wimala Lalitya. Dhanista, S.T., M.T. (Penguji 2)

   .....

SURABAYA, 7 AGUSTUS 2020

ANALISIS UMUR KELELAHAN SISTEM TAMBAT AKIBAT PENGARUH KETIDAKSIMETRISAN KONFIGURASI *MOORING SYSTEM* 4X1 PADA *SINGLE POINT MOORING*

Nama Mahasiswa : Revy Maghriza
NRP : 04311640000064
Departemen : Teknik Kelautan, FTK-ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.
Murdjito, M.Sc.Eng

ABSTRAK

Tugas akhir menjelaskan tentang analisis umur kelelahan *anchor chain* pada *Single Point Mooring* kondisi *stand alone* dengan membandingkan dua konfigurasi *mooring system* 4x1 asimetris dan simetris untuk mengetahui apakah kedua konfigurasi *mooring system* tersebut aman selama masa operasi dan untuk mengetahui bagaimana pengaruh ketidaksimetrisan konfigurasi *mooring system* pada *fatigue life anchor chain* terkait panjang *mooring line*, *pretension*, dan sudut sebarnya. Analisis ditinjau pada kondisi pembebanan lingkungan *Ultimate Limit State* (ULS) dan *Fatigue Limit State* (FLS) berdasarkan code API RP 2 SK menggunakan Orcaflex. Kondisi pembebanan lingkungan ULS digunakan untuk mengetahui *tension* maksimum *anchor chain* dan *offset* maksimum SPM sedangkan kondisi pembebanan lingkungan FLS digunakan untuk mengetahui umur kelelahan *anchor chain* menggunakan metode *Rainflow Counting* dengan kurva T-N. Pada kondisi ULS, konfigurasi simetris lebih mampu menahan beban lingkungan arah 0^o dan 180^o karena hasil *tension* maksimum dan *offset* maksimum yang lebih kecil dari konfigurasi asimetris yaitu 730.51 kN (*Heading* 0^o) dan 762.23 kN (*Heading* 180^o) untuk *tension* maksimum dan 5.94 m (*Heading* 0^o dan 180^o) untuk *offset* maksimum. Sedangkan konfigurasi asimetris lebih mampu menahan beban lingkungan pada arah 90^o dan 270^o karena hasil *tension* maksimum dan *offset* maksimum yang lebih kecil dari konfigurasi simetris yaitu 53.31 kN (*Heading* 90^o) dan 47.87 kN (*Heading* 270^o) untuk *tension* maksimum, dan 4.95 m (*Heading* 90^o) dan 4.72 m (*Heading* 270^o) untuk *offset* maksimum. Pada kondisi FLS, konfigurasi asimetris memiliki umur kelelahan minimum *anchor chain* yang lebih panjang yaitu sebesar 291 tahun dengan umur desain sebesar 97 tahun daripada konfigurasi simetris yang memiliki umur kelelahan minimum *anchor chain* sebesar 207 tahun dengan umur desain sebesar 69 tahun. Hasil ini menunjukkan bahwa kedua konfigurasi mooring system dapat dinyatakan aman untuk beroperasi karena umur desainnya melampaui umur layanan operasi yang diharapkan yaitu 20 tahun. Hasil ini juga menunjukkan pengaruh ketidaksimetrisan konfigurasi *mooring system* karena beberapa faktor yaitu sudut sebar *mooring line*, panjang *mooring line*, dan *pretension mooring line*.

Kata Kunci : *Anchor Chain, Tension, T-N Curve, Fatigue Life, Rainflow method*

FATIGUE LIFE ANALYSIS OF MOORING SYSTEM: THE EFFECT OF ASYMMETRY MOORING SYSTEM CONFIGURATION ON SINGLE POINT MOORING

Name : Revy Maghriza

Student Reg. Number : 04311640000064

Department : Teknik Kelautan, FTK-ITS

Supervisors : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.

Murdjito, M.Sc.Eng

ABSTRACT

The final project explains the fatigue life analysis of anchor chain on Single Point Mooring in stand-alone conditions by comparing the asymmetric and symmetrical 4x1 mooring system configurations to find out whether the two mooring system configurations are safe during the operating period and to find out how the influence of the asymmetric mooring system configuration on fatigue life of the anchor chain which is related to the length of the mooring line, pretension, and spread angle. The analysis was reviewed in terms of the environmental conditions of Ultimate Limit State (ULS) and Fatigue Limit State (FLS) based on the API RP 2 SK code using Orcaflex software. ULS environmental loading condition is used to determine the maximum tension of anchor chain and maximum offset of SPM while the FLS environmental loading condition is used to determine the fatigue life of the anchor chains using the Rainflow Counting method with a T-N curve. In the ULS condition, the symmetrical configuration is better able to withstand environmental loads in heading of 0^o and 180^o because the results of maximum tension and maximum offset are smaller than the asymmetrical configuration of 730.51 kN (Heading 0^o) and 762.23 kN (Heading 180^o) for maximum tension and 5.94 m (Heading 0^o and 180^o) for maximum offset. While the asymmetrical configuration is better able to withstand environmental loads in heading of 90^0 and 270^0 because the results of maximum tension and maximum offset are smaller than the symmetrical configuration of 53.31 kN (heading 90^0) and 47.87 kN (heading 270^0) for maximum tension and 4.95 m (heading 90^0) and 4.72 m (heading 270^0) for maximum offset. In the FLS condition, the asymmetrical configuration has a longer minimum fatigue life of anchor chain which is 291 years with a design life of 97 years than the symmetrical configuration which has a minimum fatigue life of anchor chain which is 207 years with a design life of 69 years. These results indicate that both mooring system configurations can be declared safe to operate because the design life of them exceed the expected service life of 20 years. These results also indicate the influence of asymmetric mooring system configuration because several factors, namely the spread angle of the mooring line, the length of the mooring line, and the pretension of the mooring line .

Keywords : *Anchor Chain, Tension, T-N Curve, Fatigue Life, Rainflow method*

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT, zat maha pencipta dan maha kuasa atas segala hidayah dan karunia-Nya. Shalawat serta salam semoga senantiasa tercurahkan ke haribaan Nabi Muhammad SAW. *Alhamdulillahirabbil'alamin*, dengan izin Allah SWT penulis dapat menyelesaikan penulisan tugas akhir ini. Laporan tugas akhir ini bertujuan untuk memenuhi prasyarat mahasiswa dalam menyelesaikan Studi Kesarjanaan (S-1) di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Tugas akhir juga ini dibuat dengan tujuan agar mahasiswa mampu menerapkan ilmu pengetahuan yang selama ini telah didapat selama berada di bangku perkuliahan berdasarkan topik yang diminati. Selain itu penulis berharap laporan tugas akhir ini dapat dijadikan sebagai inspirasi dan dasar dalam pengerjaan jurnal dan tugas akhir atau penelitian selanjutnya yang terkait.

Dalam penyusunan tugas akhir ini penulis mendapatkan banyak bantuan, dukungan, dan motivasi dari berbagai pihak yang terkait. Atas bantuan dari pihak yang terkat tersebut, penulis mengucapkan banyak terima kasih.

Penulis menyadari bahwa laporan tugas akhir ini masih memiliki kekurangan baik dari segi penulisan maupun isi atau materi didalamnya. Karenanya penulis memohon maaf sebesar-besarnya. Penulis sangat berharap tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi para pembaca khususnya mahasiswa/i Departemen Teknik Kelautan FTK ITS untuk meningkatkan kualitas dan prestasi akademik ITS. Akhirnya kepada Allah SWT jugalah penulis berserah diri, semoga selalu dalam lindungan dan hidayah-Nya. Aamiin.

Surabaya, 8 Mei 2020

Penulis,

UCAPAN TERIMA KASIH

Selama penyelesaian laporan tugas akhir ini, penulis banyak mendapatkan bantuan tenaga, materi, informasi, waktu, maupun motivasi yang tidak terhingga dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan ketulusan dan kerendahan hati penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT, karena berkah, rahmat, dan hidayah-Nya penulis mendapatkan berbagai kemudahan dalam berbagai masalah yang telah dihadapi penulis.
2. Ayahanda Sentot Efendi, Ibunda Nur Farida, Hezby Vierdausytha sebagai kakak, M. Aqmal Baihaqi sebagai adik, dan seluruh anggota keluarga penulis yang tak berhenti memberikan doa dan dukungan selama masa perkuliahan.
3. Bapak Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D., sebagai dosen pembimbing pertama yang telah berkenan membimbing, memberikan kritik dan saran bagi penulis selama pengerjaan tugas akhir ini.
4. Bapak Murdjito, M.Sc.Eng., sebagai dosen pembimbing kedua yang juga telah berkenan membimbing, memberikan kritik dan saran bagi penulis selama pengerjaan tugas akhir ini.
5. Bapak Rudi Waluyo Prastianto, S.T., M.T., Dr.Eng dan Ibu Wimala Lalitya Dhanista, S.T., M.T. sebagai dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukannya dalam laporan tugas akhir ini.
6. Bapak Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D selaku dosen wali yang telah berkenan mendukung dan mengarahkan penulis selama masa perkuliahan.
7. Teman-teman adhiwamastya P-56, L-34 yang telah berjuang bersama dan banyak memberikan dukungan moral antara satu dengan yang lainnya.
8. Sahabat-sahabat penulis yaitu Difa, Tiwi, Cici, Anggun, dan Devi.
9. Mas Gilrandi, mbak Madea, mbak Inneke, mas arief, mas Hafidz dan kating Tekla lainnya yang telah membantu penulis selama pengerjaan tugas akhir.
10. Pihak-pihak lain yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu yang telah memberikan dukungan dan inspirasinya.

Penulis berharap semoga dengan segala kebaikan yang telah mereka berikan, mendapatkan balasan yang setimpal oleh Allah SWT. Aamiin.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL ..... **i**
LEMBAR PENGESAHAN ..... **ii**
ABSTRAK ..... **iii**
ABSTRACT ..... **iv**
KATA PENGANTAR ..... **v**
UCAPAN TERIMA KASIH ..... **vi**
DAFTAR ISI ..... **vii**
DAFTAR GAMBAR ..... **x**
DAFTAR TABEL ..... **xii**
BAB I PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan 3
1.4 Manfaat 4
1.5 Batasan Masalah 4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI **5**
2.1 Tinjauan Pustaka 5
2.2 Dasar Teori 7
2.2.1 *Single Point Mooring* (SPM) 7
2.2.2 Kriteria Desain *Mooring System* 9
2.2.3 Simulasi Respon *Mooring Line* 9
2.2.4 Beban Lingkungan 10
2.2.5 Arah Gelombang Terhadap Bangunan Laut 11
2.2.6 Teori Gerak Bangunan Apung 12
2.2.7 Persamaan Gerak Bangunan Apung 13
2.2.8 *Response Amplitude Operator* (RAO) 20
2.2.9 Spektra Gelombang 21
2.2.10 *Spektra Respons* 22
2.2.11 Penentuan Panjang Tali Tambat 23
2.2.12 *Tension* pada *Mooring Line* 24

2.2.13 *Offset* 25
2.2.14 Metode *Rainflow Counting* 25
2.2.15 Kurva T-N 27
2.2.16 Akumulasi *Fatigue Damage* 28
2.2.17 *Fatigue Life* 28
BAB III METODOLOGI PENELITIAN 29
3.1 Diagram Alir Penelitian 29
3.2 Penjelasan Diagram Alir 30
3.2.1 Studi Literatur 30
3.2.2 Pengumpulan Data 30
3.2.3 Pemodelan SPM 30
3.2.4 Validasi SPM 30
3.2.5 Analisis RAO SPM Kondisi *Free Floating* 30
3.2.6 Pemodelan SPM dan *Mooring* dengan Software Orcaflex 31
3.2.7 Analisis *Mooring* Dinamis Dengan Beban ULS (pada kondisi *intact*) 31
3.2.8 Analisis *Mooring* Dinamis Dengan Beban FLS 31
3.2.9 Analisis Umur Kelelahan pada *Anchor Chain* 31
3.2.10 Kesimpulan 31
3.3 Pengumpulan Data 32
3.3.1 Data SPM 32
3.3.2 Data *Mooring* 32
3.3.3 Data Lingkungan 33
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN 35
4.1 Pemodelan SPM 35
4.2 Validasi Pemodelan SPM 36
4.3 *Added Mass* SPM *Free Floating* 36
4.4 *Damping* SPM *Free Floating* 40
4.5 RAO SPM *Free Floating* 43
4.6 Pemodelan *Mooring System* 48
4.6.1 Konfigurasi 4x1 Asimetris 51
4.6.1.1 Konfigurasi 4x1 Asimetris *In Line* 52

4.6.1.2 Konfigurasi 4x1 Asimetris *Between Line* 54
4.6.2 Konfigurasi 4x1 Simetris 55
4.6.2.1 Konfigurasi 4x1 Simetris *In Line* 56
4.6.2.2 Konfigurasi 4x1 Simetris *Between Line* 58
4.7 Analisis *Tension* pada *Mooring Line* 59
4.8 Analisis *Offset* pada SPM 67
4.9 Simulasi Pembebanan pada *Anchor Chain* 71
4.10 Analisis Umur Kelelahan 73
4.10.1 Umur Kelelahan *Mooring System* 4x1 Asimetris 73
4.10.2 Umur Kelelahan *Mooring System* 4x1 Simetris 80
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 87
5.1 Kesimpulan 87
5.2 Saran 88
DAFTAR PUSTAKA 89
LAMPIRAN 91
LAMPIRAN I OUTPUT MOSES 91
LAMPIRAN II OUTPUT ORCAFLEX 97

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Pada SPM Tampak Atas 2
Gambar 1.2 Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Pada SPM Tampak Samping..... 3
Gambar 2.1 CALM Buoy..... 8
Gambar 2.2 Arah Datang Gelombang Terhadap Bangunan Laut..... 12
Gambar 2.3 Derajat Kebebasan Bangunan Apung 13
Gambar 2.4 Gerakan Osilasi Bebas Teredam Akibat Eksitasi Harmonik 16
Gambar 2.5 Grafik Respon Gerakan Bangunan Apung..... 20
Gambar 2.6 Transformasi Spektra Gelombang menjadi Spektra Respon..... 23
Gambar 2.7 *Vessel Moored* dengan Satu *Anchor Line* 23
Gambar 2.8 *Rainflow Method* 26
Gambar 2.9 Kurva T-N 27
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian 29
Gambar 3.2 Data *Mooring Equipment* Asimetris 32
Gambar 4.1 Pemodelan SPM..... 35
Gambar 4.2 Grafik *Added Mass* Gerakan Surge SPM *Free Floating*..... 36
Gambar 4.3 Grafik *Added Mass* Gerakan Sway SPM *Free Floating*..... 37
Gambar 4.4 Grafik *Added Mass* Gerakan Heave SPM *Free Floating*..... 37
Gambar 4.5 Grafik *Added Mass* Gerakan Roll SPM *Free Floating*..... 38
Gambar 4.6 Grafik *Added Mass* Gerakan Pitch SPM *Free Floating*..... 38
Gambar 4.7 Grafik *Added Mass* Gerakan Yaw SPM *Free Floating* 39
Gambar 4.8 Grafik *Damping* Gerakan Surge Pada SPM *Free Floating*..... 40
Gambar 4.9 Grafik *Damping* Gerakan Sway Pada SPM *Free Floating*..... 40
Gambar 4.10 Grafik *Damping* Gerakan Heave Pada SPM *Free Floating*..... 41
Gambar 4.11 Grafik *Damping* Gerakan Roll Pada SPM *Free Floating*..... 41
Gambar 4.12 Grafik *Damping* Gerakan Pitch Pada SPM *Free Floating*..... 42
Gambar 4.13 Grafik *Damping* Gerakan Yaw Pada SPM *Free Floating* 42
Gambar 4.14 Grafik RAO Gerakan Surge SPM *Free Floating*..... 44
Gambar 4.15 Grafik RAO Gerakan Sway SPM *Free Floating* 44
Gambar 4.16 Grafik RAO Gerakan Heave SPM *Free Floating*..... 45
Gambar 4.17 Grafik RAO Gerakan Roll SPM *Free Floating* 46

Gambar 4.18 Grafik RAO Gerakan Pitch SPM *Free Floating* 46
Gambar 4.19 Grafik RAO Gerakan Yaw SPM *Free Floating* 47
Gambar 4.20 *Segment Anchor Chain* 1 – Asimetris 48
Gambar 4.21 *Segment Anchor Chain* 2 – Asimetris 49
Gambar 4.22 *Segment Anchor Chain* 3 – Asimetris 49
Gambar 4.23 *Segment Anchor Chain* 4 – Asimetris 49
Gambar 4.24 *Segment Anchor Chain* 1 – Simetris 50
Gambar 4.25 *Segment Anchor Chain* 2 – Simetris 50
Gambar 4.26 *Segment Anchor Chain* 3 – Simetris 50
Gambar 4.27 *Segment Anchor Chain* 4 – Simetris 51
Gambar 4.28 Detail Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Asimetris 52
Gambar 4.29 Pemodelan Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Asimetris Kondisi *In Line,* (a) Tampak Atas, (b) Tampak Isometrik..... 53
Gambar 4.30 Pemodelan Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Asimetris Kondisi *Between Line,* (a) Tampak Atas, (b) Tampak Isometrik 55
Gambar 4.31 Detail Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Simetris..... 56
Gambar 4.32 Pemodelan Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Simetris Kondisi *In Line,* (a) Tampak Atas, (b) Tampak Isometrik..... 57
Gambar 4.33 Pemodelan Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Simetris Kondisi *Between Line,* (a) Tampak Atas, (b) Tampak Isometrik 59
Gambar 4.34 Grafik *Tension* Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Asimetris..... 63
Gambar 4.35 Grafik *Tension* Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Simetris 66
Gambar 4.36 *Offset* pada *Single Point Mooring* (SPM) 68
Gambar 4.37 *Offset* SPM Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Asimetris..... 69
Gambar 4.38 *Offset* SPM Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Simetris..... 70

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Persamaan Massa Tambah Untuk Bentuk Silinder 14
Tabel 2.2 *Tension Limit* dan *Safety Factor* 25
Tabel 2.3 Nilai M dan K 27
Tabel 3.1 Data SPM 32
Tabel 3.2 Data *Mooring Equipment* Simetris 33
Tabel 3.3 Data Lingkungan Perairan Laut Utara Pulau Jawa 33
Tabel 3.4 *Wave Scatter* 1 Tahunan 34
Tabel 4.1 Hasil Validasi Model SPM 36
Tabel 4.2 Rekapitulasi Perbandingan *Added Mass* Maksimum SPM *Free Floating* Tiap Mode Gerakan 39
Tabel 4.3 Rekapitulasi Perbandingan *Damping* Maksimum SPM *Free Floating* Tiap Mode Gerakan 43
Tabel 4.4 Rekapitulasi Perbandingan RAO Tiap Gerakan Pada SPM 48
Tabel 4.5 Hasil *Tension* dan Pengecekan *Safety Factor Mooring Line* Konfigurasi 4x1 Asimetris, (a) *In Line*, (b) *Between Line* 60
Tabel 4.6 Hasil *Tension* dan Pengecekan *Safety Factor Mooring Line* Konfigurasi 4x1 Simetris, (a) *In Line*, (b) *Between Line* 64
Tabel 4.7 *Offset* Maksimum SPM dengan Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Asimetris 68
Tabel 4.8 *Offset* Maksimum SPM dengan Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Simetris 70
Tabel 4.9 *Seastate* Untuk Analisis *Fatigue* pada *Anchor Chain* 71
Tabel 4.10 Konsep Pembebanan Dalam Simulasi pada Konfigurasi *Mooring System* 4x1 72
Tabel 4.11 Hasil Perhitungan *Damage* pada *Anchor Chain* 1 pada Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Asimetris 73
Tabel 4.12 Hasil Perhitungan *Damage* pada *Anchor Chain* 2 pada Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Asimetris 75
Tabel 4. 13 Hasil Perhitungan *Damage* pada *Anchor Chain* 3 pada Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Asimetris 76

Tabel 4.14 Hasil Perhitungan *Damage* pada *Anchor Chain* 4 pada Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Asimetris 78
Tabel 4.15 Hasil Perhitungan Umur Kelelahan Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Asimetris 79
Tabel 4.16 Hasil Perhitungan *Damage* pada *Anchor Chain* 1 pada Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Simetris 80
Tabel 4.17 Hasil Perhitungan *Damage* pada *Anchor Chain* 2 pada Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Simetris 81
Tabel 4.18 Hasil Perhitungan *Damage* pada *Anchor Chain* 3 pada Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Simetris 83
Tabel 4.19 Hasil Perhitungan *Damage* pada *Anchor Chain* 4 pada Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Simetris 84
Tabel 4.20 Hasil Perhitungan Umur Kelelahan Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Simetris..... 86

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

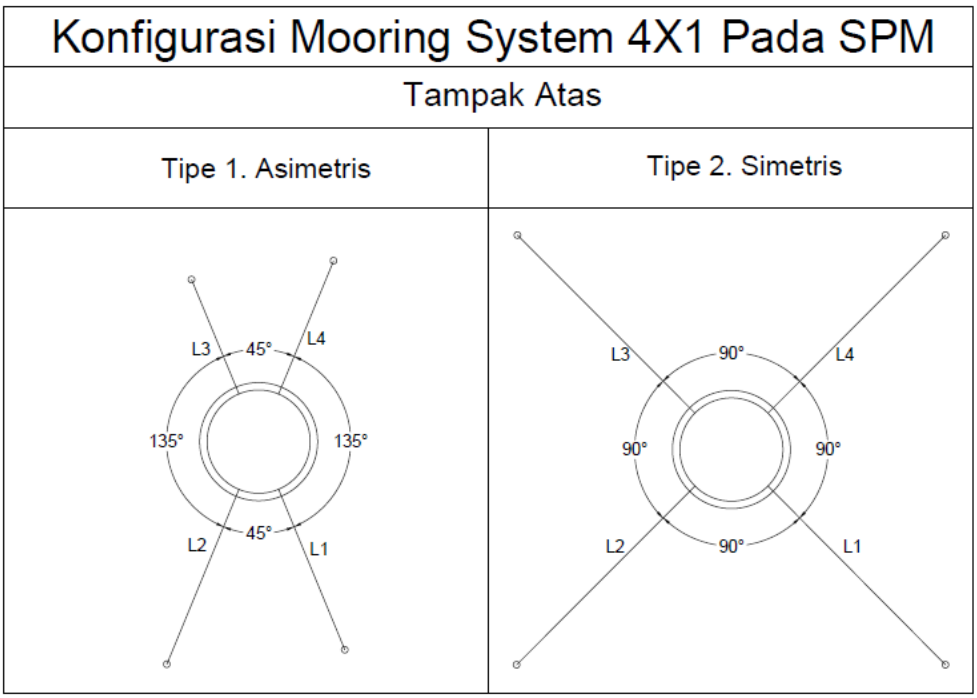
Pengeboran migas di lepas pantai atau yang biasa disebut dengan *offshore* sudah tidak asing lagi di telinga masyarakat. Pengeboran migas *offshore* dapat dilakukan di perairan dangkal maupun dalam. Namun seiring dengan perkembangan zaman, cadangan migas di laut dangkal semakin menipis. Selain itu kebutuhan terhadap energi juga semakin meningkat. Hal ini menyebabkan terjadinya dorongan untuk melakukan pengeboran migas di laut dalam. Berbagai teknologi telah dikembangkan untuk mengatasi hal ini, yaitu adanya *offshore structure*. *Offshore structure* diklasifikasikan menjadi *fixed offshore platform* dan *floating offshore platform*. Penggunaan *floating offshore platform* sendiri dinilai lebih ekonomis daripada *fixed offshore platform* untuk laut dalam.

Dalam menangani kegiatan ekplorasi dan eksploitasi di laut dalam, *floating offshore platform* membutuhkan sistem tambat. Salah satu jenis sistem tambat yaitu *single point mooring. Single point mooring* merupakan suatu sistem tambat yang bersifat permanen menggunakan satu tali tambat untuk menambatkan *shuttle tanker* (Chakrabarti, 1987). Selain berfungsi untuk menambatkan kapal (FSO/FPSO), *single point mooring* juga berfungsi untuk interkoneksi sumur pengeboran dengan *shuttle tanker*. Sistem tambat tidak sepenuhnya membuat bangunan apung diam, namun hanya membatasi geraknya saja agar cenderung stabil dalam posisinya. Dalam membatasi gerak bangunan apung diperlukan konfigurasi tali tambat pada sistem tambat.

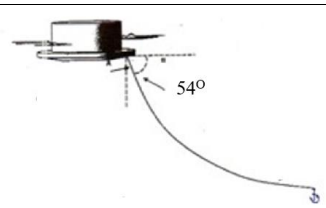
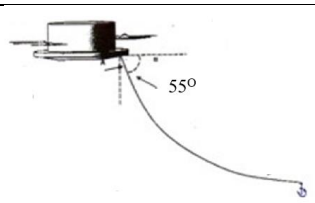
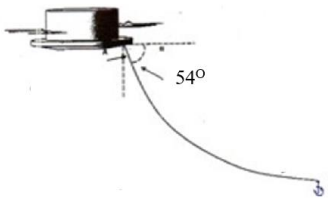
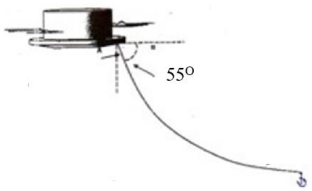
Gerakan bangunan apung cenderung dipengaruhi oleh beban lingkungan. Beban lingkungan yang bersifat siklik menyebabkan terjadinya kelelahan (*fatigue*). Kelelahan (*fatigue*) tidak hanya terjadi pada strukturnya saja, namun juga komponen utama dan pendukung pada struktur. Sistem tambat merupakan komponen pendukung pada struktur yang dapat mengalami kegagalan akibat kelelahan. Faktor lain yang dapat mempengaruhi *fatigue life* adalah ketidaksimetrisan sudut sebar *mooring*

line (Shoup & Mueller, 1984). Selain itu, panjang mooring line menurut (Wu, Wang, Eide, & Haverty, 2015) juga berpengaruh. Maka dari itu perlu dilakukan pemeliharaan secara berkala. Salah satu bentuk pemeliharaan berkala yaitu dengan dilakukannya modifikasi. Modifikasi biasanya dilakukan dengan cara mengganti *mooring line*. Modifikasi ini juga biasanya menyebabkan kurang diperhatikannya konfigurasi *mooring system* dan panjang *mooring line*nya.

Berkaitan dengan latar belakang tersebut, akan dilakukan analisis *fatigue life anchor chain* pada *single point mooring* dengan dipengaruhi oleh ketidaksimetrisan konfigurasi sistem tambat. Konfigurasi sistem tambat yang akan digunakan dalam analisis ini adalah 4x1. Berikut adalah konfigurasi sistem tambat pada *single point mooring* yang akan dianalisis. Dimana pada gambar 1.1 merupakan konfigurasi *mooring system* 4x1 tampak atas sedangkan pada gambar 1.2 adalah konfigurasi *mooring system* 4x1 tampak samping:



Gambar 1.1 Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Pada SPM Tampak Atas

Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Pada SPM	
Tampak Samping	
Mooring Line 1	Mooring Line 2
	
Mooring Line 3	Mooring Line 4
	

Gambar 1.2 Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Pada SPM Tampak Samping

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Seberapa besar *tension* maksimum yang dialami oleh *anchor chain* pada SPM dengan konfigurasi *mooring system* 4x1 tipe asimetris dan simetris?
2. Seberapa besar *offset* maksimum yang terjadi pada *single point mooring* dengan konfigurasi *mooring system* 4x1 tipe asimetris dan simetris?
3. Seberapa besar umur kelelahan (*fatigue life*) *anchor chain* pada SPM dengan konfigurasi *mooring system* 4x1 tipe asimetris dan simetris?

1.3 Tujuan

Tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui besar *tension* maksimum yang dialami *anchor chain single point mooring* dengan konfigurasi *mooring system* 4x1 tipe asimetris dan simetris
2. Mengetahui besar *offset* maksimum yang terjadi pada *single point mooring* dengan konfigurasi *mooring system* 4x1 tipe asimetris dan simetris

3. Mengetahui besar umur kelelahan (*fatigue life*) *anchor chain single point mooring* dengan konfigurasi *mooring system* 4x1 tipe asimetris dan simetris

1.4 Manfaat

Manfaat yang dapat diperoleh dari hasil penelitian adalah sebagai berikut:

1. Hasil perhitungan dapat dijadikan sebagai acuan untuk menentukan konfigurasi *mooring system* pada *single point mooring* dengan pertimbangan tension yang dialami *anchor chain*
2. Hasil perhitungan dapat dijadikan sebagai acuan untuk menentukan konfigurasi *mooring system* pada *single point mooring* dengan pertimbangan *offset*nya.
3. Hasil perhitungan dapat dijadikan sebagai acuan untuk menentukan konfigurasi *mooring system* pada *single point mooring* dengan pertimbangan umur kelelahan pada *anchor chain*

1.5 Batasan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan identifikasi masalah yang telah dijelaskan sebelumnya, batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *Single point mooring* yang ditinjau adalah tipe *catenary anchor leg mooring*
2. Standar codes yang digunakan mengacu pada API
3. Analisis *mooring* dilakukan pada kondisi stabilitas intact
4. Analisis RAO yang ditinjau adalah 0^o, 45^o, 90^o, 135^o, 180^o
5. Analisis beban lingkungan *collinear*
6. Beban lingkungan yang ditinjau adalah angin, arus, dan gelombang pada kriteria *Ultimate Limit State* (ULS) dan *Fatigue Limit State* (FLS)
7. Analisis *floating hose* dan *subsea hose* diabaikan
8. Sistem *offloading* tidak diperhitungkan
9. Analisis *anchor* tidak dilakukan karena dianggap mampu menahan beban
10. Permukaan dasar laut diasumsikan datar
11. Tidak mempertimbangkan faktor korosi
12. Kondisi pasang surut diabaikan

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Saat ini *floating offshore structure* lebih banyak digunakan daripada *fixed offshore structure* dengan alasan keekonomisannya. Dalam kegiatan eksplorasi dan eksploitasi migas, *floating offshore structure* memerlukan sistem tambat. Proses perancangan bangunan lepas pantai beserta sistem tambatnya harus mampu bertahan menahan beban selama waktu operasinya. Beban yang diterima tidak hanya beban statis yang berasal dari strukturnya sendiri, tetapi juga beban dinamis yang berasal dari lingkungan seperti angin, arus, dan gelombang. Respon bangunan lepas pantai yang paling signifikan terhadap beban dinamis berupa beban lingkungan tersebut terdiri dari *low frequency respon* dan *wave frequency respon*. Beban dinamis yang bersifat siklik akan menyebabkan bangunan lepas pantai beserta sistem tambatnya cenderung mengalami *fatigue* atau kelelahan.

Dalam buku karangan (Ma, Luo, Kwan, & Wu, 2019), terdapat dua jenis kurva yang merepresentasikan ketahanan suatu struktur terhadap *fatigue*, yaitu T-N curve dan S-N curve. (Ma, Luo, Kwan, & Wu, 2019) menyatakan bahwa S-N curve memberikan *fatigue life* yang lebih besar dari T-N curve. Beberapa penelitian juga mengatakan hal yang sama. Salah satunya (Xue, Chen , Wu, Xiong, & Gu, 2018) yang melakukan penelitian terkait *fatigue life* pada semi-submersible dengan membandingkan T-N curve dan S-N curve. Hasil dari penelitiannya adalah T-N curve lebih konservatif dibandingkan dengan S-N curve.

Adapun metode pendekatan yang dikembangkan untuk mendapatkan *fatigue damage*. Salah satu teknik yang paling akurat dalam mengekstrak pembebanan siklik (*stress/tension range*) sebelum digunakan berbagai metode pendekatan *fatigue damage* adalah *rainflow counting method*. Beberapa penelitian dilakukan yang menggunakan metode tersebut untuk analisa f*atigue life* pada *mooring system*. Salah satunya adalah (Olagnon & Guede, 2008) yang menganalisa *fatigue life* pada *mooring line*.

Selain itu (Shafizadeh & Gharechahi, 2015) juga melakukan penelitian dengan membanding *fatigue life* antara satu tali tambat dan dua tali tambat pada sistem tambat Wave Dragon (WEC) menggunakan *rainflow counting method.* Hasil dari penelitiannya adalah *fatigue life* dengan satu tali tambat lebih panjang dibanding dua tali tambat meskipun tension keduanya hampir sama.

Adapun metode pendekatan *fatigue damage* salah satunya adalah *spectrum analysis*. (Xu, Zhao, Dong , & Bi, 2014) melakukan analisa *fatigue* pada *mooring system* dengan rainflow untuk mendapatkan *stress range* karena dianggap paling akurat. Kemudian untuk analisis jumlah siklus dalam rentang *stress*nya mereka analisis dengan S-N curves. Sedangkan *fatigue damage* mereka analisis dengan *spectrum analysis method.* Menurut mereka *spectrum analysis* lebih konservatif.

Menurut (DNVGL-OS-E301, 2015) *fatigue* juga disebabkan oleh *out of plane bending* (OPB). Adanya *out of plane bending* adalah akibat dari adanya gesekan antar sambungan rantai. Penelitian yang berkaitan dengan hal ini adalah penelitian dari (Hwang, 2012) yang menganalisa *fatigue life* pada *spread mooring* dengan mempertimbangkan OPB menggunakan analisa nonlinear finite elemen. Hasilnya *fatigue life spread mooring* hampir sama dengan *design life*nya.

(Kim, Kim, & Park, 2018) juga melakukan analisa *fatigue life* dengan mempertimbangkan OPB dan IPB menggunakan T-N curves dan spectrum. Hasilnya dalam analisa *fatigue life* perlu mempertimbangkan OPB dan IPB karena dapat meningkatkan *tension*. Analisa lain terkait perilaku OPB pada sambungan *mooring chain* dan *fairlead* dengan 7 pocket *fairlead wheel* dilakukan oleh (Luo, 2017). Dalam analisanya *fairlead wheel* memperburuk *fatigue strength* pada *mooring chain* karena adanya gesekan antara rantai dan *fairlead.*

Faktor lain yang perlu dipertimbakan dalam *fatigue life* adalah *chain length*. (Wu, Wang, Eide, & Haverty, 2015) menganalisa pengaruh panjang rantai terhadap *fatigue life*. Berdasarkan penelitiannya, mereka menyimpulkan bahwa semakin panjang rantai maka akan semakin panjang

*fatigue life*nya. Penelitian yang sama sebelumnya juga dilakukan oleh (Prasodjo, Aristanto, & Ashyar, 2011). Dimana hasil penelitian mereka adalah semakin panjang *mooring line* maka akan semakin kecil *tension* dan semakin besar *offset*nya pada kapal.

(Shoup & Mueller, 1984) melakukan penelitian terkait pola penambatan CALM Buoy terhadap *fatigue life*. Pola penambatan yang dianalisa mereka adalah pola penambatan 4 kaki asimetris dan 6 kaki simetris. Dari hasil penelitian mereka, pola kaki 4 asimetris lebih cepat mengalami kegagalan daripada pola kaki 6 simetris karena gesekan yang berlebih dan perilaku dinamis dari pola kaki 4 asimetris.

Berdasarkan latar belakang dan penelitian sebelumnya, untuk mengantisipasi kegagalan pada *mooring line*, maka perlu dilakukan analisis lebih lanjut terkait pengaruh ketidaksimetrisan konfigurasi sudut sebar dan panjang *mooring line* nya. Dalam tugas akhir ini, penulis akan membandingkan *fatigue life* pada *single point mooring* dengan konfigurasi *mooring system* 4x1 antara yang asimetris dan simetris. Sehingga diharapkan kedepannya hasil analisis ini dapat dijadikan acuan dalam penentuan konfigurasi sudut sebar dan panjang *mooring line* pada *single point mooring* berdasarkan *fatigue life*nya.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Single Point Mooring (SPM)

Single point mooring merupakan salah satu jenis sistem tambat yang tidak hanya berfungsi untuk menambatkan kapal tanker tetapi juga untuk interkoneksi muatan cair dari dan ke kapal tanker yang bertambat. Terminal SPM memungkinkan kapal tanker berputar 360^{o} (*weathervane*) mengelilingi titik tambatnya. Menurut (API-RP-2SK, 2005) terdapat beberapa jenis *single point mooring*, antara lain:

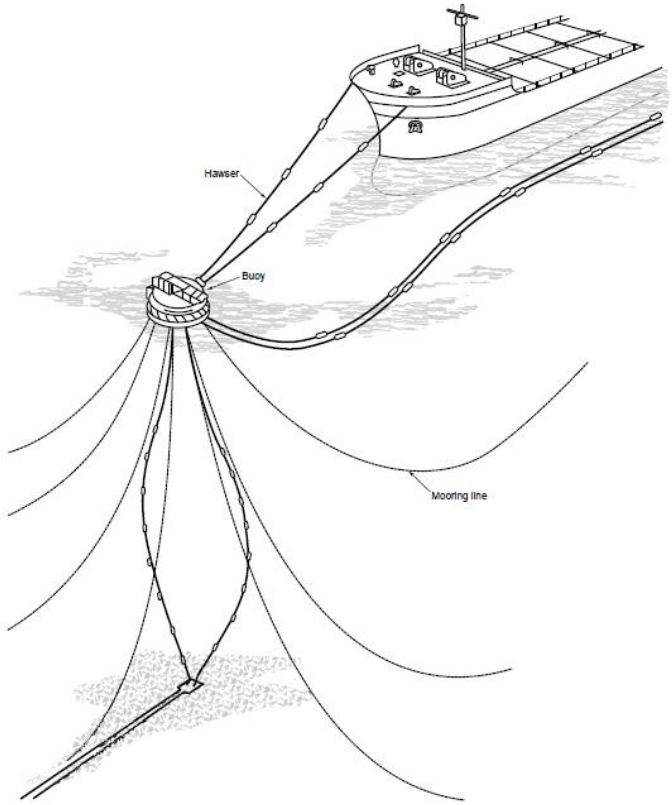
a. *Turret Mooring*

Turret mooring merupakan sistem tambat yang memiliki sejumlah *catenary mooring legs* yang terhubung ke turret pada *vessel*. Dimana sistem tambat ini memiliki *bearing* yang memungkinkan *vessel* berputar mengelilingi *catenary mooring legs* tersebut. *Turret mooring*

dapat dihubungkan secara eksternal pada bagian *bow* atau *stern vessel* dan internal pada *vessel*.

b. CALM (*Catenary Anchor Leg Mooring*)

Sistem CALM terdiri dari buoy dengan ukuran besar yang mendukung sejumlah *catenary chain leg anchor* yang terikat pada *seabed*. Beberapa sistem menggunakan *hawser* dari tali sintetis yang menghubungkan *vessel* ke buoy. Selain itu terdapat riser yang melekat pada bagian bawah CALM buoy. Berikut merupakan contoh sistem CALM pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 CALM Buoy

Sumber : (API-RP-2SK, 2005)

c. *Single Anchor Leg Mooring* (SALM)

Single anchor leg mooring adalah sistem tambat yang memiliki sistem riser vertical dan gaya apung yang besar disebabkan oleh *pretension* pada riser.

2.2.2 Kriteria Desain *Mooring System*

Menurut (DNVGL-OS-E301, 2015), mooring system dianalisis berdasarkan kriteria desain yang diklasifikasikan menjadi 3 batas keadaan, yaitu:

a. *Ultimate Limit state* (ULS)

Untuk memastikan bahwa masing-masing *mooring line* memiliki kekuatan yang memadai untuk tahan terhadap beban lingkungan yang ekstrem sekaligus. Biasanya beban pada kondisi maksimum/ekstrem ini pada periode 100 tahunan. Hal ini sebanding dengan pernyataan (API-RP-2SK, 2005) yang menyatakan bahwa kondisi desain maksimum merupakan kombinasi angin, gelombang, dan arus dalam beban lingkungan yang ekstrem pada periode 100 tahunan juga.

b. *Accidental Limit State* (ALS)

Untuk memastikan bahwa *mooring system* mempunyai kemampuan bertahan pada kegagalan satu *mooring line*, kegagalan satu *thruster*, atau satu kegagalan dalam *control thruster*. Kegagalan tersebut terjadi pada saat keadaan yang tak terduga.

c. *Fatigue Limit State* (FLS)

Untuk memastikan bahwa masing-masing mooring line mampu bertahan pada pembebanan yang berulang (beban siklik). Biasanya beban yang digunakan pada periode 1 tahunan.

2.2.3 Simulasi Respon *Mooring Line*

Analisis dinamis dapat digunakan untuk memprediksi respon *mooring line* terhadap gerakan fairlead akibat adanya gerakan translasi dan rotasi pada bangunan apung. Umumnya respon *mooring line* terhadap gerak bangunan apung dapat dianalisi dengan dua metode (API-RP-2SK, 2005) yaitu:

a. *Frequency domain analysis*

Frequency domain analysis adalah penyelesain gerakan dinamis berdasarkan *frequency*. Metode ini cocok digunakan untuk analisis gerakan dan kekuatan suatu bangunan apung seperti percepatan, gaya, sudut, dan sebagainya akibat beban gelombang acak. Keuntungan dalam

menggunakan metode ini adalah tidak memerlukan banyak waktu dalam analisisnya. Keterbatasan dalam metode ini adalah sebagai berikut:

- Membutuhkan persamaan gerak linear
- Linearitas menyiratkan ketidaksesuaian dalam *drag load, time varying geometry*, dan momen pengembali horizontal.

b. *Time domain analysis*

Time domain analysis adalah penyelesaian gerakan dinamis yang menghasilkan *time history response* berdasarkan fungsi waktu. Metode ini memerlukan simulasi panjang yang cukup untuk menyediakan statistic yang memadai. Durasi yang digunakan dengan beban lingkungan dilakukan selama 3 jam (10800 s). Hasil dari metode ini adalah berupa *time history tension*, *offset*, stress, dll.

2.2.4 Beban Lingkungan

Beban lingkungan menurut (API-RP-2SK, 2005) dapat dibedakan menurut frekuensinya:

a. Beban steady merupakan beban lingkungan yang konstan/ tidak berubah terhadap perubahan waktu. Beban yang konstan tersebut adalah sebagai berikut:

- Beban angin

  Beban angin adalah beban akibat adanya kecepatan angin. Beban angin bekerja pada permukaan luar dari struktur yang tertutup dan juga dapat bekerja pada permukaan tertutup dari struktur yang terbuka. Tekanan angin bekerja pada arah normal ke permukaan.

- Beban Arus

  Beban arus harus dipertimbangkan dalam mendesain kapal dan *offshore structure* pada konstruksi dan operasinya. Pada struktur kapal yang tertambat, umumnya untuk mewakili gerak arus dalam surge, sway, dan yaw diberikan koefisien arus global empiris sebagai fungsi dari arah arus.

- Beban Gelombang

  Pada kenyataannya gelombang laut acak dalam bentuk, tinggi, panjang, dan kecepatan rambatnya, hal ini menimbulkan terjadinya gerakan pada struktur.

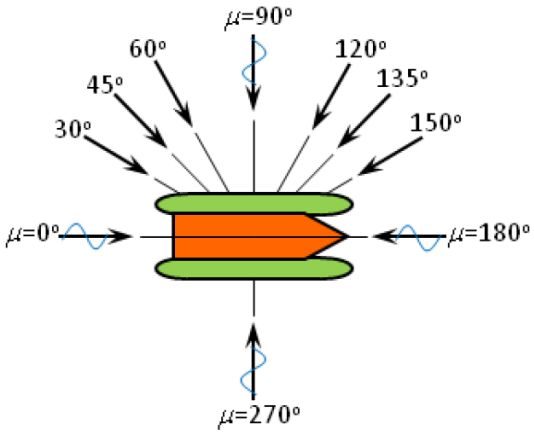
b. Beban siklus *low frequency* yang menyebabkan struktur mengalami gerak surge, sway, yaw. Dimana beban ini terjadi pada periode natural antara satu sampai 10 menit
c. Beban siklus *wave frequency/ high frequency* dengan periode antara tiga sampai tiga puluh detik. Beban siklus *wave frequency* dalam gerak *wave frequency*, biasanya terjadi pada kekakuan *mooring*. Jika periode natural pada *moored vessel* mendekati periode gelombang, maka *wave frequency*nya tergantung pada kekakuan *mooring*.

2.2.5 Arah Gelombang Terhadap Bangunan Laut

Arah gelombang didefinisikan sebagai sudut antara arah laju bangunan laut dengan arah propagasi gelombang (Djatmiko, 2012). Arah gelombang terhadap bangunan laut minimal yang diperhitungkan adalah sebanyak 5, yaitu sebagai berikut:

a. Following sea (0^o) yaitu arah gelombang sama dengan arah laju bangunan laut. Dimana gelombang datang dari arah buritan bangunan laut.
b. Head sea (180^o) yaitu arah gelombang berlawanan dengan arah laju bangunan laut. Dimana gelombang datang dari arah haluan bangunan laut.
c. Beam sea (90^o atau 270^o) yaitu gelombang datang dari arah yang tegak lurus dengan sumbu memanjang bangunan laut.
d. Stern quartening seas (45^o) yaitu gelombang datang dari arah seperempat kali (180^o) pada buritan.
e. Bow quartening seas (135^o) yaitu gelombang datang dari arah seperempat kali (180^o) pada haluan.

Adapun gambar 2.2 di bawah ini memperlihatkan arah datang gelombang terhadap bangunan laut.



Gambar 2.2 Arah Datang Gelombang Terhadap Bangunan Laut

Sumber : (Djatmiko, 2012)

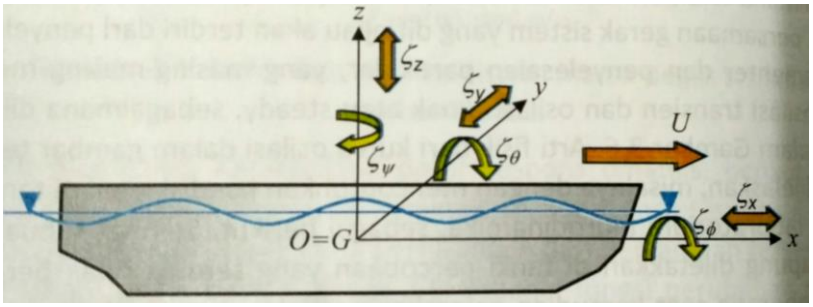
2.2.6 Teori Gerak Bangunan Apung

Menurut (Djatmiko, 2012) gerakan pada bangunan apung bila terkena gelombang akan mengalami gerakan osilasi dalam 6 derajat kebebasan. Dimana diklasifikasikan ke dalam 2 kelompok besar, yaitu:

a. Gerak translasi adalah gerak yang terjadi pada setiap titik dari bangunan apung dengan bentuk lintasan berupa garis lurus. Gerak translasi terbagi menjadi 3, yaitu :
   - Surge yaitu gerakan osilasi translasi pada sumbu x
   - Sway yaitu gerakan osilasi translasi pada sumbu y
   - Heave yaitu gerakan osilasi translasi pada sumbu z

b. Gerakan rotasi adalah gerak pada setiap titik dari bangunan apung dengan bentuk lintasan berupa lingkaran. Gerak rotasi terbagi menjadi 4, yaitu :
   - Roll yaitu gerakan osilasi rotasi pada sumbu x
   - Pitch yaitu gerakan osilasi rotasi pada sumbu y
   - Yaw yaitu gerakan osilasi rotasi pada sumbu z

Adapun gambar 2.3 memperlihatkan gerakan dari bangunan apung pada 6 derajat kebebasan.



Gambar 2.3 Derajat Kebebasan Bangunan Apung

Sumber : (Djatmiko, 2012)

2.2.7 Persamaan Gerak Bangunan Apung

Persamaan gerak bangunan apung dapat dianalisiskan menggunakan hukum newton II pada persamaan 2.1 sebagai berikut:

$$\sum F = mi\xi i \quad \text{..... (2.1)}$$

dengan,

i = mode gerak translasi dan rotasi pada struktur

$\sum F$ = resultan gaya (N)

m = massa struktur (kg)

ξ = percepatan struktur (m/s^2)

Persamaan di atas menunjukkan adanya hubungan antara resultan gaya dengan massa dan percepatan struktur. Resultan gaya pada bangunan apung merupakan hasil pengurangan dari gaya aksi dengan gaya reaksi. Gaya aksi yang dimaksud dalam hal ini adalah gaya eksitasi yang diterima oleh struktur akibat adanya distribusi tekanan yang tidak merata dari gelombang. Dampak dari tekanan yang tidak merata tersebut disebut gaya *Froude-Krillof* (Faltinsen, 1990). Selain itu, keberadaan struktur yang berukuran besar juga akan menyebabkan perubahan distribusi tekanan. Dampak dari perubahan distribusi tekanan akibat adanya struktur yang besar disebut dengan gaya difraksi. Besar gaya eksitasi akan bervariasi terhadap perubahan waktu. Sedangkan gaya reaksi yang dimaksud disini adalah gaya yang melawan gaya aksi tersebut. Berikut adalah persamaan 2.2 yang menggambarkan hubungan resultan gaya dengan gaya aksi dan reaksi:

$$\sum F = F_{eksitasi} - F_{reaksi} \quad \text{..... (2.2)}$$

Adapun gaya reaksi dipengaruhi oleh massa tambah (*added mass*), redaman (*damping*), dan kekakuan (*stiffness*). Berikut penjelasan dari masing-masing komponen tersebut:

1. Massa tambah (*added mass*)

   Bangunan apung yang bergerak akibat adanya gelombang akan menyebabkan displasemennya berubah dan mendorong partikel fluida di sekitarnya dalam jumlah massa tertentu. Hal ini dianggap menambah massa benda sehingga disebut dengan massa tambah atau *added mass*. Massa tambah bergantung pada bentuk benda serta mode geraknya. Gaya hidrodinamik yang terjadi karena massa tambah merupakan gaya inersia (Fa). Berikut adalah formula gaya inersia pada persamaan 2.3:

   $$F_a = (m + a)i\xi i \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2.3)$$

   dengan,

   i = mode gerak translasi dan rotasi pada struktur

   a = massa tambah (kg)

   ξ = percepatan struktur (m/s^2)

   Adapun persamaan massa tambah untuk bentuk silinder dijelaskan dalam tabel 2.1 di bawah ini:

   Tabel 2.1 Persamaan Massa Tambah Untuk Bentuk Silinder

Bentuk	Added Mass Per Unit Length
Circle	$\rho\pi c^2$
Circular Disk	$\frac{8}{3}\rho c^2$

   Sumber : (Sarpkaya, 2010)

2. Redaman (*damping*)

   Redaman merupakan dampak adanya disipasi energi dari struktur. ‘bahkan hilang akibat bergesekan dengan permukaan medium. Dengan kata lain jika struktur digetarkan di air yang tenang, maka energi kinetic struktur (gerakan) semakin lama akan semakin mengecil, hal ini lah yang disebut redaman. Nilai redaman sama seperti massa tambah, bergantung pada bentuk benda dan mode gerak benda. Berikut adalah persamaan 2.4 gaya redaman:

   $$F_b = bi\xi i \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2.4)$$

dengan,

i = mode gerak translasi dan rotasi pada struktur

b = redaman sistem (N s/m)

ξ = kecepatan struktur (m/s^2)

3. Kekakuan (*stiffness*)

Struktur terapung yang bergerak di permukaan air tenang tanpa gelombang akan mempunyai kekakuan untuk kembali ke posisi awal yang dipengaruhi oleh karakteristik hidrostatik struktur. Dimana hal ini disebut dengan gaya pengembali (*restoring force*). Fenomena ini hanya terjadi pada tiga mode gerak struktur yaitu heave, roll, pitch (Djatmiko, 2012). Hal ini karena mode gerak lainnya tidak mempunyai frekuensi alami yang secara teknis tidak mempunyai mekanisme kekakuan sendiri yang bermanifestasi menjadi gaya pengembali. Berikut adalah persamaan 2.5 gaya pengembali:

$$F_c = ci\xi i \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.5)$$

dengan,

i = mode gerak translasi dan rotasi pada struktur

c = kekakuan struktur (N/m)

ξ = respon posisi gerak struktur (m)

Berdasarkan penjelasan di atas, maka persamaan 2.3, 2.4, dan 2.5 dapat di substitusi ke dalam persamaan 2.2 menjadi persamaan 2.6:

$$\sum F = F_{eksitasi} - (F_a + F_b + F_c) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.6)$$

Dengan mensubstitusi persamaan 2.1 ke persamaan 2.6, maka didapatkan persamaan 2.7 sebagai berikut:

$$mi\xi i = F_{eksitasi} - (F_a + F_b + F_c) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.7)$$

$$F_w = (mi + ai)\xi i + bi\dot{\xi} i + ci\xi i \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.8)$$

dengan,

i = mode gerak translasi dan rotasi pada struktur

F_w = gaya eksitasi

m = massa struktur (kg)

a = massa tambah (kg)

c = kekakuan struktur (N/m)

b = nilai redaman sistem (N m/s)

ξ = respon posisi gerak struktur (m)

$\dot{\xi}$ = kecepatan gerak struktur (m/s)

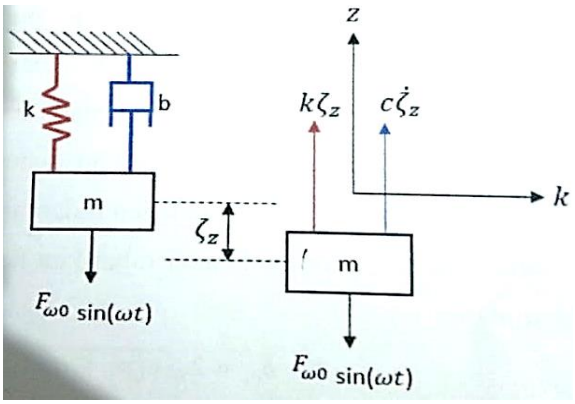
$\ddot{\xi}$ = percepatan gerak struktur (m/s^2)

Gaya induksi oleh gelombang Fw yang bisa juga dikenal dengan gaya eksitasi merupakan penjumlahan dari gaya gelombang insiden F_I dan gaya gelombang difraksi F_D (Djatmiko, 2012). Maka persamaan 2.9 gaya induksi/ gaya eksitasi dapat ditulis sebagai berikut:

$$F_w = (F_I + F_D)e^{-i\omega t} \quad \text{..... (2.9)}$$

dengan i = $\sqrt{-1}$

Persamaan 2.8 dapat dikenali sebagai getaran sistem massa -pegas teredam dalam gerakan 1 derajat kebebasan pada arah gaya harmonic eksternal yang mengenainya (Djatmiko, 2012). Berikut adalah ilustrasinya gerakan osilasi bebas teredam akibat eksitasi harmonik pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Gerakan Osilasi Bebas Teredam Akibat Eksitasi Harmonik
Sumber : (Djatmiko, 2012)

Dalam sistem di atas, maka gaya gelombang harmonic pada persamaan 2.9 dapat digantikan oleh elevasi gaya yang mempunyai amplitudo F_{w0} dan frekuensi ω_t , maka persamaan 2.8 menjadi persamaan 2.10:

$$F_w \sin(\omega t) = (mi + ai)\xi i + bi\dot{\xi} i + ci\xi i \quad \text{.....(2.10)}$$

Dengan memberikan harga amplitudo F_w = 0, getaran bebas akan mempresentasikan penyelesaian umum yang dinamakan penyelesaian transient, yaitu terdapat pada persamaan 2.11 di bawah ini:

$$(mi + ai)\xi i + bi\dot{\xi} i + ci\xi i = 0 \quad \text{.....(2.11)}$$

Bila diasumsikan maka penyelesaian di atas memiliki bentuk persamaan 2.12 sebagai berikut:

$$\zeta_z = \zeta_{z_0} e^{qt} \quad \text{..... (2.12)}$$

Dengan ζ_{z_0} dan q adalah konstanta yang belum diketahui, mensubtitusikan persamaan (2.12) ke dalam persamaan (2.11), maka persamaannya menjadi persamaan 2.13:

$$\zeta_{z_0}((m+a)q^2 + bq + k)e^{qt} = 0 \quad \text{..... (2.13)}$$

Yang harus memenuhi untuk semua t. kemudian

$$(m+a)q^2 + bq + k) = 0 \quad \text{..... (2.14)}$$

Akan menghasilkan dua harga q, yaitu :

$$q_{1,2} = -\frac{b}{2(m+a)} \pm \sqrt{\left(\frac{b}{2(m+a)}\right)^2 - \frac{k}{m+a}} \quad \text{.....(2.15)}$$

Penyelesaian umum dari ζ_z dapat ditulis sebagai berikut pada persamaan 2.16:

$$\zeta_z = A_1 e^{q_1 t} + A_2 e^{q_2 t} \quad \text{..... (2.16)}$$

Konstanta A1 dan A2 daapt ditentukan dari nilai-nilai awal untuk permasalahan yang tergantung dari pola gerakan dimulai. Bila ditijau dari persamaan 2.15, jika hasil perhitungan dalam akar menghasilkan harga nol maka hanya akan didapat satu penyelesaian dari q. Kondisi inilah yang dinamakan teredam kritis dengan koefisien redaman yang disebut dengan koefisien redaman kritis, b_c. Maka redaman kritisnya menjadi persamaan 2.17:

$$b_c = 2\sqrt{k(m+a)} \quad \text{..... (2.17)}$$

Rasio antara redaman, b dengan redaman kritis, bc disebut dengan faktor redaman $b_f = b/b_c$. Nilai ini sering digunakan untuk mengetahui besar redaman pada suatu sistem dinamis. Bila $b_f = 1$, maka sistem akan teredam kritis dan memiliki osilator aperiodic. Bila $b_f > 1$ disebut dengan sangat teredam (*overdamped*) dan $b_f < 1$ disebut dengan kurang teredam atau (*underdamped*) (Djatmiko, 2012).

Dengan adanya eksitasi gaya eksternal seperti gelombang yang bekerja terus-menerus maka bangunan apung seperti silinder terapung juga akan bergerak dengan amplitudo dan frekuensi yang tetap (*steady-state-*

oscillation). Kondisi ini akan dipresentasikan oleh solusi particular dalam persamaan 2.18 sebagai berikut:

$$\zeta_z = \zeta_{z_0} \sin(\omega t - \varepsilon_z) \text{ ……..... (2.18)}$$

Dari persamaan 2.18 di atas, ζ_{z_0} adalah amplitudo gerakan osilasi dan ε_z adalah sudut fase antara gerakan dengan gaya eksitasi. Dalam hal ini sudut fase adalah pada saat gelombang pertama kali berpropagasi melewati bangunan apung, bangunan apung masih dalam keadaan diam, dan baru beberapa saat kemudian akan bergerak. Waktu yang diukur dari puncak gelombang dan puncak gerakan yang berurutan bila dibagi dengan peridoe gerakan dan dikali dengan satu siklus gerakan $(2\pi rad)$ akan memberikan yang namanya sudut fase.

Dengan menurunkan/mendeferensiasikan x ke dalam persamaan 2.18 terhadap waktu dan menyubtitusikan ke persamaan 2.10 maka akan diperoleh persamaan 2.19 sebagai berikut:

$$F_{w0}\sin(\omega t - \varepsilon_z) = -(m+a)\omega^2\zeta_{z_0}\cos(\omega t - \varepsilon_z) +$$
$$b\omega\zeta_{z_0}\sin(\omega t - \varepsilon_z) + c\zeta_{z_0}\sin(\omega t - \varepsilon_z) \text{ ……. (2.19)}$$

Karena persamaan di atas harus berlaku untuk semua harga t, maka suku $\sin\omega t$ dan $\cos\omega t$ dapat diambil sama dengan 0, sehingga persamaannya menjadi persamaan 2.20 dan 2.21:

$$F_{w0} = -(m+a)\omega^2\zeta_{z_0}\cos\varepsilon_z + b\omega\zeta_{z_0}\sin\varepsilon_z + c\zeta_{z_0}\sin\varepsilon_z \text{ …… (2.20)}$$

dan

$$F_{w0} = (m+a)\omega^2\zeta_{z_0}\sin\varepsilon_z + b\omega\zeta_{z_0}\cos\varepsilon_z - c\zeta_{z_0}\sin\varepsilon_z \text{ …….. (2.21)}$$

Penyelesaian kedua persamaan untuk ζ_{z_0} dan ε_z memberikan persamaan 2.22 dan 2.23:

$$\zeta_{z_0} = \frac{F_{w0}}{\sqrt{[\{k-(m+a)\omega^2\}^2+(b\omega)^2]}} \text{ ……... (2.22)}$$

$$\tan\varepsilon_2 = \frac{b\omega}{k-(m+a)\omega^2} \text{ …….....(2.23)}$$

Meninjau kembali gambar 2.4 bila peredam dihilangkan sehingga b=0 dan pada sistem dikenakan gaya statis sebesar F_{w0} , yaitu amplitudo gaya eksitasi harmonic, maka sistem massa-pegas akan terdefleksi ke bawah sejauh ζ_{zs}. Hal ini berarti defleksi yang terjadi adalah defleksi statis dan memiliki persamaan 2.24 sebagai berikut:

$$\zeta_{zs} = \frac{F_{w0}}{k} \text{ ..... (2.24)}$$

Melihat hubungan $\omega_n = \sqrt{k(m+a)}$, $b_f = \frac{b}{b_c}$, dan $b_c = 2\,(m + a)\omega_n$, penyelesaian dari persamaan 2.22 dapat dituliskan dalam bentuk non dimensi pada persamaan 2.25 dan 2.26 sebagai berikut:

$$\frac{\zeta_{z_0}}{\zeta_{zs}} = \frac{1}{\sqrt{\left[1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2+\left[2b_f\frac{\omega}{\omega_n}\right]^2}} \text{ ..... (2.25)}$$

dan

$$\tan \varepsilon_z = \frac{2bf\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \text{ ..... (2.26)}$$

Mengacu ke persamaan 2.25, perhitungan tersebut digunakan untuk memperoleh data respon non dimensi $\frac{\zeta_{z_0}}{\zeta_{zs}}$ sebagai fungsi perubahan faktor redaman bf dan rasio frekuensi ekistasi terhadap frekuensi alami $\frac{\omega}{\omega_n}$.

Dimana $\frac{\zeta_{z_0}}{\zeta_{zs}}$ merupakan rasio antara respon atau defleksi sistem dinamis dengan respon statis. Harga rasio $\frac{\zeta_{z_0}}{\zeta_{zs}}$ bisa membesar atau mengecil tergantung pada perubahan faktor redaman dan frekuensi, maka nilai rasio tersebut disebut juga faktor pembesaran atau *magnification factor*. Pada sistem yang teredam kritis, saat $bf = 1$ maka harga $\frac{\zeta_{z_0}}{\zeta_{zs}}$ akan di bawah 1. Adapun $bf = 0$, bila terkena eksitasi pada frekuensi alaminya akan mempunyai respon yang besarnya tidak terhingga sehingga dalam perancangan, operasi bangunan laut tersebut akan menimbulkan resonansi yang membuat respon sistem menjadi berlebihan.

Mengacu ke persamaan 2.26, pada nilai $bf = 1$, kenaikan ε_z terjadi bersamaan dengan kenaikan $\frac{\omega}{\omega_n}$. Bila nilai bf mengecil maka perubahan kenaikan ε_z lebih lambat pada awalnya. Kemudian akan naik dengan cepat di sekitar $\frac{\omega}{\omega_n} = 1$, kemudian melambat lagi pada $\frac{\omega}{\omega_n}$ yang lebih tinggi. Sudut fase respon saat $\frac{\omega}{\omega_n} = 1$ atau saat kondisi resonansi, mempunyai harga 90^o.

2.2.8 Response Amplitude Operator (RAO)

Response Amplitude Operator (RAO) biasa disebut dengan transfer function. Dimana merupakan fungsi respon yang mentransfer gaya gelombang menjadi respon dinamis pada struktur dalam rentang frekuensi. Grafik RAO memuat parameter frekuensi pada absisnya dan rasio antara amplitudo gerakan mode tertentu pada ordinatnya. Contoh grafik respon gerakan bangunan apung terdapat pada gambar 2.5.

Menurut (Djatmiko, 2012), RAO pada gerak translasi dirumuskan pada persamaan 2.27 sebagai berikut:

$$RAO\ (\omega) = \frac{\zeta_{k0}(\omega)}{\zeta_0\ (\omega)}\ \text{(m/m)} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2.27)$$

dengan,

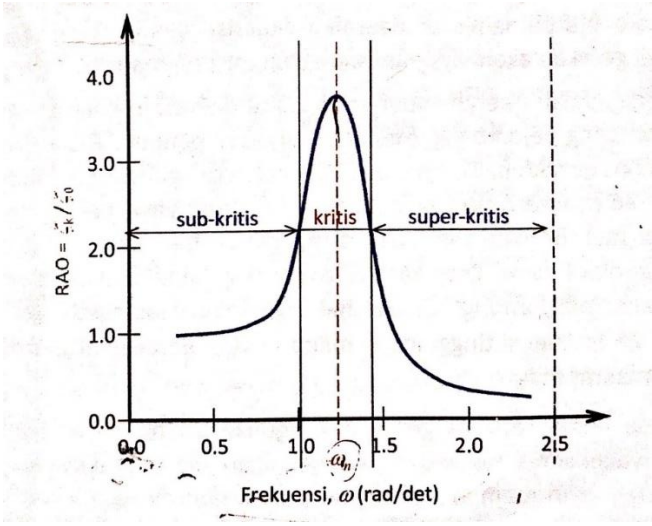
$\zeta_{k0}(\omega)$ = amplitudo struktur (m)

$\zeta_0\ (\omega)$ = amplitudo gelombang (m)

Sedangkan RAO pada gerak rotasi yang merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan rotasi dengan kemiringan gelombang, yaitu perkalian antara angka gelombang dengan amplitudo gelombang ($k_w = w^2/g$) dirumuskan pada persamaan 2.28 dan 2.29 sebagai berikut:

$$RAO\ (\omega) = \frac{\zeta_{k0}(\omega)}{\zeta_0\ (\omega)}\ \text{(rad/rad)} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2.28)$$

$$RAO\ (\omega) = \frac{\zeta_{k0}(\omega)}{\left(\frac{\omega^2}{g}\right)\zeta_0}\ \text{(rad/rad)} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2.29)$$



Gambar 2.5 Grafik Respon Gerakan Bangunan Apung

Sumber : (Djatmiko, 2012)

Kurva respon bangunan apung diatas dibagi menjadi tiga bagian:

1. Frekuensi rendah atau gelombang dengan periode penjang yang disebut daerah sub-kritis. Di daerah ini bangunan laut akan bergerak mengikuti elevasi gelombang sehingga amplitudo gerakan akan ekivalen dengan amplitudo gelombang atau disebut dengan contouring. Dalam korelasi persamaan hidrodinamis, di daerah frekuensi rendah atau $\omega^2 < k/(m+a)$, gerakan akan didominasi oleh faktor kekakuan.
2. Daerah kritis, yaitu meliputi wilayah pertengahan kurva di sisi frekuensi rendah sampai dengan puncak kurva dan diteruskan hingga pertengahan kurva di sisi frekuensi tinggi. Puncak kurva terdapat pada frekuensi alami yang merupakan daerah resonansi sehingga respon gerak mengalami magnifikasi, atau amplitudo gerakan akan lebih besar dari pada amplitudo gelombang. Di daerah frekuensi alami, yakni $k/(m+a) < \omega^2 < k/a$, gerakan akan didominasi oleh faktor redaman.
3. Daerah super kritis, yaitu daerah dengan frekuensi tinggi dimana terdapat gelombang dengan periode pendek. Pada daerah ini respon bangunan apung terhadap gelombang akan semakin mengecil karena semakin rapat puncak – pucak gelombangnya, maka akan memberikan efek seperti bangunan laut bergerak diatas air yang relatif datar. Dalam hal korelasi hidrodinamis, gerakan di daerah frekuensi tinggi ini, dimana $\omega^2 < k/a$, gerakan akan didominasi oleh faktor massa (Djatmiko, 2012).

2.2.9 Spektra Gelombang

Dalam menganalisa spektrum gelombang terdapat beberapa teori spektrum gelombang antara lain Bretschneider, JONSWAP, Pierson-Moskowitz, ISSC, ITTC/ISSC, dan Wang. Penggunaan teori tersebut bergantung pada kondisi real laut yang ditinjau. Dalam menggunakan model matematik, spektrum biasanya menggunakan satu atau beberapa parameter, seperti tinggi gelombang, periode gelombang, parameter bentuk, dan sebagainya. Pada tugas akhir ini akan menggunakan spektrum gelombang teori JONSWAP.

JONSWAP merupakan singkatan dari *Joint North Sea Wave Project,* yakni proyek yang dilakukan bersama oleh sebagian orang untuk

meneliti gelombang di Laut Utara. Teori JONSWAP sendiri merupakan modifikasi dari teori yang sudah ada sebelumnya, yaitu teori Pierson-Moskowitz. Persamaan spektrum gelombang JONSWAP terdapat pada persamaan 2.30 sebagai berikut (Djatmiko, 2012):

$$S_\zeta(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} exp\{-1{,}25(\omega/\omega_0)^{-4}\}\gamma^{exp\left\{\frac{(\omega-\omega_0)^2}{2\tau\omega_0^2}\right\}} \quad \text{..... (2.30)}$$

dengan,

α = $0.076(X_0)^{-0.22}$

X_0 = gX/U_w^2

X = panjang fetch

U_w = kecepatan angin

α = 0.0081 jika X tidak diketahui

γ = parameter ketinggian atau *peakedness parameter*, yang harganya dapat bervariasi antara 1.0 sampai dengan 7.0. untuk laut utara mempunyai harga 3.3

α = parameter bentuk atau *shape parameter*

α = 0.07 jika $\omega \leq \omega_0$

α = 0.09 jika $\omega > \omega_0$

ω_0 = $2\pi(g/U_w)(X_0)^{-0.33}$

2.2.10 Spektra Respons

Pengaruh interaksi hidrodinamik pada massa tambah, potensial damping, dan gaya eksternal dalam analisis respon bangunan apung pada gelombang regular. Adapun respon bangunan laut pada gelombang acak adalah dengan mentransformasikan spektrum gelombang menjadi spektrum respon. Ilustrasi transformasi spektrum gelombang menjadi spektrum respon terdapat pada gambar 2.6. Spektrum respon merupakan respon kerapatan energi pada struktur akibat beban gelombang. hal itu dapat dirumuskan pada persamaan 2.31 sebagai berikut (Djatmiko, 2012):

$$S_{\zeta r}(\omega) = [RAO\ (\omega)]^2 x\ S_\zeta(\omega) \quad \text{..... (2.31)}$$

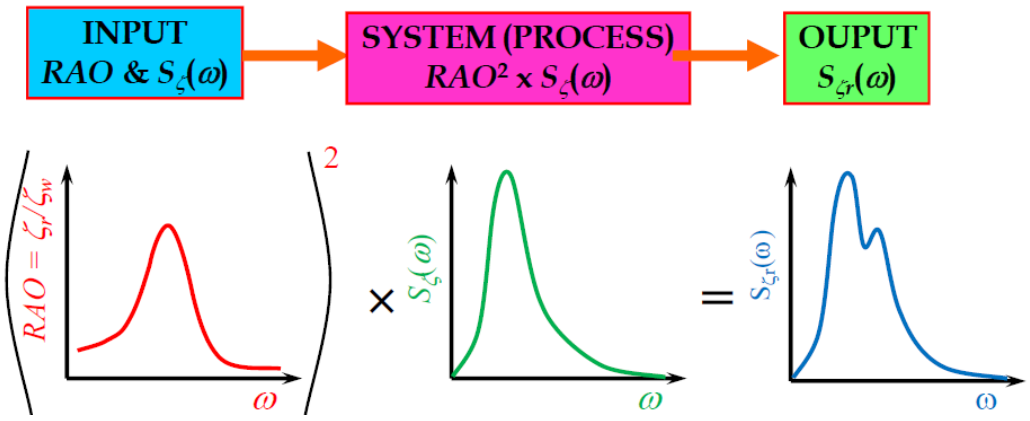
dengan,

$S_{\zeta r}(\omega)$ = spectra respon (m^2/s)

$S_\zeta(\omega)$ = spectra gelombang (m^2/s)

$RAO\ (\omega)$ = transfer function

ω = frekuensi gelombang (rad/s)

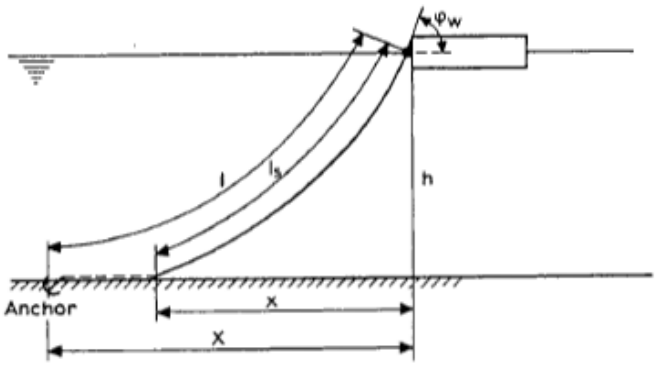


Gambar 2.6 Transformasi Spektra Gelombang menjadi Spektra Respon

Sumber : (Djatmiko, 2012)

2.2.11 Penentuan Panjang Tali Tambat

Penentuan panjang tali tambat diperlukan untuk menjaga struktur agar tetap pada posisi yang diinginkan. (Faltinsen, 1990) menggunakan persamaan untuk menentukan panjang tali dan besar *tension* yang direkomendasikan. Selain itu jarak minimum *mooring line* juga perlu diperhatikan agar beratnya jangkar tidak terlalu mengalami tegangan yang besar sehingga tegangan yang dihasilkan masih aman dalam operasinya. Berikut adalah persamaan 2.32 sampai 2.35 dan gambar 2.7 terkait parameter yang harus diketahui dalam perancangan *mooring line*:



Gambar 2.7 Vessel Moored Dengan Satu Anchor Line

Sumber : (Faltinsen, 1990)

$$I_{min} = h\ x\ \sqrt{\frac{2.T}{w.h} - 1} \text{ ..... (2.32)}$$

$$I_{min} = h\ x\ \sqrt{\frac{2.F_H}{w.h} + 1} \text{ ..... (2.33)}$$

$$X = l - l_s + x \text{ ..... (2.34)}$$

$$X = l - h\left(1 + 2\ \frac{a}{h}\right)^{\frac{1}{2}} + \ a\ cosh^{-1}\left(1 + \frac{h}{a}\right) \text{ ..... (2.35)}$$

dengan,

T = tension pada tali tambat (kN) = F_H + wh

I_{min} = panjang minimum tali tambat (m)

l = jarak *mooring line* dari fairlead ke seabed (m)

l_s = jarak *mooring line* dari fairlead ke titik awal jatuhnya tali ke *anchor* (m)

h = jarak vertical dari *fairlead* ke *seabed* (m)

w = berat tali tambat dalam air tiap satuan panjang

F_H = gaya horizontal pretension (kN)

a = F_H/w

x = jarak horizontal *mooring line* dari fairlead ke titik awal jatuhnya tali ke seabed (m)

X = jarak horizontal *mooring line* ke *anchor* (m)

D = Panjang tali tambat yang terletak pada *anchor* (X-x) (m)

Harga D dapat diasumsikan berdasarkan tipe dari mooring line, yaitu:

1. 200 s/d 300 m untuk mooring line dengan konfigurasi *wire rope anchor lines*
2. 50 s/d 100 m untuk mooring line yang memiliki konfigurasi *chain anchor lines*

2.2.12 Tension Pada Mooring Line

Gerakan bangunan apung menyebabkan terjadinya tarikan pada mooring line. Tarikan pada mooring menurut (API-RP-2SK, 2005), dibagi menjadi dua, yaitu *mean tension* dan *maximum tension*. *Mean tension* didefinisikan sebagai *tension* pada *mooring line* yang sesuai dengan *mean offset* pada bangunan apung. *Maximum tension* diartikan sebagai penjumlahan *mean tension* dan kombinasi *tension wave frequency* dengan

low frequency. *Maximum tension* dapat dilihat dari besarnya *offset maximum* yang terjadi pada bangunan apung.

Besar *maximum tension* digunakan untuk pengecekan dari desain *mooring system* pada bangunan apung. Dari pengecekan tersebut dapat diketahui kekuatan dari *mooring system*, apakah sudah sesuai dengan kriteria/batas aman untuk beroperasi atau tidak. Adapun batas aman tersebut harus memenuhi *tension limit* (nilai presentase dari MBL) atau dengan kriteria *safety factor*. Kriteria *safety factor* mengacu pada beberapa standard, salah satunya adalah standard (API-RP-2SK, 2005) yang terdapat pada tabel 2.2 di bawah ini.

Tabel 2.2 *Tension Limit* dan *Safety Factor*

Case	Analysis Method	Tension Limit (Percent of MBS)	Equivalent Factor of Safety
Intact (ULS)	Dynamic	60	1.67

2.2.13 Offset

Menurut (API-RP-2SK, 2005) *Offset* adalah perpindahan posisi yang merupakan respon dari suatu bangunan apung dengan jarak tertentu akibat dikenai beban lingkungan terutama gelombang. *Offset* akan terjadi sejauh kapasitas dari *mooring line* karena terdapat korelasi terhadap perubahan *tension* pada *mooring line*. *Offset* dibedakan menjadi dua kelompok yaitu *mean offset* dan *maximum offset*.

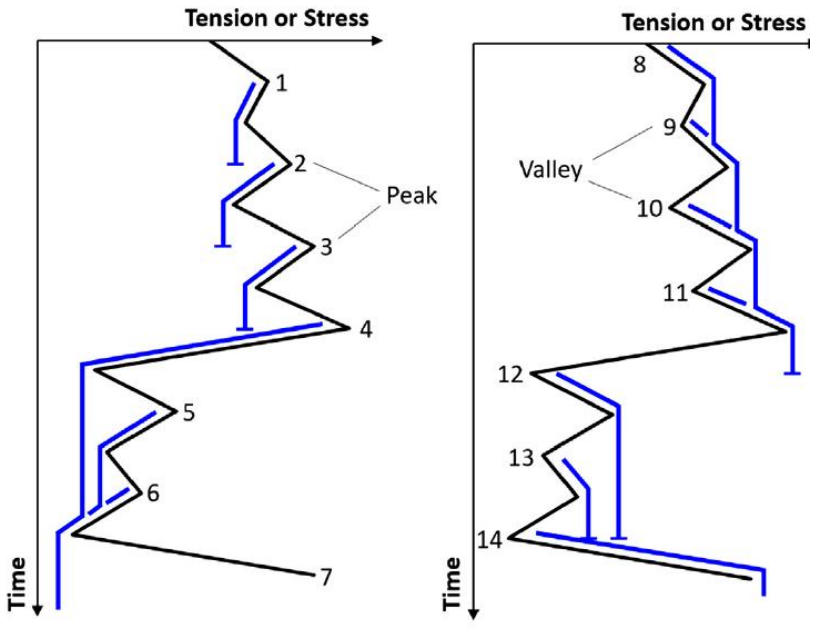
Mean offset adalah perpindahan posisi dari bangunan apung akibat komponen *steady* yaitu angin, arus, gelombang, dan beban eksternal lainnya. Sedangkan *maximum offset* menurut (API-RP-2SK, 2005) merupakan penjumlahan dari *mean offset* dan perpindahan maksimum karena kombinasi *wave frequency* dan *low frequency* pada gerak bangunan apung. Analisis *maximum offset* dapat dilakukan dengan metode *time domain* atau kombinasi *time* dan *frequency domain*.

2.2.14 Metode Rainflow Counting

Metode *rainflow counting* pertama kali dikembangkan oleh Matsuishi dan Endo pada tahun 1968. *rainflow counting* merupakan metode

perhitungan setengah siklus sebagai operasi algoritma pada *time history* (Ma, Luo, Kwan, & Wu, 2019). Dimana metode ini mirip seperti aliran setetes hujan yang mengalir di atap pagoda (candi). Metode ini bertujuan untuk mengurutkan kembali definisi siklus sehingga diharapkan hasil perhitungan *fatigue* lebih presisi. Metode ini dianggap paling akurat untuk analisis *fatigue* bila cukup banyak simulasi time domain yang dilakukan mewakili *wave scatter diagram* (Zhen & Moan, 2007). Berikut adalah alur perhitungan metode *rainflow* beserta ilustrasinya pada gambar 2.8:

a. Time history stress/ tension diputar 90^o searah jarum jam sehingga menyerupai atap pagoda (Kim, Kim, & Park, 2018) (candi)
b. *Time history stress* atau *tension* direpresentasikan sebagai puncak atau lembah di atap candi ketika diputar 90^o searah jarum jam
c. Bayangkan setetes hujan pada bagian lembah merupakan setengah siklus dan setengah siklus lainnya pada bagian puncak. Penamaan puncak/lembah tergantung pada definisi kita.
d. *Stress range/tension range* dalam setengah siklus dianggap sebagai jarak pada sumbu *stress/tension*.



Gambar 2.8 Rainflow Method
Sumber : (Ma, Luo, Kwan, & Wu, 2019)

2.2.15 Kurva T-N

Kurva T-N adalah kurva yang menggambarkan hubungan antara tension dan jumlah siklus. Dimana kurva ini merepresentasikan ketahanan suatu struktur terhadap *fatigue*. Basic design kurva T-N menurut (API-RP-2SK, 2005) dinyatakan pada persamaan 2.36 sebagai berikut:

$$NR^M = K \quad \text{..... (2.36)}$$

dengan,

N = jumlah siklus yang mengalami kegagalan berdasarkan kurva T-N

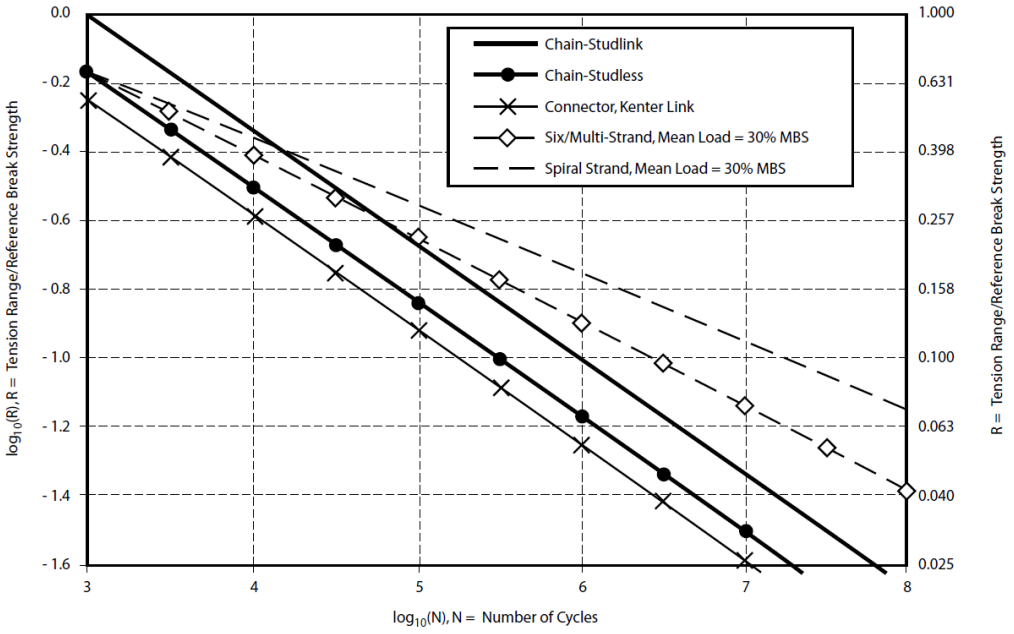
R = *tension range* / *minimum breaking strength*

Sedangkan nilai M dan K dapat diperoleh dari tabel 2.3 di bawah ini:

Tabel 2.3 Nilai M dan K

Component	M	K
Common studlink	3.0	1000
Common studless	3.0	316
Baldt and kenter connecting link	3.0	178
Six/multi strand rope	4.09	$10^{(3.20 - 2.79L_m)}$
Spiral strand rope	5.05	$10^{(3.25 - 3.43L_m)}$

Adapun kurva T-N menurut (API-RP-2SK, 2005), diaplikasikan pada gambar 2.9 sebagai berikut:



Gambar 2.9 Kurva T-N
Sumber : (API-RP-2SK, 2005)

2.2.16 Akumulasi Fatigue Damage

Diperlukan *cumulative damage* ratio tahunan sebagai akibat dari pembebanan siklik. *Cumulative damage* berdasarkan miner's rule dapat dirumuskan pada persamaan 2.37 dan 2.38 sebagai berikut (API-RP-2SK, 2005):

$$D_i = \sum_{j=1}^{j=n} \frac{n_j}{N_j} \quad \text{..... (2.37)}$$

$$D_{annual} = \sum_{j=1}^{j=n} D_i \quad \text{..... (2.38)}$$

dengan,

n_j = jumlah siklus per tahun dari rentang tegangan j

N_j = jumlah siklus untuk gagal dari rentang tegangan j pada kurva S-N

D_i = kerusakan kelelahan tahunan akibat kondisi lingkungan i

D_{annual} = kerusakan kelelahan tahunan total akibat *fatigue limit state* pada setiap kondisi lingkungan

2.2.17 Fatigue Life

Fatigue life pada suatu struktur harus melebihi umur layanan desain dengan faktor keamanan (*safety factor*) 3 untuk *chain* (API-RP-2SK, 2005). *Fatigue life* dirumuskan pada persamaan 2.39 dan 2.40 sebagai berikut:

$$L_{fatigue} = \frac{1}{D_{annual}} \quad \text{..... (2.39)}$$

$$L_{design} = \frac{L_{fatigue}}{SF} \quad \text{..... (2.40)}$$

dengan,

D_{annual} = total *fatigue damage* tahunan

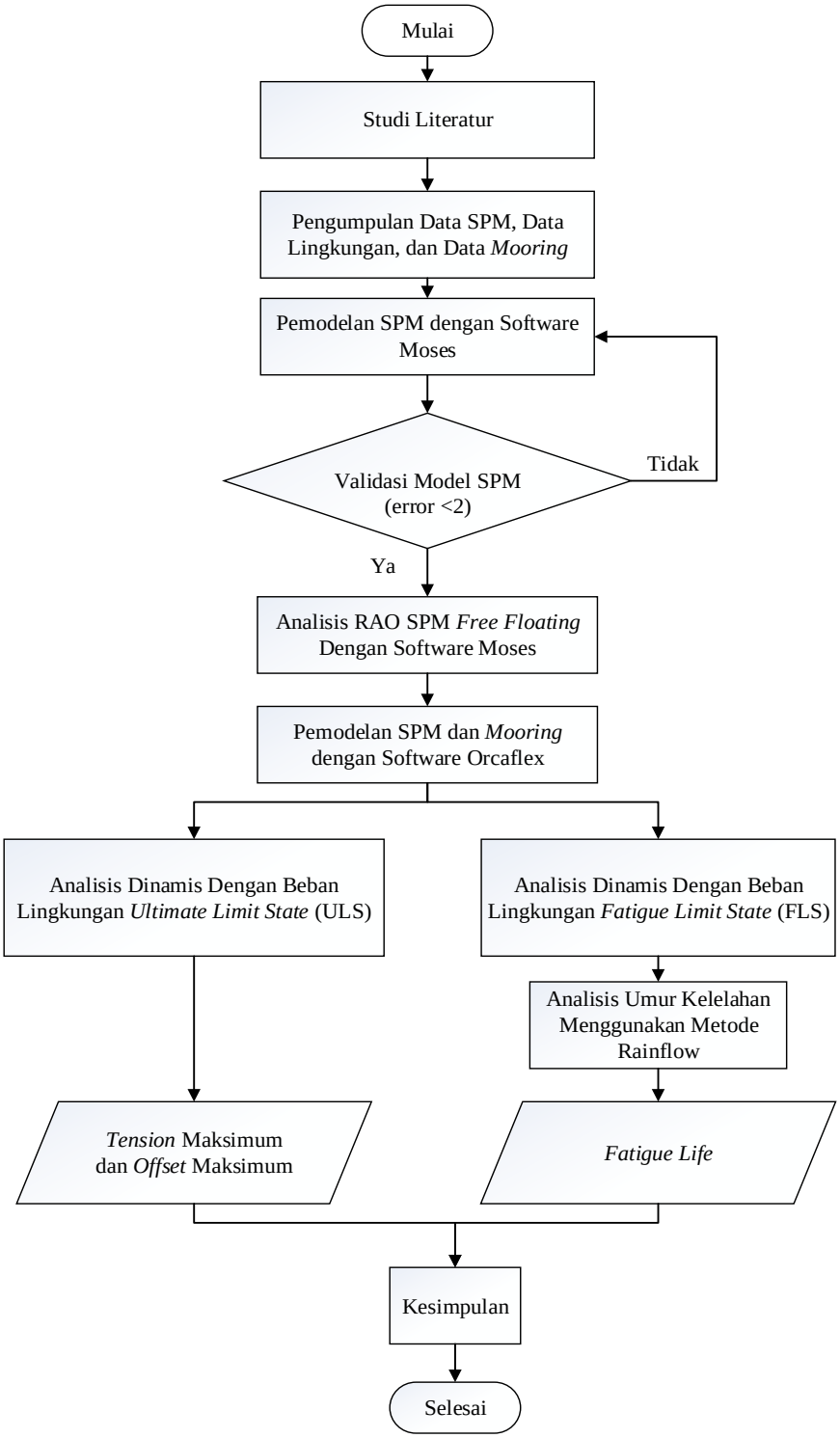
$L_{fatigue}$ = fatigue life (tahun)

L_{design} = umur desain (*design life*) (tahun)

SF = faktor keamanan (*safety factor)*

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Penjelasan Diagram Alir

3.2.1 Studi Literatur

Studi literatur bertujuan untuk mengumpulkan data-data, bahan, standards atau codes yang relevan untuk menunjang pengerjaan penelitian. Studi literatur dapat diperoleh dari jurnal, tugas akhir atau penelitian sebelumnya, buku, materi-materi yang pernah didapatkan di perkuliahan. Studi literatur juga dapat dijadikan sebagai referensi dalam mengerjakan dasar teori pada laporan hasil penelitian lainnya.

3.2.2 Pengumpulan Data

Data yang didapatkan dari studi literatur maupun perusahaan terkait meliputi data *single point mooring*, data *mooring*, dan data lingkungan. Data dari *single point mooring* terdiri dari *outside* diameter, tinggi, *displacement*, VCG, dll. Data *mooring equipment* terdiri dari diameter, *grade*, dan MBL. Data lingkungan terdiri dari data angin, arus, dan gelombang.

3.2.3 Pemodelan SPM

Pemodelan *single point mooring* dilakukan dengan menggunakan software MOSES. Pemodelan dilakukan dengan menginput data-data SPM yang telah diperoleh sebelumnya.

3.2.4 Validasi SPM

Dari data hidrostatis yang telah diperoleh dari software, maka dilakukan validasi antara hasil hidrostatis dari moses tersebut dengan hidrostatis pada data. Nilai toleransi dari hasil pemodelan pada moses dan data adalah harus < 2% (ABS, 2017). Tujuan dari nilai toleransi ini adalah untuk mengetahui apakah pemodelan sudah menyerupai bentuk aslinya atau tidak.

3.2.5 Analisis RAO SPM Kondisi *Free Floating*

Pada tahap ini akan dilakukan analisis respon gerak struktur *single point mooring* kondisi *free floating* dengan software. Analisis respon gerak struktur *single point mooring* dilakukan untuk mendapatkan RAO dalam setiap gerakan, yaitu gerak translasi yang terdiri dari surge, sway, dan heave dan rotasi yang terdiri dari roll, pitch, yaw pada kondisi *free floating*.

3.2.6 Pemodelan SPM dan *Mooring* dengan Software Orcaflex

Untuk melakukan analisis *mooring* dinamis, dilakukan terlebih dahulu pemodelan SPM dan *mooring* pada software Orcaflex dengan menginput data-data yang diperlukan dalam software Orcaflex.

3.2.7 Analisis *Mooring* Dinamis Dengan Beban ULS (pada kondisi intact)

analisis dinamis dilakukan pada beban lingkungan ekstrem (*Ultimate Limit State*) dalam kondisi intact dengan *safety factor* ≥ 1.67 (API-RP-2SK, 2005) untuk kriteria *tension mooring*. Analisis dinamis dengan beban ULS dilakukan untuk memperoleh *offset* maksimum *single point mooring* dan *tension* maksimum *anchor chain*.

3.2.8 Analisis *Mooring* Dinamis Dengan Beban FLS

Dalam kondisi beban *Fatigue Limit State* (FLS) diperlukan simulasi pembebanan pada *anchor chain* untuk memperoleh *tension* dalam *time history*. Dimana *tension* dalam bentuk *time history* akan digunakan untuk analisis kelelahan pada *anchor chain*.

3.2.9 Analisis Umur Kelelahan pada *Anchor Chain*

Tension time history yang didapat pada tahap sebelumnya digunakan untuk analisis umur kelelahan dengan kurva T-N menggunakan metode perhitungan siklus *Rainflow Counting*. Dari hasil diperoleh *fatigue damage* tahunan pada setiap kondisi desain yang kemudian akan diakumulasikan. Hasil *accumulative damage* inilah yang akan digunakan untuk menghitung umur kelelahan (*fatigue life*) *anchor chain*. Dimana umur kelelahan harus lebih besar dari umur desain dengan *safety factor* ≥ 3 untuk *chain* (API-RP-2SK, 2005).

3.2.10 Kesimpulan

Tahap terakhir dalam proses pengerjaan penelitian ini adalah membuat kesimpulan. Dimana kesimpulan didapat dari hasil analisis yang telah dilakukan. Kesimpulan harus menjawab rumusan masalah yang telah dijabarkan sebelumnya pada bab pendahuluan, yaitu *offset* maksimum SPM, *tension* maksimum *anchor chain,* dan umur kelelahan dari *anchor chain*.

3.3 Pengumpulan Data

3.3.1 Data SPM

Tabel 3.1 Data SPM

Deskripsi	Simbol	Data	Unit
Displacement	Δ	132.887	ton
Outside Diameter of Buoy	ODB	8.000	m
Outside Diameter of Skirt	ODS	11.240	m
Height	H	3.700	m
Draft (T)	T	1.800	m
Vertical Center of Gravity	VCG	2.220	m
Radius of Giration	Kxx	2.586	m
	Kyy	2.586	m
	Kzz	3.574	m

Sumber: PT. Pertamina Pengapon

3.3.2 Data Mooring

Berikut adalah data *mooring line* pada *single point mooring.*

Gambar 3.2 Data *Mooring Equipment* Asimetris

Deskripsi	Unit	Data
Line 1 dan Line 4		
Tipe	-	Studless - Chain
Grade	-	Grade R4
Diameter	mm	58
Weight in Water	te/m	0.058
Minimum Breaking Load	kN	3627.95
Line 2 dan Line 3		
Tipe	-	Studlink - Chain
Grade	-	U3
Diameter	mm	58
Weight in Water	te/m	0.064
Minimum Breaking Load	kN	2600
Panjang	m	55
Line 2 dan Line 3		
Tipe	-	Studless - Chain
Grade	-	Grade R4
Diameter	mm	82.5
Weight in Water	te/m	0.118
Minimum Breaking Load	kN	6974.77

Sumber: PT. Pertamina Pengapon

Tabel 3.2 Data *Mooring Equipment* Simetris

Deskripsi	Unit	Data
***Line* 1, 2, 3, dan *Line* 4**		
Tipe	-	Studless - Chain
Grade	-	Grade R4
Diameter	mm	58
Weight in Water	te/m	0.058
Minimum Breaking Load (MBL)	kN	3627.95

Sumber: PT. Pertamina Pengapon

3.3.3 Data Lingkungan

Berikut adalah data lingkungan yang digunakan untuk analisis sistem tambat *single point mooring* di Perairan Laut Utara Pulau Jawa, Semarang dengan kedalaman laut 11.83 m.

Tabel 3.3 Data Lingkungan Perairan Laut Utara Pulau Jawa

Parameter			Periode Ulang (Tahun)		
Item	**Notasi**	**Unit**	**1**	**10**	**100**
Kecepatan Angin					
1-minute mean	U1	m/s	5.58	8.14	12.16
Tinggi Gelombang					
Significant wave height	Hs	m	1.48	2.38	3.31
Significant wave period	Ts	s	4.71	6.12	7.52
Significant wave length	Ls	m	34.34	58.35	84.28
Maximum individual wave height	Hmax	m	2.52	4.05	5.62
Maximum individual wave period	Tmax	s	6.43	8.52	10.91
Maximum individual wave length	Lmax	m	63.06	102.91	145.89
Kecepatan Arus					
0 % kedalaman	V_0	m/s	0.77	1.69	2.36
10 % kedalaman	V_{10}	m/s	0.6	1.51	2.29
20 % kedalaman	V_{20}	m/s	0.43	1.33	2.04
30 % kedalaman	V_{30}	m/s	0.42	1.35	2.03
40 % kedalaman	V_{40}	m/s	0.35	1.27	1.98
50 % kedalaman	V_{50}	m/s	0.34	1.23	1.96
60 % kedalaman	V_{60}	m/s	0.33	1.21	1.94
70 % kedalaman	V_{70}	m/s	0.17	1.08	1.91
80 % kedalaman	V_{80}	m/s	0.16	1.05	1.88
90 % kedalaman	V_{90}	m/s	0.15	1.02	1.85
100 % kedalaman	V_{100}	m/s	0.14	1	1.83

Sumber: PT. Pertamina Pengapon

Tabel 3.4 Wave Scatter 1 Tahunan

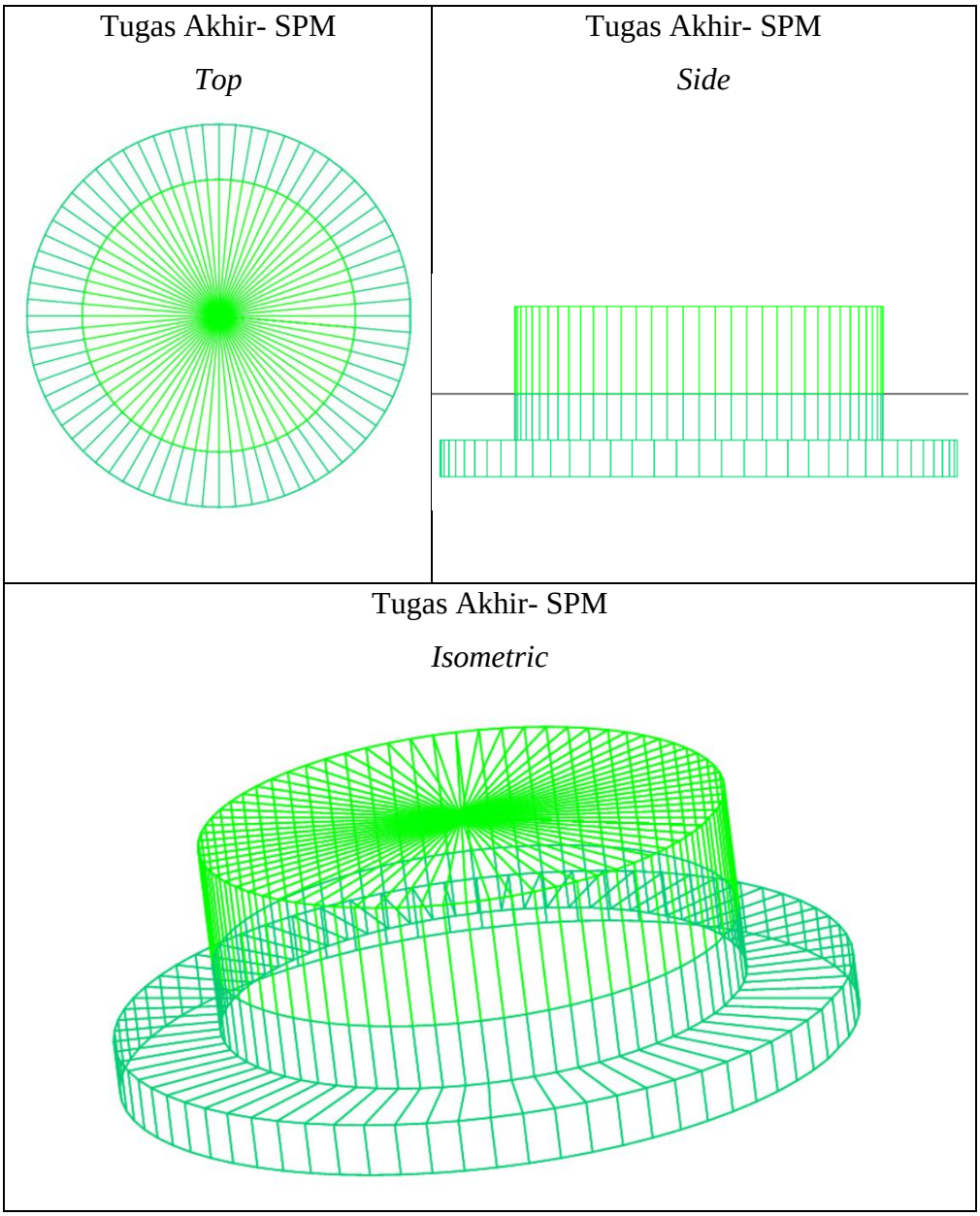
Hs (m)	Tp (s)															Total
	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	5.75	6.25	6.8	7.25	7.75	8.25	8.75	
0.1	6	45		1	6	3	2	1								64
0.3		8	226	446	256	261	93	17	1							1308
0.5				55	859	648	479	283	28	2	1					2355
0.7				29	281	531	436	630	181	35	2					2125
0.9				1	10	249	323	540	340	137	28	1				1629
1.1					1	5	186	348	321	205	78	6	1			1151
1.3					1	1	6	154	202	175	102	15	1			657
1.5					1	1	1	19	99	118	95	31	1	1		367
1.7							1	1	24	61	63	36	2	1		189
1.9							1	1	3	23	36	25	3	1		93
2.1							1	1	1	4	17	14	4	1		43
2.3										1	5	10	3	1		20
2.5										1	1	4	3	1	1	11
2.7											1	1	1	1	1	5
2.9												1	1	1	1	4
3.1												1	1	1		3
Total	6	53	226	532	1415	1699	1529	1995	1200	762	429	145	21	9	3	10024

Sumber: PT. Pertamina Pengapon

BAB IV
ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan SPM

Pemodelan SPM dilakukan dengan software MOSES menggunakan *3D diffraction theory* untuk mendefinisikan bentuk buoy. Pemodelan diawali dengan memasukkan data-data yang diperlukan untuk mendefinisikan bentuk buoy. Berikut gambar 4.1 adalah hasil pemodelan SPM.



Gambar 4.1 Pemodelan SPM

4.2 Validasi Pemodelan SPM

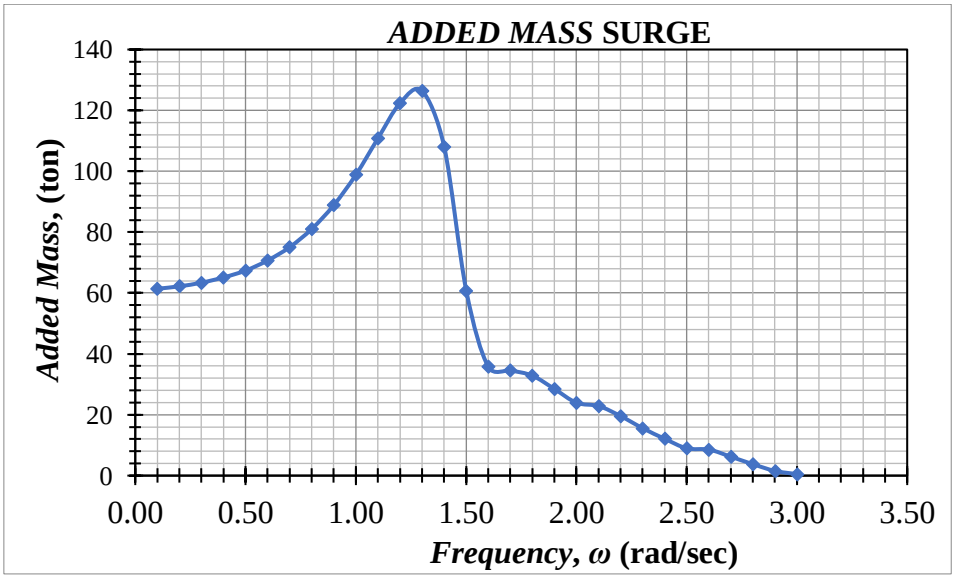
Pemodelan SPM yang telah dibuat kemudian dilakukan pengecekan validitas, apakah model telah mewakili bentuk aslinya. Dalam hal ini model dikatakan sesuai atau memenuhi kriteria bila presentase error hasil pemodelan pada data ≤ 2% (ABS, 2017). Berikut adalah table 4.1 hasil validasi model SPM dimana model telah mewakili bentuk aslinya.

Tabel 4.1 Hasil Validasi Model SPM

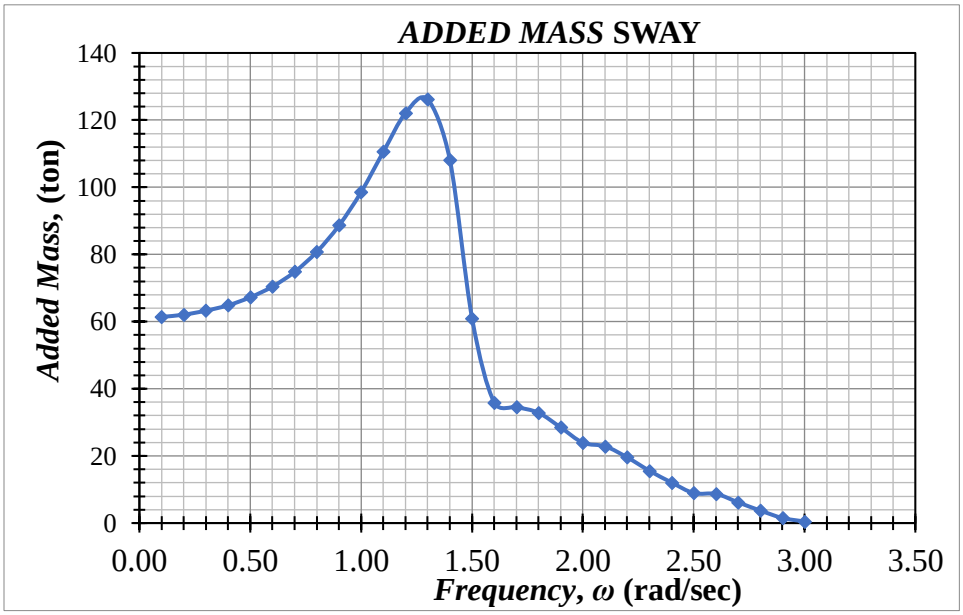
Deskripsi	Unit	Data	Moses	Error
Displacement (Δ)	ton	132.89	132.77	0.09%
Diameter of Buoy (ODB)	m	8.00	8.00	0.00%
Diameter of Skirt (ODS)	m	11.24	11.24	0.00%
Height (H)	m	3.70	3.70	0.00%
Draft (T)	m	1.80	1.80	0.00%
Vertical Center of Gravity (VCG)	m	2.22	2.22	0.00%

4.3 *Added Mass* SPM *Free Floating*

Berdasarkan pemodelan SPM dilakukan analisis *added mass* pada SPM *free floating* menggunakan software MOSES. Analisis *added mass* dilakukan pada rentang frekuensi gelombang 0.1 rad/s hingga 3 rad/s dengan interval 0.1 rad/s dalam 6 derajat kebebasan. Berikut adalah *added mass* SPM kondisi *free floating* yang disajikan dalam gambar grafik 4.2 sampai 4.7 pada setiap mode gerak.

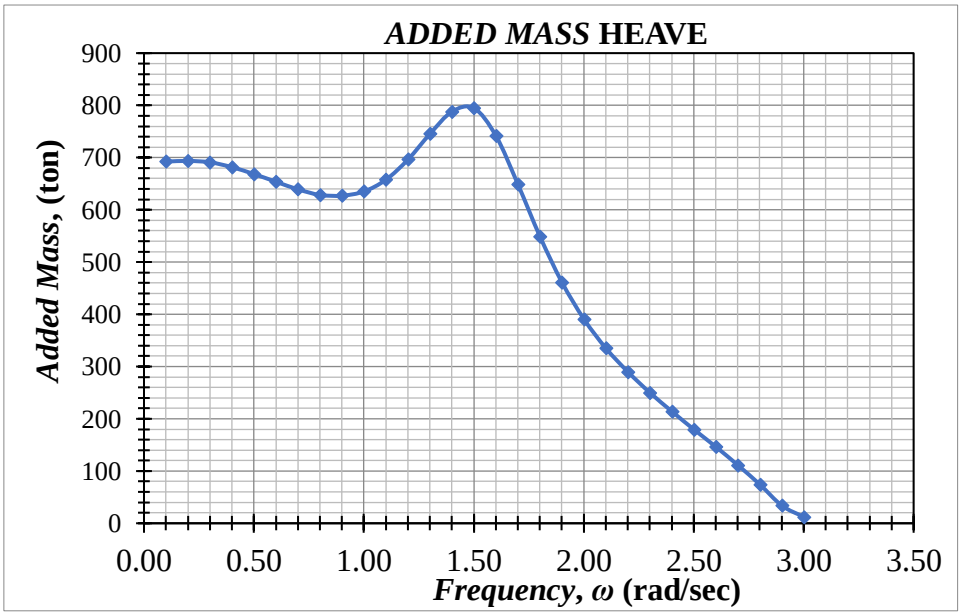


Gambar 4.2 Grafik *Added Mass* Gerakan Surge SPM *Free Floating*



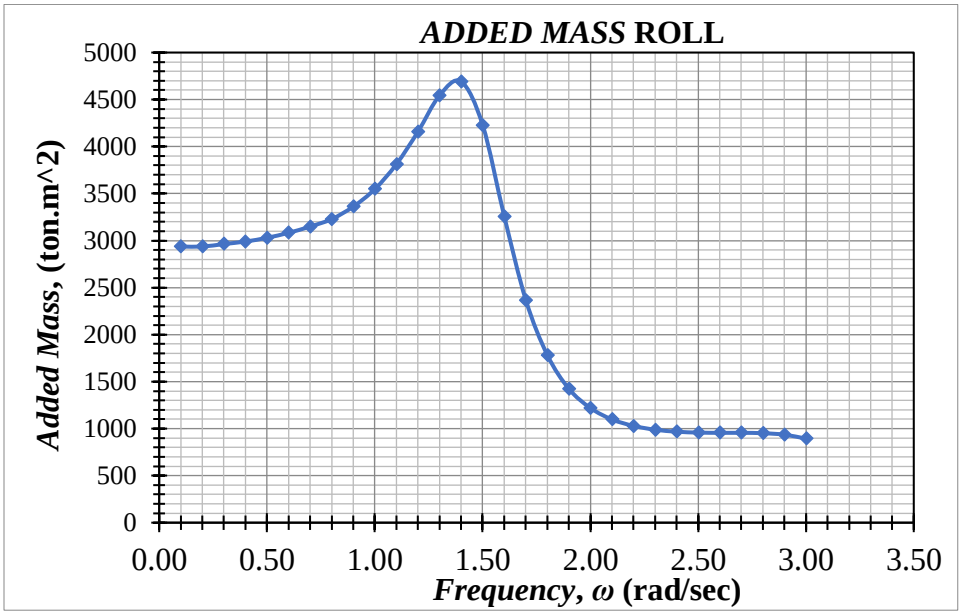
Gambar 4.3 Grafik *Added Mass* Gerakan Sway SPM *Free Floating*

Berdasarkan gambar grafik *added mass* 4.2 gerakan surge dan 4.3 gerakan sway di atas, dapat disimpulkan bahwa grafik *added mass* pada gerakan surge dan sway untuk SPM kondisi *free floating* memiliki pola yang sama. Hal ini dikarenakan bentuk struktur SPM yang simetris. *Added mass* terbesar gerakan surge sebesar 126 ton saat frekuensi gelombang 1.3 rad/s dan sway sebesar 126 ton saat frekuensi gelombang 1.3 rad/s.

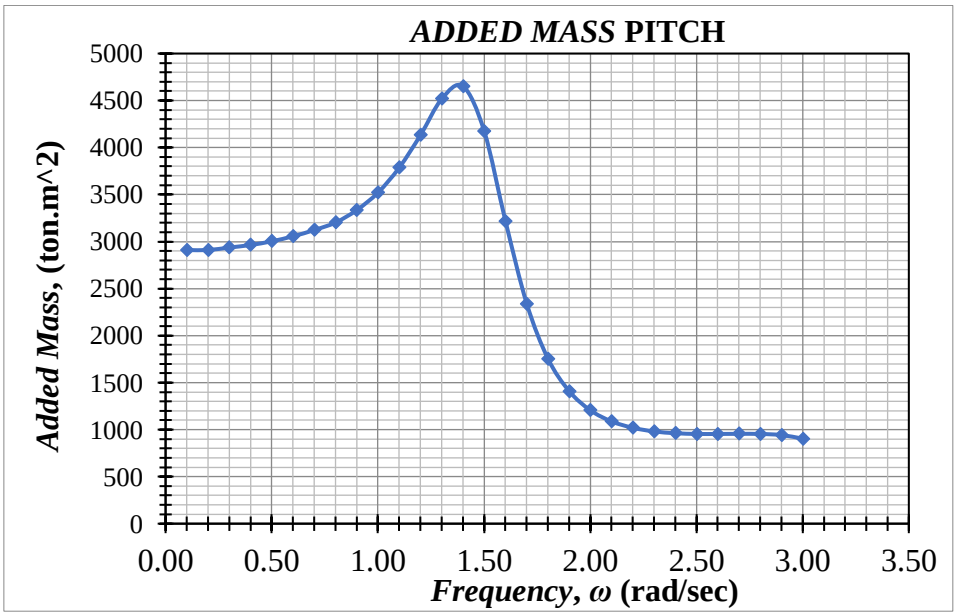


Gambar 4.4 Grafik *Added Mass* Gerakan Heave SPM *Free Floating*

Berdasarkan grafik *added mass* 4.4 gerakan heave di atas, nilai *added mass* terbesar gerakan heave pada SPM kondisi *free floating* adalah 795 ton saat frekuensi gelombang 1.5 rad/s.



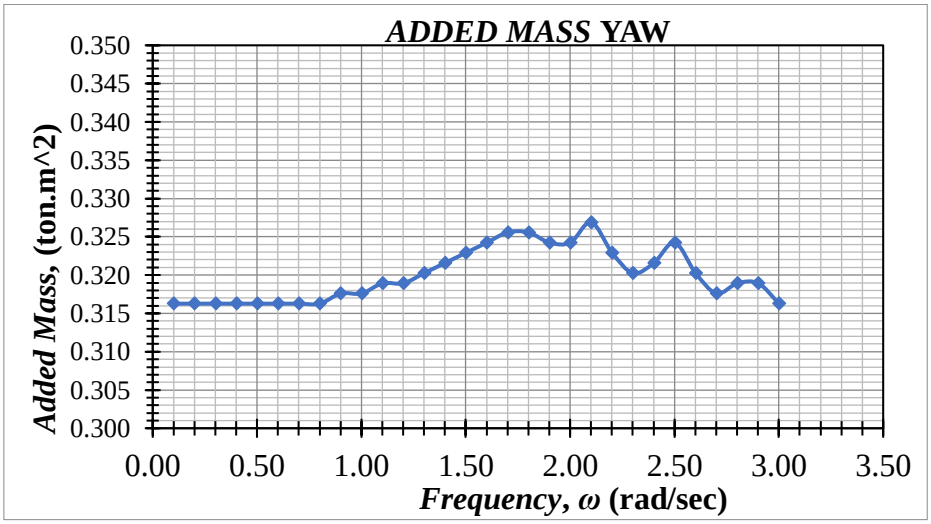
Gambar 4.5 Grafik *Added Mass* Gerakan Roll SPM *Free Floating*



Gambar 4.6 Grafik Added Mass Gerakan Pitch SPM Free Floating

Berdasarkan gambar grafik *added mass moment of inertia* 4.5 gerakan roll dan 4.6 gerakan pitch di atas, disimpulkan bahwa grafik *added mass moment of inertia* gerakan roll dan pitch untuk SPM *free floating* memiliki pola yang sama. Hal ini dikarenakan bentuk struktur SPM yang

simetris. Nilai *added mass moment of inertia* terbesar pada SPM *free floating* gerakan roll sebesar 4691 ton.m^2 saat frekuensi gelombang 1.4 rad/s dan pitch sebesar 4651 ton.m^2 saat frekuensi gelombang 1.4 rad/s.



Gambar 4.7 Grafik Added Mass Gerakan Yaw SPM Free Floating

Berdasarkan grafik *added mass moment of inertia* 4.7 gerakan yaw di atas, nilai *added mass moment of inertia* gerakan yaw kecil. Adapun nilai *added mass* gerakan yaw pada SPM kondisi *free floating* rata-rata sebesar 0.3 ton.m^2 pada rentang frekuensi gelombang 0.1 rad/s sampai dengan 3 rad/s.

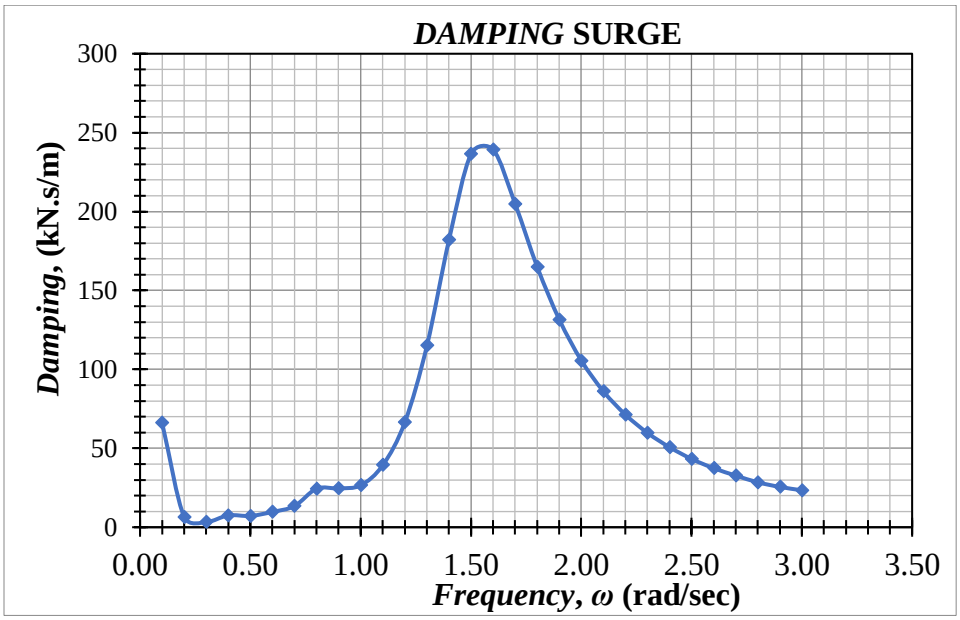
Berikut ini disajikan tabel 4.2 perbandingan *added mass* maksimum tiap mode gerakan pada SPM *free floating* pada rentang frekuensi gelombang 0.1 rad/s sampai 3 rad/s.

Tabel 4.2 Rekapitulasi Perbandingan *Added Mass* Maksimum SPM *Free Floating* Tiap Mode Gerakan

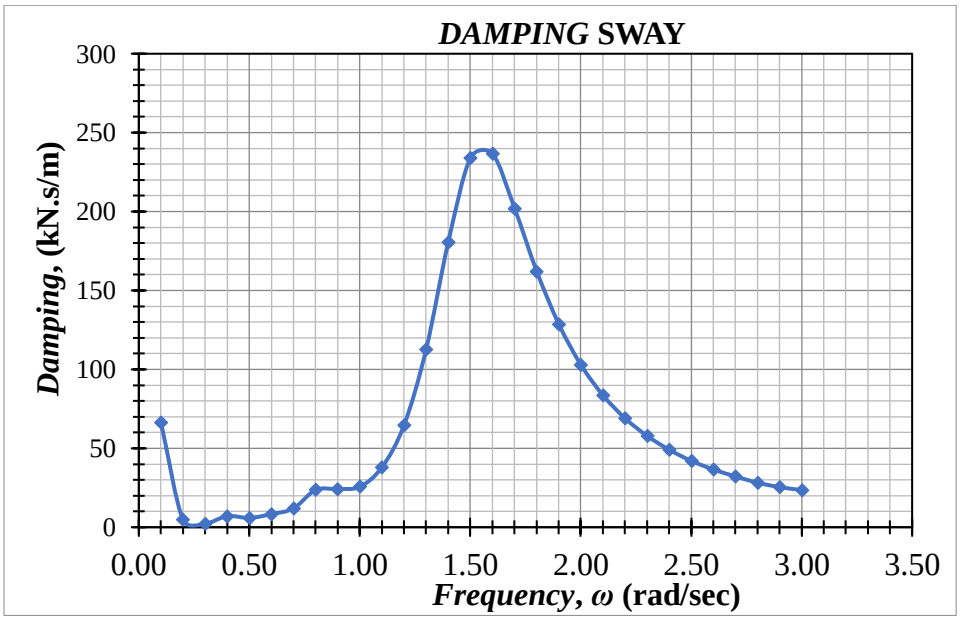
Rekapitulasi *Added Mass* SPM *Free Floating*			
Mode Gerakan		Unit	*Maximum Added Mass*
Translasi	Surge	ton	126
	Sway	ton	126
	Heave	ton	795
Rotasi	Roll	ton.m^2	4691
	Pitch	ton.m^2	4651
	Yaw	ton.m^2	0.33

4.4 *Damping* SPM *Free Floating*

Analisis selanjutnya berdasarkan pemodelan SPM adalah *damping* SPM dengan menggunakan software yang sama yaitu MOSES. Analisis damping dilakukan pada rentang frekuensi gelombang 0.1 rad/s hingga 3 rad/s dengan interval 0.1 rad/s dalam 6 derajat kebebasan. Berikut adalah *damping* SPM kondisi *free floating* yang disajikan dalam gambar grafik 4.8 smapai 4.13 pada setiap mode gerak.

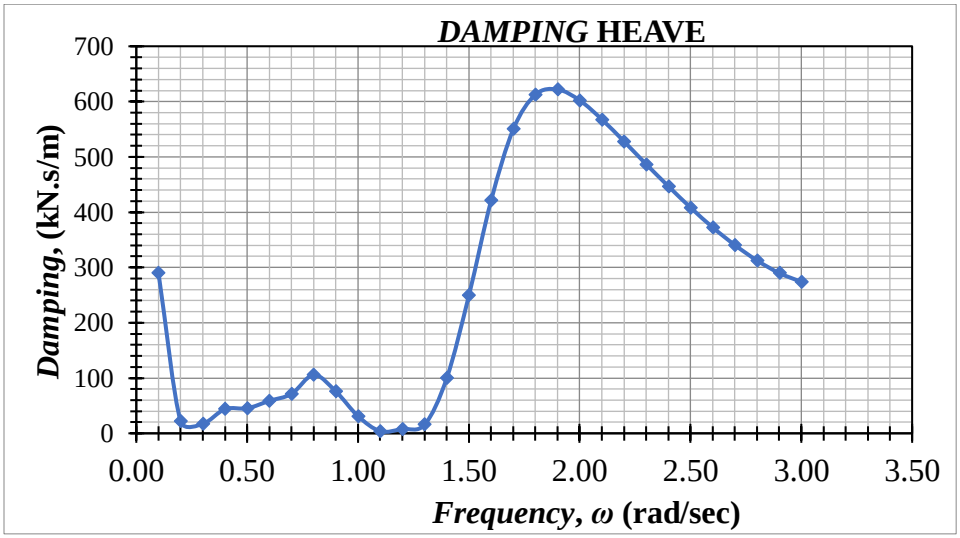


Gambar 4.8 Grafik *Damping* Gerakan Surge pada SPM *Free Floating*



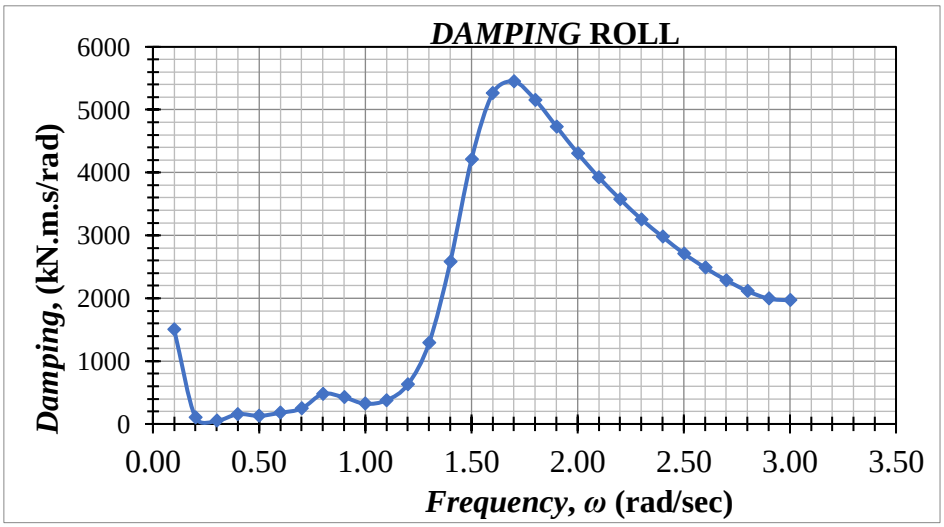
Gambar 4.9 Grafik *Damping* Gerakan Sway pada SPM *Free Floating*

Berdasarkan gambar grafik *damping* 4.8 gerakan surge dan 4.9 gerakan sway di atas, dapat disimpulkan bahwa grafik *damping* pada gerakan surge dan sway untuk SPM kondisi *free floating* memiliki pola yang sama. Hal ini dikarenakan bentuk struktur SPM yang simetris. Nilai *damping* terbesar gerakan surge sebesar 239 kN.s/m saat frekuensi gelombang 1.6 rad/s dan gerakan sway sebesar 237 kN.s/m saat frekuensi gelombang 1.6 rad/s.

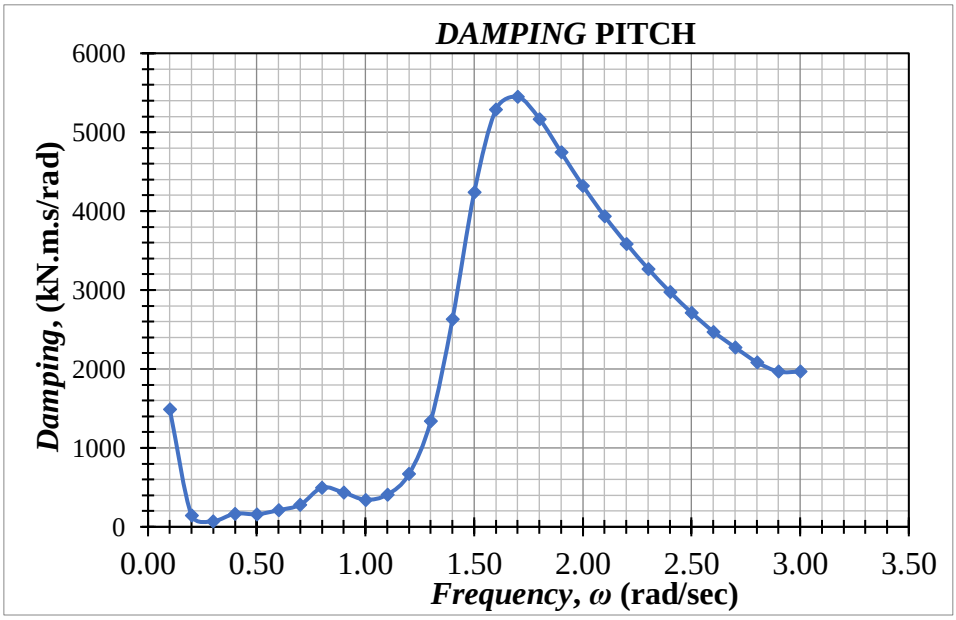


Gambar 4.10 Grafik *Damping* Gerakan Heave pada SPM *Free Floating*

Berdasarkan grafik *damping* 4.10 gerakan heave di atas, nilai *damping* terbesar gerakan heave pada SPM kondisi *free floating* adalah sebesar 622 kN.s/m saat frekuensi gelombang 1.9 rad/s.

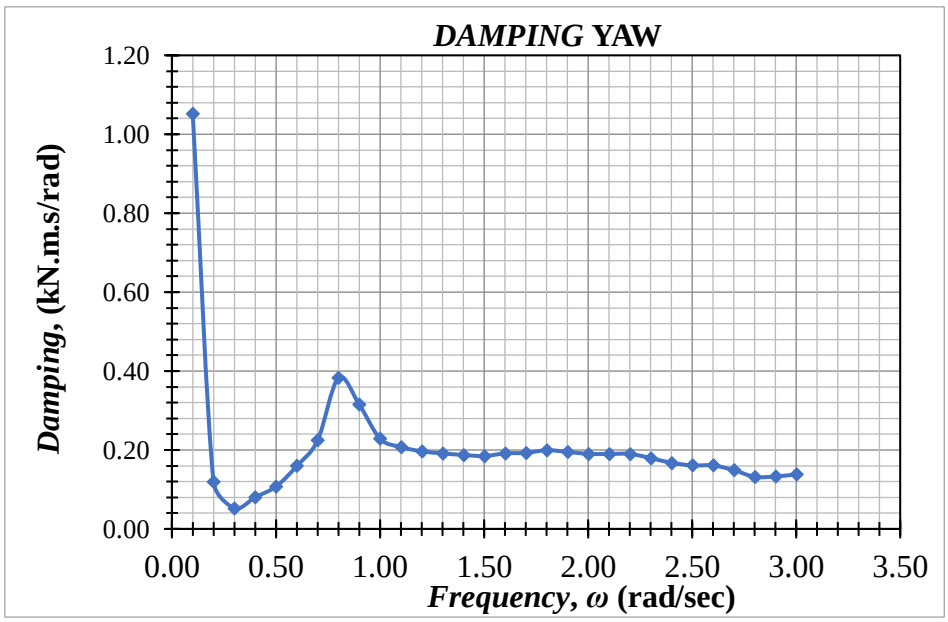


Gambar 4.11 Grafik *Damping* Gerakan Roll pada SPM *Free Floating*



Gambar 4.12 Grafik *Damping* Gerakan Pitch pada SPM *Free Floating*

Berdasarkan gambar grafik *damping* 4.11 gerakan roll dan gambar grafik *damping* 4.12 gerakan pitch di atas, dapat disimpulkan bahwa grafik *damping* pada gerakan roll dan pitch untuk SPM kondisi *free floating* memiliki pola yang sama. Hal ini dikarenakan bentuk struktur SPM yang simetris. Adapun nilai *damping* terbesar gerakan roll dan pitch pada SPM kondisi *free floating* yaitu 5448 kN.m.s/rad saat frekuensi gelombang 1.7 rad/s.



Gambar 4.13 Grafik *Damping* Gerakan Yaw pada SPM *Free Floating*

Berdasarkan gambar grafik *damping* 4.13 gerakan yaw di atas, dapat dilihat, nilai *damping* yang terjadi kecil. Adapun nilai damping terbesar adalah 1.05 kN.m.s/rad pada frekuensi gelombang 0.1 rad/s.

Berikut ini disajikan tabel 4.3 perbandingan *damping* maksimum tiap mode gerakan pada SPM *free floating* pada rentang frekuensi gelombang 0.1 rad/s sampai 3 rad/s.

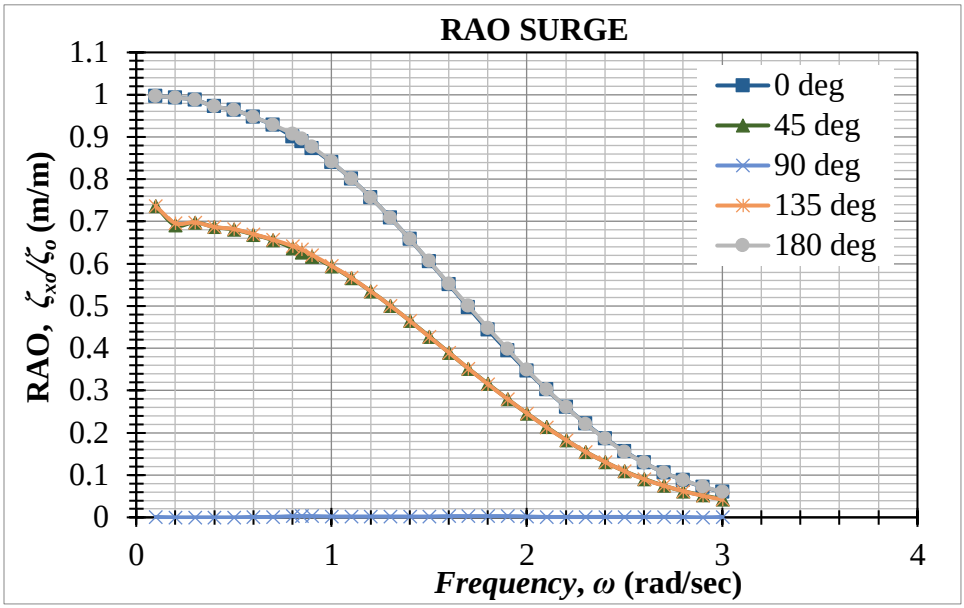
Tabel 4.3 Rekapitulasi Perbandingan *Damping* Maksimum *SPM Free Floating* Tiap Mode Gerakan

Rekapitulasi *Damping* SPM *Free Floating*			
Mode Gerakan		Unit	*Maximum Damping*
Translasi	Surge	kn.s/m	239
	Sway	kn.s/m	237
	Heave	kn.s/m	622
Rotasi	Roll	kn.m.s/rad	5448
	Pitch	kn.m.s/rad	5448
	Yaw	kn.m.s/rad	1.05

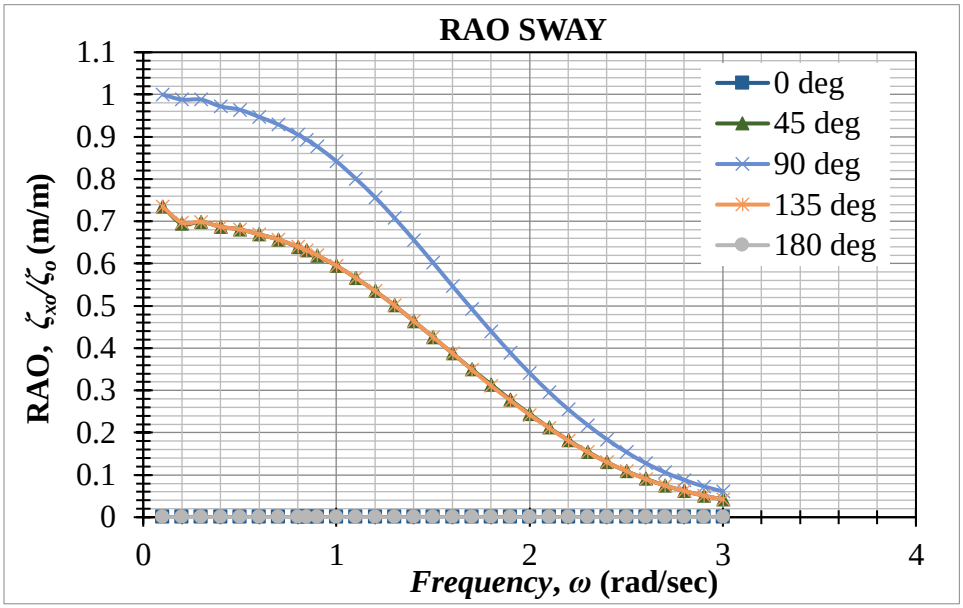
4.5 RAO SPM *Free Floating*

Analisis RAO dilakukan pada rentang frekuensi gelombang 0.1 rad/s hingga 3 rad/s dengan interval 0.1 rad/s. Respon gerak yang terjadi pada struktur (SPM) yaitu *surge, sway, heave, roll, pitch, yaw*. *Heading angle* yang ditinjau adalah 0^o, 45^o, 90^o, 135^o, 180^o. Berikut adalah RAO SPM kondisi *free floating* yang disajikan dalam bentuk grafik pada setiap mode gerak.

Berikut adalah RAO SPM yang disajikan dalam bentuk gambar grafik 4.14 sampai 4.19 pada setiap mode gerak.



Gambar 4.14 Grafik RAO Gerakan Surge SPM *Free Floating*

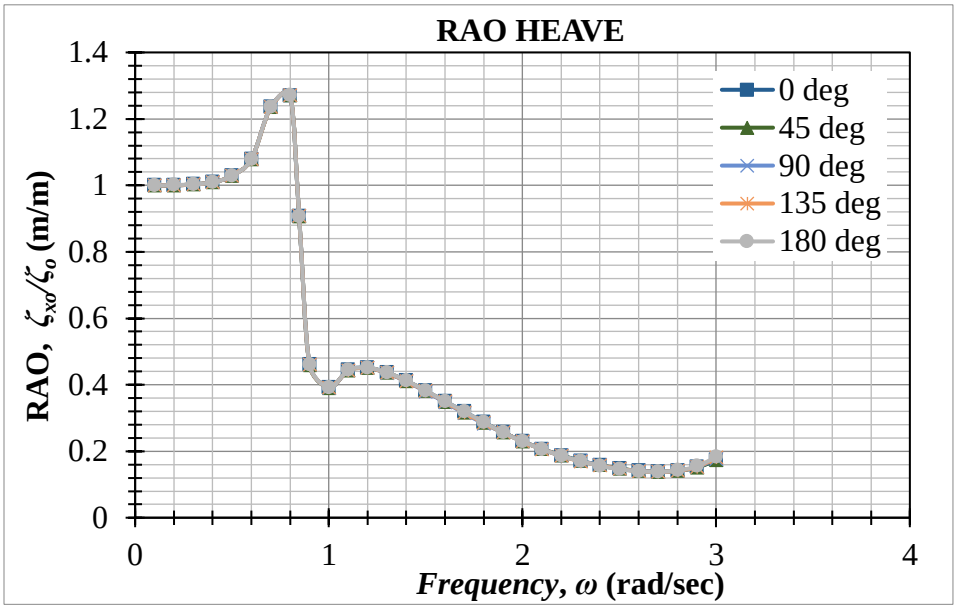


Gambar 4.15 Grafik RAO Gerakan Sway SPM *Free Floating*

Berdasarkan dua gambar grafik mode gerakan 4.14 dan 4.15 di atas yaitu surge dan sway, dapat dilihat bahwa grafik yang terbentuk memiliki pola yang sama. Hal ini karena bentuk struktur SPM yang simetris sehingga pada setiap *heading angle*-nya memilki pola grafik yang sama namun berkebalikan pada *heading angle* yang saling tegak lurus dengan arah geraknya (surge memiliki arah gerak pada sumbu x yang saling tegak lurus

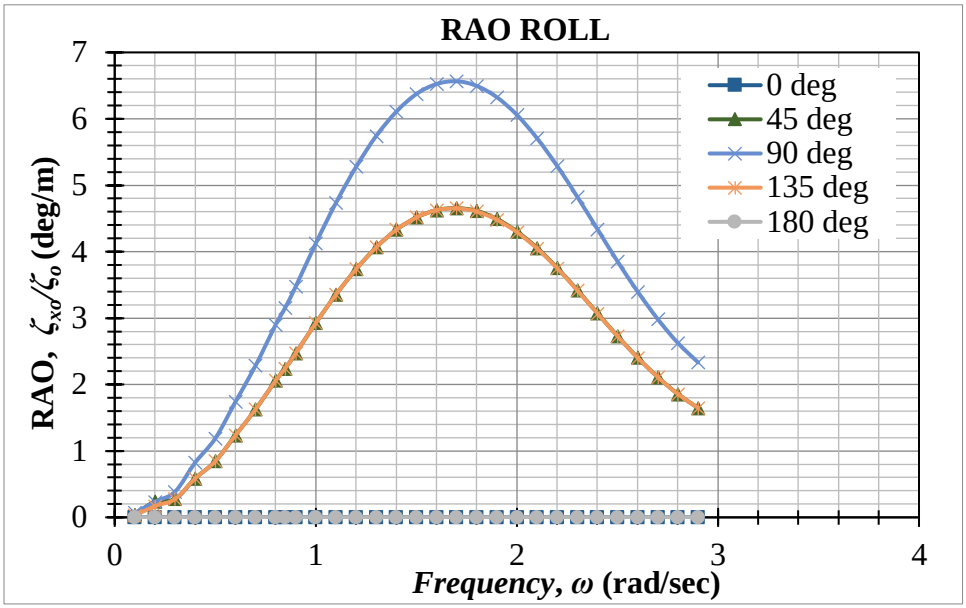
atau memiliki sudut 90^o terhadap sway yang memiliki arah gerak pada sumbu y). Berikut adalah besar amplitudo dari penjelasan di atas:

- Pada gerakan surge amplitudo terbesar terjadi pada *heading* 0^o dan 180^o yaitu sebesar 0.997 m/m dengan frekuensi gelombang 0.1 rad/s. sedangkan pada *heading* 90^o hampir tidak terjadi gerakan surge. Hal ini dapat dilihat pada grafik yang menunjukkan bahwa besar amplitudonya yaitu 0.003 m/m. pada frekuensi gelombang 0.8 rad/s.
- Pada gerakan sway amplitudo terbesar terjadi pada *heading* 90^o yaitu sebesar 1 m/m dengan frekuensi gelombang 0.1 rad/s. sedangkan pada *heading* 0^o dan 180^o tidak terjadi gerakan sway. Hal ini dapat dilihat pada grafik yang menunjukkan bahwa besar amplitudonya yaitu 0.000 m/m pada setiap frekuensi gelombang.

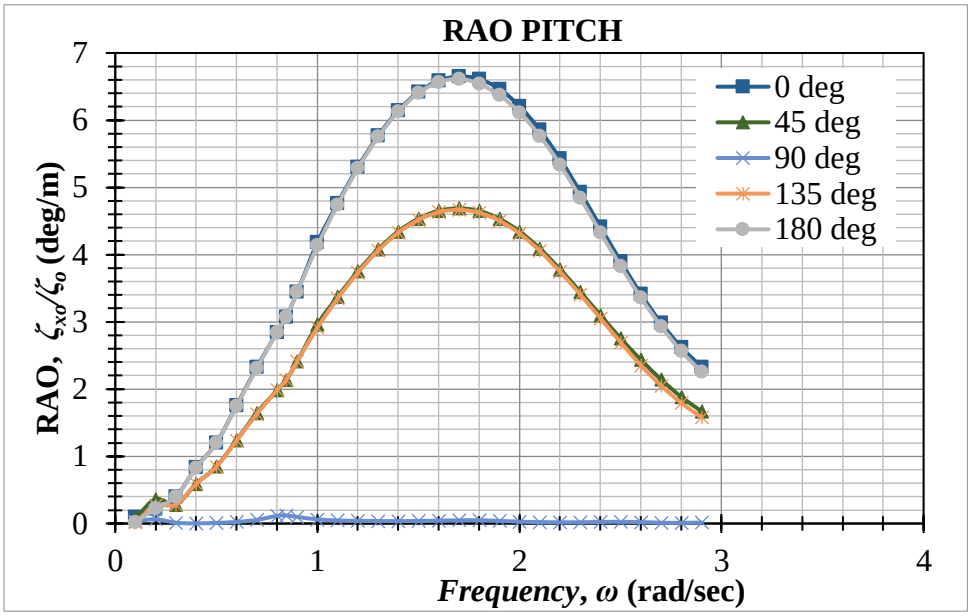


Gambar 4.16 Grafik RAO Gerakan Heave SPM *Free Floating*

Berdasarkan gambar grafik 4.16 RAO Heave di atas dapat dilihat bahwa terjadi pola yang sama di setiap heading dengan amplitudo terbesarnya 1.27 m/m pada frekuensi gelombang 0.8 rad/s. Hal ini dikarenakan bentuk struktur SPM yang simetris.



Gambar 4.17 Grafik RAO Gerakan Roll SPM *Free Floating*

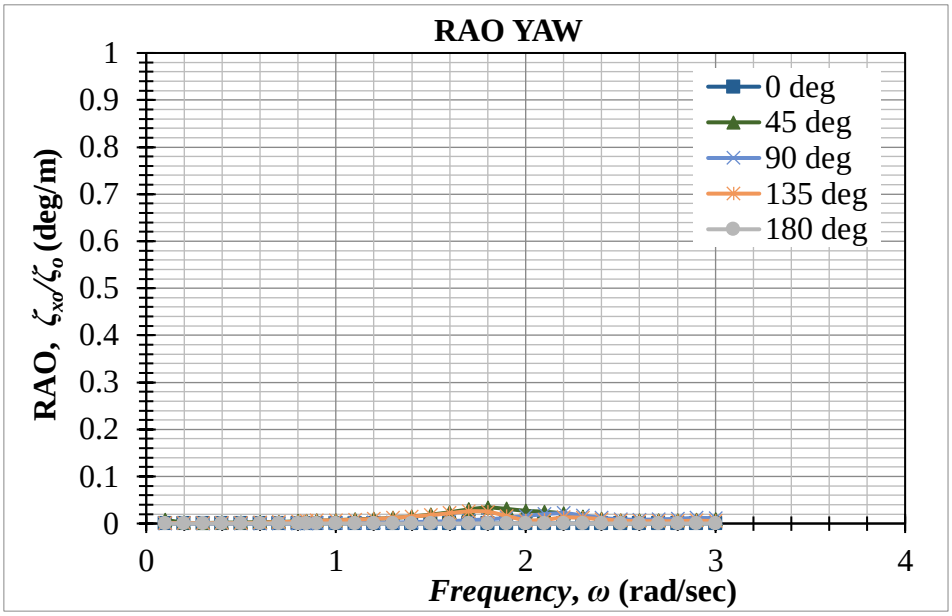


Gambar 4.18 Grafik RAO Gerakan Pitch SPM *Free Floating*

Berdasarkan dua gambar grafik mode gerakan 4.17 dan 4.18 di atas yaitu roll dan pitch, dapat dilihat bahwa grafik yang terbentuk memiliki pola yang sama. Hal ini karena bentuk struktur SPM yang simetris sehingga pada setiap *heading angle*-nya memilki pola grafik yang sama namun berkebalikan pada *heading angle* yang saling tegak lurus dengan arah geraknya (roll memiliki arah gerak pada sumbu x yang saling tegak lurus

atau memiliki sudut 90^o terhadap pitch yang memiliki arah gerak pada sumbu y). Berikut adalah besar amplitudo dari penjelasan di atas:

- Pada gerakan roll amplitudo terbesar terjadi pada *heading* 90^o yaitu sebesar 6.57 deg/m dengan frekuensi gelombang 1.7 rad/s. sedangkan pada *heading* 0^o dan 180^o tidak terjadi gerakan roll. Hal ini dapat dilihat pada grafik yang menunjukkan bahwa besar amplitudonya yaitu 0.000 deg/m pada setiap frekuensi gelombang.
- Pada gerakan pitch amplitudo terbesar terjadi pada *heading* 0^o dan 180^o yaitu sebesar 6.60 deg/m dengan frekuensi gelombang 1.7 rad/s. sedangkan pada *heading* 90^o hampir tidak terjadi gerakan pitch. Hal ini dapat dilihat pada grafik yang menunjukkan bahwa besar amplitudonya yaitu 0.119 deg/m pada frekuensi gelombang 0.8 rad/s.



Gambar 4.19 Grafik RAO Gerakan Yaw SPM *Free Floating*

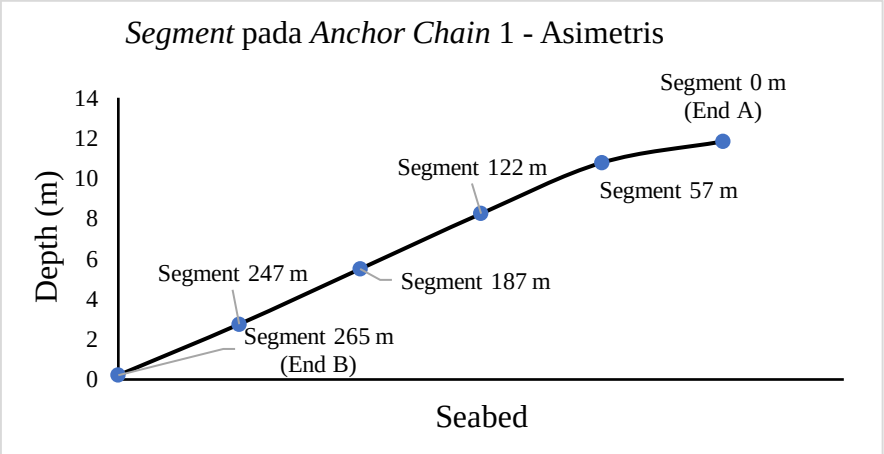
Berdasarkan gambar grafik 4.19 RAO yaw di atas amplitudo terbesar adalah 0.034 deg/m untuk heading 45^o, 0.026 deg/m untuk heading 135^o dan heading 90^o amplitudonya sebesar 0.022 deg/m. Sedangkan untuk heading 0^o dan 180^o tidak terjadi gerakan yaw. Hal ini dapat dilihat pada grafik yang menunjukkan bahwa besar amplitudonya yaitu 0.000 deg/m pada setiap frekuensi gelombang. Berikut adalah tabel 4.4 rekapitulasi RAO setiap mode gerakan pada SPM.

Tabel 4.4 Rekapitulasi Perbandingan RAO Tiap Gerakan pada SPM

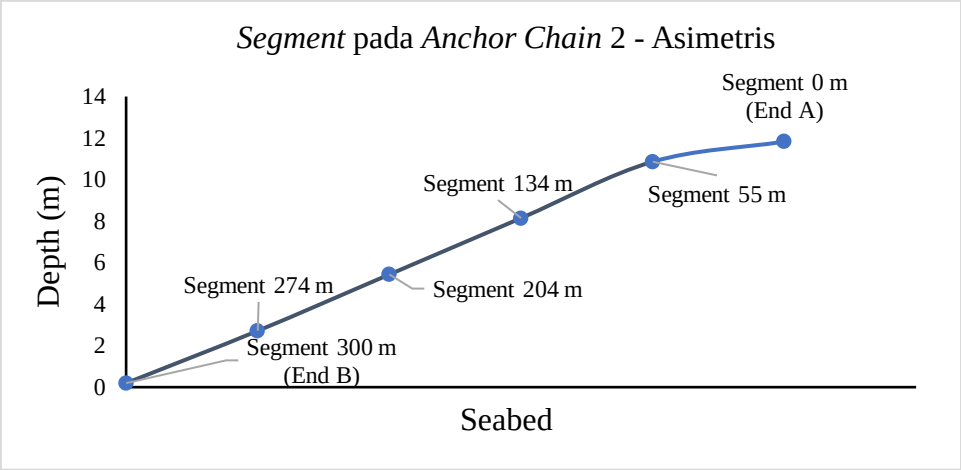
Rekapitulasi RAO pada SPM Free Floating								
Mode Gerakan		Unit	RAO Maksimum					*Maximum Amplitude*
			0^O	45^O	90^O	135^O	180^O	
Translasi	Surge	m/m	0.997	0.736	0.003	0.736	0.997	0.997
	Sway	m/m	0.000	0.735	1.000	0.735	0.000	1.000
	Heave	m/m	1.270	1.271	1.271	1.271	1.271	1.271
Rotasi	Roll	deg/m	0.000	4.656	6.566	4.652	0.000	6.566
	Pitch	deg/m	6.651	4.689	0.119	4.666	6.614	6.651
	Yaw	deg/m	0.000	0.034	0.022	0.026	0.000	0.034

4.6 Pemodelan *Mooring System*

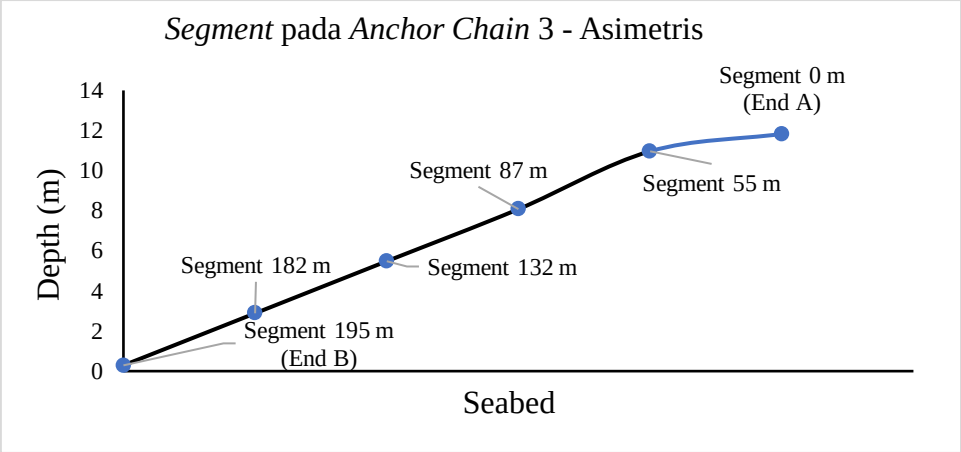
Pemodelan *mooring system* dilakukan menggunakan software Orcaflex. Pemodelan diawali dengan memodelkan SPM. Pemodelan SPM dilakukan dengan menginput tinggi, diameter, *displacement*, *draft*, *vcg*, *moment of inertia*. Pemodelan SPM pada geometrinya dimodelkan sebagai 6D Buoy tipe spar buoy. Selanjutnya dilakukan pemodelan *mooring line* yang menambatkan SPM ke *seabed*. Adapun pengaturan properti *Mooring line* sesuai data *mooring system* pada bab 3. Kemudian menginput koordinat untuk kedua ujung *mooring line* ke fairlead SPM sedemikian rupa sesuai dengan konfigurasi dan *mooring layout*. Segment pada masing-masing *anchor chain* pada 2 konfigurasi terdapat pada gambar 4.20 sampai 4.27.



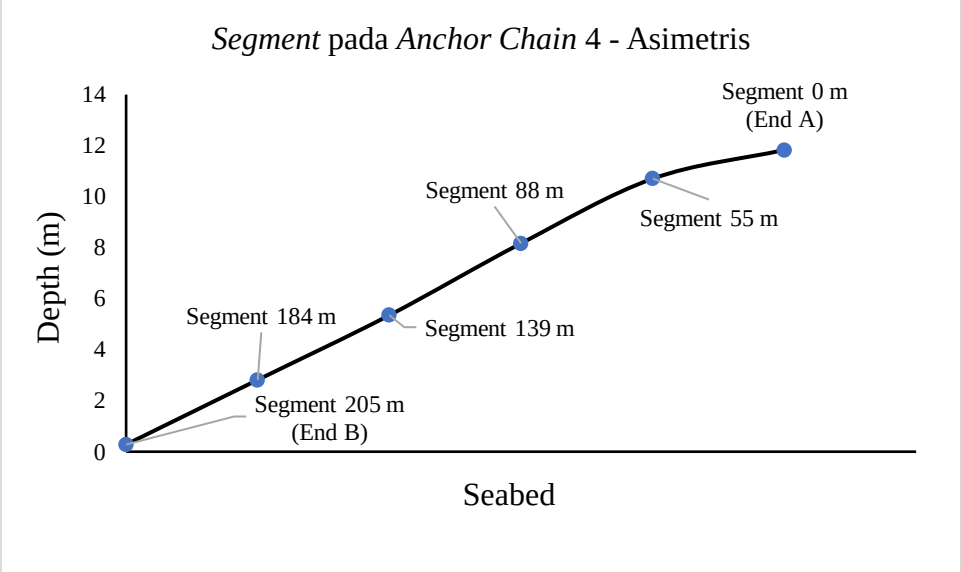
Gambar 4.20 *Segment Anchor Chain* 1 – Asimetris



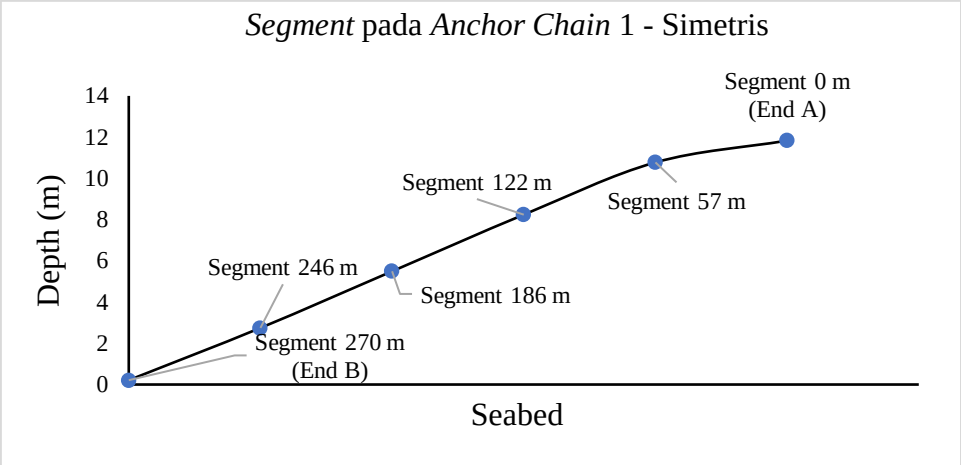
Gambar 4.21 *Segment Anchor Chain* 2 – Asimetris



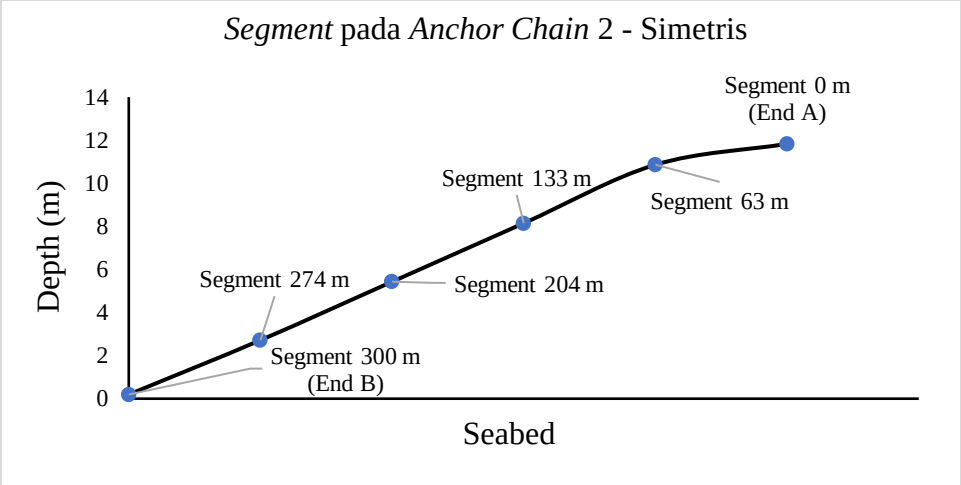
Gambar 4.22 *Segment Anchor Chain* 3 – Asimetris



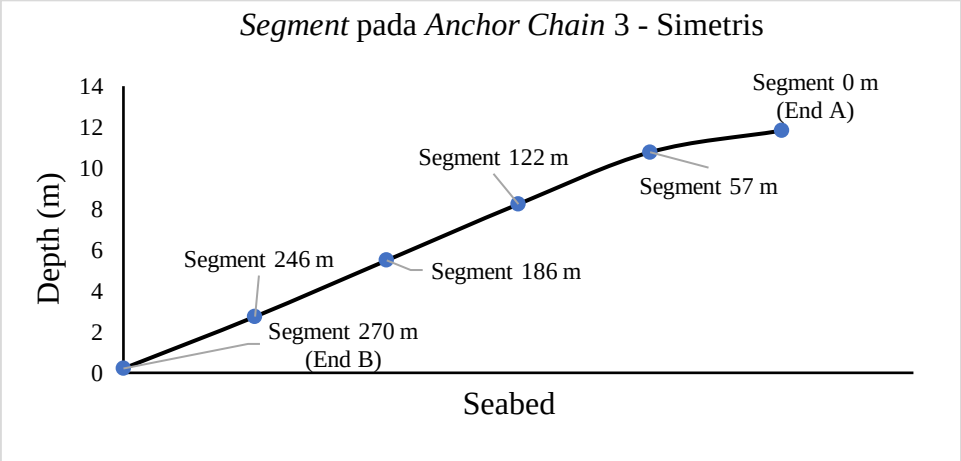
Gambar 4.23 *Segment Anchor Chain* 4 – Asimetris



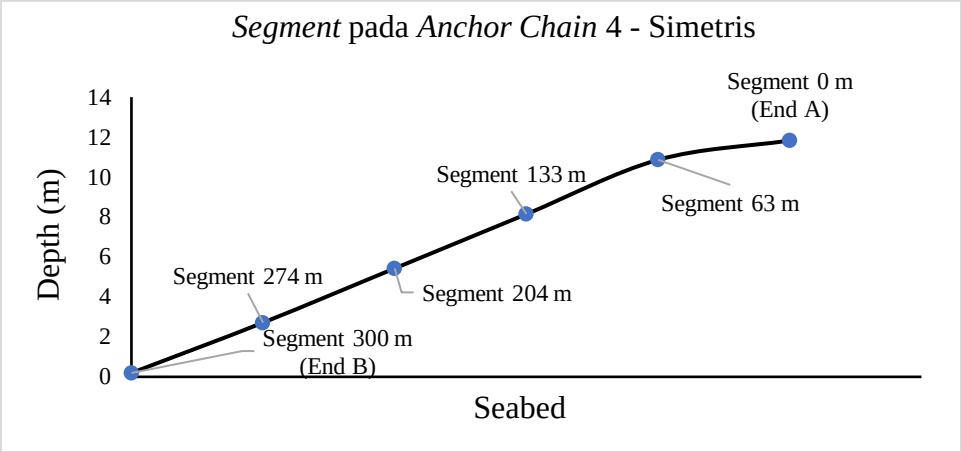
Gambar 4.24 *Segment Anchor Chain* 1 – Simetris



Gambar 4.25 *Segment Anchor Chain* 2 – Simetris



Gambar 4.26 *Segment Anchor Chain* 3 – Simetris

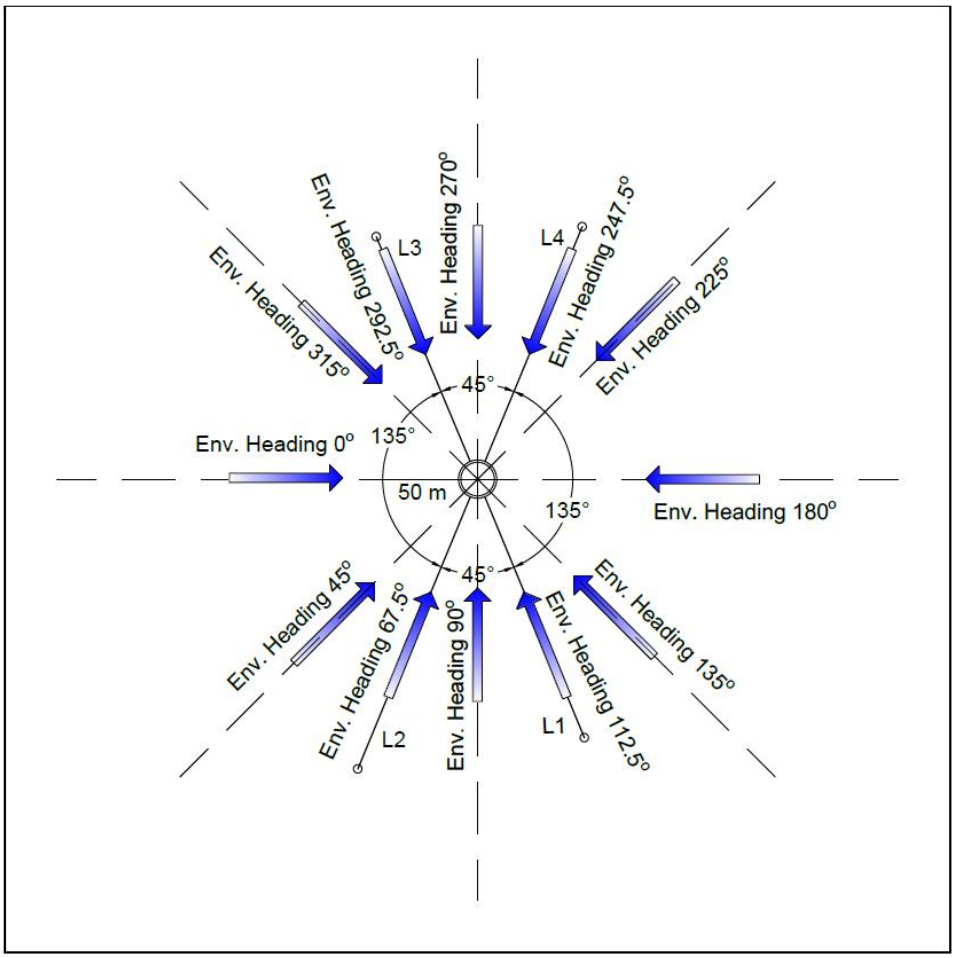


Gambar 4.27 *Segment Anchor Chain* 4 – Simetris

Setelah semua pemodelan struktur selesai dilakukan, maka selanjutnya dilakukan pengaturan kondisi lingkungan seperti kedalaman laut, spectrum gelombang, kecepatan angin, kecepatan arus, dan *environment heading*. Pada tugas akhir ini sistem tambat yang dianalisis adalah tipe CALM Buoy. Kekuatan *mooring line* pada konfigurasi *mooring system* asimetris dan simetris akan dianalisis ketika arah pembebanan lingkungannya berada pada posisi *in line* dan *between line*.

4.6.1 Konfigurasi 4x1 Asimetris

Pada konfigurasi 4x1 asimetris memiliki sudut antar *mooring* yang terkoneksi dengan *fairlead* sebesar 45^{o} dan 135^{o}. Pada konfigurasi *mooring system* 4x1 asimetris ini dimodelkan dengan pengaturan sudut deklinasi pada End A (sudut antara *mooring line* dengan *fairlead* SPM) yang telah diketahui di latar belakang. Berikut adalah detail gambar 4.28 konfigurasi *mooring system* 4x1 asimetris beserta *environment heading*nya.

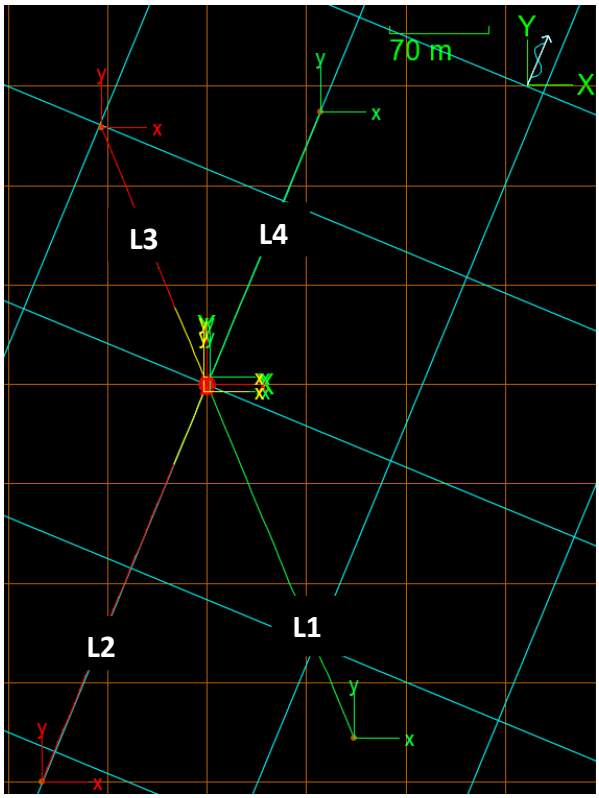


Gambar 4.28 Detail Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Asimetris

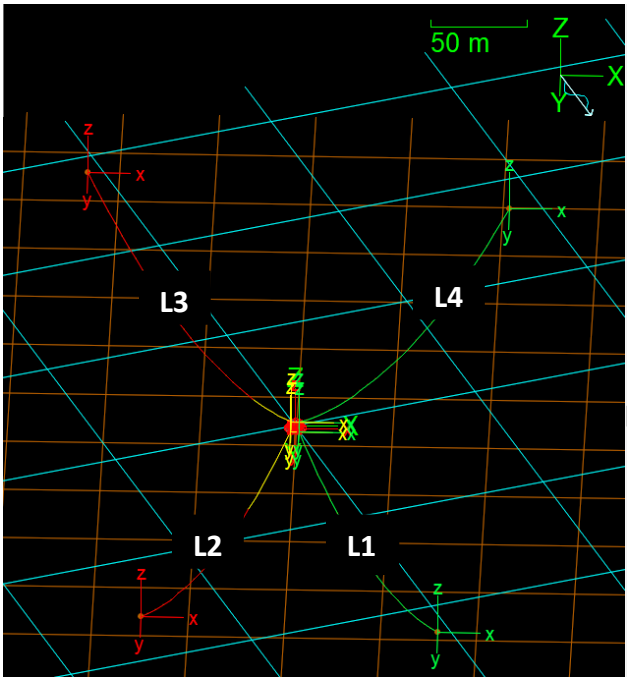
4.6.1.1 Konfigurasi 4x1 Asimetris *In Line*

Konfigurasi perlu dianalisis kekuatan *mooring line*-nya ketika arah pembebanan lingkungannya berada di posisi yang sejajar dengan *mooring line*. Pada pemodelan ini sejajar dengan semua *mooring line* atau berturut-turut *environment heading* 112.5°, 67.5°, 292.5°, 247.5°. Berikut gambar 4.29 yang merupakan salah satu hasil pemodelan konfigurasi *mooring system* 4x1 asimetris *in line* dengan *mooring line* 2 atau *environment heading* 67.5° dengan software Orcaflex.

(a)



(b)

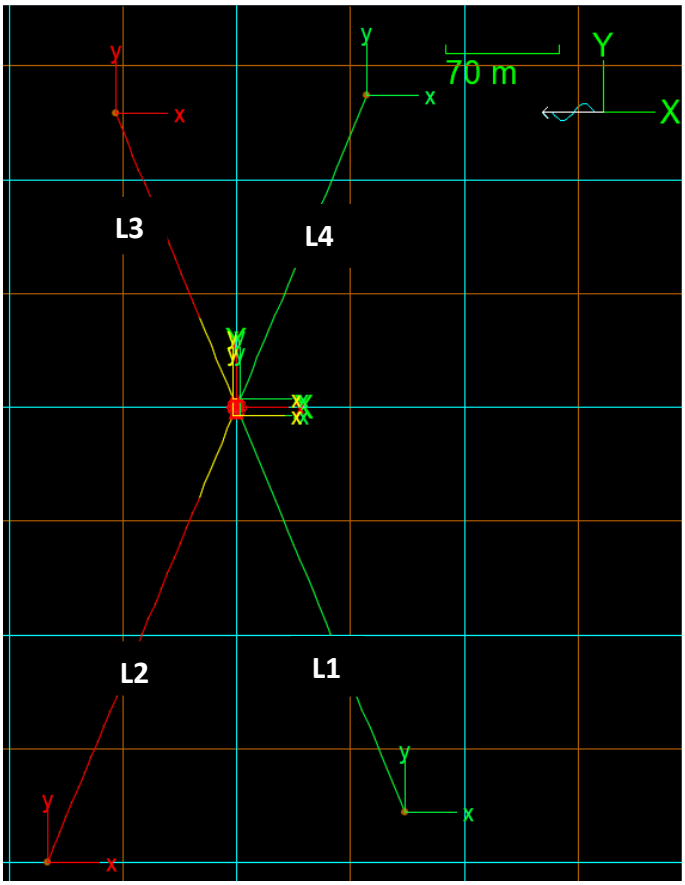


Gambar 4.29 Pemodelan Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Asimetris Kondisi *In Line*, (a) Tampak Atas, (b) Tampak Isometrik

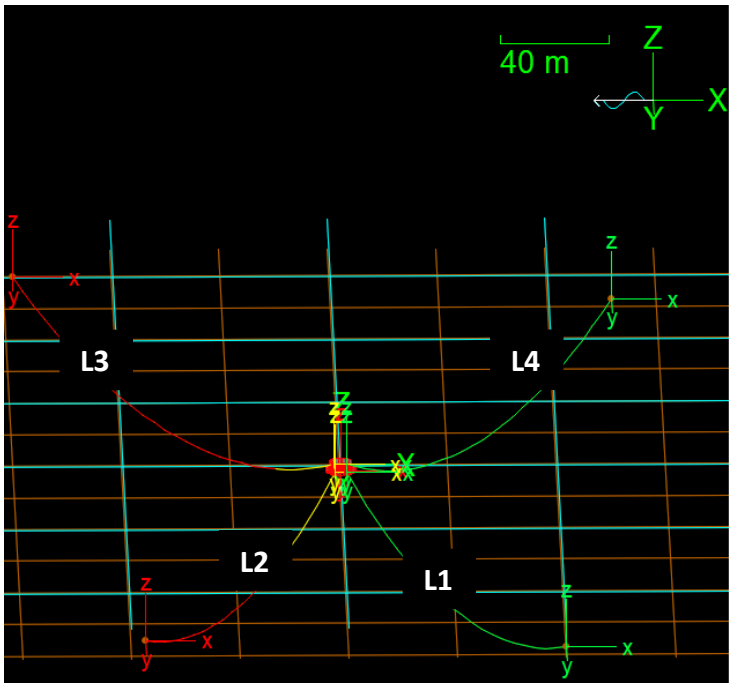
4.6.1.2 Konfigurasi 4x1 Asimetris *Between Line*

Konfigurasi perlu dianalisis kekuatan *mooring line*-nya ketika arah pembebanan lingkungannya berada di antara *mooring line*. Pada pemodelan ini berada di antara *mooring line* 1, 2, 3, dan 4 atau *environment heading* 0^o, 45^o, 90^o, 135^o, 180^o, 225^o, 270^o, 315^o. Berikut gambar 4.20 yang merupakan salah satu hasil pemodelan konfigurasi *mooring system* 4x1 asimetris *between line* (*mooring line* 1 dan 4) atau *environment heading* 180^o pada software orcaflex.

(a)



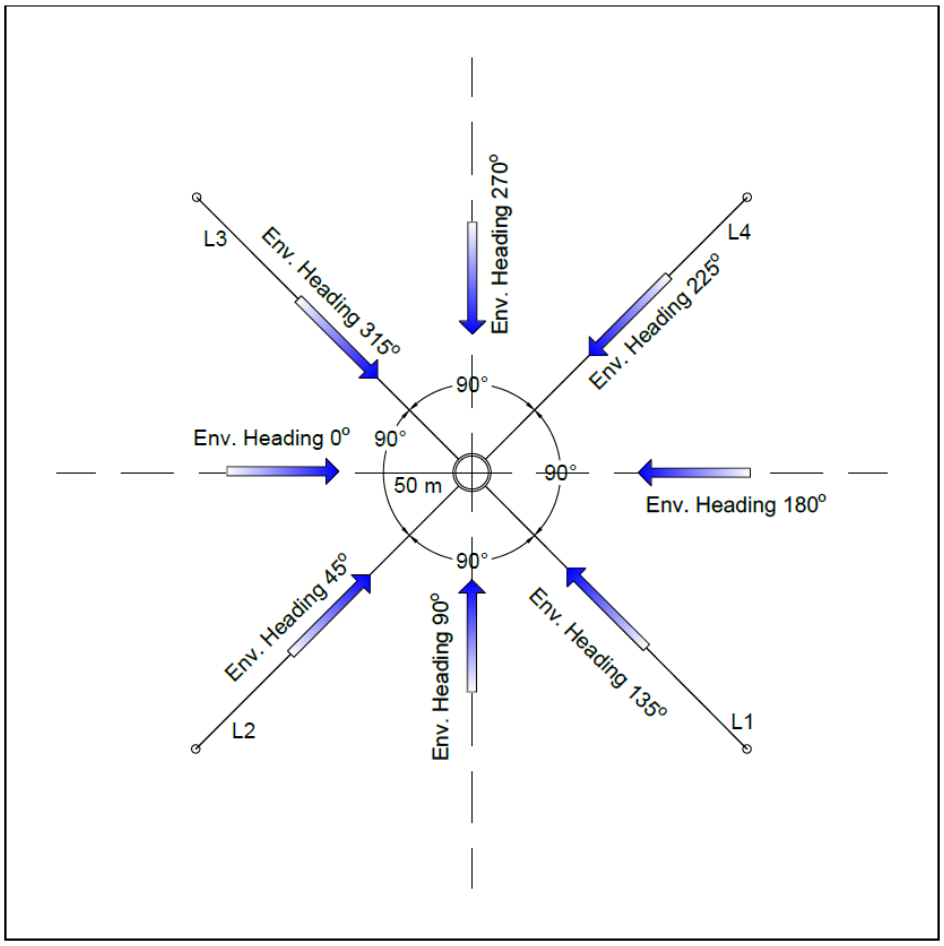
(b)



Gambar 4.30 Pemodelan Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Asimetris Kondisi *Between Line*, (a) Tampak Atas, (b) Tampak Isometrik

4.6.2 Konfigurasi 4x1 Simetris

Seperti yang telah dijelaskan pada latar belakang bahwa pada konfigurasi 4x1 simetris memiliki sudut antar *mooring* yang terkoneksi dengan *fairlead* sebesar 90^{o} dan koordinat sedemikian rupa hingga terbentuk konfigurasi simetris. Berikut adalah detail gambar 4.31 konfigurasi *mooring system* 4x1 simetris beserta *environment heading*nya.

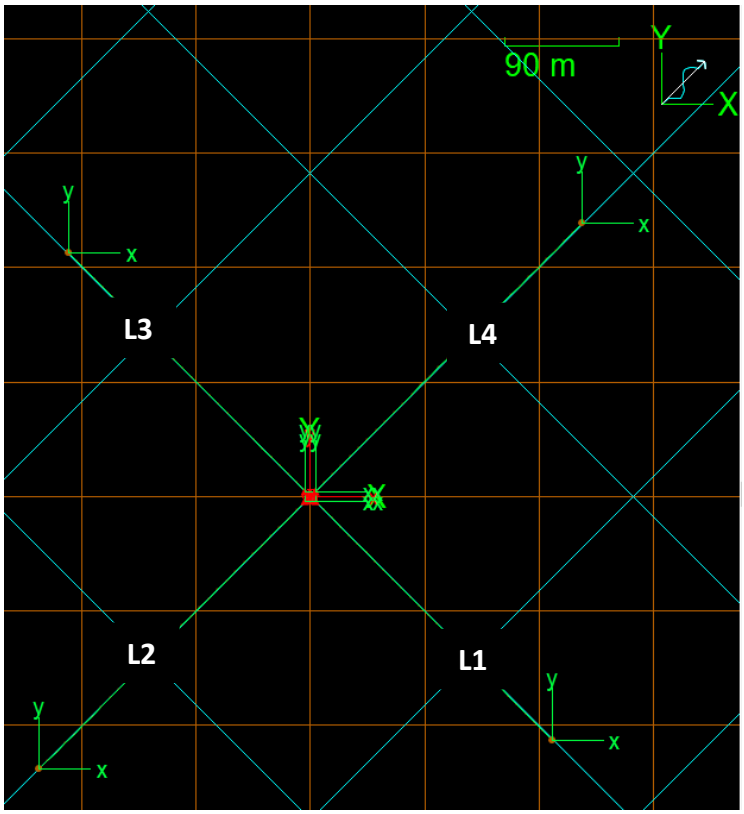


Gambar 4.31 Detail Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Simetris

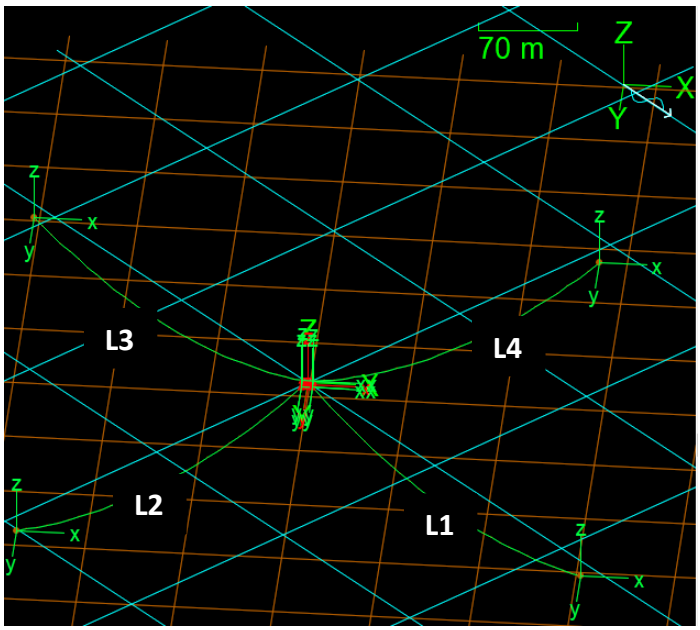
4.6.2.1 Konfigurasi 4x1 Simetris *In Line*

Konfigurasi perlu dianalisis kekuatan *mooring line*-nya ketika arah pembebanan lingkungannya berada di posisi yang sejajar dengan *mooring line*. Pada pemodelan ini sejajar dengan semua *mooring line* yang ada pada konfigurasi *mooring system* 4x1 simetris atau berturut-turut *environment heading* 135°, 45°, 315°, 225°. Berikut gambar 4.32 yang merupakan salah satu hasil pemodelan konfigurasi 4x1 simetris *in line* pada *mooring line* 2 atau *environment heading* 45° dengan software Orcaflex.

(a)



(b)

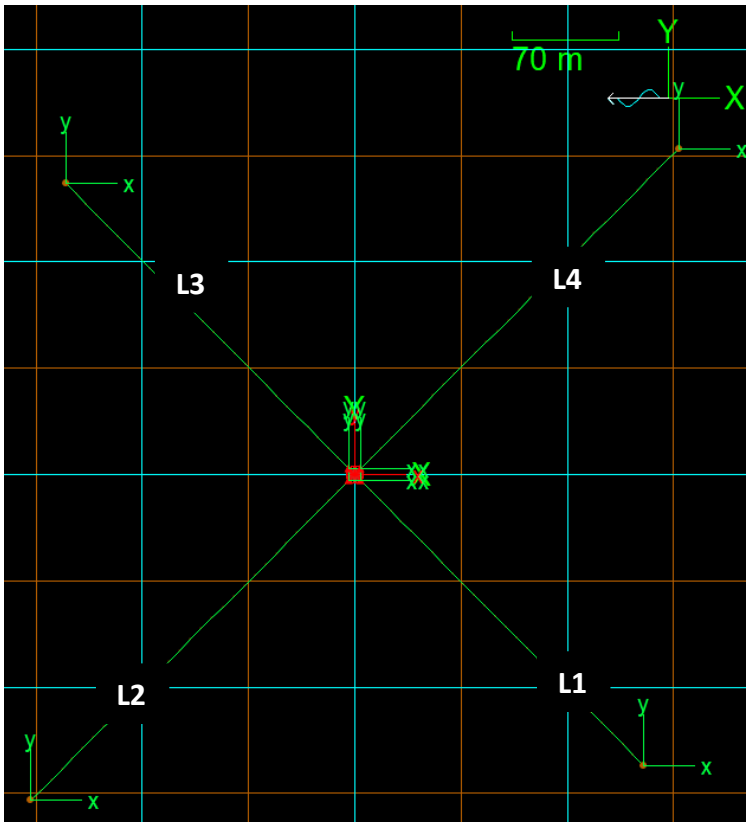


Gambar 4.32 Pemodelan Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Simetris Kondisi *In Line*, (a) Tampak Atas, (b) Tampak Isometrik

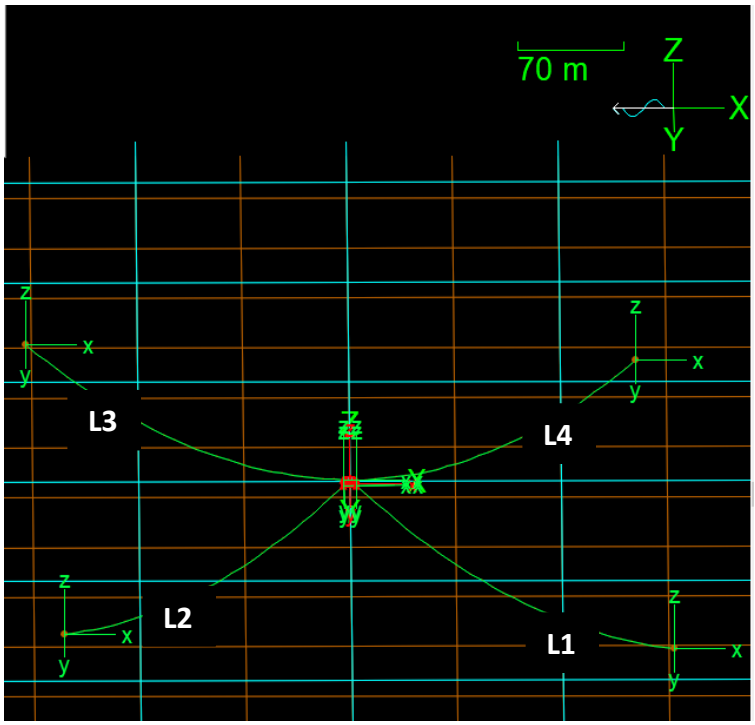
4.6.2.2 Konfigurasi 4x1 Simetris *Between Line*

Konfigurasi perlu dianalisis kekuatan *mooring line*-nya ketika arah pembebanan lingkungannya berada di antara *mooring line*. Pada pemodelan ini berada di antara semua *mooring line* yang ada pada konfigurasi *mooring system* 4x1 simetris atau berturut-turut *environment heading* 90^{o}, 0^{o}, 270^{o}, 180^{o}. Berikut gambar 4.33 yang merupakan salah satu hasil pemodelan konfigurasi 4x1 simetris *between line* antara *mooring line* 1 dan 4 atau *environment heading* 180^{o} dengan software Orcaflex.

(a)



(b)



Gambar 4.33 Pemodelan Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Simetris Kondisi *Between Line*, (a) Tampak Atas, (b) Tampak Isometrik

4.7 Analisis *Tension* Pada *Mooring Line*

Analisis *tension* pada *mooring line* dilakukan untuk mengetahui kekuatan *mooring line* dalam menerima *tension* yang terjadi sesuai dengan *safety factor*. *Safety factor* yang diijinkan oleh class yaitu SF ≥ 1.67 (API-RP-2SK, 2005) untuk analisis dinamis. Dalam menghitung SF pada *mooring line* dapat digunakan persamaan 4.1 di bawah ini:

$$SF = \frac{MBL\ (kN)}{Tension\ (kN)} \tag{4.1}$$

Kondisi beban lingkungan yang digunakan adalah *collinear*. Kriteria beban lingkungan yang digunakan pada analisis adalah *Ultimate Limit State* (ULS) dengan kondisi angin, gelombang, dan arus periode ulang 100 tahunan (API-RP-2SK, 2005). Dinama ULS merupakan kondisi batas *ultimate* untuk memastikan setiap *mooring line* memiliki *breaking strength* yang cukup untuk bertahan dari efek pembebanan yang diakibatkan oleh beban lingkungan ekstrem. Sedangkan untuk arah pembebanan

lingkungannya sesuai dengan yang telah dijelaskan pada pemodelan *mooring system*.

Analisis dilakukan menggunakan Orcaflex dengan simulasi berbasis *time domain* pada durasi 1800 s dan pada *time origin* yang telah mencakup kejadian puncak/lembah gelombang tertinggi dari profil gelombang selama 10800 s. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk mempersingkat waktu analisis akibat keterbatasan teknologi yang dimiliki penulis dan agar hasil yang dianalisis telah mencakup pembebanan maksimum yang diberikan oleh beban lingkungan pada kondisi ekstrem. Berikut adalah hasil *tension* pada konfigurasi *mooring system* asimetris (Tabel 4.5) dan simetris (Tabel 4.6) beserta pengecekannya dengan *safety factor* (SF).

Tabel 4.5 Hasil *Tension* dan Pengecekan *Safety Factor Mooring Line* Konfigurasi 4x1 Asimetris, (a) *In Line*, (b) *Between Line*

(a)

Mooring Line	Lokasi	*Tension* (kN)	*Breaking Load* (kN)	Kriteria SF	SF	Ket.
In Line (Line 1) - Heading 112.5^o						
Anchor Chain 1	End A (Segment 0 m)	1122.49	3627.95	1.67	3.23	OK
Anchor Chain 2	End A (Segment 0 m)	74.24	2600	1.67	35.02	OK
Anchor Chain 3	End A (Segment 0 m)	77.51	2600	1.67	33.54	OK
Anchor Chain 4	End A (Segment 0 m)	284.52	3627.95	1.67	12.75	OK
In Line (Line 2) - Heading 67.5^o						
Anchor Chain 1	End A (Segment 0 m)	45.70	3627.95	1.67	79.39	OK
Anchor Chain 2	End A (Segment 0 m)	1263.96	2600	1.67	2.06	OK
Anchor Chain 3	End A (Segment 0 m)	171.22	2600	1.67	15.18	OK
Anchor Chain 4	End A (Segment 0 m)	92.51	3627.95	1.67	39.22	OK
In Line (Line 3) - Heading 292.5^o						
Anchor Chain 1	End A (Segment 0 m)	78.42	3627.95	1.67	46.26	OK
Anchor Chain 2	End A (Segment 0 m)	135.21	2600	1.67	19.23	OK

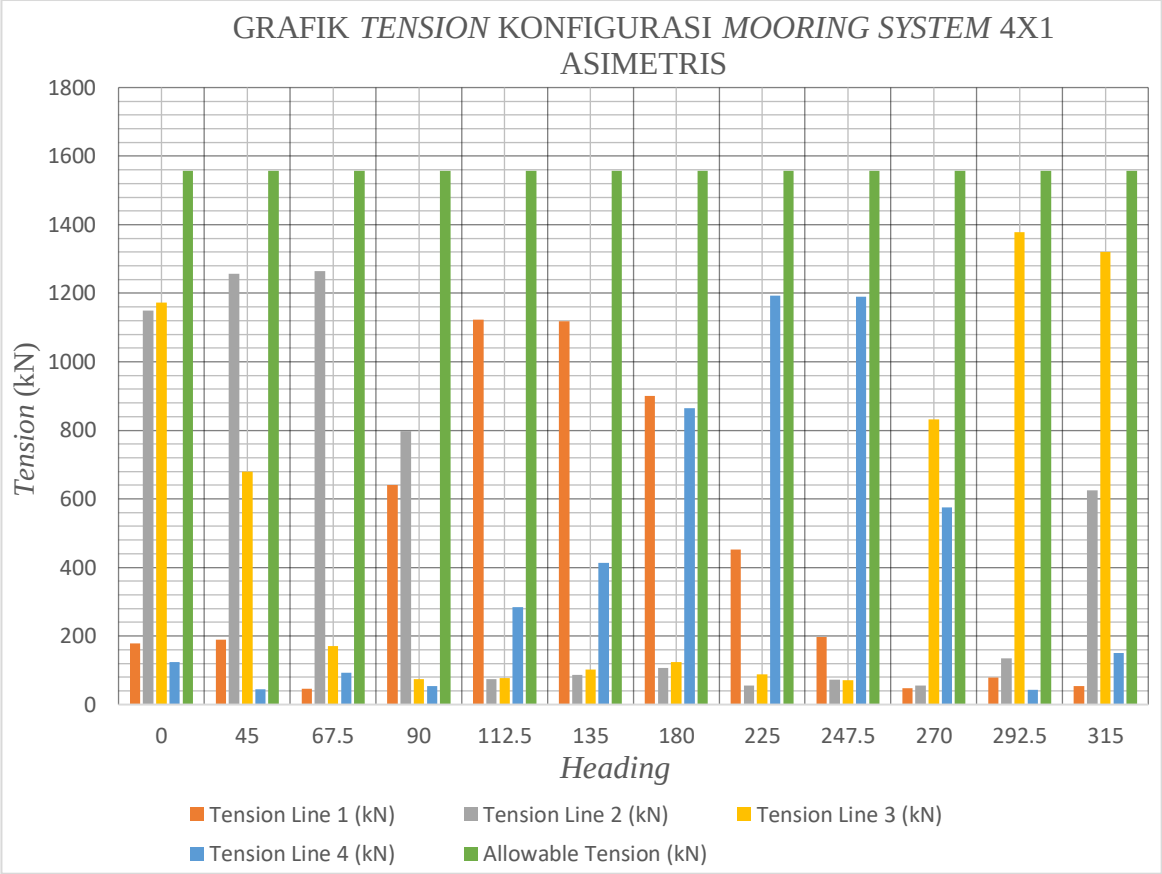
Mooring Line	Lokasi	*Tension* (kN)	*Breaking Load* (kN)	Kriteria SF	SF	Ket.
Anchor Chain 3	End A (Segment 0 m)	1378.62	2600	1.67	1.89	OK
Anchor Chain 4	End A (Segment 0 m)	42.91	3627.95	1.67	84.56	OK
In Line (Line 4) - Heading 247.5^{o}						
Anchor Chain 1	End A (Segment 0 m)	197.07	3627.95	1.67	18.41	OK
Anchor Chain 2	End A (Segment 0 m)	72.35	2600	1.67	35.94	OK
Anchor Chain 3	End A (Segment 0 m)	71.15	2600	1.67	36.54	OK
Anchor Chain 4	End A (Segment 0 m)	1190.55	3627.95	1.67	3.05	OK

(b)

Mooring Line	Lokasi	*Tension* (kN)	*Breaking Load* (kN)	Kriteria SF	SF	Ket.
Between Line (Line 2 dan Line 3) - Heading 0^{o}						
Anchor Chain 1	End A (Segment 0 m)	177.91	3627.95	1.67	20.39	OK
Anchor Chain 2	End A (Segment 0 m)	1149.21	2600	1.67	2.26	OK
Anchor Chain 3	End A (Segment 0 m)	1173.10	2600	1.67	2.22	OK
Anchor Chain 4	End A (Segment 0 m)	124.16	3627.95	1.67	29.22	OK
Between Line (Line 2 dan Line 3) - Heading 45^{o}						
Anchor Chain 1	End A (Segment 0 m)	189.39	3627.95	1.67	19.16	OK
Anchor Chain 2	End A (Segment 0 m)	1256.31	2600	1.67	2.07	OK
Anchor Chain 3	End A (Segment 0 m)	680.07	2600	1.67	3.82	OK
Anchor Chain 4	End A (Segment 0 m)	45.23	3627.95	1.67	80.21	OK
Between Line (Line 1 dan Line 2) - Heading 90^{o}						
Anchor Chain 1	End A (Segment 0 m)	640.81	3627.95	1.67	5.66	OK
Anchor Chain 2	End A (Segment 0 m)	797.32	2600	1.67	3.26	OK
Anchor Chain 3	End A (Segment 0 m)	74.35	2600	1.67	34.97	OK
Anchor Chain 4	End A (Segment 0 m)	53.31	3627.95	1.67	68.06	OK
Between Line (Line 1 dan Line 4) - Heading 135^{o}						

Mooring Line	Lokasi	*Tension* (kN)	*Breaking Load* (kN)	Kriteria SF	SF	Ket.
Anchor Chain 1	End A (Segment 0 m)	1117.89	3627.95	1.67	3.25	OK
Anchor Chain 2	End A (Segment 0 m)	87.34	2600	1.67	29.77	OK
Anchor Chain 3	End A (Segment 0 m)	102.64	2600	1.67	25.33	OK
Anchor Chain 4	End A (Segment 0 m)	412.78	3627.95	1.67	8.79	OK
Between Line (Line 1 dan Line 4) - Heading 180º						
Anchor Chain 1	End A (Segment 0 m)	900.84	3627.95	1.67	4.03	OK
Anchor Chain 2	End A (Segment 0 m)	107.51	2600	1.67	24.18	OK
Anchor Chain 3	End A (Segment 0 m)	123.33	2600	1.67	21.08	OK
Anchor Chain 4	End A (Segment 0 m)	865.35	3627.95	1.67	4.19	OK
Between Line (Line 1 dan Line 4) - Heading 225º						
Anchor Chain 1	End A (Segment 0 m)	452.55	3627.95	1.67	8.02	OK
Anchor Chain 2	End A (Segment 0 m)	55.60	2600	1.67	46.77	OK
Anchor Chain 3	End A (Segment 0 m)	88.72	2600	1.67	29.31	OK
Anchor Chain 4	End A (Segment 0 m)	1192.60	3627.95	1.67	3.04	OK
Between Line (Line 3 dan Line 4) - Heading 270º						
Anchor Chain 1	End A (Segment 0 m)	47.87	3627.95	1.67	75.78	OK
Anchor Chain 2	End A (Segment 0 m)	56.06	2600	1.67	46.38	OK
Anchor Chain 3	End A (Segment 0 m)	832.25	2600	1.67	3.12	OK
Anchor Chain 4	End A (Segment 0 m)	575.33	3627.95	1.67	6.31	OK
Between Line (Line 2 dan Line 3) - Heading 315º						
Anchor Chain 1	End A (Segment 0 m)	53.65	3627.95	1.67	67.62	OK
Anchor Chain 2	End A (Segment 0 m)	625.10	2600	1.67	4.16	OK
Anchor Chain 3	End A (Segment 0 m)	1320.71	2600	1.67	1.97	OK
Anchor Chain 4	End A (Segment 0 m)	149.73	3627.95	1.67	24.23	OK

Tabel di atas dapat disajikan dalam bentuk gambar grafik 4.34 sebagai berikut.



Gambar 4.34 Grafik *Tension* Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Asimetris

Berdasarkan tabel 4.5 dan gambar grafik 4.34 di atas dapat disimpulkan bahwa pada konfigurasi *mooring system* 4x1 asimetris:

- Arah pembebanan lingkungan *In Line*
  - *Env. Heading* 112.5^{o} *tension* maksimum terjadi pada *anchor chain* 1 sebesar 1122.49 kN
  - *Env. Heading* 67.5^{o} *tension* maksimum terjadi pada *anchor chain* 2 sebesar 1263.96 kN
  - *Env. Heading* 292.5^{o} *tension* maksimum terjadi pada *anchor chain* 3 sebesar 1378.62 kN
  - *Env. Heading* 247.5^{o} *tension* maksimum terjadi pada *anchor chain* 4 sebesar 1190.55 kN

- Arah pembebanan lingkungan *Between Line*
  - *Env. Heading* 0^{o} *tension* maksimum terjadi pada *anchor chain* 3 sebesar 1173.10 kN
  - *Env. Heading* 45^{o} *tension* maksimum terjadi pada *anchor chain* 2 sebesar 1256.31 kN
  - *Env. Heading* 90^{o} *tension* maksimum terjadi pada *anchor chain* 2 sebesar 797.32 kN
  - *Env. Heading* 135^{o} *tension* maksimum terjadi pada *anchor chain* 1 sebesar 11117.89 kN
  - *Env. Heading* 180^{o} *tension* maksimum terjadi pada *anchor chain* 1 sebesar 900.84 kN
  - *Env. Heading* 225^{o} *tension* maksimum terjadi pada *anchor chain* 4 sebesar 1192.60 kN
  - *Env. Heading* 270^{o} *tension* maksimum terjadi pada *anchor chain* 3 sebesar 832.25 kN
  - *Env. Heading* 315^{o} *tension* maksimum terjadi pada *anchor chain* 3 sebesar 1320.71 Kn

Tabel 4.6 Hasil *Tension* dan Pengecekan *Safety Factor Mooring Line* Konfigurasi 4x1 Simetris, (a) *In Line*, (b) *Between Line*

(a)

Mooring Line	Lokasi	*Tension* (kN)	*Breaking Load* (kN)	Kriteria SF	SF	Ket.
In Line (Line 1) - Heading 135^{o}						
Anchor Chain 1	End A (Segment 0 m)	1722.71	3627.95	1.67	2.11	OK
Anchor Chain 2	End A (Segment 0 m)	466.21	3627.95	1.67	7.78	OK
Anchor Chain 3	End A (Segment 0 m)	174.90	3627.95	1.67	20.74	OK
Anchor Chain 4	End A (Segment 0 m)	470.36	3627.95	1.67	7.71	OK
In Line (Line 2) - Heading 45^{o}						
Anchor Chain 1	End A (Segment 0 m)	418.85	3627.95	1.67	8.66	OK
Anchor Chain 2	End A (Segment 0 m)	1579.58	3627.95	1.67	2.30	OK

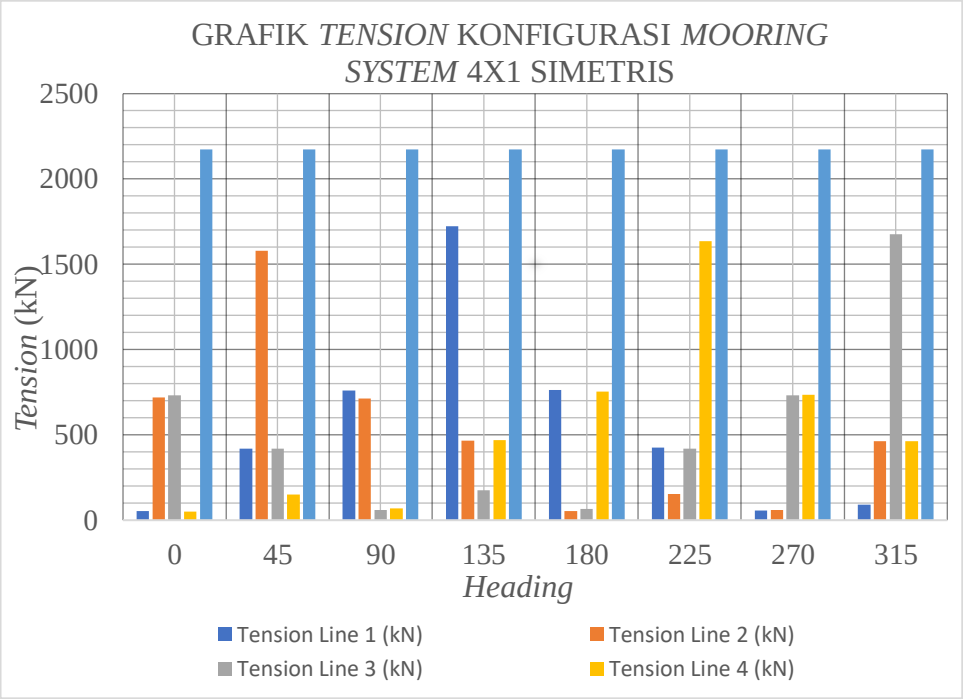
Mooring Line	Lokasi	*Tension* (kN)	*Breaking Load* (kN)	Kriteria SF	SF	Ket.
Anchor Chain 3	End A (Segment 0 m)	419.08	3627.95	1.67	8.66	OK
Anchor Chain 4	End A (Segment 0 m)	150.49	3627.95	1.67	24.11	OK
In Line (Line 3) - Heading 315^{o}						
Anchor Chain 1	End A (Segment 0 m)	92.11	3627.95	1.67	39.39	OK
Anchor Chain 2	End A (Segment 0 m)	463.32	3627.95	1.67	7.83	OK
Anchor Chain 3	End A (Segment 0 m)	1677.46	3627.95	1.67	2.16	OK
Anchor Chain 4	End A (Segment 0 m)	462.75	3627.95	1.67	7.84	OK
In Line (Line 4) - Heading 225^{o}						
Anchor Chain 1	End A (Segment 0 m)	426.43	3627.95	1.67	8.51	OK
Anchor Chain 2	End A (Segment 0 m)	151.92	3627.95	1.67	23.88	OK
Anchor Chain 3	End A (Segment 0 m)	419.82	3627.95	1.67	8.64	OK
Anchor Chain 4	End A (Segment 0 m)	1634.57	3627.95	1.67	2.22	OK

(b)

Mooring Line	Lokasi	*Tension* (kN)	*Breaking Load* (kN)	Kriteria SF	SF	Ket.
Between Line (Line 1 dan Line 4) - Heading 180^{o}						
Anchor Chain 1	End A (Segment 0 m)	762.23	3627.95	1.67	4.76	OK
Anchor Chain 2	End A (Segment 0 m)	52.14	3627.95	1.67	69.58	OK
Anchor Chain 3	End A (Segment 0 m)	65.53	3627.95	1.67	55.37	OK
Anchor Chain 4	End A (Segment 0 m)	752.25	3627.95	1.67	4.82	OK
Between Line (Line 1 dan Line 2) - Heading 90^{o}						
Anchor Chain 1	End A (Segment 0 m)	759.49	3627.95	1.67	4.78	OK
Anchor Chain 2	End A (Segment 0 m)	713.65	3627.95	1.67	5.08	OK
Anchor Chain 3	End A (Segment 0 m)	59.61	3627.95	1.67	60.86	OK
Anchor Chain 4	End A (Segment 0 m)	68.34	3627.95	1.67	53.09	OK
Between Line (Line 2 dan Line 3) - Heading 0^{o}						

Mooring Line	Lokasi	*Tension* (kN)	*Breaking Load* (kN)	Kriteria SF	SF	Ket.
Anchor Chain 1	End A (Segment 0 m)	54.21	3627.95	1.67	66.93	OK
Anchor Chain 2	End A (Segment 0 m)	718.58	3627.95	1.67	5.05	OK
Anchor Chain 3	End A (Segment 0 m)	730.51	3627.95	1.67	4.97	OK
Anchor Chain 4	End A (Segment 0 m)	51.49	3627.95	1.67	70.46	OK
Between Line (Line 3 dan Line 4) - Heading 270^{o}						
Anchor Chain 1	End A (Segment 0 m)	55.91	3627.95	1.67	64.89	OK
Anchor Chain 2	End A (Segment 0 m)	58.99	3627.95	1.67	61.50	OK
Anchor Chain 3	End A (Segment 0 m)	730.56	3627.95	1.67	4.97	OK
Anchor Chain 4	End A (Segment 0 m)	735.78	3627.95	1.67	4.93	OK

Tabel di atas dapat disajikan dalam bentuk grafik sebagai berikut.



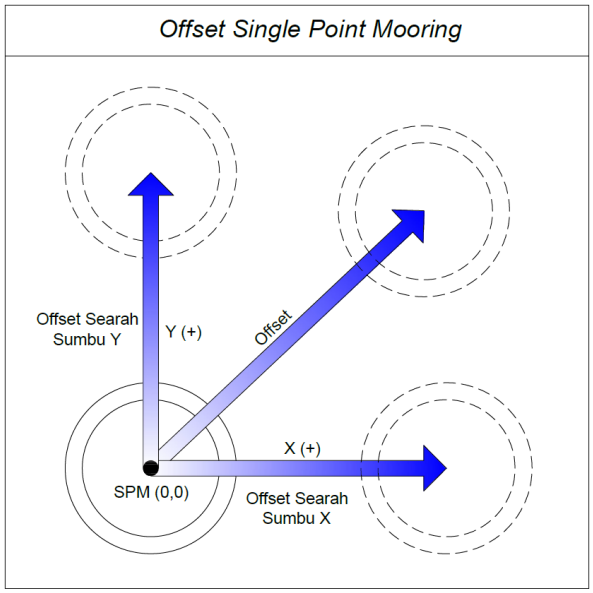
Gambar 4.35 Grafik *Tension* Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Simetris

Berdasarkan tabel 4.6 dan gambar grafik 4.35 di atas dapat disimpulkan bahwa pada konfigurasi *mooring system* 4x1 simetris:

- Arah pembebanan lingkungan *In Line*
  - *Env. Heading* 135^{o} *tension* maksimum terjadi pada *anchor chain* 1 sebesar 1722.71 kN
  - *Env. Heading* 45^{o} *tension* maksimum terjadi pada *anchor chain* 2 sebesar 1579.58 kN
  - *Env. Heading* 315^{o} *tension* maksimum terjadi pada *anchor chain* 3 sebesar 1677.46 kN
  - *Env. Heading* 225^{o} *tension* maksimum terjadi pada *anchor chain* 4 sebesar 1634.57 kN
- Arah pembebanan lingkungan *Between Line*
  - *Env. Heading* 180^{o} *tension* maksimum terjadi pada *anchor chain* 1 sebesar 762.23 kN
  - *Env. Heading* 90^{o} *tension* maksimum terjadi pada *anchor chain* 1 sebesar 759.49 kN
  - *Env. Heading* 0^{o} *tension* maksimum terjadi pada *anchor chain* 3 sebesar 730.51 kN
  - *Env. Heading* 270^{o} *tension* maksimum terjadi pada *anchor chain* 4 sebesar 735.78 kN

4.8 Analisis *Offset* Pada SPM

Ketika SPM dianalisis pada beban lingkungan ekstrem (ULS) untuk tiap kondisi pembebanan tentunya SPM akan mengalami perpindahan posisi dari posisi awalnya. Besar perpindahan posisi SPM pada bidang horizontal inilah yang disebut dengan *offset.* Besar *offset* maksimum SPM yang terjadi berkaitan dengan besar *tension* yang terjadi pada sistem tambat. Analisis *offset* dilakukan menggunakan software orcaflex dengan koordinat posisi awal SPM pada 0 m, 0 m (X,Y). Sistem koordinat dan sumbu yang menunjukkan adanya perpindahan posisi (*offset*) pada SPM ditunjukkan oleh gambar 4.36 di bawah ini.

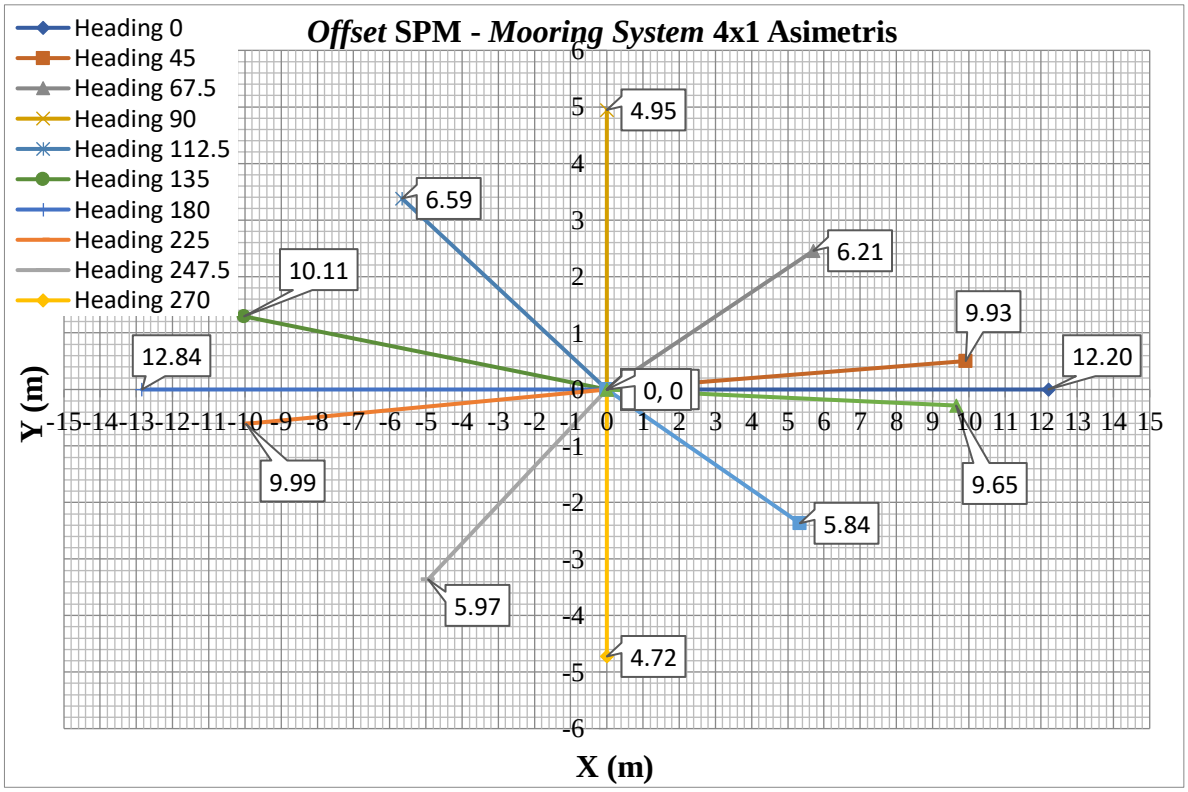


Gambar 4.36 *Offset* Pada *Single Point Mooring* (SPM)

Berikut adalah o*ffset* maksimum yang terjadi pada SPM untuk konfigurasi mooring system 4x1 asimetris dan simetris pada setiap *environment heading* yang disajikan dalam bentuk tabel 4.7 untuk konfigurasi asimetis dan 4.8 untuk konfigurasi simetris serta gambar grafik 4.37 untuk konfigurasi asimetris dan 4.38 untuk konfigurasi simetris.

Tabel 4.7 *Offse*t Maksimum SPM dengan Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Asimetris

Environment Heading	*SPM Coordinates* (m)		Smax (m)
	X	Y	
0	12.20	0.14	12.20
45	9.92	0.50	9.93
67.5	5.71	2.45	6.21
90	-0.73	4.89	4.95
112.5	-5.66	3.38	6.59
135	-10.02	1.29	10.11
180	-12.84	0.15	12.84
225	-9.97	-0.61	9.99
247.5	-4.94	-3.36	5.97
270	-0.39	-4.71	4.72
292.5	5.33	-2.37	5.84
315	9.65	-0.28	9.65



Gambar 4.37 *Offset* SPM Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Asimetris

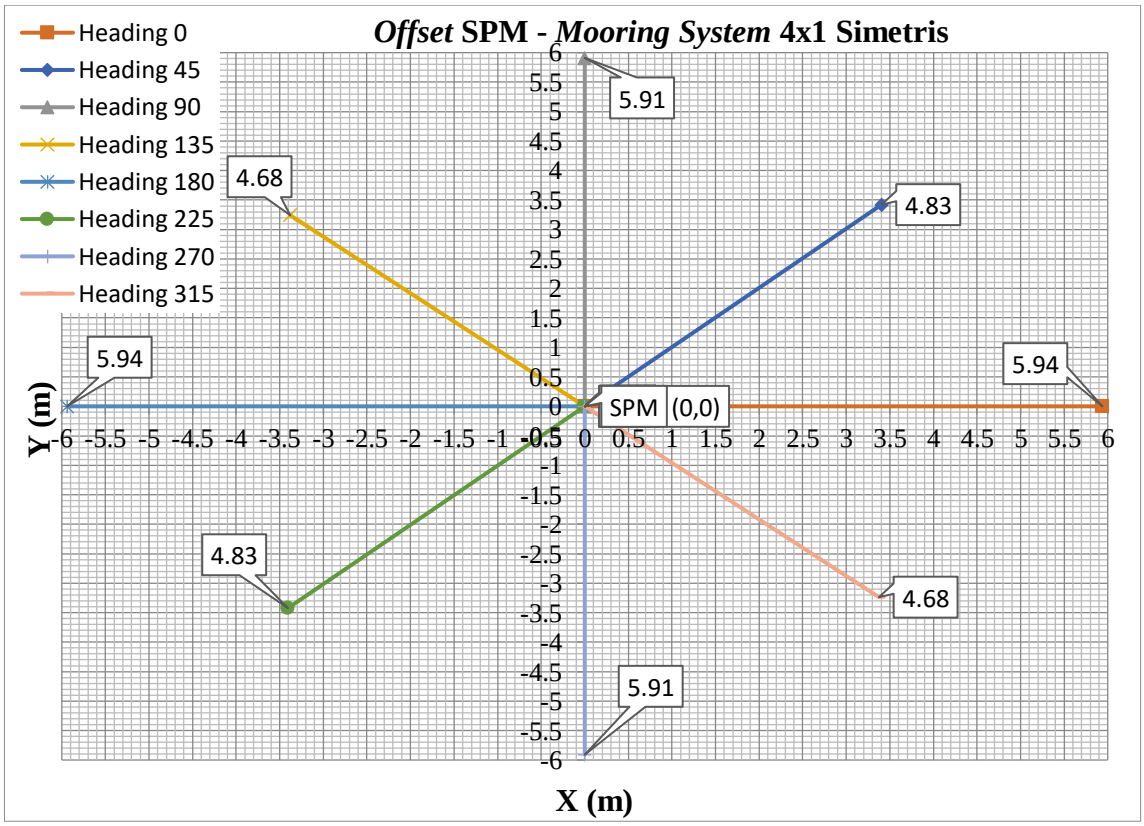
Berdasarkan tabel dan grafik *offset* SPM konfigurasi *mooring system* 4x1 asimetris di atas, dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Untuk *Env. Heading* 0^{o} *offset* maksimum yang terjadi sebesar 12.20 m
- Untuk *Env. Heading* 45^{o} *offset* maksimum yang terjadi sebesar 9.93 m
- Untuk *Env. Heading* 67.5^{o} *offset* maksimum yang terjadi sebesar 6.21 m
- Untuk *Env. Heading* 90^{o} *offset* maksimum yang terjadi sebesar 4.95 m
- Untuk *Env. Heading* 112.5^{o} *offset* maksimum yang terjadi sebesar 6.59 m
- Untuk *Env. Heading* 135^{o} *offset* maksimum yang terjadi sebesar 10.11 m
- Untuk *Env. Heading* 180^{o} *offset* maksimum yang terjadi sebesar 12.84 m
- Untuk *Env. Heading* 225^{o} *offset* maksimum yang terjadi sebesar 9.99 m
- Untuk *Env. Heading* 247.5^{o} *offset* maksimum yang terjadi sebesar 5.97 m

- Untuk *Env. Heading* 270^{o} *offset* maksimum yang terjadi sebesar 4.72 m
- Untuk *Env. Heading* 292.5^{o} *offset* maksimum yang terjadi sebesar 5.84 m
- Untuk *Env. Heading* 315^{o} *offset* maksimum yang terjadi sebesar 9.65 m

Tabel 4.8 *Offset* Maksimum SPM dengan Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Simetris

Environment Heading	*SPM Coordinates* (m)		Smax (m)
	X	Y	
0	5.94	0.10	5.94
45	3.41	3.42	4.83
90	0.13	5.91	5.91
135	-3.38	3.24	4.68
180	-5.94	-0.11	5.94
225	-3.41	-3.42	4.83
270	-0.16	-5.91	5.91
315	3.38	-3.24	4.68



Gambar 4.38 *Offset* SPM Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Simetris

Berdasarkan tabel dan grafik *offset* SPM konfigurasi *mooring system* 4x1 simetris di atas, dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Untuk *Env. Heading* 0^o dan 180^o *offset* maksimum yang terjadi sebesar 5.94 m
- Untuk *Env. Heading* 45^o dan 225^o *offset* maksimum yang terjadi sebesar 4.83 m
- Untuk *Env. Heading* 90^o dan 270^o *offset* maksimum yang terjadi sebesar 5.91 m
- Untuk *Env. Heading* 135^o dan 315^o *offset* maksimum yang terjadi sebesar 4.68 m

4.9 Simulasi Pembebanan pada *Anchor Chain*

Tahap selanjutnya yaitu dilakukan simulasi pembebanan pada *anchor chain* dengan kriteria beban lingkungan *Fatigue Limit State* (FLS) untuk memperoleh hasil analisis berupa seri waktu *tension*. Analisis dilakukan untuk setiap *seastate* yang memiliki probabilitas kejadian yang cukup besar untuk dapat menyebabkan terjadinya *fatigue*. Adapun *seastate* untuk analisis berdasarkan Tabel 3.5 *Wave Scatter* 1 Tahunan di Perairan Laut Utara Pulau Jawa, Semarang. Berdasarkan data tersebut dapat ditentukan 27 *seastate* dan periode kejadian (*time exposure*) tiap seastate tersebut untuk analisis *fatigue.* Berikut tabel 4.9 yang merupakan *seastate* yang digunakan untuk analisis *fatigue*.

Tabel 4.9 *Seastate* Untuk Analisis *Fatigue* Pada *Anchor Chain*

Case	Hs (m)	Tp (s)	*Probability*	*Wind Speed* (m/s)	*Current Speed* (m/s)	1 *year* - *Time exposure* (*hour*)
1	0.1	2.25	0.005188	5.58	0.77	45.4429
2		4.25	0.001197	5.58	0.77	10.4868
3	0.3	3.25	0.093376	5.58	0.77	817.973
4		4.75	0.037111	5.58	0.77	325.092
5	0.5	3.75	0.203611	5.58	0.77	1783.64
6		5.75	0.031325	5.58	0.77	274.405
7	0.7	4.25	0.127394	5.58	0.77	1115.97
8		5.75	0.084597	5.58	0.77	741.069

Case	Hs (m)	Tp (s)	*Probability*	*Wind Speed* (m/s)	*Current Speed* (m/s)	1 *year - Time exposure* (*hour*)
9	0.9	4.75	0.058160	5.58	0.77	509.485
10		5.75	0.104350	5.58	0.77	914.102
11	1.1	4.75	0.053871	5.58	0.77	471.907
12		6.25	0.060954	5.58	0.77	533.955
13	1.3	5.25	0.016161	5.58	0.77	141.572
14		6.25	0.049381	5.58	0.77	432.582
15	1.5	5.75	0.012071	5.58	0.77	105.742
16		6.75	0.024541	5.58	0.77	214.98
17	1.7	6.25	0.008679	5.58	0.77	76.0295
18		7.25	0.010176	5.58	0.77	89.1381
19	1.9	6.25	0.002793	5.58	0.77	24.4693
20		7.25	0.006484	5.58	0.77	56.8037
21	2.1	6.25	0.000698	5.58	0.77	6.11732
22		7.25	0.003591	5.58	0.77	31.4605
23	2.3	7.75	0.001995	5.58	0.77	17.4781
24	2.5	7.75	0.001097	5.58	0.77	9.61293
25	2.7	8.25	0.000499	5.58	0.77	4.36951
26	2.9	8.25	0.000399	5.58	0.77	3.49561
27	3.1	8.25	0.000299	5.58	0.77	2.62171

Berdasarkan seastate di atas, konsep pembebanan kondisi intact yang diaplikasikan dalam simulasi dijelaskan pada tabel 4.10 di bawah ini:

Tabel 4.10 Konsep Pembebanan Dalam Simulasi Pada Konfigurasi *Mooring System* 4x1

Mooring Line	*Env. Heading* Asimetris	*Env. Heading* Simetris	Beban Lingkungan
Line 1	112.5^{o}	135^{o}	27 *Seastates*
Line 2	67.5^{o}	45^{o}	
Line 3	292.5^{o}	315^{o}	
Line 4	247.5^{o}	225^{o}	

Analisis dinamis pada setiap kondisi tersebut disimulasikan dengan durasi 1800 s pada *time origin* dimana terjadi puncak/lembah gelombang yang tertinggi dari profil gelombang selama 10800 s. Hal ini agar diperoleh data seri waktu yang telah mencakup pembebanan maksimum yang diberikan pada setiap kondisi.

Dari hasil analisis akan diperoleh data seri waktu *tension* untuk analisis *fatigue* pada *anchor chain* untuk konfigurasi *mooring system* 4x1 asimetris dan simetris setiap kondisi pembebanan.

4.10 Analisis Umur Kelelahan

Perhitungan *fatigue damage* dilakukan dengan Orcaflex menggunakan metode perhitungan siklus *rainflow counting*. Setelah diperoleh *rasio damage* tahunan untuk setiap *design condition*, maka akan dihitung umur kelelahan struktur. Berdasarkan (API-RP-2SK, 2005) *safety factor* untuk *chain* adalah 3. Hal tersebut memiliki arti yaitu umur kelelahan struktur harus melebihi umur operasi layanan yang diharapkan yaitu 20 tahun. Bila tidak maka struktur dinyatakan tidak aman karena dapat mengalami kegagalan sebelum masa layanan terpenuhi. Jika hal tersebut terjadi, maka perlu ditinjau kembali terkait desain dari sistem tambat tersebut. Berikut adalah analisis umur kelelahan konfigurasi *mooring system* 4x1 asimetris dan simetris.

4.10.1 Umur Kelelahan *Mooring System* 4x1 Asimetris

Berikut adalah tabel 4.11 sampai 4.14 yang merupakan hasil perhitungan *damage* tahunan *anchor chain* konfigurasi *mooring system* 4x1 asimetris setiap *design condition*.

Tabel 4.11 Hasil Perhitungan *Damage* pada *Anchor Chain* 1 pada Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Asimetris

Case	Hs (m)	Tp (s)	*Probability*	*1 year - Time exposure (hour)*	Lokasi	Di
1	0.1	2.25	0.005188	45.44	End A (Segment 0 m)	0.000000
2		4.25	0.001197	10.49	End A (Segment 0 m)	0.000000
3	0.3	3.25	0.093376	817.97	End A (Segment 0 m)	0.000000
4		4.75	0.037111	325.09	End A (Segment 0 m)	0.000000
5	0.5	3.75	0.203611	1783.64	End A (Segment 0 m)	0.000002

Case	Hs (m)	Tp (s)	*Probability*	*1 year - Time exposure (hour)*	Lokasi	Di
6		5.75	0.031325	274.41	End A (Segment 0 m)	0.000002
7	0.7	4.25	0.127394	1115.97	End A (Segment 0 m)	0.000017
8		5.75	0.084597	741.07	End A (Segment 0 m)	0.000022
9	0.9	4.75	0.058160	509.49	End A (Segment 0 m)	0.000039
10		5.75	0.104350	914.10	End A (Segment 0 m)	0.000088
11	1.1	4.75	0.053871	471.91	End A (Segment 0 m)	0.000134
12		6.25	0.060954	533.95	End A (Segment 0 m)	0.000126
13	1.3	5.25	0.016161	141.57	End A (Segment 0 m)	0.000135
14		6.25	0.049381	432.58	End A (Segment 0 m)	0.000240
15	1.5	5.75	0.012071	105.74	End A (Segment 0 m)	0.000262
16		6.75	0.024541	214.98	End A (Segment 0 m)	0.000238
17	1.7	6.25	0.008679	76.03	End A (Segment 0 m)	0.000181
18		7.25	0.010176	89.14	End A (Segment 0 m)	0.000221
19	1.9	6.25	0.002793	24.47	End A (Segment 0 m)	0.000171
20		7.25	0.006484	56.80	End A (Segment 0 m)	0.000240
21	2.1	6.25	0.000698	6.12	End A (Segment 0 m)	0.000040
22		7.25	0.003591	31.46	End A (Segment 0 m)	0.000225
23	2.3	7.75	0.001995	17.48	End A (Segment 0 m)	0.000231
24	2.5	7.75	0.001097	9.61	End A (Segment 0 m)	0.000260
25	2.7	8.25	0.000499	4.37	End A (Segment 0 m)	0.000114
26	2.9	8.25	0.000399	3.50	End A (Segment 0 m)	0.000201

Case	Hs (m)	Tp (s)	*Probability*	*1 year - Time exposure (hour)*	Lokasi	Di
27	3.1	8.25	0.000299	2.62	End A (Segment 0 m)	0.000142
Total			1	8760	Dannual = 0.003332	

Tabel 4.12 Hasil Perhitungan *Damage* pada *Anchor Chain* 2 pada Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Asimetris

Case	Hs (m)	Tp (s)	*Probability*	*1 year - Time exposure (hour)*	Lokasi	Di
1	0.1	2.25	0.005188	45.44	End A (Segment 0 m)	0.000000
2		4.25	0.001197	10.49	End A (Segment 0 m)	0.000000
3	0.3	3.25	0.093376	817.97	End A (Segment 0 m)	0.000000
4		4.75	0.037111	325.09	End A (Segment 0 m)	0.000001
5	0.5	3.75	0.203611	1783.64	End A (Segment 0 m)	0.000009
6		5.75	0.031325	274.41	End A (Segment 0 m)	0.000003
7	0.7	4.25	0.127394	1115.97	End A (Segment 0 m)	0.000021
8		5.75	0.084597	741.07	End A (Segment 0 m)	0.000024
9	0.9	4.75	0.058160	509.49	End A (Segment 0 m)	0.000038
10		5.75	0.104350	914.10	End A (Segment 0 m)	0.000077
11	1.1	4.75	0.053871	471.91	End A (Segment 0 m)	0.000113
12		6.25	0.060954	533.95	End A (Segment 0 m)	0.000101
13	1.3	5.25	0.016161	141.57	End A (Segment 0 m)	0.000112
14		6.25	0.049381	432.58	End A (Segment 0 m)	0.000198
15	1.5	5.75	0.012071	105.74	End A (Segment 0 m)	0.000233

Case	Hs (m)	Tp (s)	*Probability*	*1 year - Time exposure (hour)*	Lokasi	Di
16		6.75	0.024541	214.98	End A (Segment 0 m)	0.000209
17	1.7	6.25	0.008679	76.03	End A (Segment 0 m)	0.000155
18		7.25	0.010176	89.14	End A (Segment 0 m)	0.000177
19	1.9	6.25	0.002793	24.47	End A (Segment 0 m)	0.000149
20		7.25	0.006484	56.80	End A (Segment 0 m)	0.000198
21	2.1	6.25	0.000698	6.12	End A (Segment 0 m)	0.000035
22		7.25	0.003591	31.46	End A (Segment 0 m)	0.000191
23	2.3	7.75	0.001995	17.48	End A (Segment 0 m)	0.000192
24	2.5	7.75	0.001097	9.61	End A (Segment 0 m)	0.000255
25	2.7	8.25	0.000499	4.37	End A (Segment 0 m)	0.000122
26	2.9	8.25	0.000399	3.50	End A (Segment 0 m)	0.000204
27	3.1	8.25	0.000299	2.62	End A (Segment 0 m)	0.000167
Total			1	8760	Dannual = 0.002985	

Tabel 4. 13 Hasil Perhitungan *Damage* pada *Anchor Chain* 3 pada Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Asimetris

Case	Hs (m)	Tp (s)	*Probability*	*1 year - Time exposure (hour)*	Lokasi	Di
1	0.1	2.25	0.005188	45.44	End A (Segment 0 m)	0.000000
2		4.25	0.001197	10.49	End A (Segment 0 m)	0.000000
3	0.3	3.25	0.093376	817.97	End A (Segment 0 m)	0.000000
4		4.75	0.037111	325.09	End A (Segment 0 m)	0.000000
5	0.5	3.75	0.203611	1783.64	End A (Segment 0 m)	0.000001

6		5.75	0.031325	274.41	End A (Segment 0 m)	0.000002
7	0.7	4.25	0.127394	1115.97	End A (Segment 0 m)	0.000013
8		5.75	0.084597	741.07	End A (Segment 0 m)	0.000020
9	0.9	4.75	0.058160	509.49	End A (Segment 0 m)	0.000034
10		5.75	0.104350	914.10	End A (Segment 0 m)	0.000076
11	1.1	4.75	0.053871	471.91	End A (Segment 0 m)	0.000119
12		6.25	0.060954	533.95	End A (Segment 0 m)	0.000104
13	1.3	5.25	0.016161	141.57	End A (Segment 0 m)	0.000118
14		6.25	0.049381	432.58	End A (Segment 0 m)	0.000203
15	1.5	5.75	0.012071	105.74	End A (Segment 0 m)	0.000252
16		6.75	0.024541	214.98	End A (Segment 0 m)	0.000201
17	1.7	6.25	0.008679	76.03	End A (Segment 0 m)	0.000158
18		7.25	0.010176	89.14	End A (Segment 0 m)	0.000184
19	1.9	6.25	0.002793	24.47	End A (Segment 0 m)	0.000187
20		7.25	0.006484	56.80	End A (Segment 0 m)	0.000207
21	2.1	6.25	0.000698	6.12	End A (Segment 0 m)	0.000038
22		7.25	0.003591	31.46	End A (Segment 0 m)	0.000210
23	2.3	7.75	0.001995	17.48	End A (Segment 0 m)	0.000214
24	2.5	7.75	0.001097	9.61	End A (Segment 0 m)	0.000309
25	2.7	8.25	0.000499	4.37	End A (Segment 0 m)	0.000136
26	2.9	8.25	0.000399	3.50	End A (Segment 0 m)	0.000263
27	3.1	8.25	0.000299	2.62	End A (Segment 0 m)	0.000216
Total			1	8760	Dannual = 0.003265	

Tabel 4.14 Hasil Perhitungan *Damage* pada *Anchor Chain* 4 pada Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Asimetris

Case	Hs (m)	Tp (s)	*Probability*	*1 year - Time exposure (hour)*	Lokasi	Di
1	0.1	2.25	0.005188	45.44	End A (Segment 0 m)	0.000000
2		4.25	0.001197	10.49	End A (Segment 0 m)	0.000000
3	0.3	3.25	0.093376	817.97	End A (Segment 0 m)	0.000000
4		4.75	0.037111	325.09	End A (Segment 0 m)	0.000000
5	0.5	3.75	0.203611	1783.64	End A (Segment 0 m)	0.000001
6		5.75	0.031325	274.41	End A (Segment 0 m)	0.000002
7	0.7	4.25	0.127394	1115.97	End A (Segment 0 m)	0.000017
8		5.75	0.084597	741.07	End A (Segment 0 m)	0.000024
9	0.9	4.75	0.058160	509.49	End A (Segment 0 m)	0.000041
10		5.75	0.104350	914.10	End A (Segment 0 m)	0.000091
11	1.1	4.75	0.053871	471.91	End A (Segment 0 m)	0.000133
12		6.25	0.060954	533.95	End A (Segment 0 m)	0.000128
13	1.3	5.25	0.016161	141.57	End A (Segment 0 m)	0.000133
14		6.25	0.049381	432.58	End A (Segment 0 m)	0.000229
15	1.5	5.75	0.012071	105.74	End A (Segment 0 m)	0.000269
16		6.75	0.024541	214.98	End A (Segment 0 m)	0.000233
17	1.7	6.25	0.008679	76.03	End A (Segment 0 m)	0.000180
18		7.25	0.010176	89.14	End A (Segment 0 m)	0.000214
19	1.9	6.25	0.002793	24.47	End A (Segment 0 m)	0.000186
20		7.25	0.006484	56.80	End A (Segment 0 m)	0.000236

Case	Hs (m)	Tp (s)	*Probability*	*1 year - Time exposure (hour)*	Lokasi	Di
21	2.1	6.25	0.000698	6.12	End A (Segment 0 m)	0.000041
22		7.25	0.003591	31.46	End A (Segment 0 m)	0.000228
23	2.3	7.75	0.001995	17.48	End A (Segment 0 m)	0.000242
24	2.5	7.75	0.001097	9.61	End A (Segment 0 m)	0.000288
25	2.7	8.25	0.000499	4.37	End A (Segment 0 m)	0.000127
26	2.9	8.25	0.000399	3.50	End A (Segment 0 m)	0.000227
27	3.1	8.25	0.000299	2.62	End A (Segment 0 m)	0.000162
Total			1	8760	Dannual = 0.003435	

Kemudian dari *cumulative damage* tahunan tersebut dapat dihitung umur kelelahannya pada masing-masing *anchor chain* dengan persamaan (2.39) dan (2.40). *Fatigue life* dan *design life* dari *anchor chain* pada konfigurasi *mooring system* 4x1 asimetris terdapat pada tabel 4.15 sebagai berikut.

Tabel 4.15 Hasil Perhitungan Umur Kelelahan Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Asimetris

Mooring Line	*Property*	*Declination* (Deg)	*Length* (m)	*Pretension* (kN)	*Fatigue Life* (year)	*Design Life* (year)
L1	R4 (Dia = 0.058 m)	54	265	13.29	300.16	100.05
L2	R4 (Dia = 0.0825 m) + U3 (Dia = 0.058 m)	55	300	13.48	335.01	111.67
L3	R4 (Dia = 0.0825 m) + U3 (Dia = 0.058 m)	54	195	13.69	306.25	102.08
L4	R4 (Dia = 0.058 m)	55	205	13.01	291.13	97.04

Berdasarkan tabel 4.15 di atas, dapat disimpulkan bahwa *fatigue life* paling pendek pada konfigurasi *mooring system* 4x1 asimetris adalah *anchor chain* 4 sebesar 291.34 tahun.

4.10.2 Umur Kelelahan *Mooring System* 4x1 Simetris

Berikut adalah tabel 4.16 sampai 4.19 yang merupakan hasil perhitungan *fatigue damage* tahunan pada *anchor chain* konfigurasi *mooring system* 4x1 simetris untuk setiap *design condition*.

Tabel 4.16 Hasil Perhitungan *Damage* pada *Anchor Chain* 1 pada Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Simetris

Case	Hs (m)	Tp (s)	*Probability*	*1 year - Time exposure (hour)*	Lokasi	Di
1	0.1	2.25	0.005188	45.44	End A (Segment 0 m)	0.000000
2		4.25	0.001197	10.49	End A (Segment 0 m)	0.000000
3	0.3	3.25	0.093376	817.97	End A (Segment 0 m)	0.000000
4		4.75	0.037111	325.09	End A (Segment 0 m)	0.000001
5	0.5	3.75	0.203611	1783.64	End A (Segment 0 m)	0.000007
6		5.75	0.031325	274.41	End A (Segment 0 m)	0.000005
7	0.7	4.25	0.127394	1115.97	End A (Segment 0 m)	0.000028
8		5.75	0.084597	741.07	End A (Segment 0 m)	0.000036
9	0.9	4.75	0.058160	509.49	End A (Segment 0 m)	0.000062
10		5.75	0.104350	914.10	End A (Segment 0 m)	0.000098
11	1.1	4.75	0.053871	471.91	End A (Segment 0 m)	0.000191
12		6.25	0.060954	533.95	End A (Segment 0 m)	0.000178
13	1.3	5.25	0.016161	141.57	End A (Segment 0 m)	0.000209
14		6.25	0.049381	432.58	End A (Segment 0 m)	0.000340

Case	Hs (m)	Tp (s)	*Probability*	*1 year - Time exposure (hour)*	Lokasi	Di
15	1.5	5.75	0.012071	105.74	End A (Segment 0 m)	0.000314
16		6.75	0.024541	214.98	End A (Segment 0 m)	0.000365
17	1.7	6.25	0.008679	76.03	End A (Segment 0 m)	0.000266
18		7.25	0.010176	89.14	End A (Segment 0 m)	0.000312
19	1.9	6.25	0.002793	24.47	End A (Segment 0 m)	0.000188
20		7.25	0.006484	56.80	End A (Segment 0 m)	0.000367
21	2.1	6.25	0.000698	6.12	End A (Segment 0 m)	0.000054
22		7.25	0.003591	31.46	End A (Segment 0 m)	0.000359
23	2.3	7.75	0.001995	17.48	End A (Segment 0 m)	0.000319
24	2.5	7.75	0.001097	9.61	End A (Segment 0 m)	0.000365
25	2.7	8.25	0.000499	4.37	End A (Segment 0 m)	0.000157
26	2.9	8.25	0.000399	3.50	End A (Segment 0 m)	0.000294
27	3.1	8.25	0.000299	2.62	End A (Segment 0 m)	0.000284
Total			1	8760	Dannual = 0.004798	

Tabel 4.17 Hasil Perhitungan *Damage* pada *Anchor Chain* 2 pada Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Simetris

Case	Hs (m)	Tp (s)	*Probability*	*1 year - Time exposure (hour)*	Lokasi	Di
1	0.1	2.25	0.005188	45.44	End A (Segment 0 m)	0.000000
2		4.25	0.001197	10.49	End A (Segment 0 m)	0.000000
3	0.3	3.25	0.093376	817.97	End A (Segment 0 m)	0.000000

Case	Hs (m)	Tp (s)	*Probability*	*1 year - Time exposure (hour)*	Lokasi	Di
4		4.75	0.037111	325.09	End A (Segment 0 m)	0.000000
5	0.5	3.75	0.203611	1783.64	End A (Segment 0 m)	0.000003
6		5.75	0.031325	274.41	End A (Segment 0 m)	0.000004
7	0.7	4.25	0.127394	1115.97	End A (Segment 0 m)	0.000024
8		5.75	0.084597	741.07	End A (Segment 0 m)	0.000032
9	0.9	4.75	0.058160	509.49	End A (Segment 0 m)	0.000056
10		5.75	0.104350	914.10	End A (Segment 0 m)	0.000092
11	1.1	4.75	0.053871	471.91	End A (Segment 0 m)	0.000180
12		6.25	0.060954	533.95	End A (Segment 0 m)	0.000167
13	1.3	5.25	0.016161	141.57	End A (Segment 0 m)	0.000188
14		6.25	0.049381	432.58	End A (Segment 0 m)	0.000318
15	1.5	5.75	0.012071	105.74	End A (Segment 0 m)	0.000270
16		6.75	0.024541	214.98	End A (Segment 0 m)	0.000344
17	1.7	6.25	0.008679	76.03	End A (Segment 0 m)	0.000247
18		7.25	0.010176	89.14	End A (Segment 0 m)	0.000303
19	1.9	6.25	0.002793	24.47	End A (Segment 0 m)	0.000180
20		7.25	0.006484	56.80	End A (Segment 0 m)	0.000347
21	2.1	6.25	0.000698	6.12	End A (Segment 0 m)	0.000051
22		7.25	0.003591	31.46	End A (Segment 0 m)	0.000339
23	2.3	7.75	0.001995	17.48	End A (Segment 0 m)	0.000300
24	2.5	7.75	0.001097	9.61	End A (Segment 0 m)	0.000341

Case	Hs (m)	Tp (s)	*Probability*	*1 year - Time exposure (hour)*	Lokasi	Di
25	2.7	8.25	0.000499	4.37	End A (Segment 0 m)	0.000152
26	2.9	8.25	0.000399	3.50	End A (Segment 0 m)	0.000256
27	3.1	8.25	0.000299	2.62	End A (Segment 0 m)	0.000292
Total			1	8760	Dannual = 0.004488	

Tabel 4.18 Hasil Perhitungan *Damage* pada *Anchor Chain* 3 pada Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Simetris

Case	Hs (m)	Tp (s)	*Probability*	*1 year - Time exposure (hour)*	Lokasi	Di
1	0.1	2.25	0.005188	45.44	End A (Segment 0 m)	0.000000
2		4.25	0.001197	10.49	End A (Segment 0 m)	0.000000
3	0.3	3.25	0.093376	817.97	End A (Segment 0 m)	0.000000
4		4.75	0.037111	325.09	End A (Segment 0 m)	0.000001
5	0.5	3.75	0.203611	1783.64	End A (Segment 0 m)	0.000007
6		5.75	0.031325	274.41	End A (Segment 0 m)	0.000004
7	0.7	4.25	0.127394	1115.97	End A (Segment 0 m)	0.000027
8		5.75	0.084597	741.07	End A (Segment 0 m)	0.000035
9	0.9	4.75	0.058160	509.49	End A (Segment 0 m)	0.000059
10		5.75	0.104350	914.10	End A (Segment 0 m)	0.000094
11	1.1	4.75	0.053871	471.91	End A (Segment 0 m)	0.000181
12		6.25	0.060954	533.95	End A (Segment 0 m)	0.000174
13	1.3	5.25	0.016161	141.57	End A (Segment 0 m)	0.000199

Case	Hs (m)	Tp (s)	*Probability*	*1 year - Time exposure (hour)*	Lokasi	Di
14		6.25	0.049381	432.58	End A (Segment 0 m)	0.000329
15	1.5	5.75	0.012071	105.74	End A (Segment 0 m)	0.000311
16		6.75	0.024541	214.98	End A (Segment 0 m)	0.000364
17	1.7	6.25	0.008679	76.03	End A (Segment 0 m)	0.000263
18		7.25	0.010176	89.14	End A (Segment 0 m)	0.000314
19	1.9	6.25	0.002793	24.47	End A (Segment 0 m)	0.000203
20		7.25	0.006484	56.80	End A (Segment 0 m)	0.000364
21	2.1	6.25	0.000698	6.12	End A (Segment 0 m)	0.000054
22		7.25	0.003591	31.46	End A (Segment 0 m)	0.000358
23	2.3	7.75	0.001995	17.48	End A (Segment 0 m)	0.000321
24	2.5	7.75	0.001097	9.61	End A (Segment 0 m)	0.000377
25	2.7	8.25	0.000499	4.37	End A (Segment 0 m)	0.000171
26	2.9	8.25	0.000399	3.50	End A (Segment 0 m)	0.000290
27	3.1	8.25	0.000299	2.62	End A (Segment 0 m)	0.000318
Total			1	8760	Dannual = 0.004818	

Tabel 4.19 Hasil Perhitungan *Damage* pada *Anchor Chain* 4 pada Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Simetris

Case	Hs (m)	Tp (s)	*Probability*	*1 year - Time exposure (hour)*	Lokasi	Di
1	0.1	2.25	0.005188	45.44	End A (Segment 0 m)	0.000000
2		4.25	0.001197	10.49	End A (Segment 0 m)	0.000000

Case	Hs (m)	Tp (s)	*Probability*	*1 year - Time exposure (hour)*	Lokasi	Di
3	0.3	3.25	0.093376	817.97	End A (Segment 0 m)	0.000000
4		4.75	0.037111	325.09	End A (Segment 0 m)	0.000000
5	0.5	3.75	0.203611	1783.64	End A (Segment 0 m)	0.000004
6		5.75	0.031325	274.41	End A (Segment 0 m)	0.000004
7	0.7	4.25	0.127394	1115.97	End A (Segment 0 m)	0.000025
8		5.75	0.084597	741.07	End A (Segment 0 m)	0.000034
9	0.9	4.75	0.058160	509.49	End A (Segment 0 m)	0.000058
10		5.75	0.104350	914.10	End A (Segment 0 m)	0.000095
11	1.1	4.75	0.053871	471.91	End A (Segment 0 m)	0.000187
12		6.25	0.060954	533.95	End A (Segment 0 m)	0.000172
13	1.3	5.25	0.016161	141.57	End A (Segment 0 m)	0.000200
14		6.25	0.049381	432.58	End A (Segment 0 m)	0.000329
15	1.5	5.75	0.012071	105.74	End A (Segment 0 m)	0.000274
16		6.75	0.024541	214.98	End A (Segment 0 m)	0.000346
17	1.7	6.25	0.008679	76.03	End A (Segment 0 m)	0.000247
18		7.25	0.010176	89.14	End A (Segment 0 m)	0.000301
19	1.9	6.25	0.002793	24.47	End A (Segment 0 m)	0.000170
20		7.25	0.006484	56.80	End A (Segment 0 m)	0.000346
21	2.1	6.25	0.000698	6.12	End A (Segment 0 m)	0.000050
22		7.25	0.003591	31.46	End A (Segment 0 m)	0.000340
23	2.3	7.75	0.001995	17.48	End A (Segment 0 m)	0.000297

Case	Hs (m)	Tp (s)	*Probability*	*1 year - Time exposure (hour)*	Lokasi	Di
24	2.5	7.75	0.001097	9.61	End A (Segment 0 m)	0.000332
25	2.7	8.25	0.000499	4.37	End A (Segment 0 m)	0.000142
26	2.9	8.25	0.000399	3.50	End A (Segment 0 m)	0.000262
27	3.1	8.25	0.000299	2.62	End A (Segment 0 m)	0.000267
Total			1	8760	Dannual = 0.004483	

Kemudian dari *cumulative damage* tahunan tersebut dapat dihitung umur kelelahannya pada masing-masing *anchor chain* dengan persamaan (2.39) dan (2.40). Berdasarkan (API-RP-2SK, 2005) *safety factor* untuk *chain* adalah sebesar 3. Sehingga *fatigue life* dan *design life* dari *anchor chain* pada konfigurasi mooring system 4x1 simetris terdapat pada tabel 4.20 sebagai berikut.

Tabel 4.20 Hasil Perhitungan Umur Kelelahan Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Simetris

Mooring Line	*Property*	*Declination* (Deg)	*Length* (m)	*Pretension* (kN)	*Fatigue Life* (year)	*Design Life* (year)
L1	R4 (Dia = 0.058 m)	54	270	12.86	208.41	69.47
L2	R4 (Dia = 0.058 m)	55	300	12.52	222.84	74.28
L3	R4 (Dia = 0.058 m)	54	270	12.86	207.57	69.19
L4	R4 (Dia = 0.058 m)	55	300	12.52	223.06	74.35

Berdasarkan tabel 4.20 di atas, dapat disimpulkan bahwa *fatigue life* paling pendek pada konfigurasi *mooring system* 4x1 simetris adalah *anchor chain* 3 sebesar 207.57 tahun.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Beberapa hal yang dapat disimpulkan dari pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Konfigurasi *mooring system* 4x1 simetris lebih mampu menahan beban lingkungan pada arah 0^o dan 180^o karena hasil *tension* maksimumnya lebih kecil daripada konfigurasi *mooring system* 4x1 asimetris yaitu sebesar 730.51 kN (*Heading* 0^o) dan 762.23 kN (*Heading* 180^o). Sedangkan konfigurasi *mooring system* 4x1 asimetris lebih mampu menahan beban lingkungan pada arah 90^o dan 270^o karena memiliki hasil *tension* maksimum yang lebih kecil dari konfigurasi *mooring system* 4x1 simetris yaitu sebesar 53.31 kN (*Heading* 90^o) dan 47.87 kN (*Heading* 270^o).
2. Hasil *Offset* maksimum yang terjadi pada SPM juga menunjukkan bahwa untuk konfigurasi *mooring system* 4x1 simetris lebih mampu menahan beban lingkungan pada arah 0^o dan 180^o karena hasil *offset* maksimumnya lebih kecil daripada konfigurasi *mooring system* 4x1 asimetris yaitu sebesar 5.94 m. Sedangkan konfigurasi *mooring system* 4x1 asimetris lebih mampu menahan beban lingkungan pada arah 90^o dan 270^o karena memiliki hasil *offset* maksimum yang lebih kecil dari konfigurasi *mooring system* 4x1 simetris yaitu sebesar 4.95 m (*Heading* 90^o) dan 4.72 m (*Heading* 270^o).
3. Hasil umur kelelahan yang diperoleh menunjukkan bahwa konfigurasi *mooring system* 4x1 asimetris memiliki umur kelelahan minimum pada *anchor chain* di segment 0 m (End A) yang lebih panjang yaitu sebesar 291 tahun dengan umur desain 97 tahun daripada konfigurasi *mooring system* 4x1 simetris yang memiliki umur kelelahan minimum pada *anchor chain* di segment 0 m (End A) sebesar 207 tahun dengan umur desain 69 tahun.

5.2 Saran

Berikut adalah saran dari penulis untuk penelitian selanjutnya dengan topik yang relevan, antara lain:

1. Mempertimbangkan faktor korosi dari hasil inspeksi dalam perhitungan umur kelelahan untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat
2. Memodelkan *floating hose* dan *subsea hose* agar hasil *offset* maksimum dapat lebih akurat

DAFTAR PUSTAKA

ABS. (2017). *Dynamic Loading Approach for Floating Production, Storage, and Offloading (FPSO) Installations.* Houston: American Bureau of Shipping.

API-RP-2SK. (2005). *Recommended Practice for Design and Analysis of Station Keeping System for Floating Structures* (3 ed.). Washington, DC: API Publishing Services.

Chakrabarti, S. K. (1987). *Hydrodynamic of Offshore Structure.* Boston, USA: Computational Mechanics Publication Shouthampton .

Djatmiko, E. B. (2012). *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak* . Surabaya: ITS Press.

DNVGL-OS-E301. (2015). *Position Mooring.* Norway: Det Norske Veritas.

DNV-RP-C205. (2010). *Environmental Conditions and Environmental Loads.* Norway: Det Norske Veritas.

Faltinsen, O. M. (1990). *Sea Loads On Ships and Offshore Structures.* United Kingdom: Cambridge University Press.

Hwang, J. O. (2012). *Fatigue Assessment of Mooring Chain Link of Spread Moored FPSO in Deepwater Considering Bending Phenomenon.* Korea: Korea Maritime and Ocean University.

Kim, Y., Kim, M. S., & Park, M. J. (2018). Fatigue Analysis on the Mooring Chain of Spread Moored FPSO Considering The OPB and IPB. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 1-24.

Luo, M. H. (2017). Numerical Study on the Out Of Plane bending (OPB) Behaviors of Studless Mooring Chain Links in Fairlead Structures. *Proceedings of The 27 International Ocean and Polar Engineering Conference, San Francisco, USA.*

Ma, K. T., Luo, Y., Kwan, T., & Wu, Y. (2019). *Mooring System Engineering for Offshore Structure.* Houston: Gulf Professional Publishing.

Olagnon, M., & Guede, Z. (2008). Rainflow Fatigue Analysis for Loads WIth Multimodal Power Spectral Densities. *Marine Structures*, 160-176.

Prasodjo, B. S., Aristanto, W. D., & Ashyar, D. F. (2011). Study Optimasi Panjang Mooring Line Tipe Spread Mooring Pada FPSO. *Jurnal Wave, 5*.

Sarpkaya, T. (2010). *Wave Forces on Offshore Structures.* Cambridge: Cambridge University Press.

Shafizadeh, E., & Gharechahi, A. (2015). *A Comparative Study On The Fatigue Life of Mooring Systems for a Wave Dragon (WEC).* Tehran: Sharif University of Technology.

Shoup, G. J., & Mueller, R. A. (1984). Failure Analysis of a Calm Buoy Anchor System. *Offshore Technology Conference.* Cities Service Oil and Gas Corp.

Wu, Y., Wang, T., Eide, Q., & Haverty, K. (2015). Governing Factors and Locations of Ftaigue Damage on Mooring Lines of Floating Structures. *Ocean Engineering*, 109-124.

Xu, T. J., Zhao, Y. P., Dong , G. H., & Bi, C. W. (2014). Fatigue Analysis of Mooring System for Net Cage Under Random Loads. *Aquacultural Engineering*, 59-68.

Xue, X., Chen , N. Z., Wu, Y., Xiong, Y., & Gu, Y. (2018). Mooring System Fatigue Analysis for a Semi-Submersible . *Ocean Engineering*, 550-563.

LAMPIRAN I

OUTPUT MOSES

Output MOSES – RAO SPM PENGAPON Kondisi Free Floating

```
**********************************************************************************************
                                  ************************
                                       *** MOSES ***
                                       ----------                 May 4, 2020
                                      SPM PENGAPON

        * Draft          =  1.8 Meters      Trim Angle     =  0.00 Deg.    GMT           =  0.1 Meters *
    *  Roll Gy. Radius  =  2.6 Meters      Pitch Gy. Radius =  2.6 Meters   Yaw Gy. Radius  =  3.6 Meters *
      * Heading         =  0.00 Deg.       Forward Speed  =  0.00 Knots    Linearization Based on 1/ 20    *
**********************************************************************************************
                                  ************************
                                  +++ M O T I O N   R E S P O N S E   O P E R A T O R S +++
                                  ========================================================
                                  Results are in Body System
                                  Of Point On Body SPM At X =    0.0 Y =   -0.0 Z =    2.2
                                  Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and   KN Unless Specified
```

E N C O U N T E R		Surge /		Sway /		Heave /		Roll /		Pitch /		Yaw /	
Frequency	Period	Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.1001	62.80	0.997	90	0.000	0	1.000	0	0.000	0	0.098	-95	0.000	0
0.2001	31.40	0.993	91	0.000	0	1.000	0	0.000	0	0.220	-122	0.000	0
0.3002	20.93	0.988	90	0.000	0	1.003	0	0.000	0	0.402	-92	0.000	0
0.4002	15.70	0.972	92	0.000	0	1.009	0	0.000	0	0.835	-88	0.000	0
0.5003	12.56	0.964	91	0.000	0	1.029	0	0.000	0	1.199	-89	0.000	0
0.6003	10.47	0.947	91	0.000	0	1.079	-1	0.000	0	1.755	-88	0.000	0
0.7004	8.97	0.928	90	0.000	0	1.236	-5	0.000	0	2.323	-88	0.000	0
0.8004	7.85	0.901	91	0.000	0	1.270	-33	0.000	0	3.028	-90	0.000	0
0.8468	7.42	0.889	91	0.000	0	0.906	-51	0.000	0	3.306	-91	0.000	0
0.9005	6.98	0.873	91	0.000	0	0.460	-49	0.000	0	3.596	-91	0.000	0
1.0005	6.28	0.840	91	0.000	0	0.391	-4	0.000	0	4.181	-90	0.000	0
1.1006	5.71	0.801	91	0.000	0	0.444	4	0.000	0	4.766	-90	0.000	0
1.2006	5.23	0.757	92	0.000	0	0.451	7	0.000	0	5.302	-89	0.000	0
1.3007	4.83	0.709	92	0.000	0	0.437	10	0.000	0	5.767	-88	0.000	0
1.4007	4.49	0.658	93	0.000	0	0.412	14	0.000	0	6.143	-88	0.000	0
1.5008	4.19	0.605	95	0.000	0	0.382	17	0.000	0	6.420	-86	0.000	0
1.6008	3.92	0.551	97	0.000	0	0.350	22	0.000	0	6.585	-85	0.000	0
1.7009	3.69	0.497	99	0.000	0	0.319	27	0.000	0	6.651	-83	0.000	0
1.8009	3.49	0.444	102	0.000	0	0.287	33	0.000	0	6.611	-81	0.000	0
1.9010	3.31	0.394	105	0.000	0	0.257	40	0.000	0	6.464	-78	0.000	0
2.0010	3.14	0.347	108	0.000	0	0.229	48	0.000	0	6.206	-75	0.000	0
2.1011	2.99	0.302	112	0.000	0	0.206	57	0.000	0	5.856	-72	0.000	0
2.2011	2.85	0.261	116	0.000	0	0.186	67	0.000	0	5.426	-68	0.000	0
2.3012	2.73	0.222	121	0.000	0	0.170	78	0.000	0	4.931	-63	0.000	0
2.4012	2.62	0.187	127	0.000	0	0.157	90	0.000	0	4.411	-57	0.000	0
2.5013	2.51	0.156	133	0.000	0	0.147	103	0.000	0	3.899	-50	0.000	0
2.6013	2.42	0.129	141	0.000	0	0.141	117	0.000	0	3.413	-42	0.000	0
2.7014	2.33	0.106	150	0.000	0	0.138	133	0.000	0	2.982	-32	0.000	0
2.8014	2.24	0.088	160	0.000	0	0.141	150	0.000	0	2.620	-21	0.000	0
2.9015	2.17	0.072	171	0.000	0	0.152	171	0.000	0	2.326	-9	0.000	0
3.0015	2.09	0.060	-173	0.000	0	0.173	-161	0.000	0	2.129	5	0.000	0

****

*** MOSES ***

May 4, 2020

SPM PENGAPON

* Draft = 1.8 Meters Trim Angle = 0.00 Deg. GMT = 0.1 Meters *
* Roll Gy. Radius = 2.6 Meters Pitch Gy. Radius = 2.6 Meters Yaw Gy. Radius = 3.6 Meters *
* Heading = 45.00 Deg. Forward Speed = 0.00 Knots Linearization Based on 1/ 20 *

****

+++ M O T I O N R E S P O N S E O P E R A T O R S +++

==========

Results are in Body System

Of Point On Body SPM At X = 0.0 Y = -0.0 Z = 2.2

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and KN Unless Specified

E N C O U N T E R		Surge /		Sway /		Heave /		Roll /		Pitch /		Yaw /	
----------		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/----------/		/----------/		/----------/		/----------/		/----------/		/----------/	
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.1001	62.80	0.736	107	0.735	107	0.999	0	0.038	135	0.083	-51	0.008	68
0.2001	31.40	0.691	93	0.694	93	1.000	0	0.238	118	0.362	-92	0.002	3
0.3002	20.93	0.698	90	0.699	90	1.003	0	0.277	93	0.283	-92	0.001	-3
0.4002	15.70	0.687	92	0.687	92	1.009	0	0.586	95	0.591	-88	0.002	-1
0.5003	12.56	0.681	91	0.681	91	1.029	0	0.845	94	0.847	-89	0.002	-3
0.6003	10.47	0.669	91	0.669	91	1.079	-1	1.235	93	1.241	-88	0.003	-4
0.7004	8.97	0.656	90	0.657	90	1.235	-5	1.625	93	1.645	-88	0.003	-6
0.8004	7.85	0.637	91	0.639	91	1.271	-33	2.060	91	1.982	-90	0.005	-8
0.8468	7.42	0.627	91	0.631	91	0.907	-51	2.239	91	2.137	-91	0.005	-8
0.9005	6.98	0.617	91	0.619	91	0.459	-49	2.472	91	2.413	-91	0.006	-7
1.0005	6.28	0.594	91	0.595	91	0.390	-4	2.928	92	2.964	-91	0.007	-7
1.1006	5.71	0.566	91	0.566	91	0.443	4	3.355	92	3.374	-90	0.009	-8
1.2006	5.23	0.535	92	0.535	91	0.450	7	3.737	92	3.752	-89	0.010	-9
1.3007	4.83	0.501	92	0.501	92	0.436	10	4.066	92	4.080	-89	0.012	-10
1.4007	4.49	0.465	94	0.464	93	0.411	14	4.330	93	4.345	-88	0.015	-12
1.5008	4.19	0.428	95	0.426	94	0.381	17	4.515	94	4.536	-87	0.019	-16
1.6008	3.92	0.390	97	0.388	96	0.348	22	4.627	95	4.653	-85	0.024	-23
1.7009	3.69	0.352	99	0.350	98	0.316	27	4.656	97	4.689	-83	0.030	-36
1.8009	3.49	0.316	102	0.314	101	0.285	33	4.614	99	4.650	-81	0.034	-57
1.9010	3.31	0.280	105	0.278	104	0.256	40	4.492	101	4.533	-78	0.031	-77
2.0010	3.14	0.246	108	0.244	107	0.230	48	4.303	104	4.345	-75	0.027	-91
2.1011	2.99	0.214	112	0.212	111	0.207	57	4.054	108	4.090	-72	0.025	-104
2.2011	2.85	0.183	116	0.182	116	0.188	67	3.755	112	3.782	-67	0.021	-123
2.3012	2.73	0.155	121	0.155	121	0.171	78	3.420	117	3.446	-62	0.014	-137
2.4012	2.62	0.131	127	0.130	127	0.158	90	3.073	123	3.097	-56	0.010	-139
2.5013	2.51	0.109	134	0.109	133	0.148	103	2.728	130	2.753	-49	0.007	-133
2.6013	2.42	0.091	142	0.091	141	0.141	117	2.403	138	2.434	-41	0.006	-127
2.7014	2.33	0.075	151	0.075	150	0.138	132	2.111	147	2.142	-32	0.006	-124
2.8014	2.24	0.062	161	0.062	160	0.141	150	1.856	158	1.883	-21	0.007	-128
2.9015	2.17	0.052	172	0.051	171	0.151	171	1.647	170	1.670	-9	0.008	-141
3.0015	2.09	0.043	-173	0.042	-173	0.173	-161	1.504	-174	1.522	5	0.009	-161

****

*** MOSES ***

May 4, 2020

SPM PENGAPON

* Draft = 1.8 Meters Trim Angle = 0.00 Deg. GMT = 0.1 Meters *

* Roll Gy. Radius = 2.6 Meters Pitch Gy. Radius = 2.6 Meters Yaw Gy. Radius = 3.6 Meters *

* Heading = 90.00 Deg. Forward Speed = 0.00 Knots Linearization Based on 1/ 20 *

****

+++ M O T I O N R E S P O N S E O P E R A T O R S +++

==========

Results are in Body System

Of Point On Body SPM At X = 0.0 Y = -0.0 Z = 2.2

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and KN Unless Specified

E N C O U N T E R		Surge /		Sway /		Heave /		Roll /		Pitch /		Yaw /	
		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/----------		/----------		/----------		/----------		/----------		/----------	
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.1001	62.80	0.001	-74	1.000	90	1.000	0	0.066	73	0.031	-71	0.000	0
0.2001	31.40	0.000	0	0.988	92	1.000	0	0.234	120	0.064	-167	0.001	11
0.3002	20.93	0.000	0	0.988	90	1.003	0	0.387	95	0.012	-177	0.000	0
0.4002	15.70	0.000	0	0.972	92	1.009	0	0.825	98	0.002	- 71	0.001	12
0.5003	12.56	0.000	0	0.964	91	1.029	0	1.189	96	0.010	-7	0.000	0
0.6003	10.47	0.001	-12	0.947	91	1.079	-1	1.739	95	0.023	-8	0.000	0
0.7004	8.97	0.001	-13	0.929	90	1.236	-5	2.285	94	0.054	-8	0.000	0
0.8004	7.85	0.003	-62	0.905	90	1.271	-33	2.899	92	0.114	-57	0.000	0
0.8468	7.42	0.003	-97	0.893	91	0.908	-51	3.150	92	0.119	-92	0.000	0
0.9005	6.98	0.003	-132	0.877	90	0.461	-49	3.476	93	0.098	-127	0.001	67
1.0005	6.28	0.002	-162	0.842	90	0.390	-4	4.128	93	0.061	-155	0.001	76
1.1006	5.71	0.002	-171	0.801	91	0.443	4	4.737	92	0.046	-161	0.001	80
1.2006	5.23	0.002	-177	0.757	91	0.450	7	5.278	92	0.039	-162	0.002	83
1.3007	4.83	0.002	177	0.708	92	0.435	10	5.743	93	0.037	-161	0.002	85
1.4007	4.49	0.002	171	0.656	93	0.410	13	6.108	94	0.036	-160	0.003	86
1.5008	4.19	0.002	165	0.602	94	0.379	17	6.375	94	0.038	-159	0.004	86
1.6008	3.92	0.003	155	0.547	96	0.347	22	6.524	96	0.043	-160	0.005	86
1.7009	3.69	0.003	139	0.493	98	0.314	27	6.566	97	0.048	-166	0.007	86
1.8009	3.49	0.003	115	0.440	101	0.283	34	6.495	99	0.049	179	0.009	85
1.9010	3.31	0.003	94	0.389	104	0.256	41	6.324	102	0.039	168	0.012	82
2.0010	3.14	0.002	84	0.341	107	0.230	49	6.057	105	0.028	169	0.016	75
2.1011	2.99	0.001	84	0.296	111	0.207	57	5.705	108	0.021	-177	0.020	60
2.2011	2.85	0.001	91	0.255	116	0.187	67	5.288	112	0.018	-156	0.022	36
2.3012	2.73	0.001	100	0.218	121	0.171	78	4.823	117	0.019	-136	0.017	18
2.4012	2.62	0.001	105	0.184	127	0.158	90	4.337	123	0.023	-124	0.012	14
2.5013	2.51	0.001	101	0.154	134	0.147	103	3.850	130	0.025	-123	0.009	22
2.6013	2.42	0.001	88	0.128	141	0.141	117	3.397	138	0.021	-128	0.008	37
2.7014	2.33	0.001	80	0.106	150	0.138	133	2.982	148	0.012	-112	0.009	50
2.8014	2.24	0.001	83	0.088	160	0.141	150	2.624	158	0.010	-55	0.010	55
2.9015	2.17	0.000	0	0.073	172	0.152	172	2.332	171	0.015	-17	0.012	50
3.0015	2.09	0.001	115	0.061	-173	0.177	-160	2.134	-174	0.021	3	0.011	40

****

*** MOSES ***

May 4, 2020

SPM PENGAPON

* Draft = 1.8 Meters Trim Angle = 0.00 Deg. GMT = 0.1 Meters *

* Roll Gy. Radius = 2.6 Meters Pitch Gy. Radius = 2.6 Meters Yaw Gy. Radius = 3.6 Meters *

* Heading = 135.00 Deg. Forward Speed = 0.00 Knots Linearization Based on 1/ 20 *

****

+++ M O T I O N R E S P O N S E O P E R A T O R S +++

==========

Results are in Body System

Of Point On Body SPM At X = 0.0 Y = -0.0 Z = 2.2

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and KN Unless Specified

E N C O U N T E R		Surge /		Sway /		Heave /		Roll /		Pitch /		Yaw /	
		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-												
0.1001	62.80	0.736	-90	0.735	89	1.000	0	0.029	126	0.014	-57	0.001	-136
0.2001	31.40	0.696	-87	0.697	92	1.000	0	0.169	110	0.270	105	0.001	8
0.3002	20.93	0.698	-89	0.699	90	1.003	0	0.277	93	0.281	91	0.001	176
0.4002	15.70	0.687	-87	0.687	92	1.009	0	0.585	95	0.587	90	0.001	169
0.5003	12.56	0.682	-88	0.681	91	1.029	0	0.845	94	0.845	89	0.001	176
0.6003	10.47	0.670	-88	0.669	91	1.079	-1	1.235	93	1.235	89	0.002	177
0.7004	8.97	0.657	-88	0.657	90	1.235	-5	1.626	92	1.629	87	0.003	178
0.8004	7.85	0.642	-88	0.640	91	1.271	-33	2.061	91	1.982	86	0.004	177
0.8468	7.42	0.634	-88	0.631	91	0.908	-51	2.239	91	2.137	88	0.005	178
0.9005	6.98	0.621	-88	0.620	91	0.460	-49	2.472	91	2.413	90	0.006	180
1.0005	6.28	0.595	-88	0.595	91	0.391	-4	2.928	92	2.915	90	0.007	-177
1.1006	5.71	0.567	-88	0.566	91	0.443	4	3.355	92	3.348	90	0.008	-175
1.2006	5.23	0.535	-88	0.535	91	0.450	7	3.737	92	3.731	90	0.010	-175
1.3007	4.83	0.501	-87	0.501	92	0.436	10	4.066	92	4.061	91	0.012	-174
1.4007	4.49	0.465	-86	0.464	93	0.411	13	4.330	93	4.327	92	0.015	-175
1.5008	4.19	0.427	-84	0.426	94	0.381	17	4.515	94	4.517	93	0.018	-177
1.6008	3.92	0.390	-82	0.388	96	0.349	22	4.626	95	4.632	94	0.022	176
1.7009	3.69	0.352	-80	0.349	98	0.316	27	4.652	97	4.666	96	0.026	162
1.8009	3.49	0.315	-78	0.311	101	0.285	33	4.604	99	4.624	98	0.025	140
1.9010	3.31	0.280	-75	0.276	104	0.256	40	4.480	101	4.504	101	0.016	121
2.0010	3.14	0.246	-71	0.242	107	0.229	48	4.293	104	4.313	104	0.007	129
2.1011	2.99	0.213	-68	0.211	111	0.206	57	4.046	108	4.055	107	0.008	-172
2.2011	2.85	0.183	-64	0.181	116	0.186	67	3.749	112	3.745	111	0.013	-175
2.3012	2.73	0.155	-58	0.154	121	0.169	78	3.415	117	3.406	116	0.012	170
2.4012	2.62	0.131	-53	0.130	127	0.157	90	3.069	123	3.052	122	0.009	166
2.5013	2.51	0.109	-46	0.109	134	0.147	103	2.725	130	2.693	129	0.006	174
2.6013	2.42	0.090	-38	0.090	141	0.140	117	2.401	138	2.352	137	0.005	-165
2.7014	2.33	0.075	-30	0.075	150	0.138	132	2.110	147	2.051	147	0.005	-140
2.8014	2.24	0.062	-20	0.062	160	0.141	150	1.855	158	1.793	158	0.005	-124
2.9015	2.17	0.051	-8	0.051	171	0.153	172	1.647	170	1.580	170	0.006	-124
3.0015	2.09	0.042	5	0.042	-174	0.181	-159	1.505	-174	1.430	-174	0.005	-131

****

*** MOSES ***

---------- May 4, 2020

SPM PENGAPON

* Draft = 1.8 Meters Trim Angle = 0.00 Deg. GMT = 0.1 Meters *
* Roll Gy. Radius = 2.6 Meters Pitch Gy. Radius = 2.6 Meters Yaw Gy. Radius = 3.6 Meters *
* Heading = 180.00 Deg. Forward Speed = 0.00 Knots Linearization Based on 1/ 20 *

****

+++ M O T I O N R E S P O N S E O P E R A T O R S +++

==========

Results are in Body System

Of Point On Body SPM At X = 0.0 Y = -0.0 Z = 2.2

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and KN Unless Specified

E N C O U N T E R		Surge /		Sway /		Heave /		Roll /		Pitch /		Yaw /	
----------		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/----------/		/----------/		/----------/		/----------/		/----------/		/----------/	
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.1001	62.80	0.997	-67	0.000	0	0.999	-1	0.000	0	0.021	-176	0.000	0
0.2001	31.40	0.993	-91	0.000	0	1.001	0	0.000	0	0.224	-58	0.000	0
0.3002	20.93	0.988	-89	0.000	0	1.003	0	0.000	0	0.400	90	0.000	0
0.4002	15.70	0.972	-87	0.000	0	1.009	0	0.000	0	0.830	90	0.000	0
0.5003	12.56	0.964	-88	0.000	0	1.029	0	0.000	0	1.198	89	0.000	0
0.6003	10.47	0.947	-88	0.000	0	1.079	-1	0.000	0	1.748	89	0.000	0
0.7004	8.97	0.929	-89	0.000	0	1.236	-5	0.000	0	2.309	88	0.000	0
0.8004	7.85	0.907	-88	0.000	0	1.271	-33	0.000	0	2.843	86	0.000	0
0.8468	7.42	0.895	-88	0.000	0	0.907	-51	0.000	0	3.073	88	0.000	0
0.9005	6.98	0.877	-88	0.000	0	0.461	-49	0.000	0	3.444	90	0.000	0
1.0005	6.28	0.841	-88	0.000	0	0.391	-4	0.000	0	4.133	90	0.000	0
1.1006	5.71	0.801	-88	0.000	0	0.444	4	0.000	0	4.742	90	0.000	0
1.2006	5.23	0.757	-87	0.000	0	0.451	7	0.000	0	5.284	90	0.000	0
1.3007	4.83	0.709	-87	0.000	0	0.437	10	0.000	0	5.751	91	0.000	0
1.4007	4.49	0.658	-86	0.000	0	0.412	13	0.000	0	6.129	91	0.000	0
1.5008	4.19	0.606	-84	0.000	0	0.382	17	0.000	0	6.405	93	0.000	0
1.6008	3.92	0.552	-82	0.000	0	0.350	22	0.000	0	6.565	94	0.000	0
1.7009	3.69	0.500	-80	0.000	0	0.319	27	0.000	0	6.614	96	0.000	0
1.8009	3.49	0.448	-78	0.000	0	0.287	32	0.000	0	6.541	98	0.000	0
1.9010	3.31	0.398	-75	0.000	0	0.256	39	0.000	0	6.372	100	0.000	0
2.0010	3.14	0.349	-72	0.000	0	0.229	47	0.000	0	6.113	104	0.000	0
2.1011	2.99	0.303	-68	0.000	0	0.206	56	0.000	0	5.766	107	0.000	0
2.2011	2.85	0.261	-64	0.000	0	0.186	66	0.000	0	5.338	111	0.000	0
2.3012	2.73	0.221	-59	0.000	0	0.170	77	0.000	0	4.845	116	0.000	0
2.4012	2.62	0.186	-53	0.000	0	0.156	89	0.000	0	4.327	122	0.000	0
2.5013	2.51	0.155	-46	0.000	0	0.146	102	0.000	0	3.827	129	0.000	0
2.6013	2.42	0.129	-38	0.000	0	0.140	116	0.000	0	3.359	137	0.000	0
2.7014	2.33	0.106	-30	0.000	0	0.138	132	0.000	0	2.933	146	0.000	0
2.8014	2.24	0.088	-20	0.000	0	0.142	150	0.000	0	2.562	157	0.000	0
2.9015	2.17	0.073	-8	0.000	0	0.155	172	0.000	0	2.257	170	0.000	0
3.0015	2.09	0.060	6	0.000	0	0.183	-158	0.000	0	2.048	-174	0.000	0

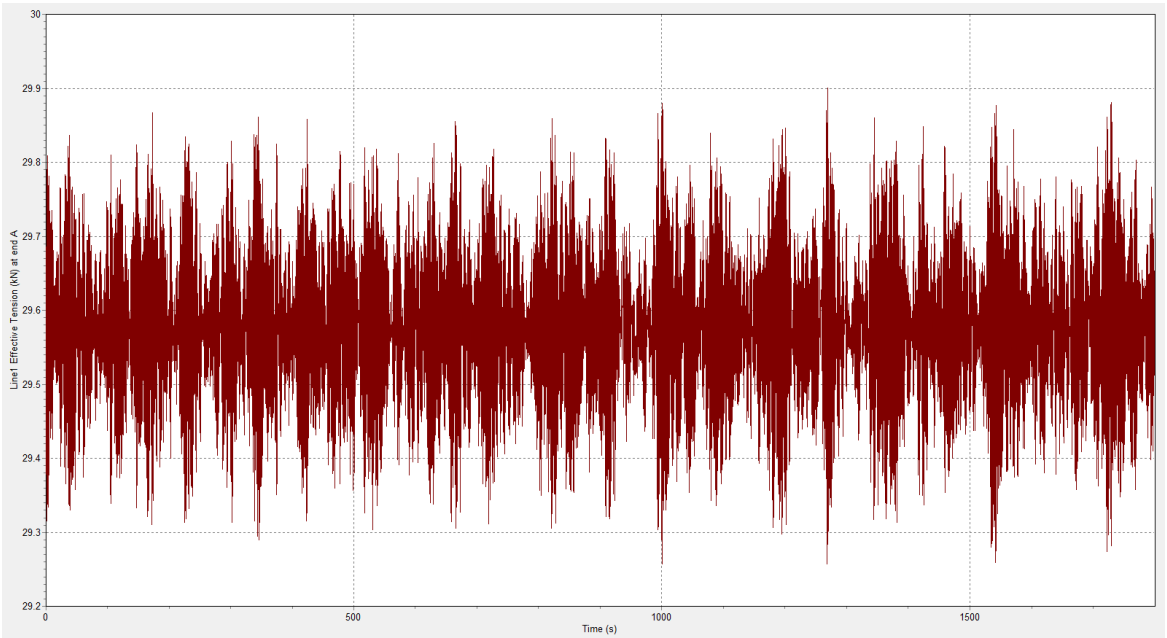
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN II

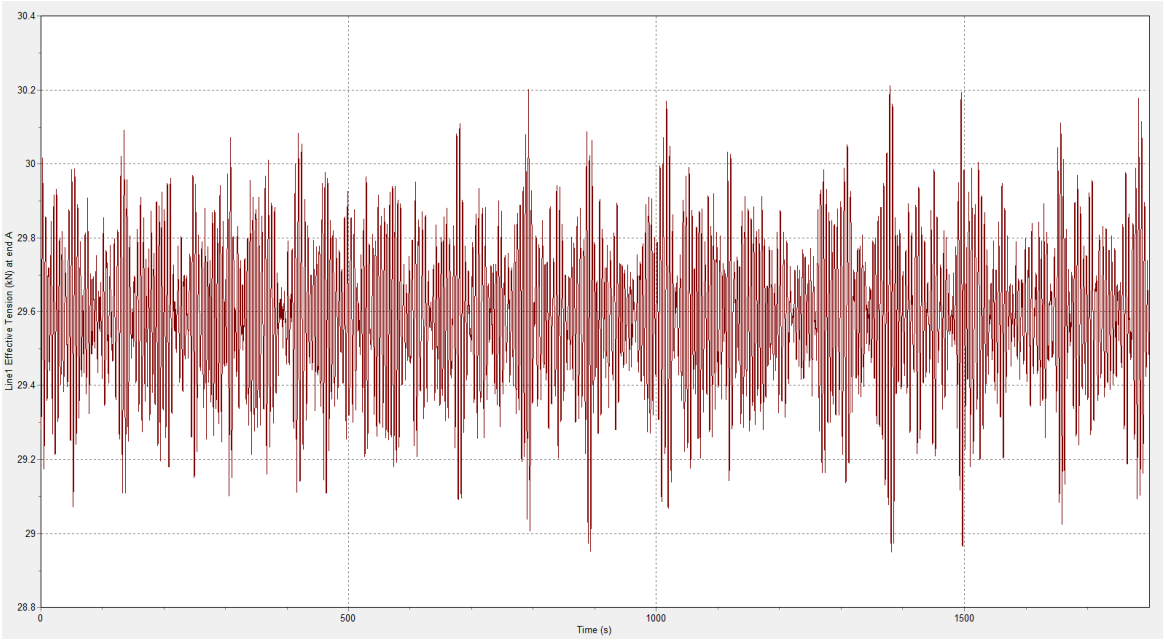
OUTPUT ORCAFLEX

Grafik Seri Waktu *Effective Tension End A Anchor Chain 1* Pada Konfigurasi Asimetris

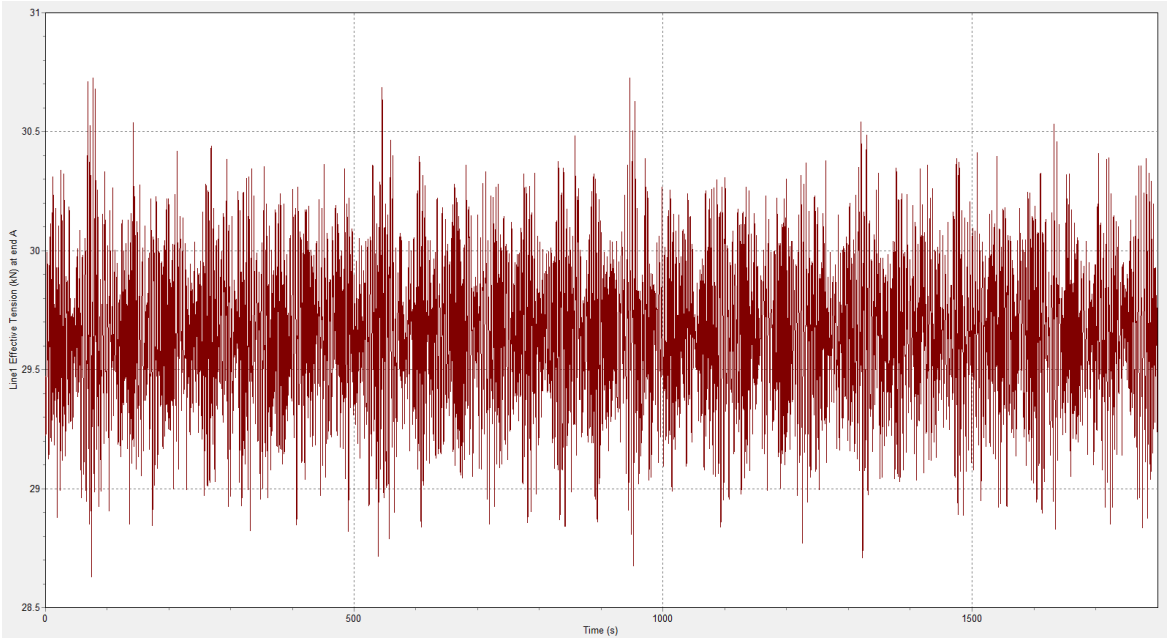
Case 1



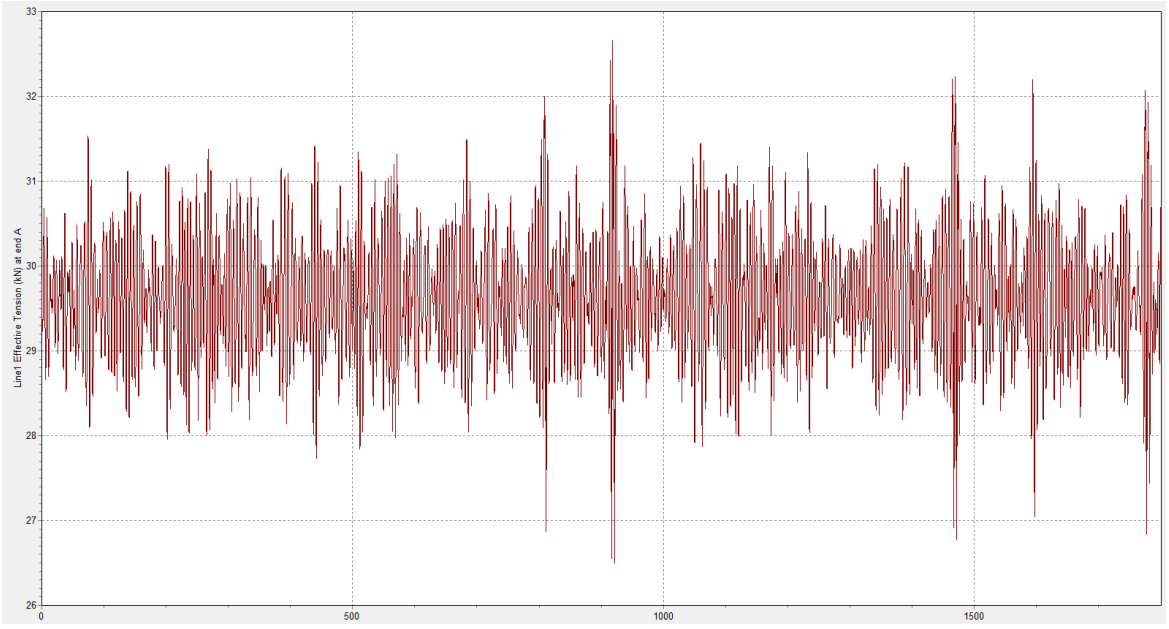
Case 2



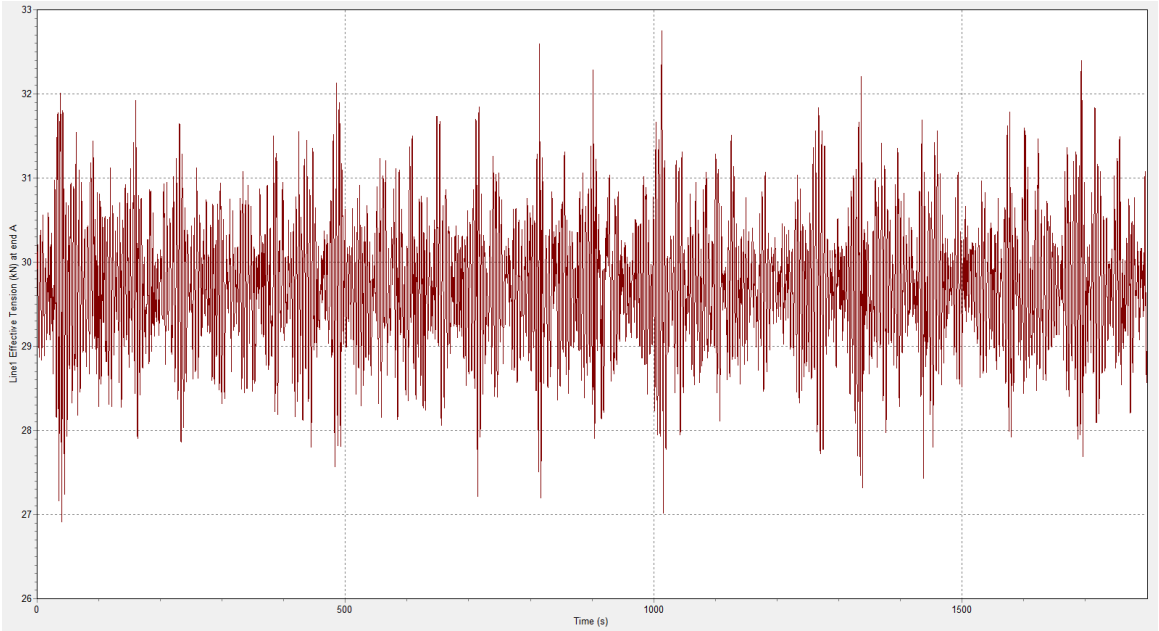
Case 3


31
30.5
30
29.5
29
28.5
Line1 Effective Tension (kN) at end A
0
500
1000
1500
Time (s)

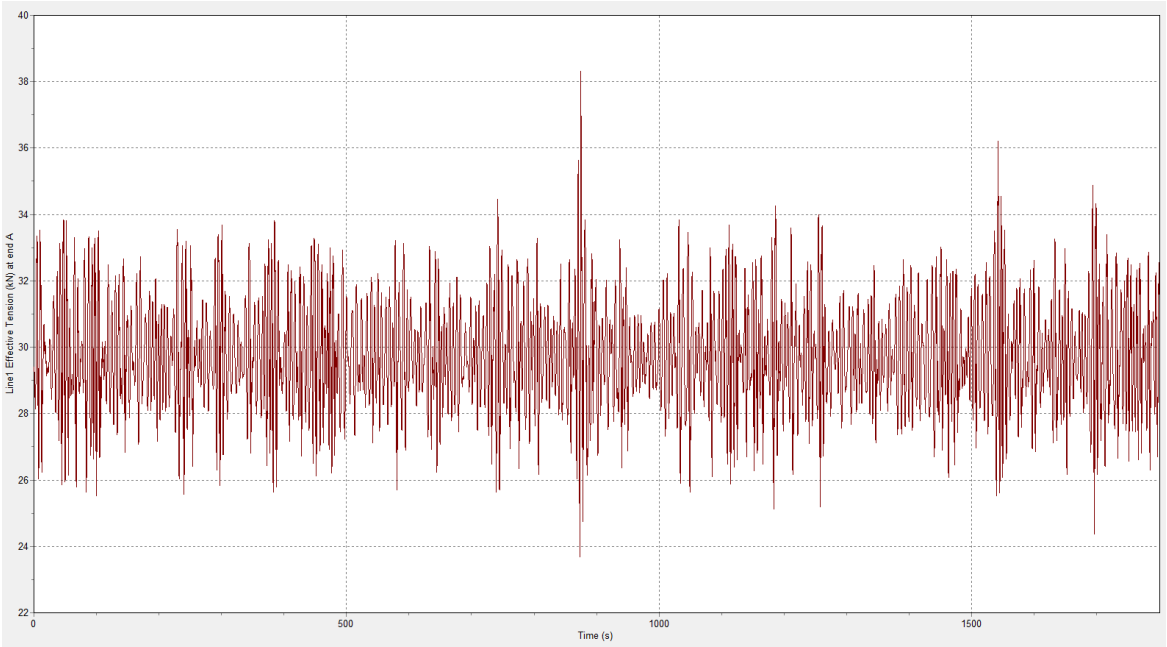
Case 4


33
32
31
30
29
28
27
26
Line1 Effective Tension (kN) at end A
0
500
1000
1500

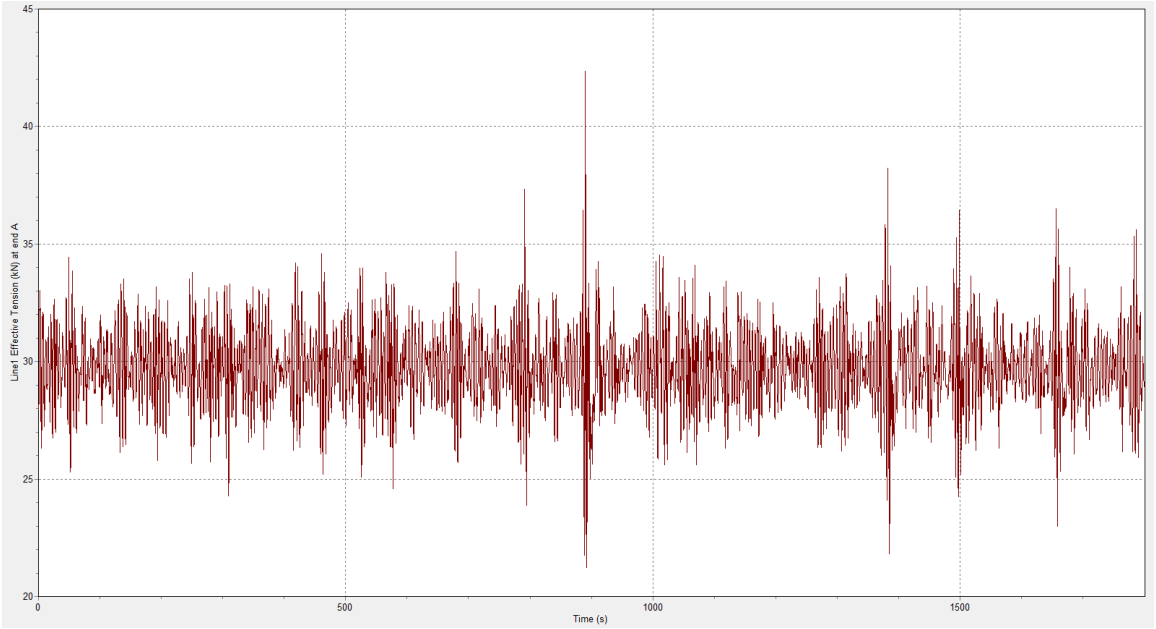
Case 5


Line1 Effective Tension (kN) at end A
Time (s)
33
32
31
30
29
28
27
26
0
500
1000
1500

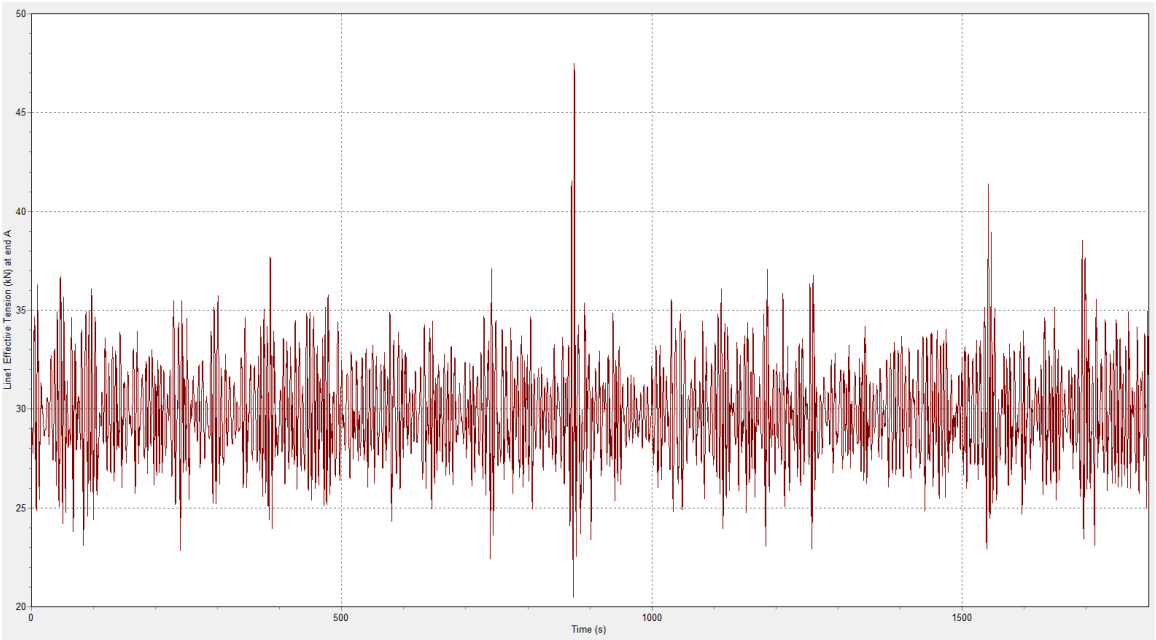
Case 6


Line1 Effective Tension (kN) at end A
Time (s)
40
38
36
34
32
30
28
26
24
22
0
500
1000
1500

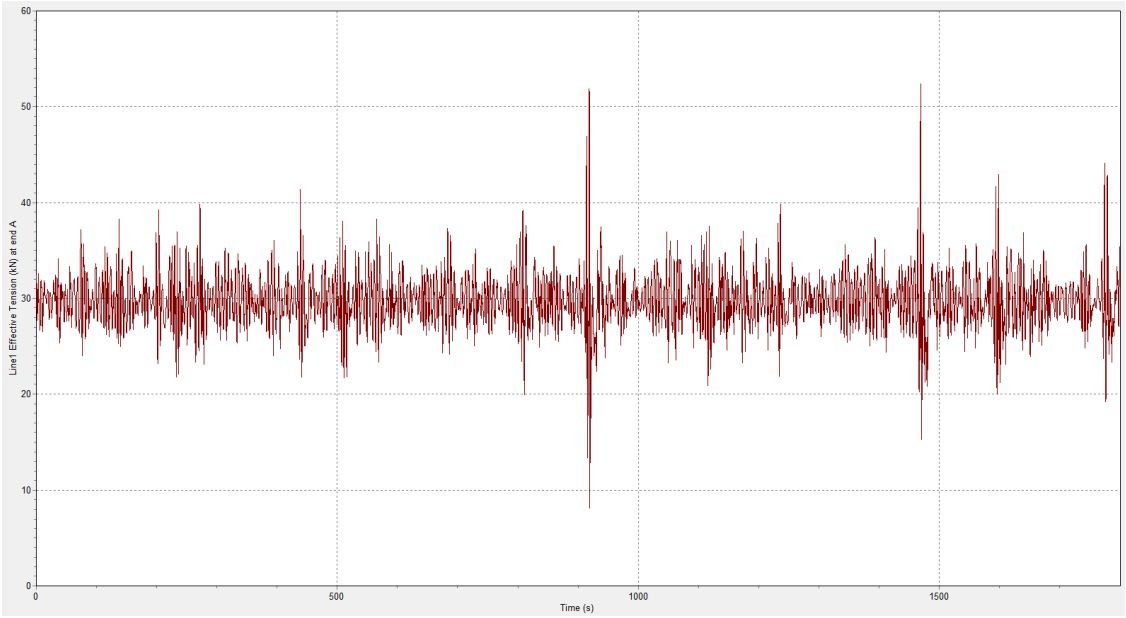
Case 7


Line1 Effective Tension (kN) at end A
45
40
35
30
25
20
0
500
1000
1500
Time (s)

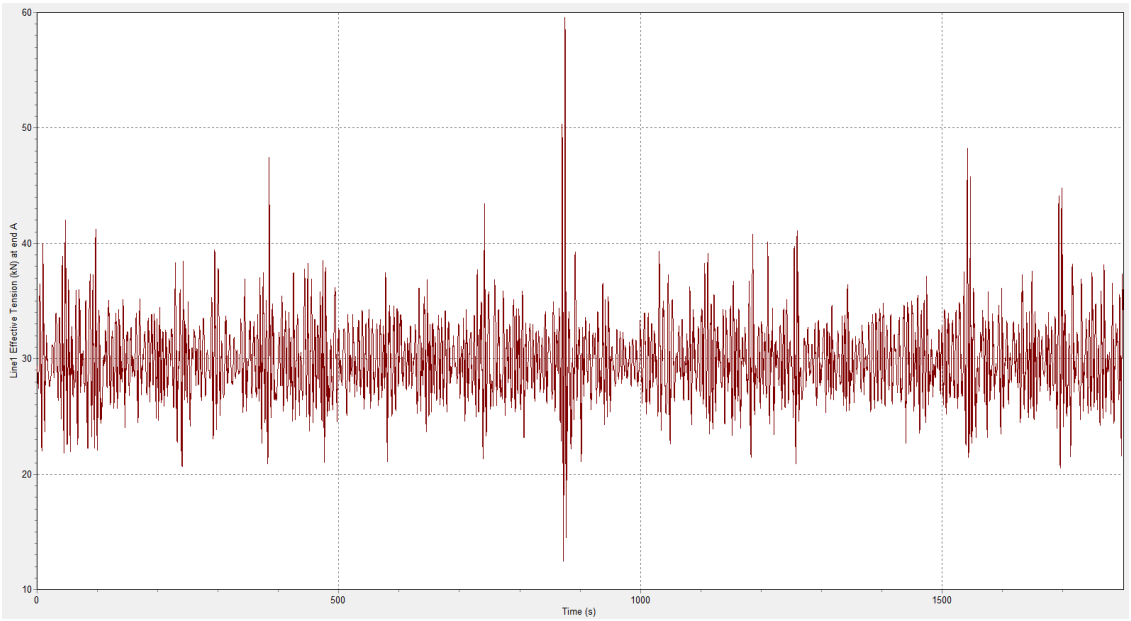
Case 8


Line1 Effective Tension (kN) at end A
50
45
40
35
30
25
20
0
500
1000
1500
Time (s)

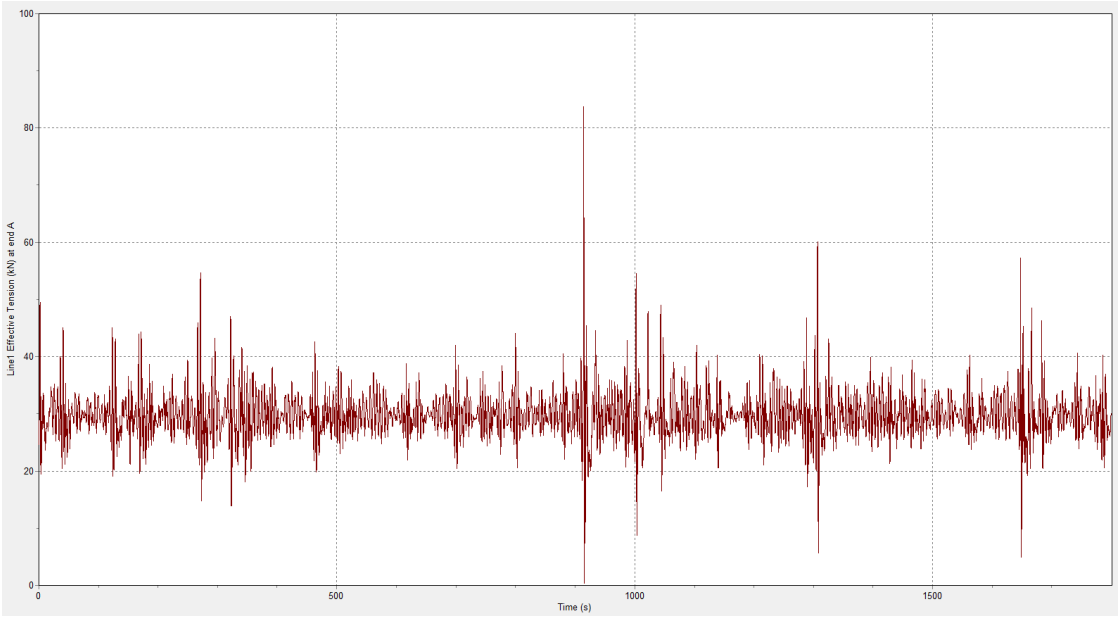
Case 9



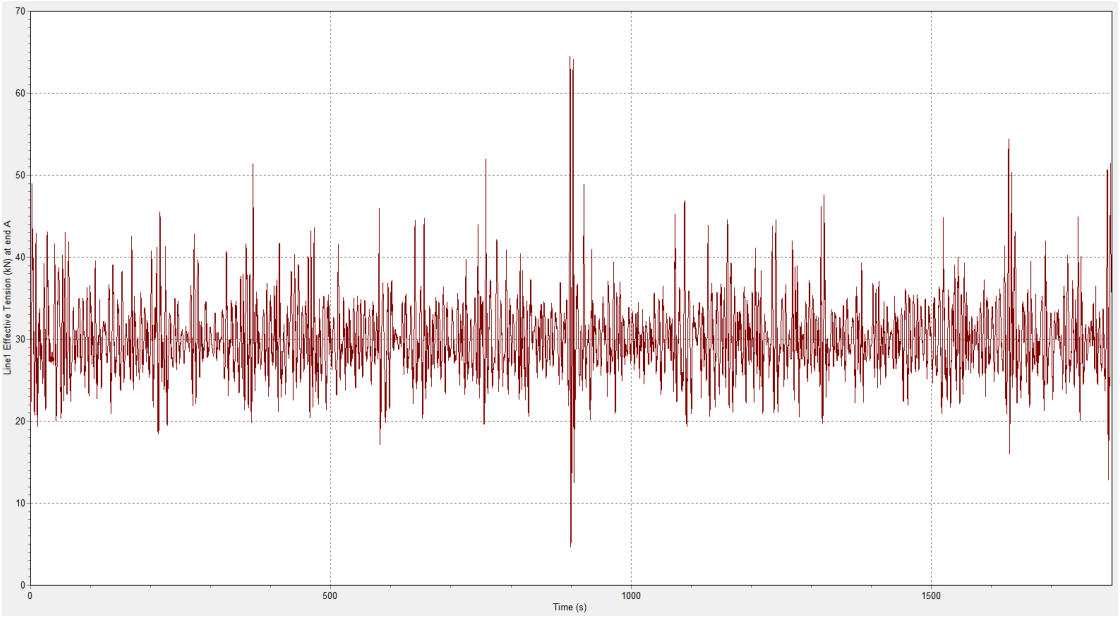
Case 10



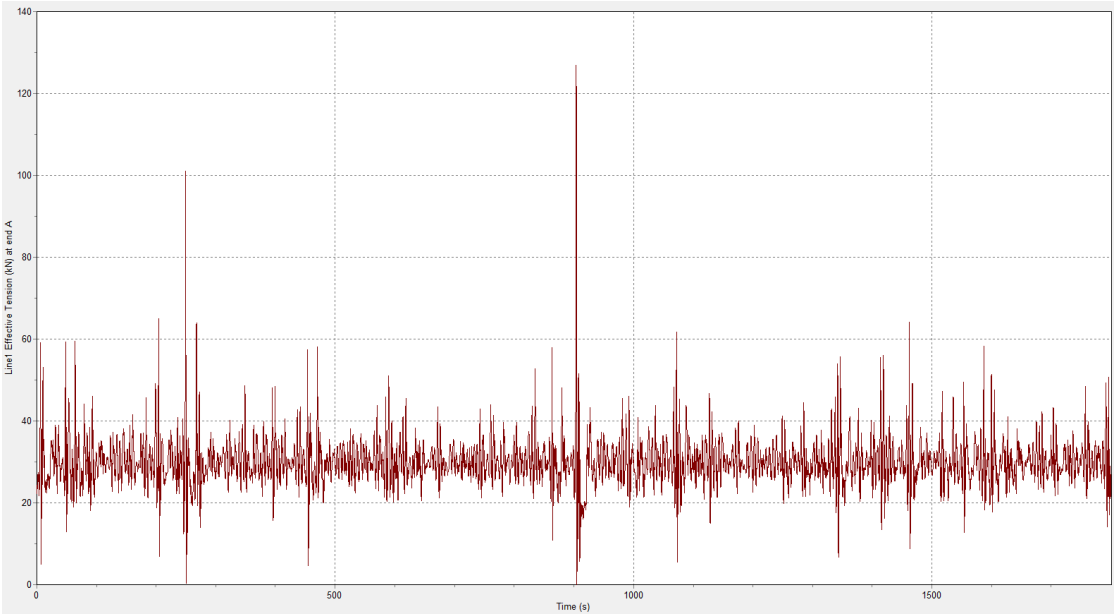
Case 11



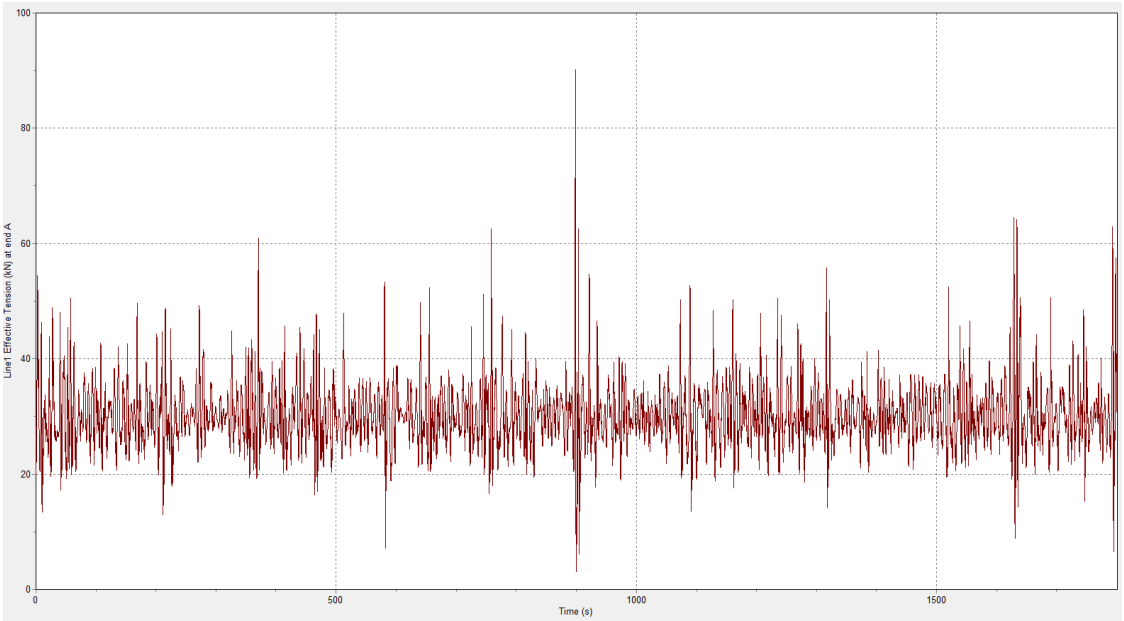
Case 12



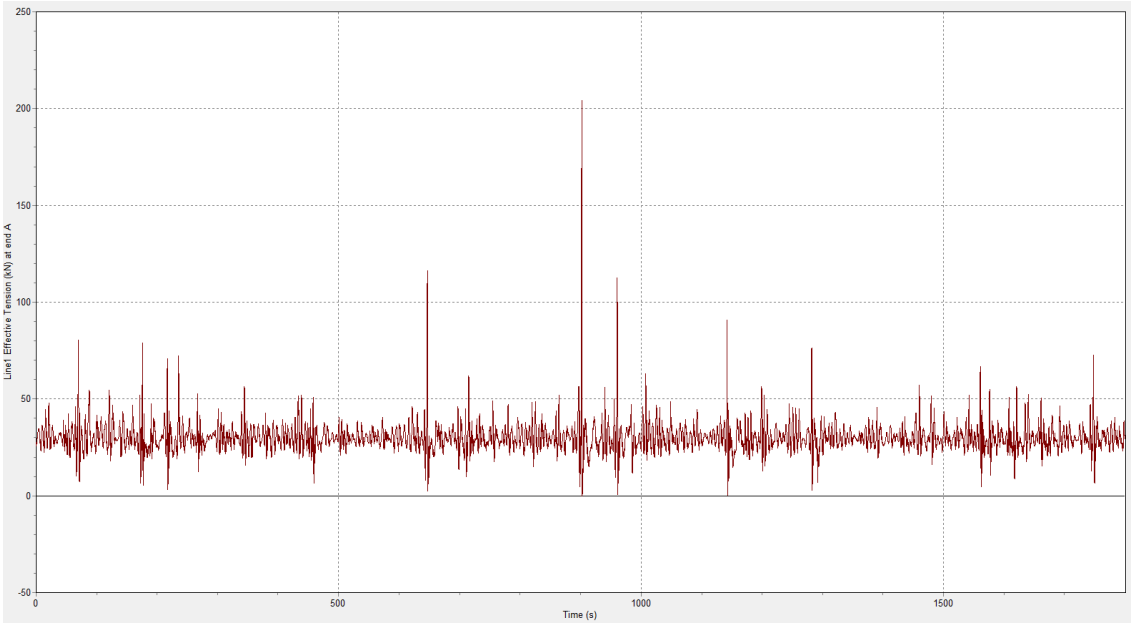
Case 13



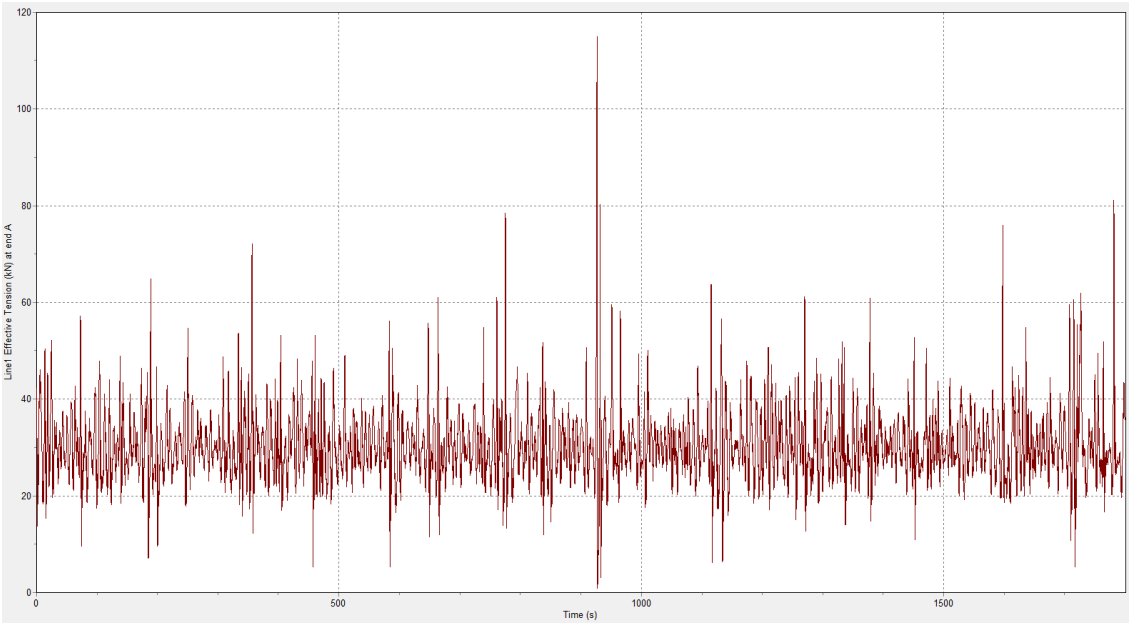
Case 14



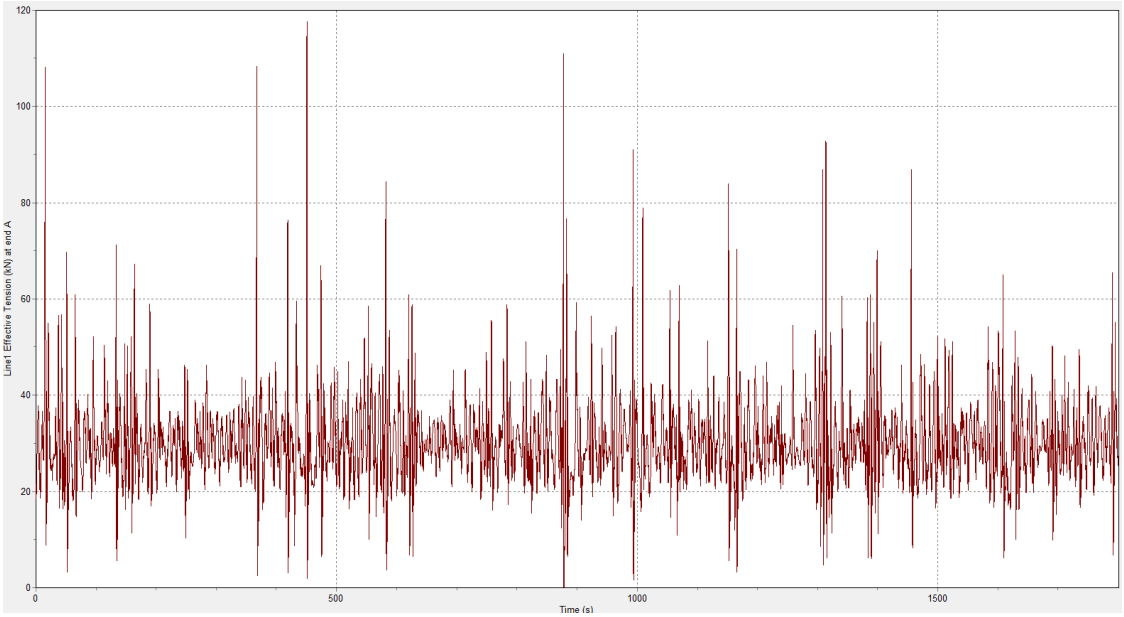
Case 15



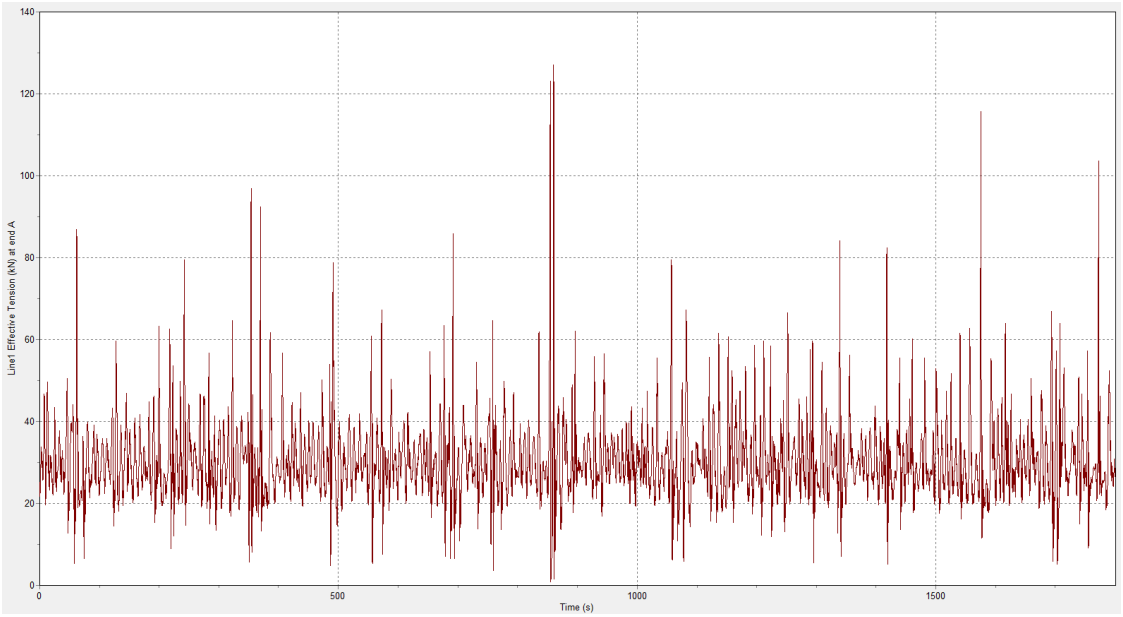
Case 16



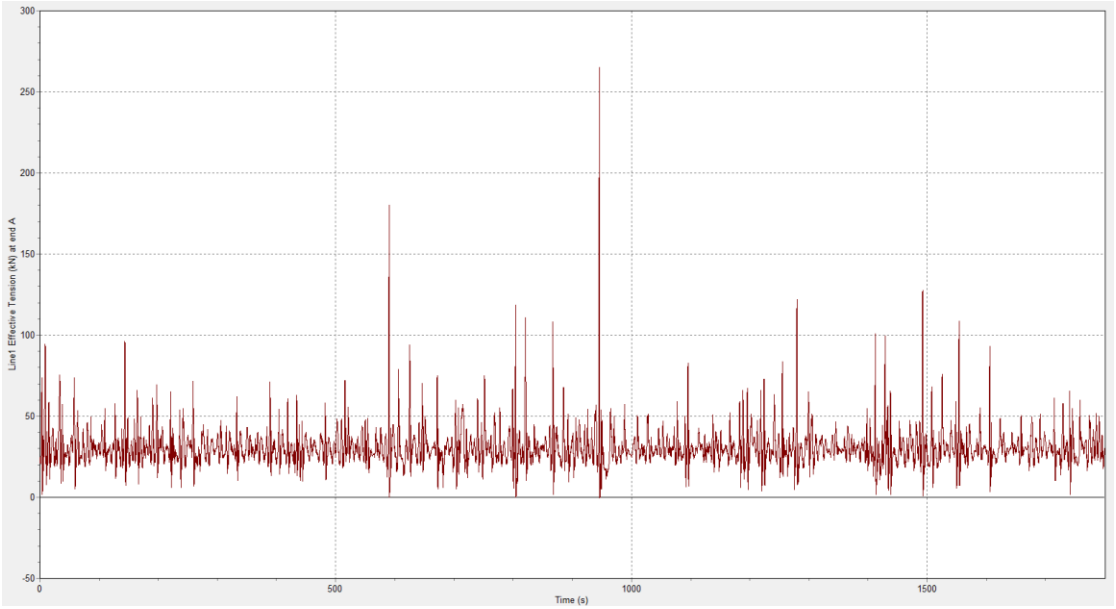
Case 17



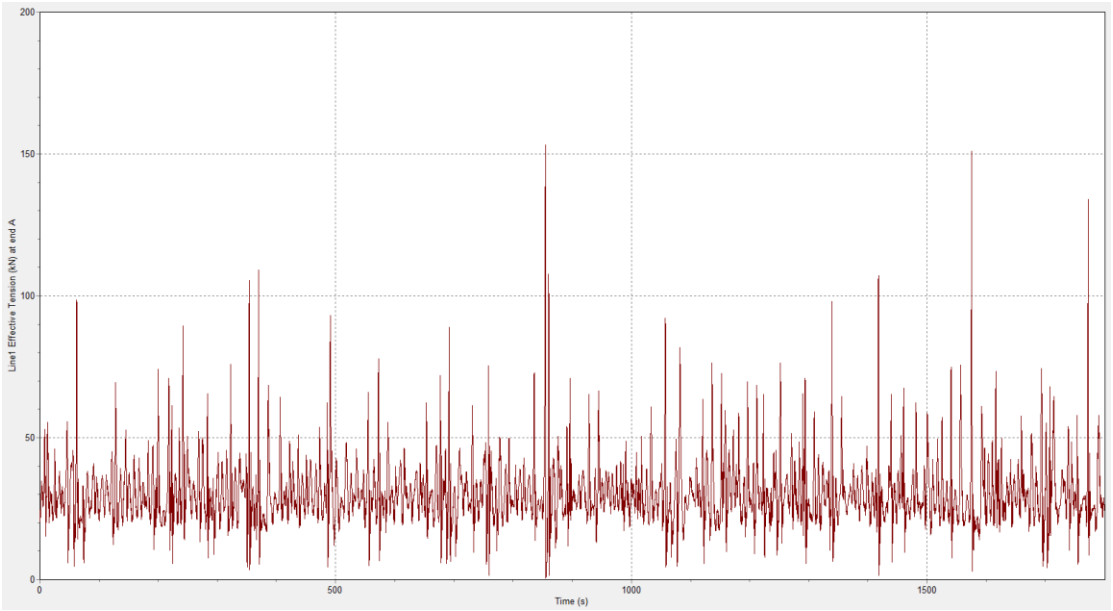
Case 18



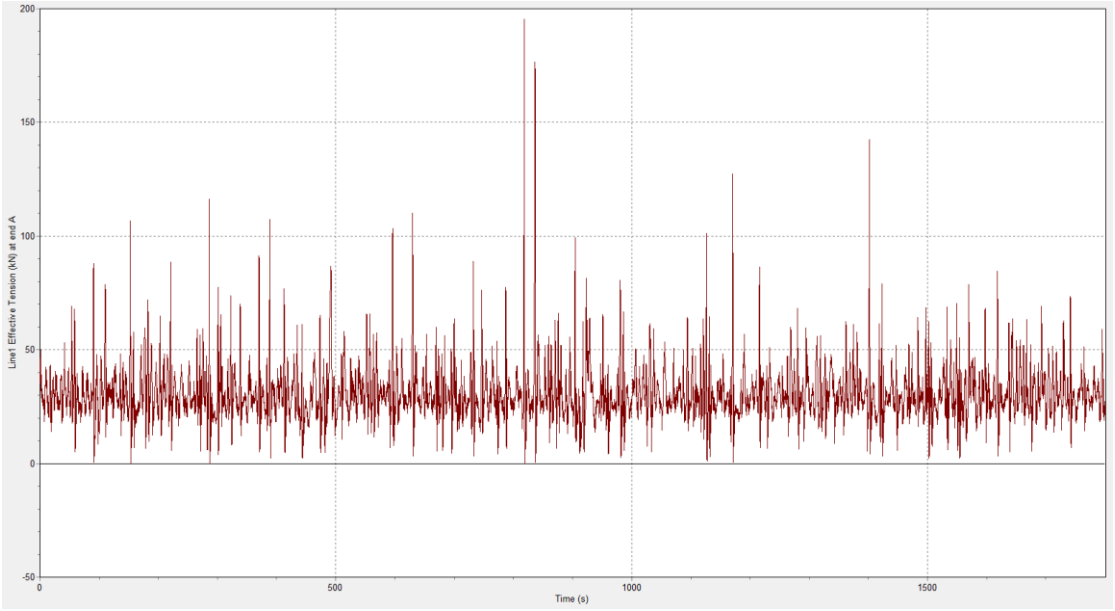
Case 19



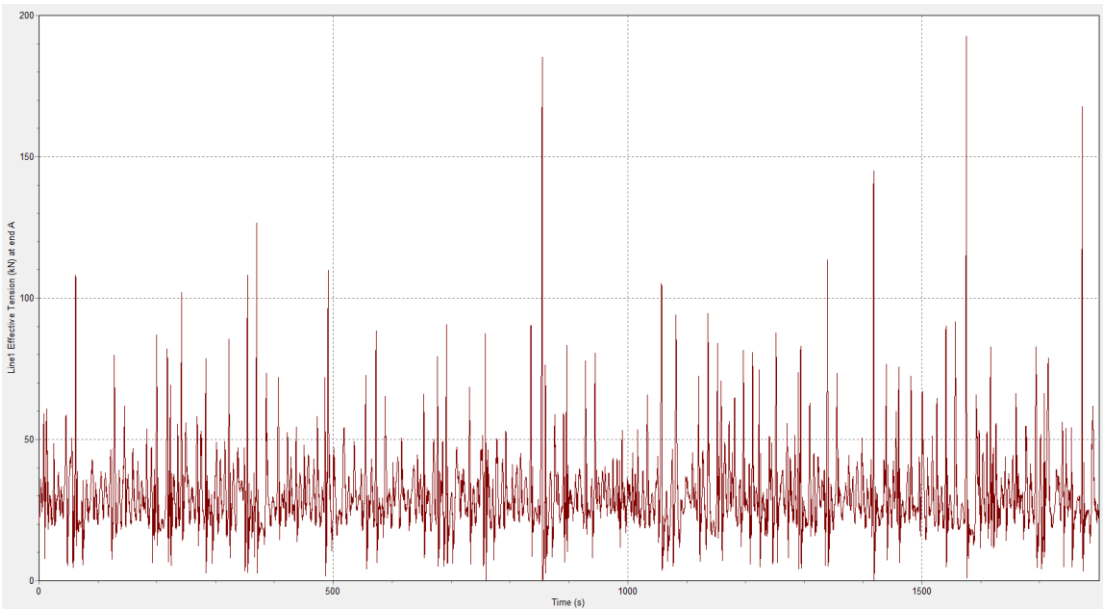
Case 20



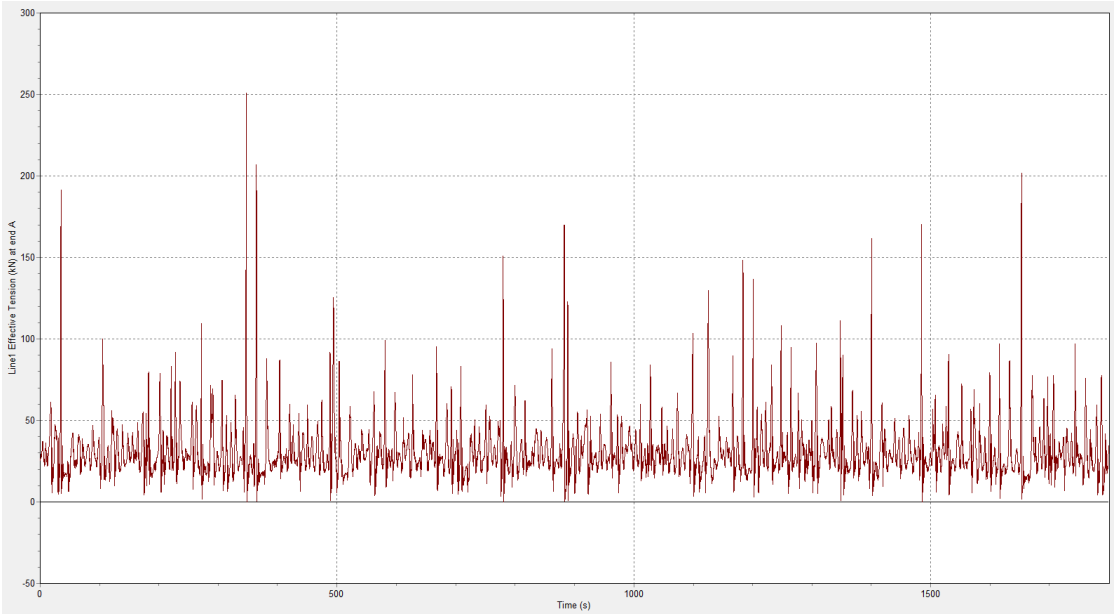
Case 21



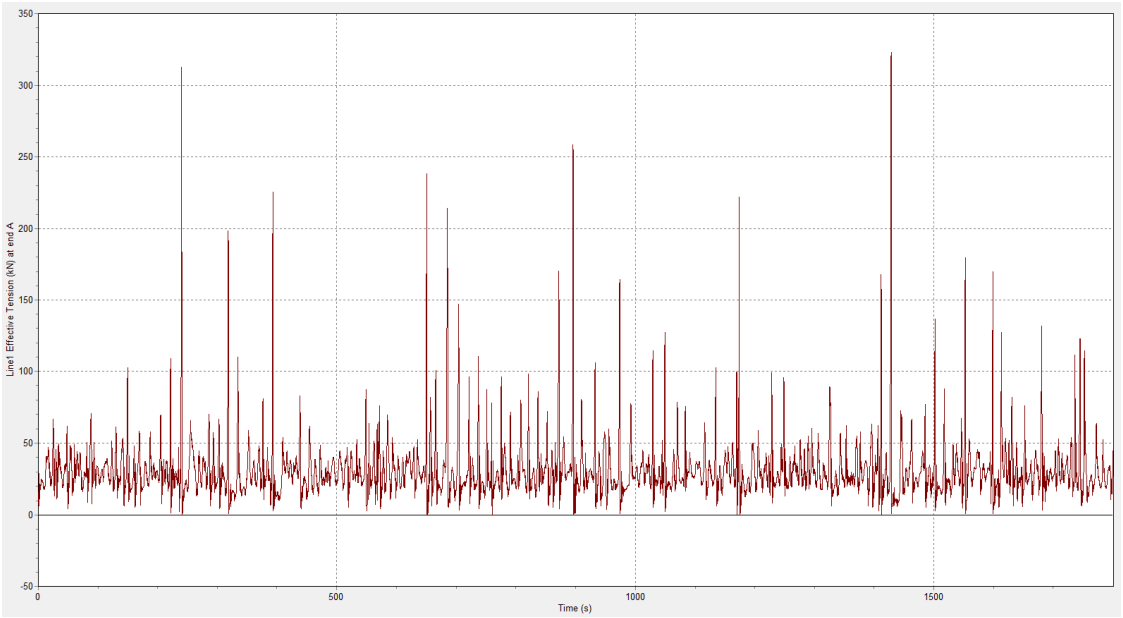
Case 22



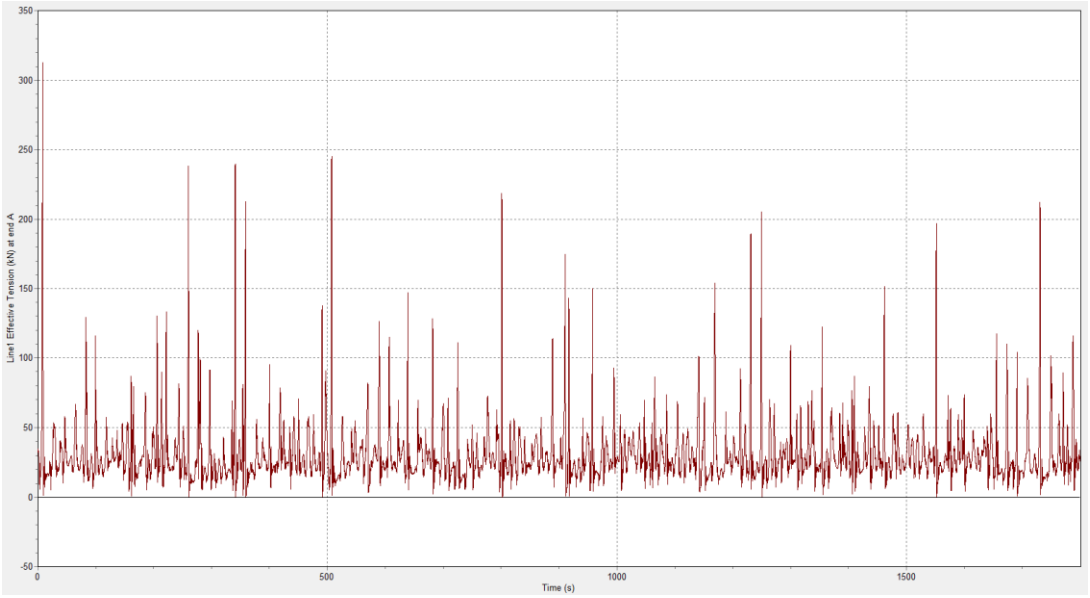
Case 23



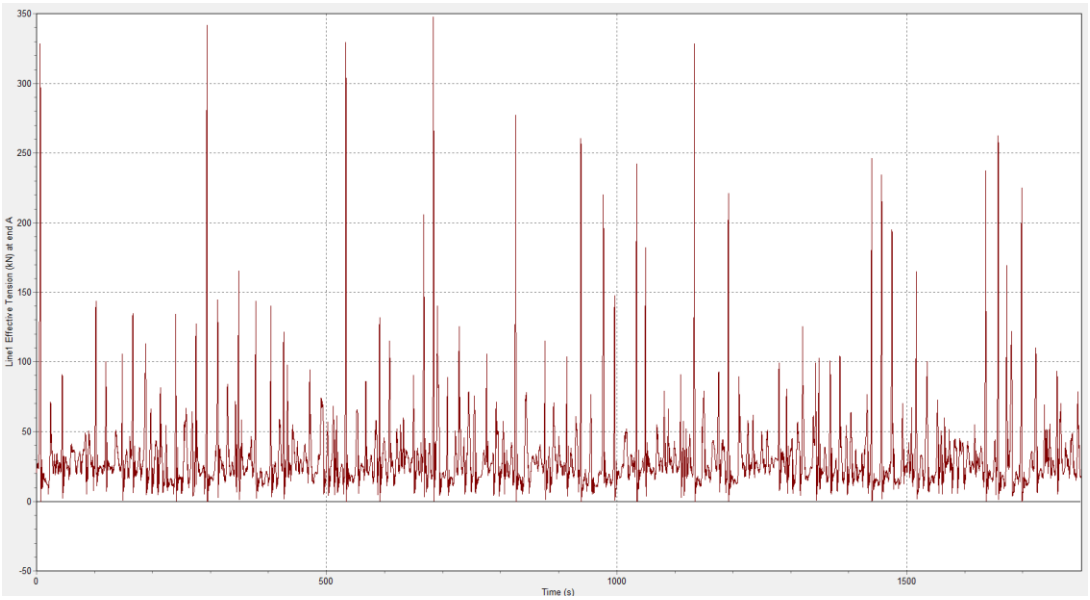
Case 24



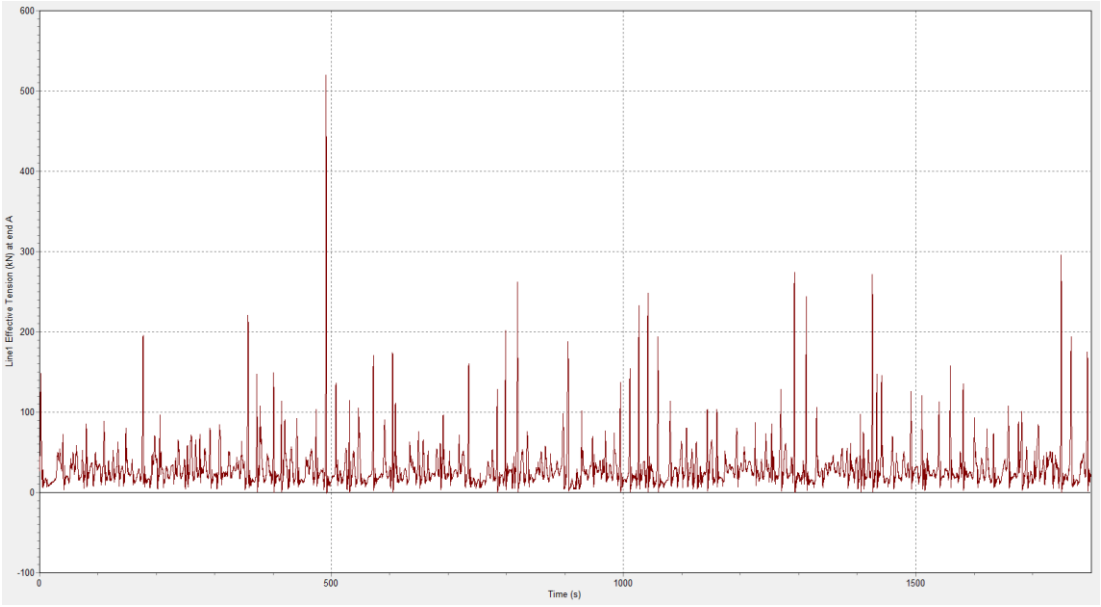
Case 25



Case 26

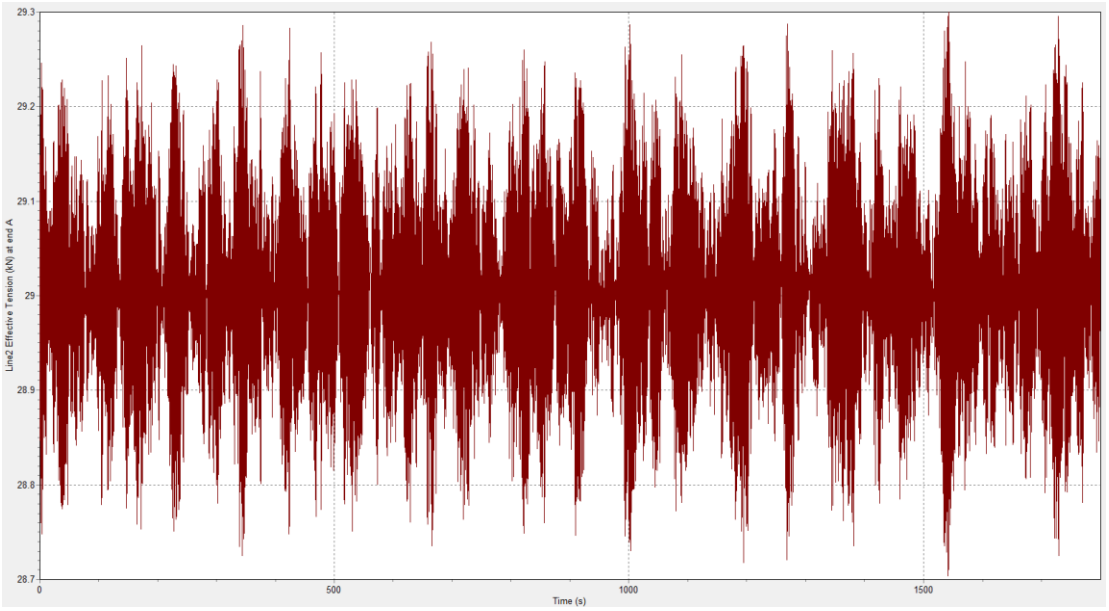


Case 27

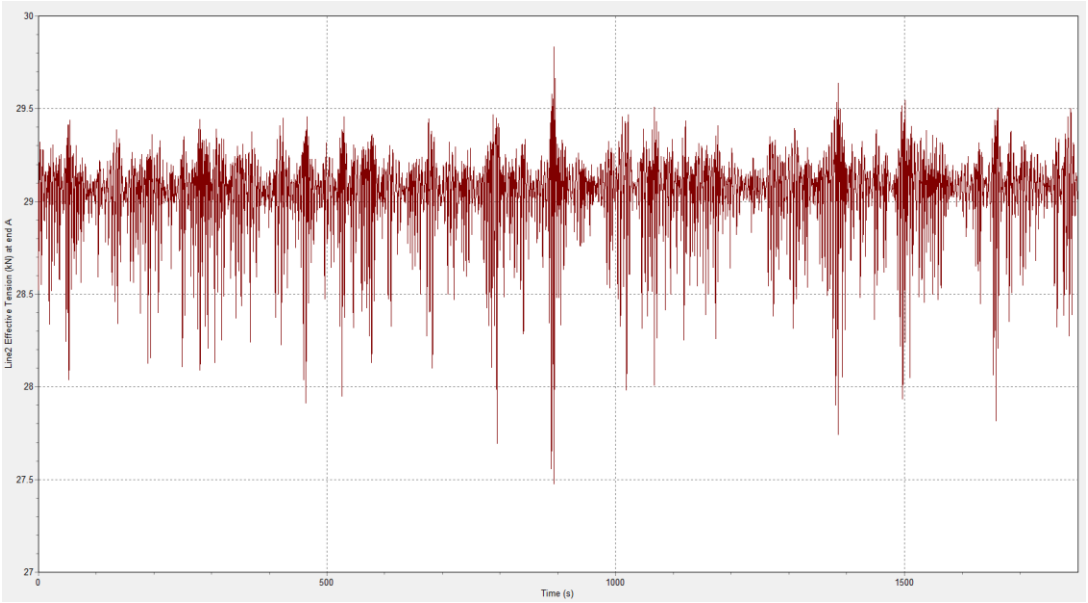


Grafik Seri Waktu *Effective Tension End A Anchor Chain 2* Pada Konfigurasi Asimetris

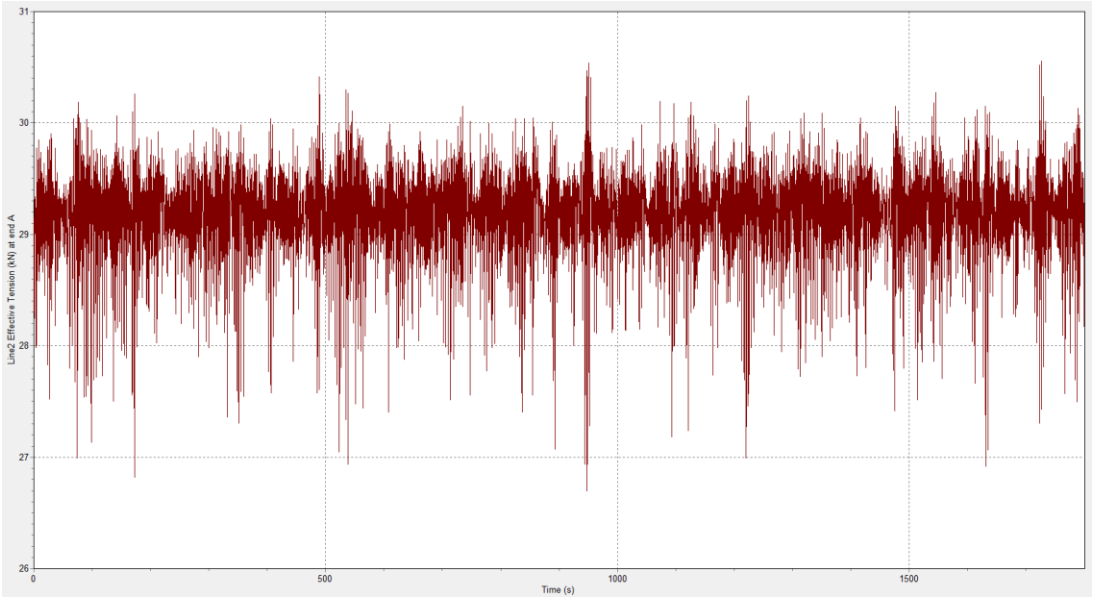
Case 1



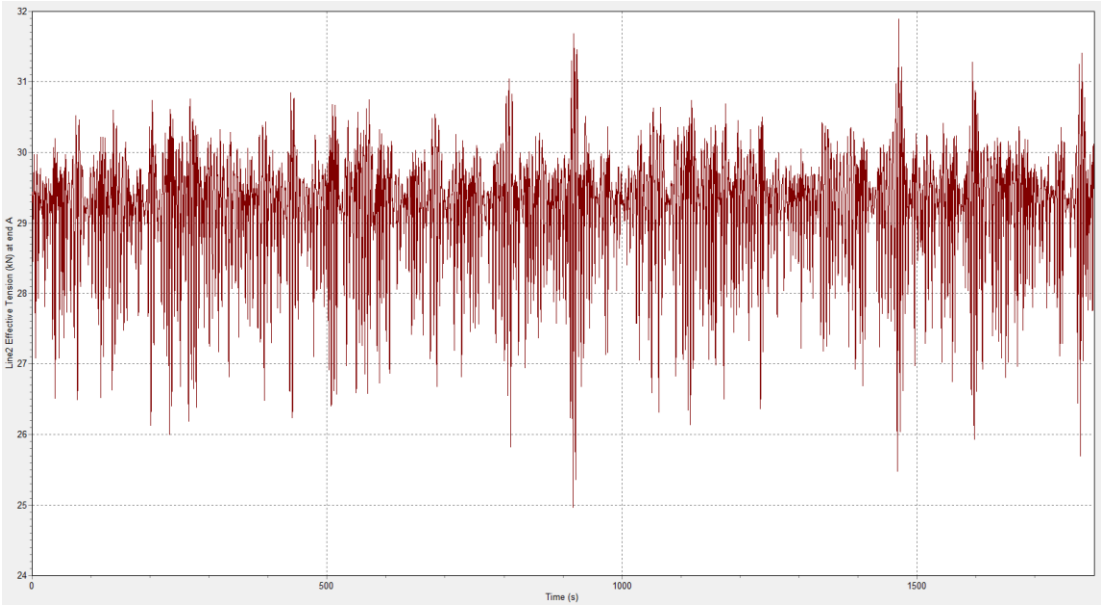
Case 2


Line2 Effective Tension (kN) at end A
30
29.5
29
28.5
28
27.5
27
0
500
1000
1500
Time (s)

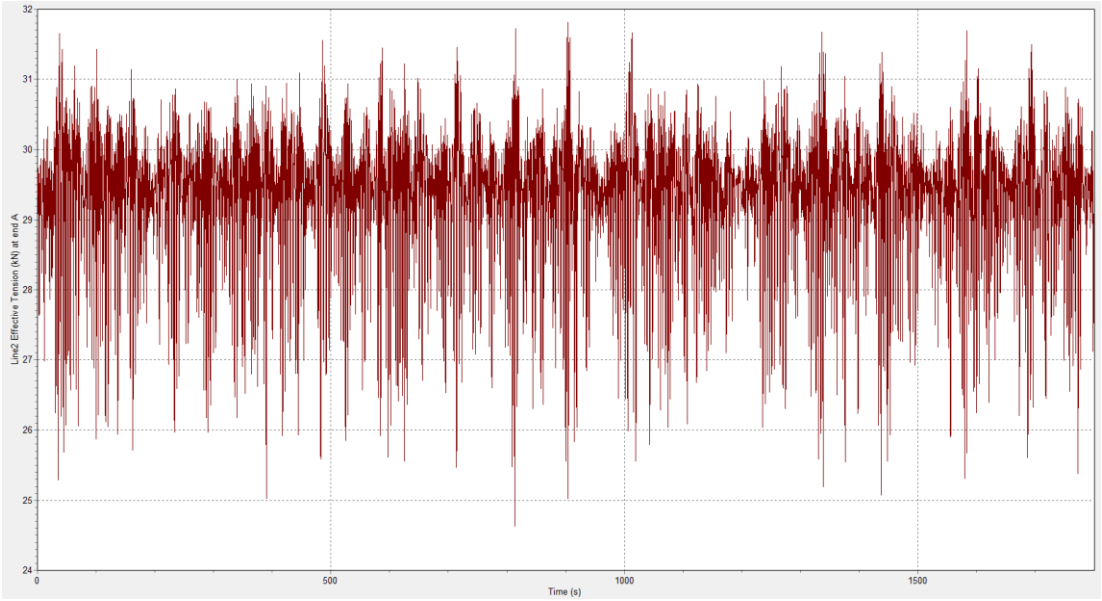
Case 3


Line2 Effective Tension (kN) at end A
31
30
29
28
27
26
0
500
1000
1500
Time (s)

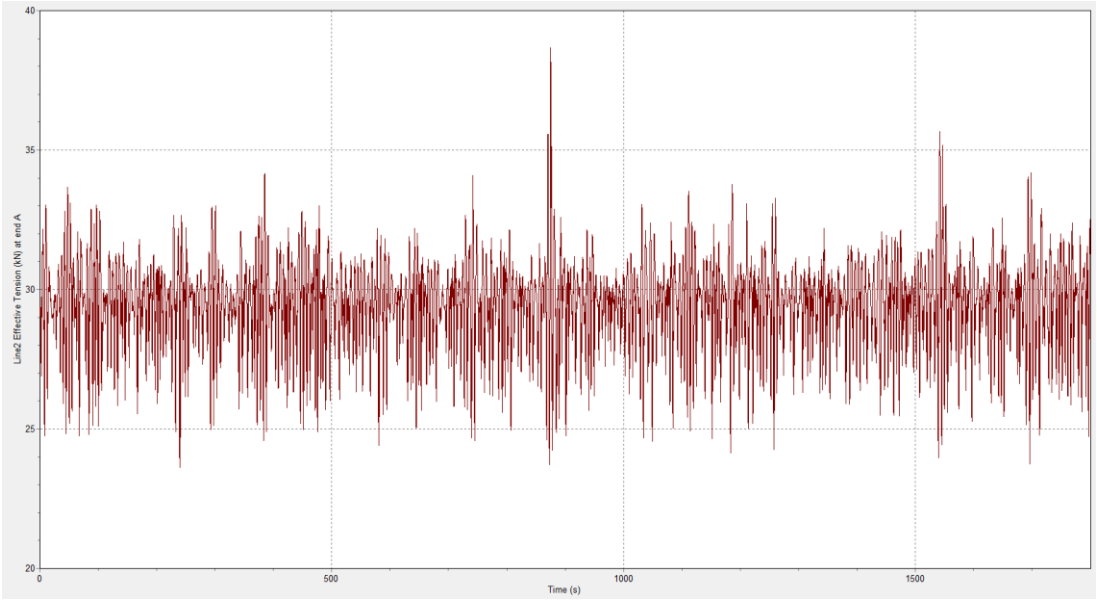
Case 4


Line2 Effective Tension (kN) at end A
Time (s)
32
31
30
29
28
27
26
25
24
0
500
1000
1500

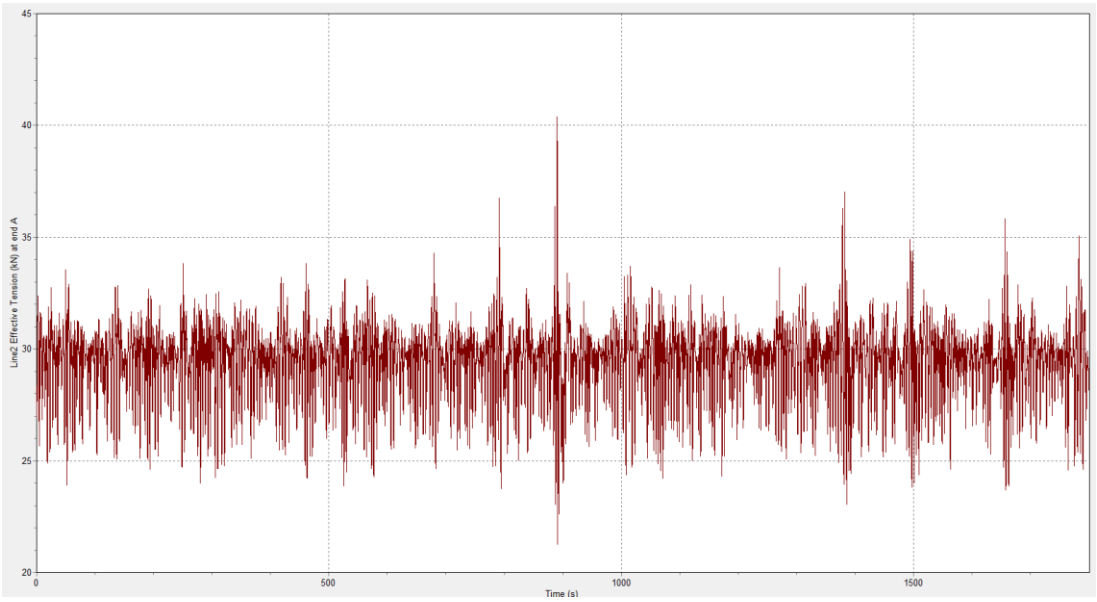
Case 5


Line2 Effective Tension (kN) at end A
Time (s)
32
31
30
29
28
27
26
25
24
0
500
1000
1500

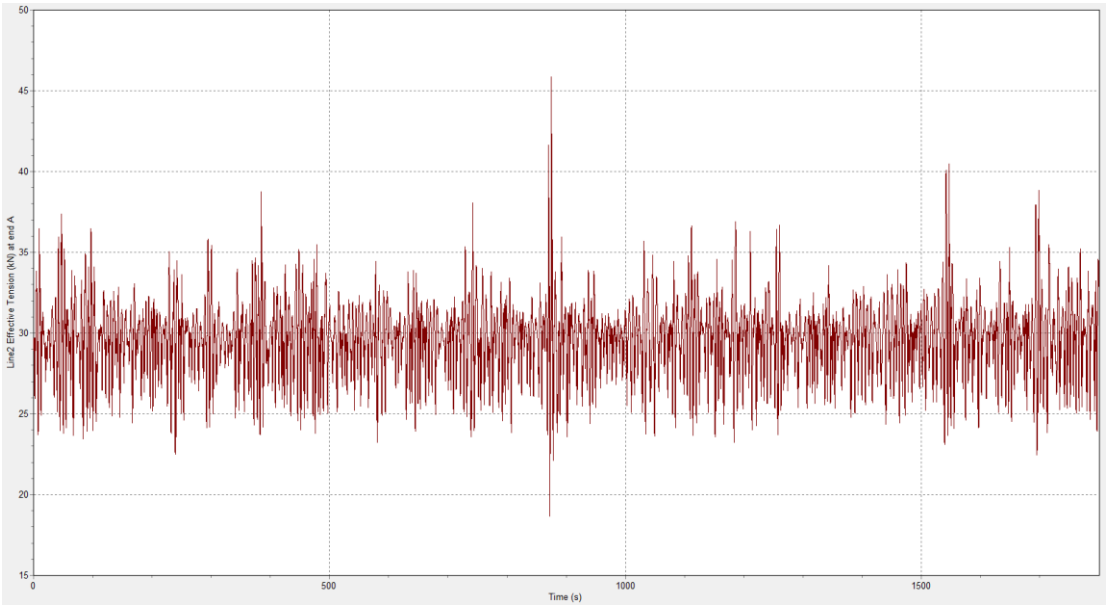
Case 6


Line2 Effective Tension (kN) at end A
40
35
30
25
20
0
500
1000
1500
Time (s)

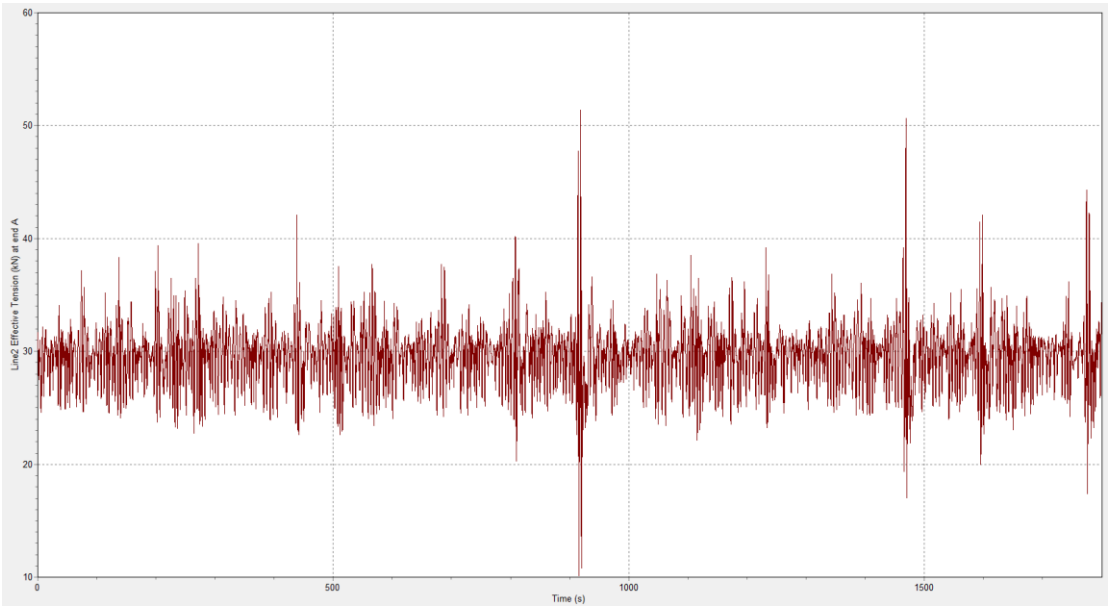
Case 7


Line2 Effective Tension (kN) at end A
45
40
35
30
25
20
0
500
1000
1500
Time (s)

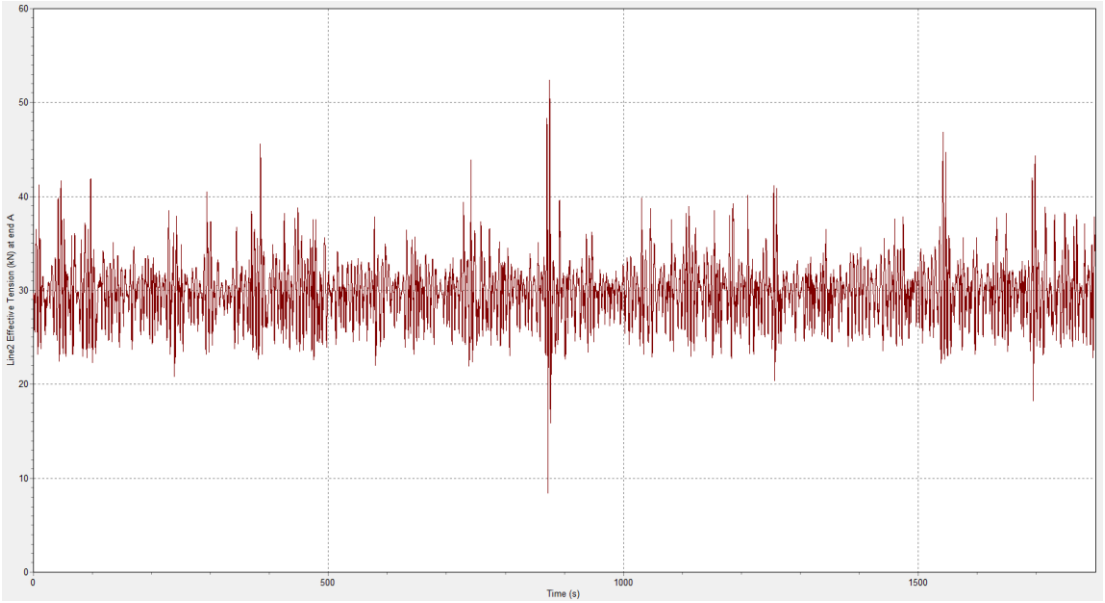
Case 8


Line2 Effective Tension (kN) at end A
Time (s)
50
45
40
35
30
25
20
15
0
500
1000
1500

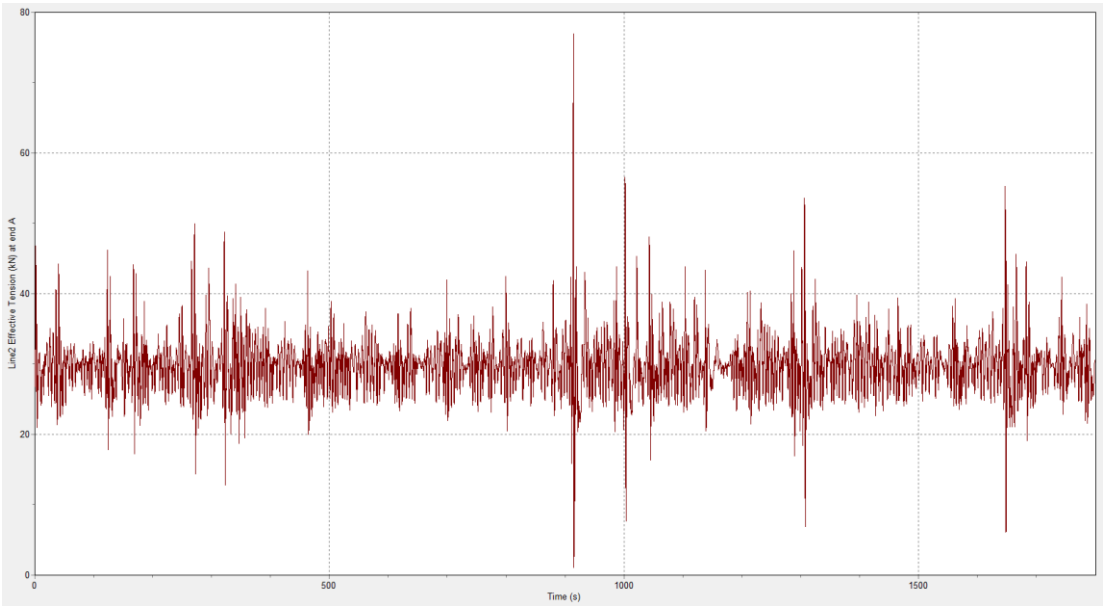
Case 9


Line2 Effective Tension (kN) at end A
Time (s)
60
50
40
30
20
10
0
500
1000
1500

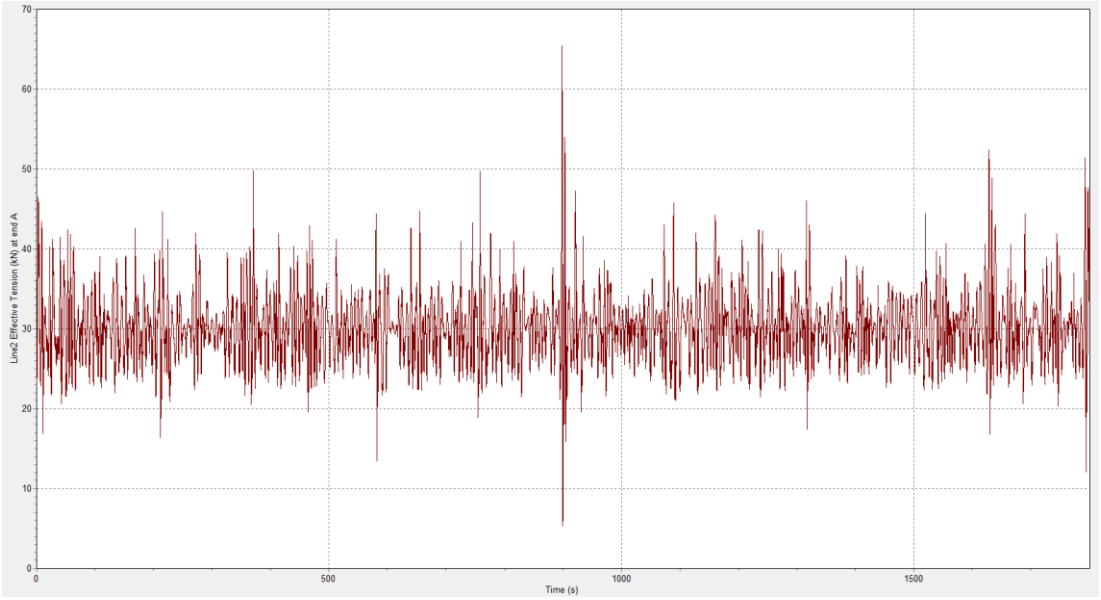
Case 10



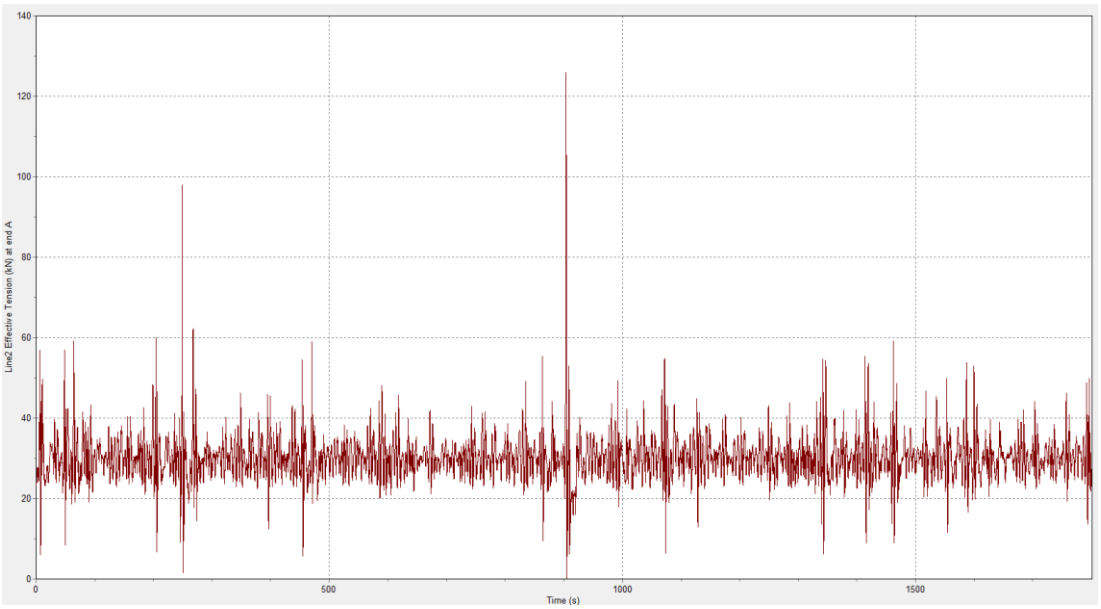
Case 11



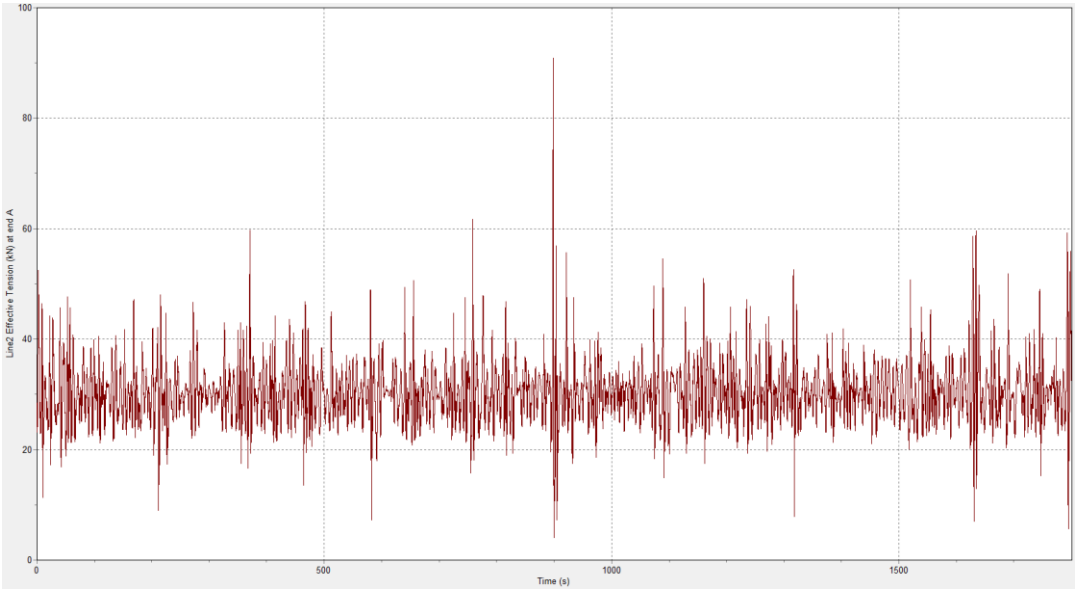
Case 12



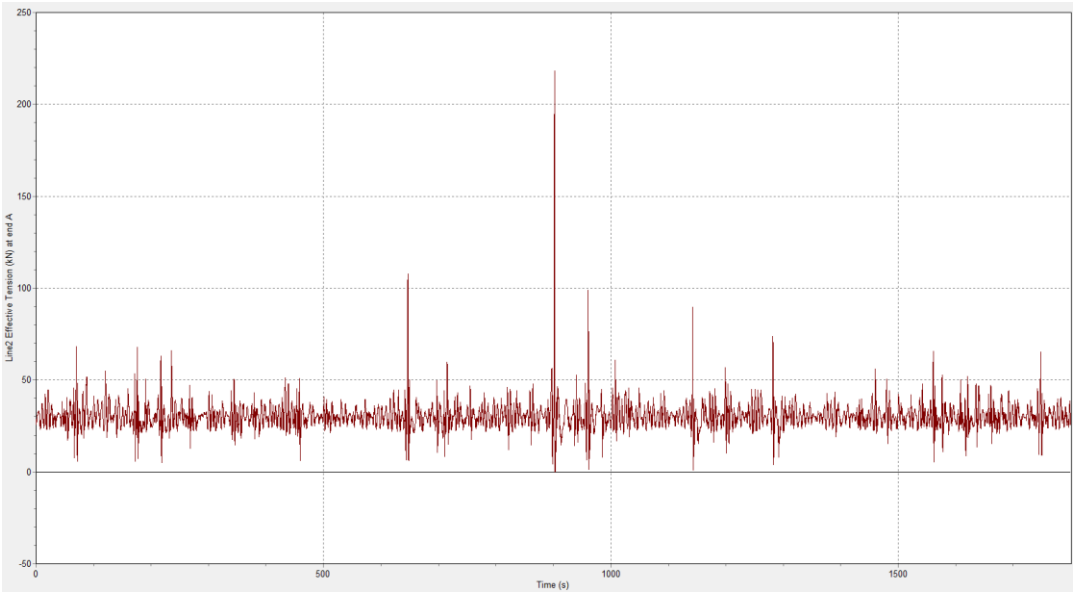
Case 13



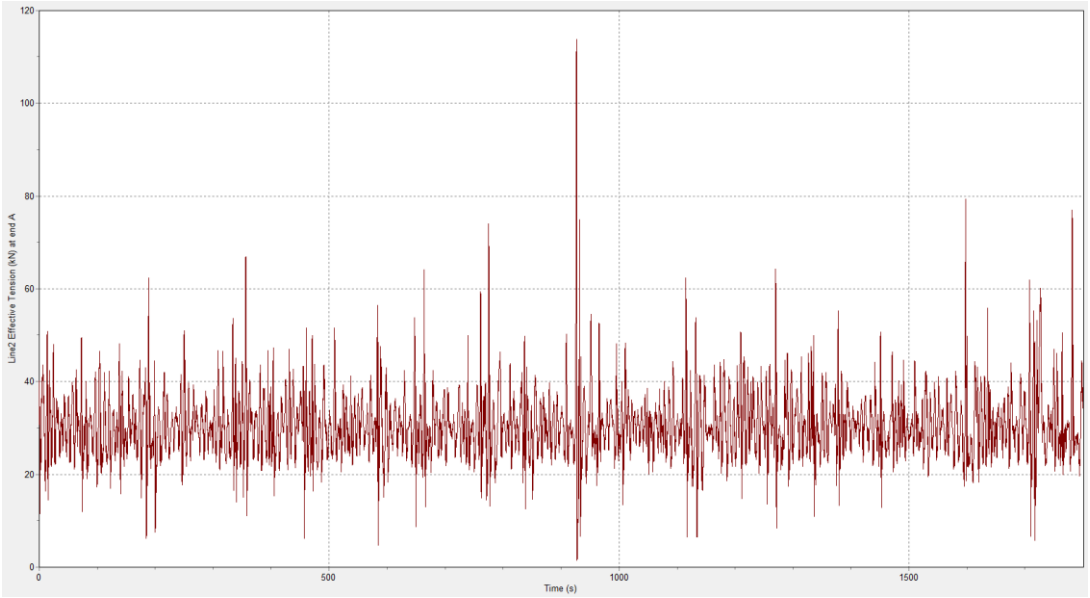
Case 14



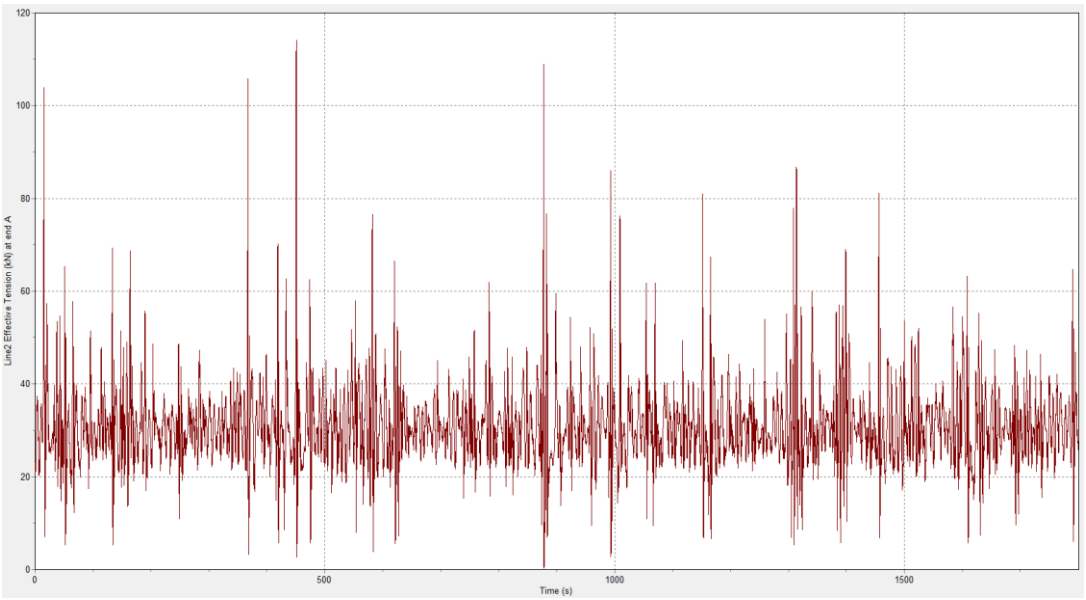
Case 15



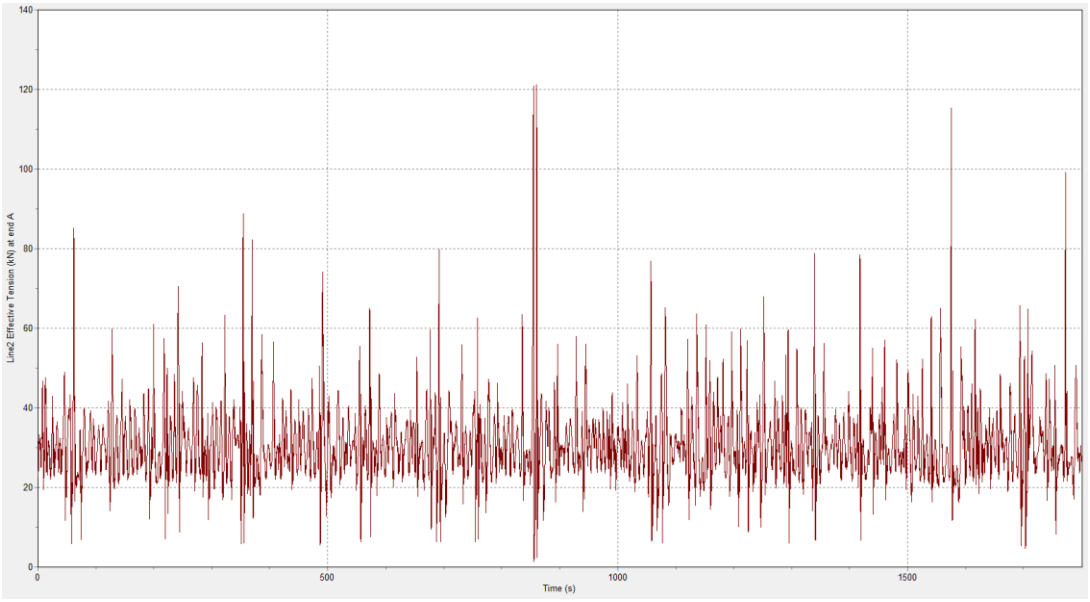
Case 16



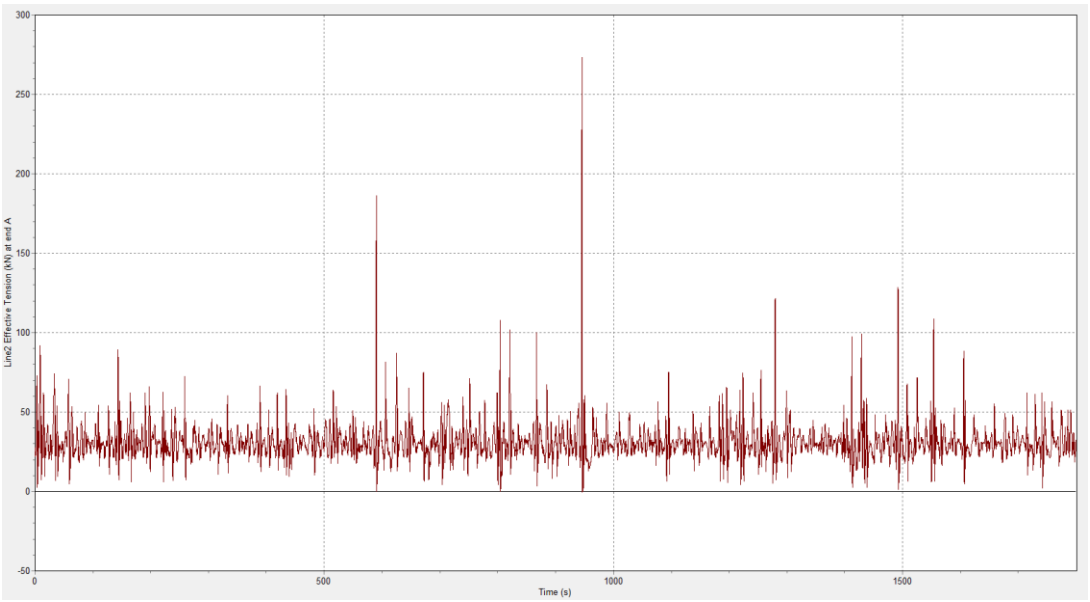
Case 17



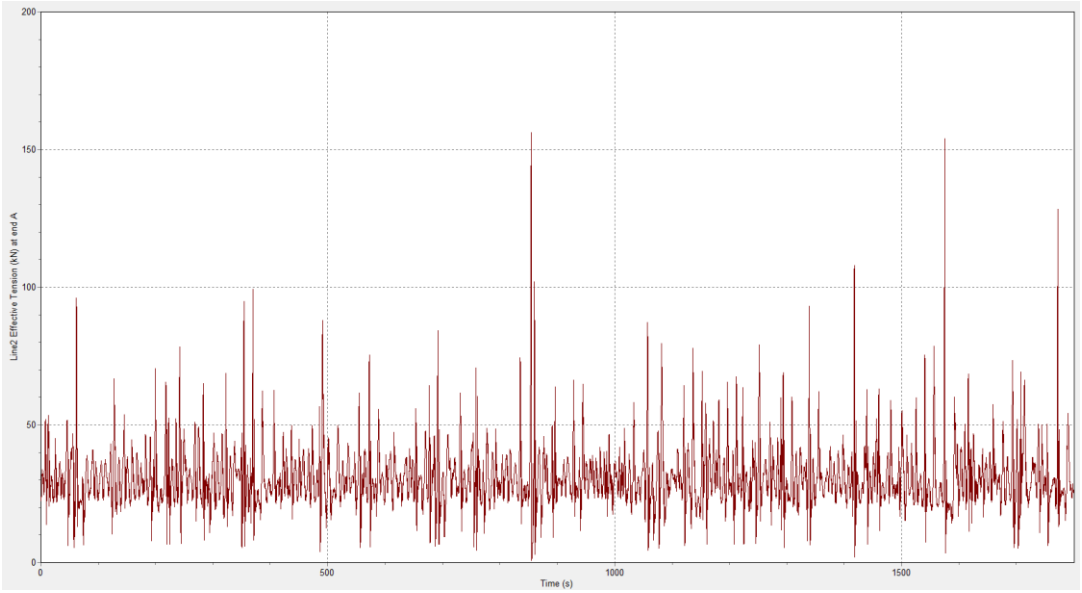
Case 18



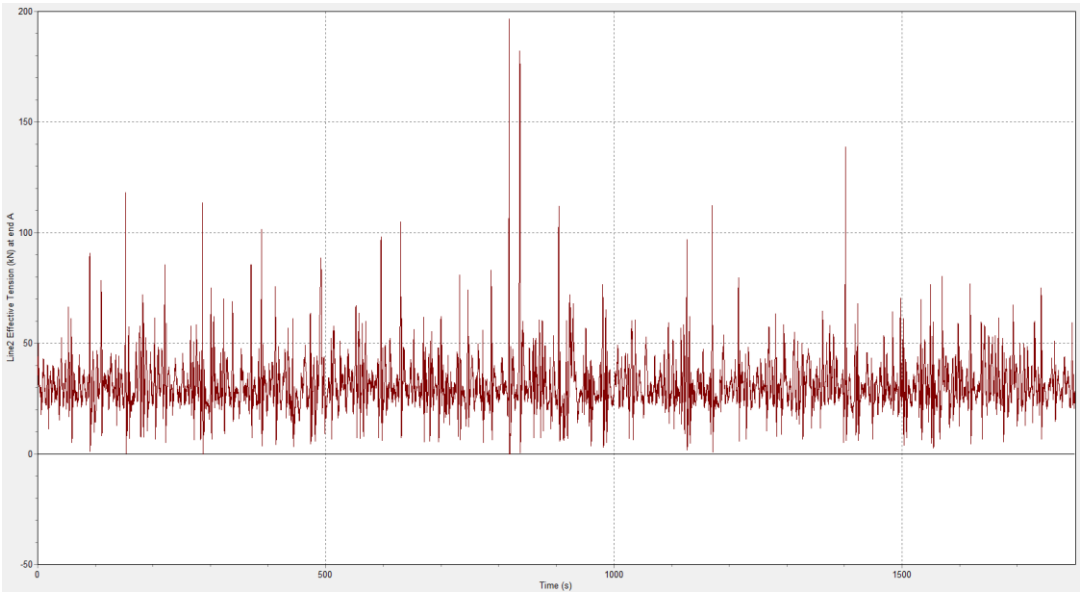
Case 19



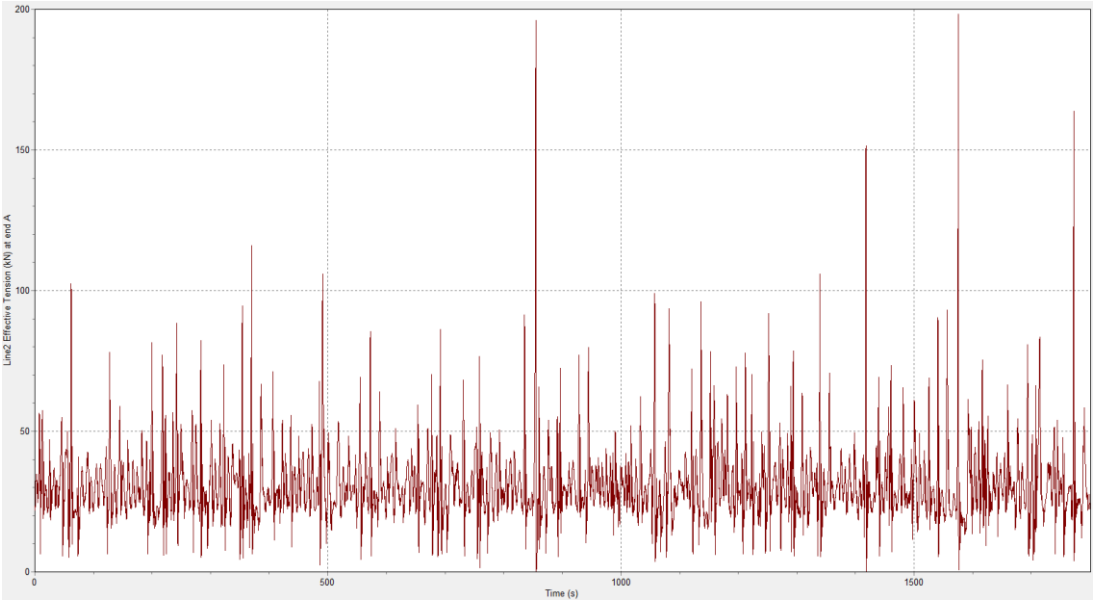
Case 20



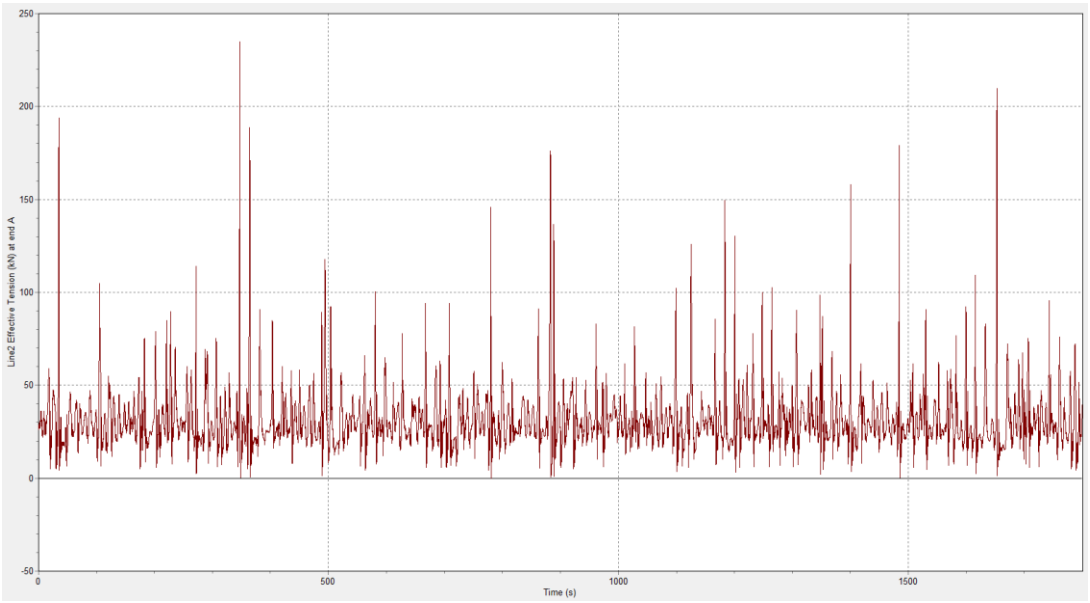
Case 21



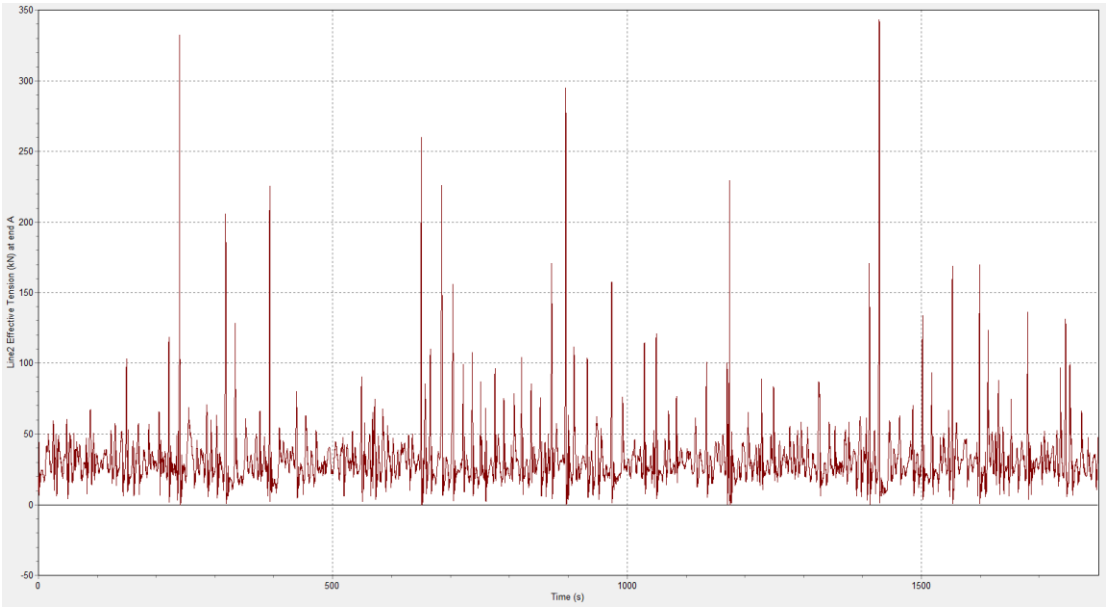
Case 22



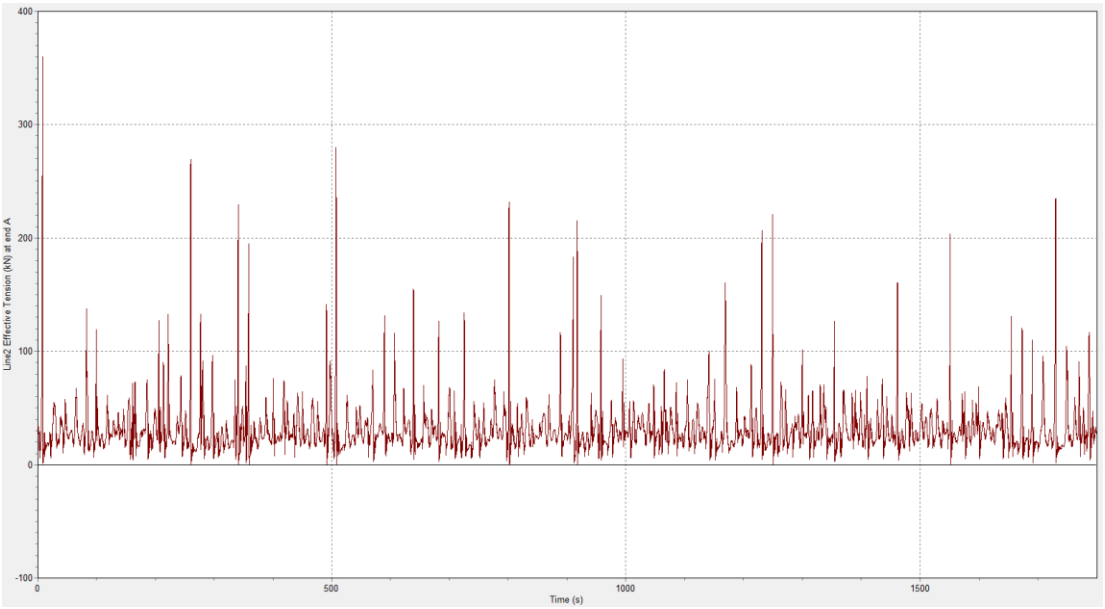
Case 23



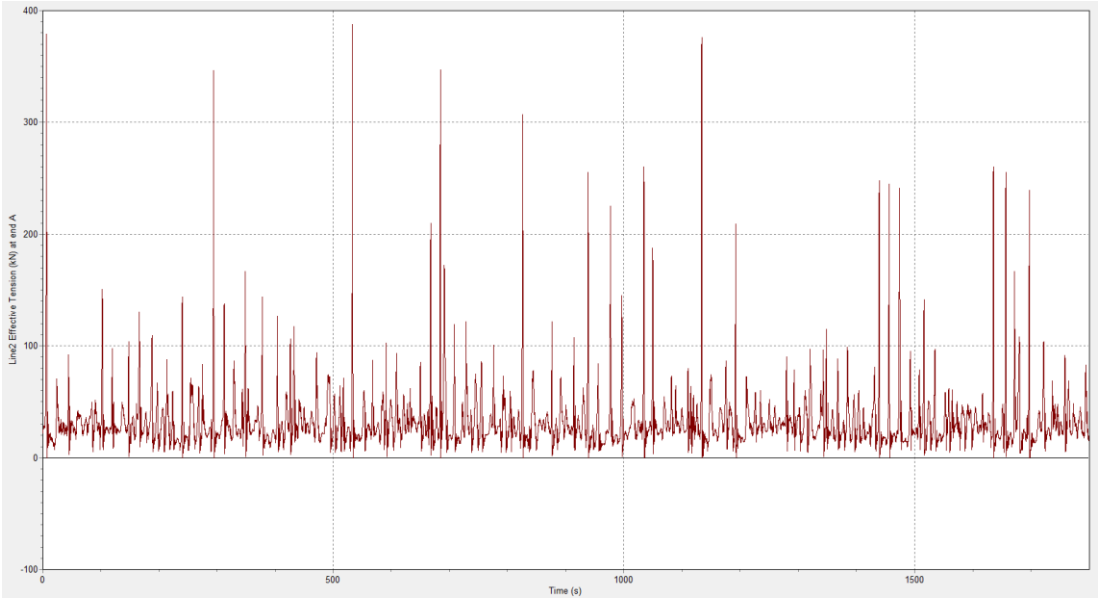
Case 24



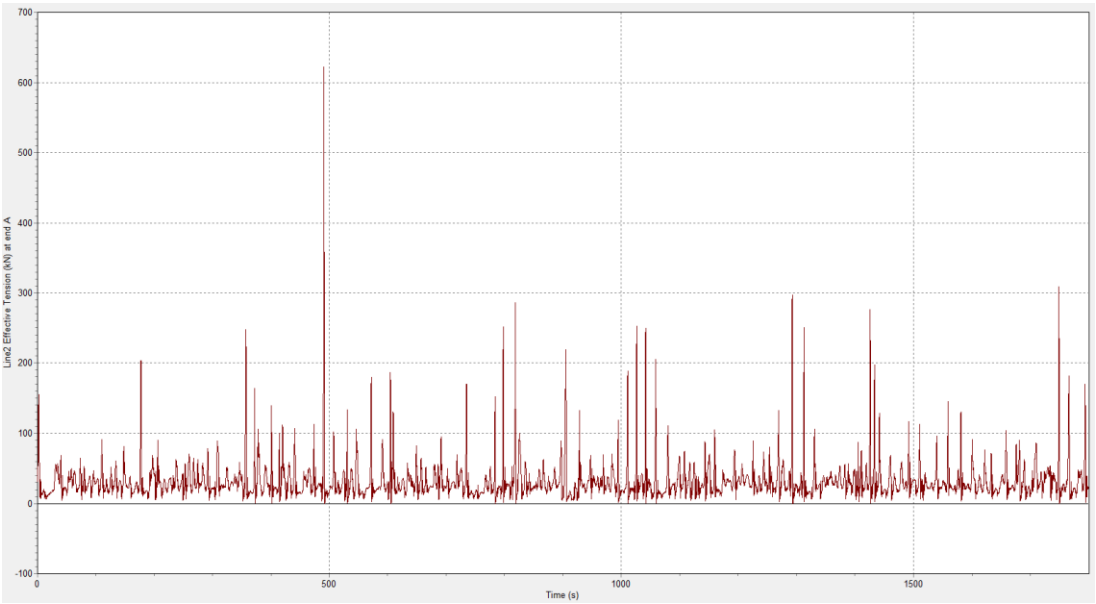
Case 25



Case 26

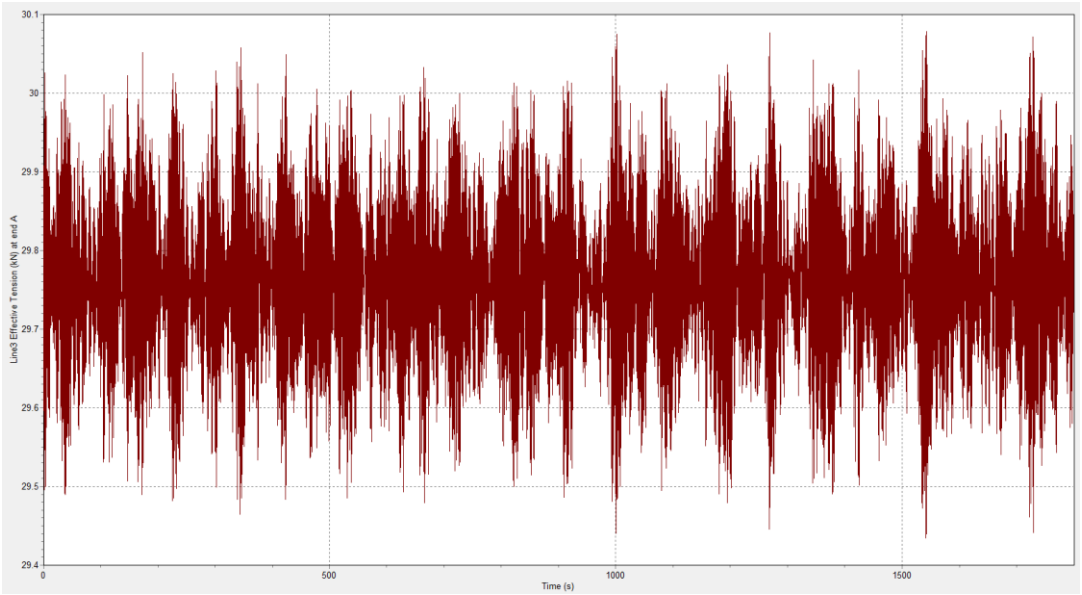


Case 27

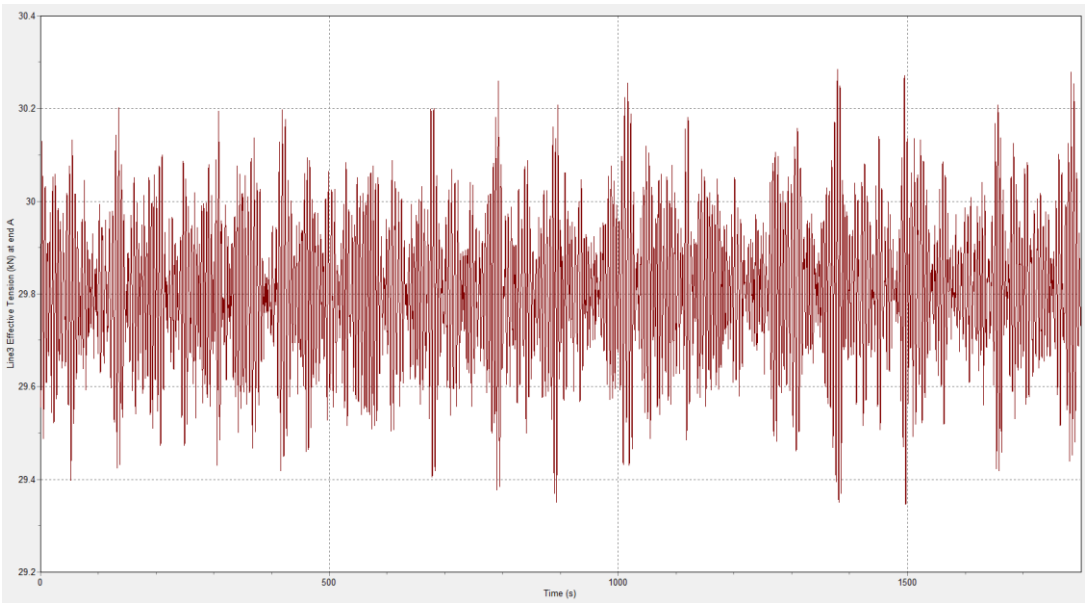


Grafik Seri Waktu *Effective Tension End A Anchor Chain 3* Pada Konfigurasi Asimetris

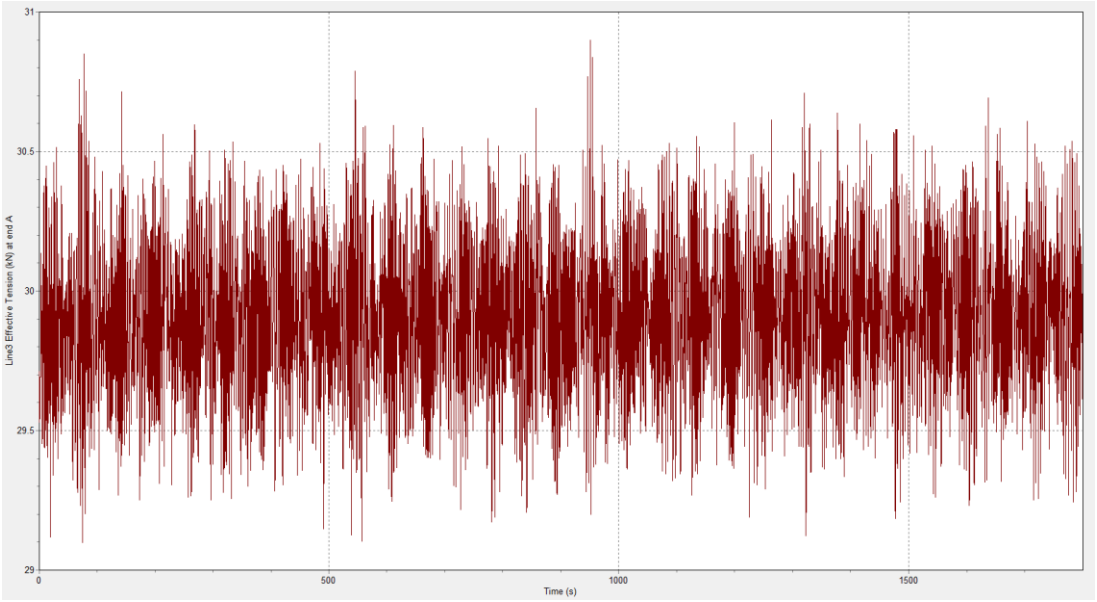
Case 1



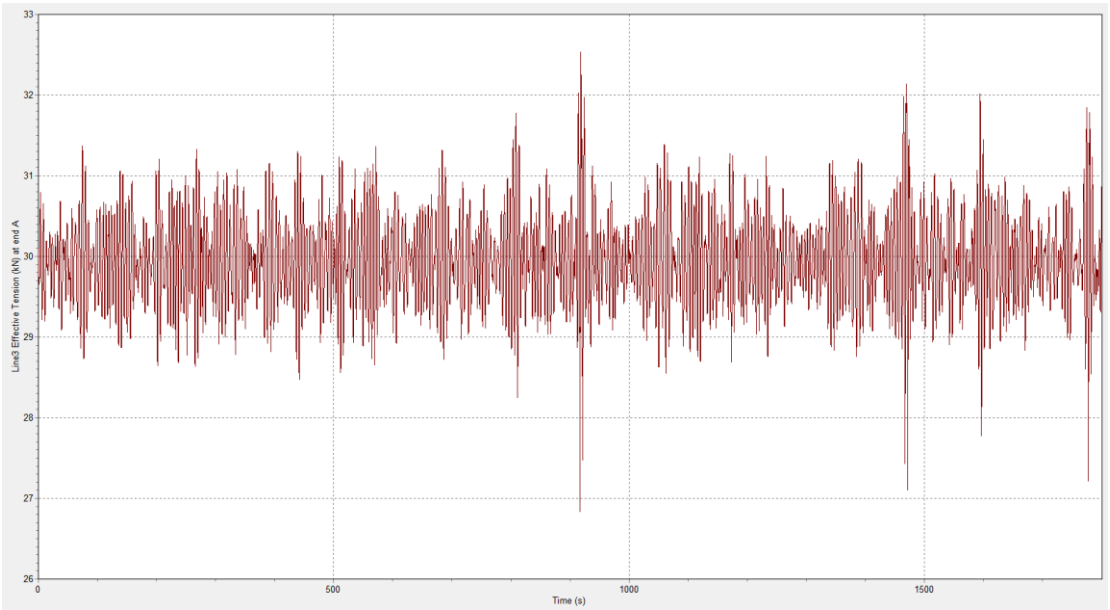
Case 2



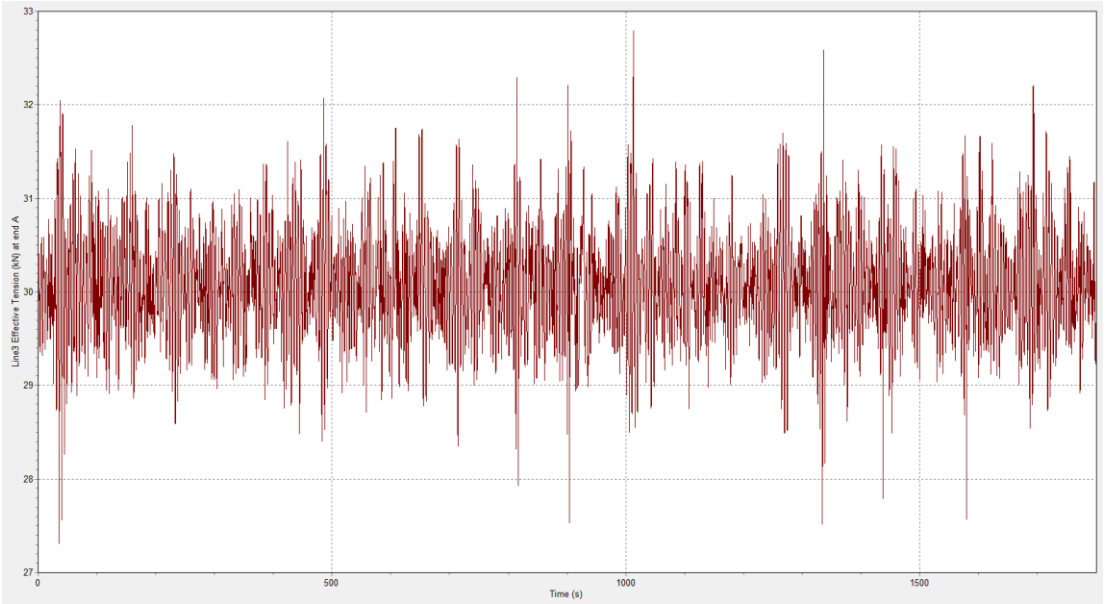
Case 3


Line3 Effective Tension (kN) at end A
Time (s)
31
30.5
30
29.5
29
0
500
1000
1500

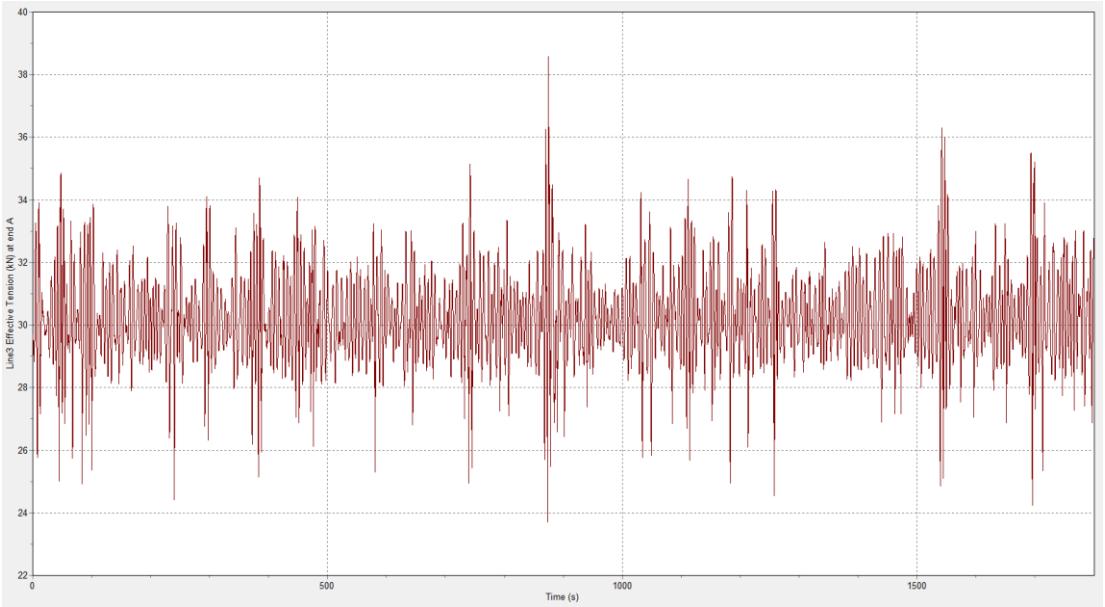
Case 4


Line3 Effective Tension (kN) at end A
Time (s)
33
32
31
30
29
28
27
26
0
500
1000
1500

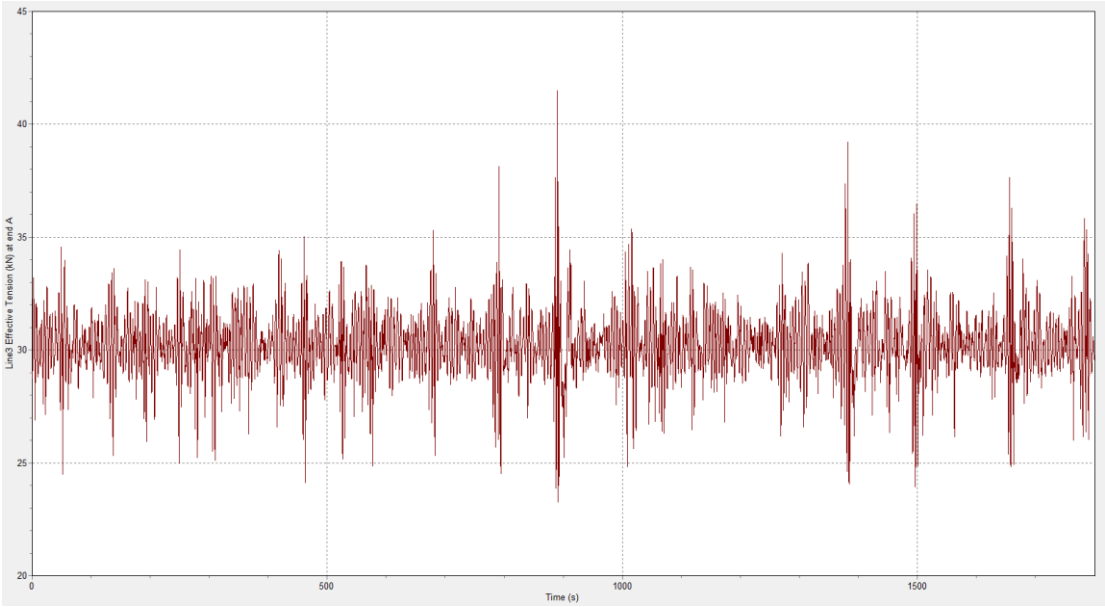
Case 5


Line3 Effective Tension (kN) at end A
Time (s)
33
32
31
30
29
28
27
0
500
1000
1500

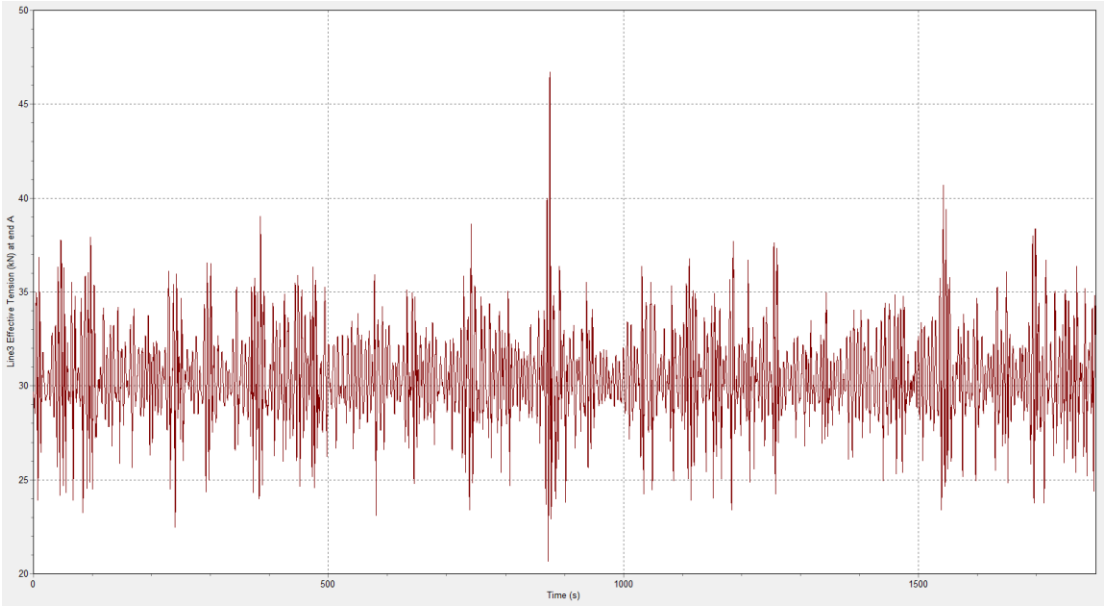
Case 6


Line3 Effective Tension (kN) at end A
Time (s)
40
38
36
34
32
30
28
26
24
22
0
500
1000
1500

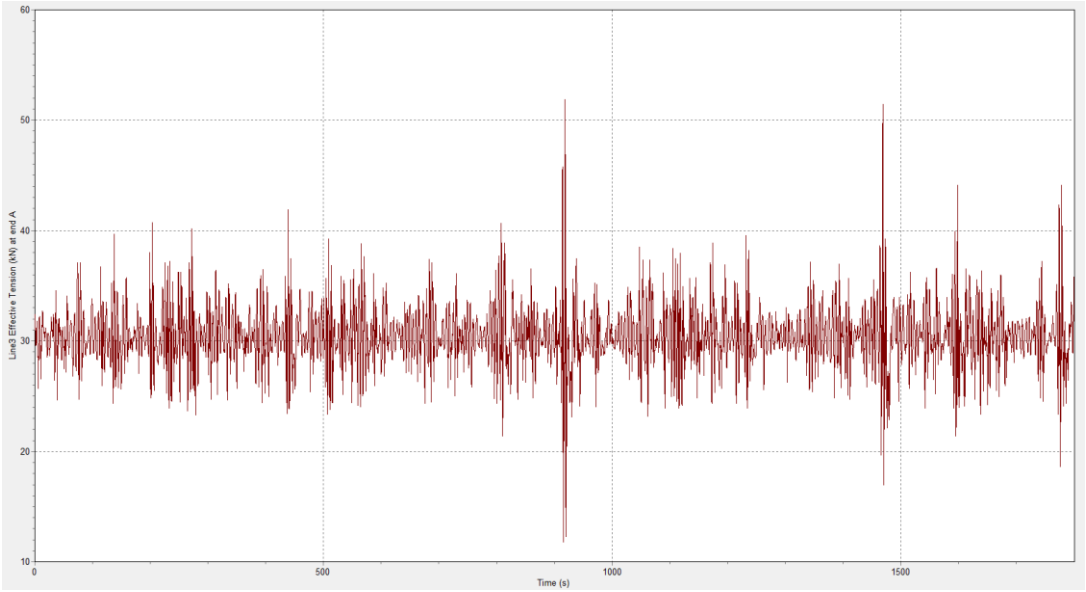
Case 7


Line3 Effective Tension (kN) at end A
Time (s)
45
40
35
30
25
20
0
500
1000
1500

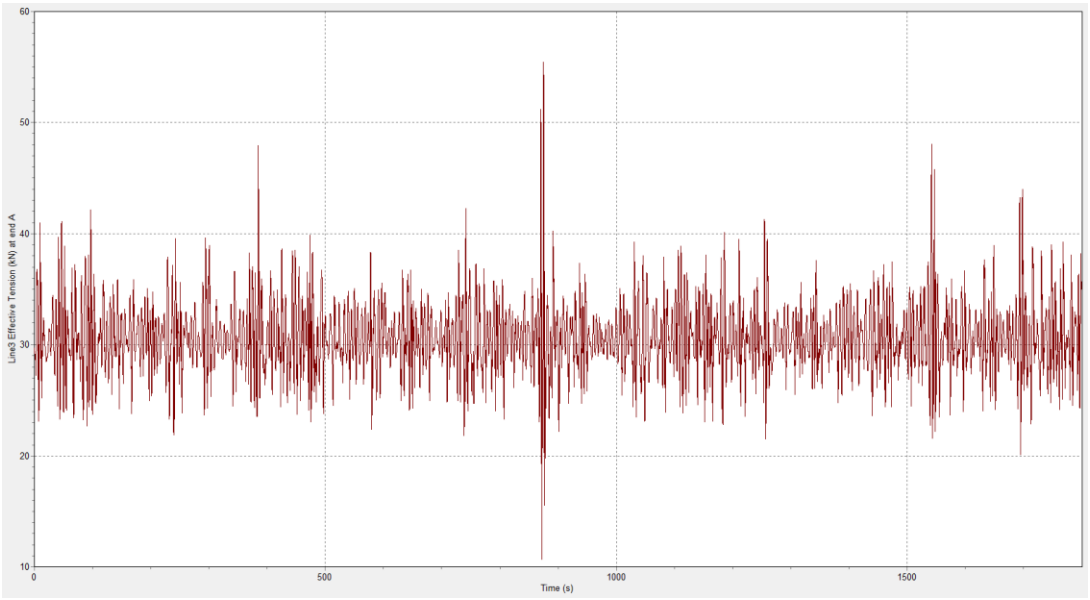
Case 8


Line3 Effective Tension (kN) at end A
Time (s)
50
45
40
35
30
25
20
0
500
1000
1500

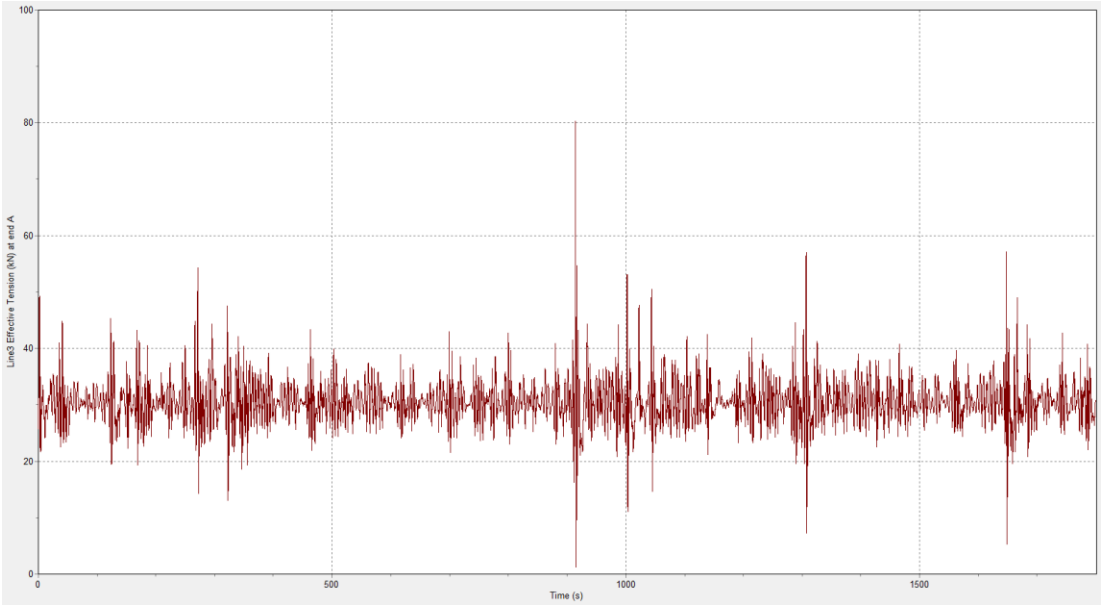
Case 9



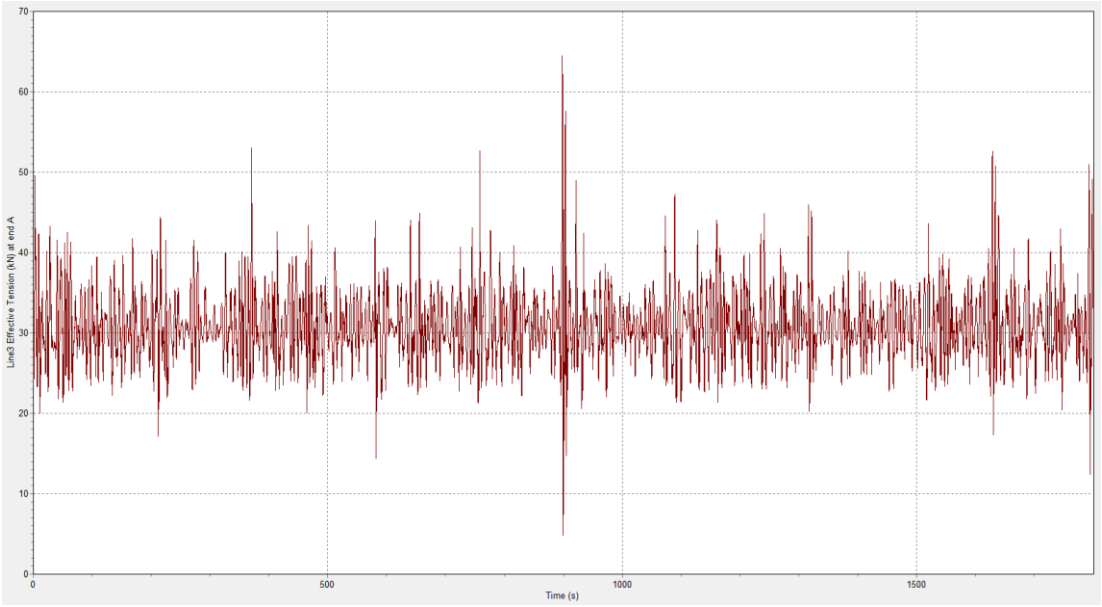
Case 10



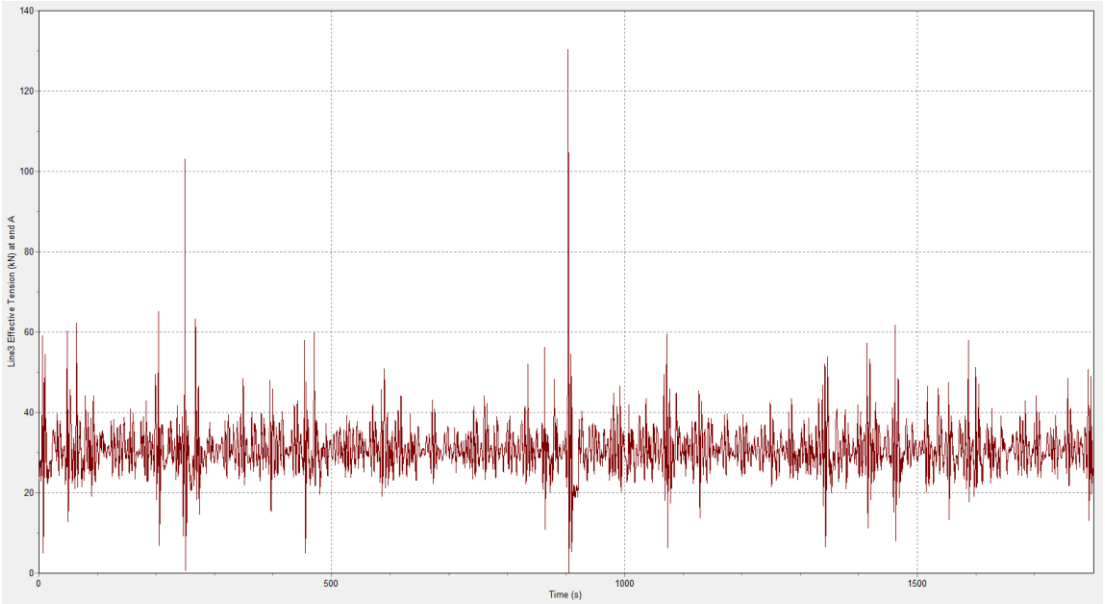
Case 11



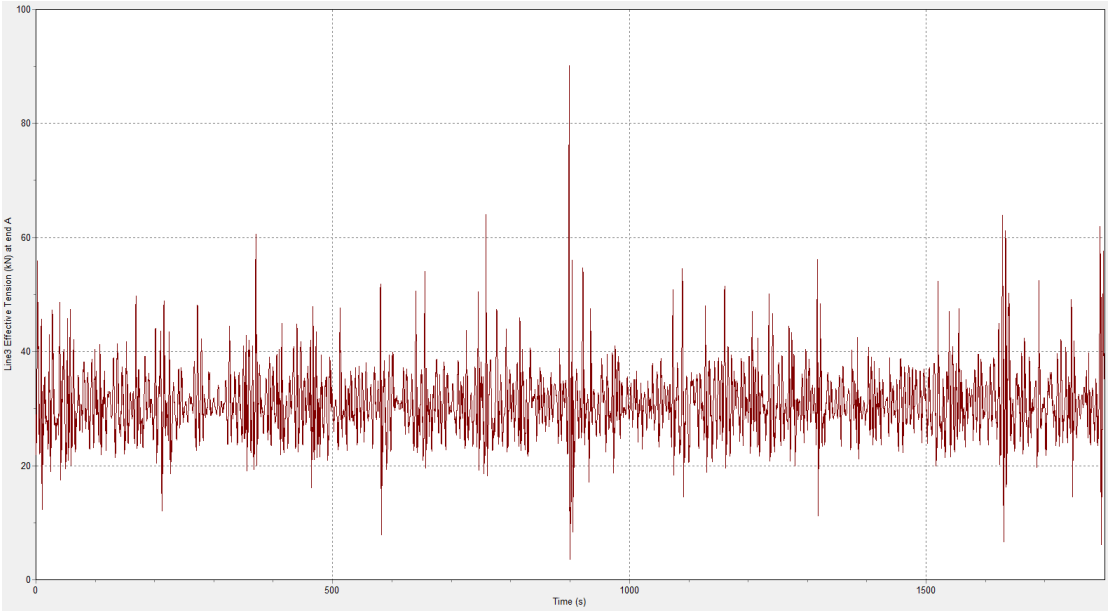
Case 12



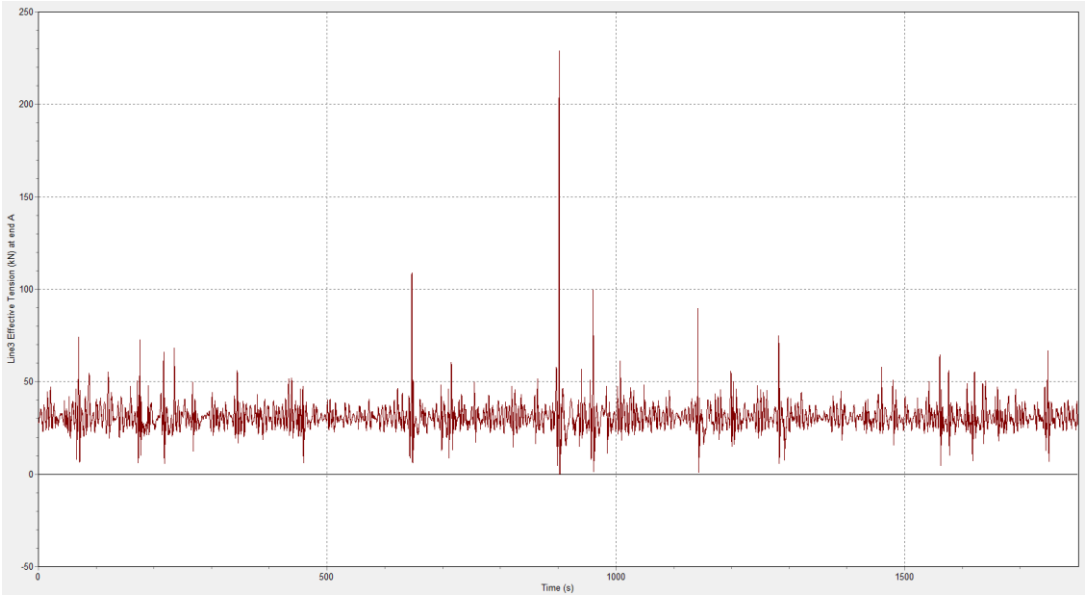
Case 13



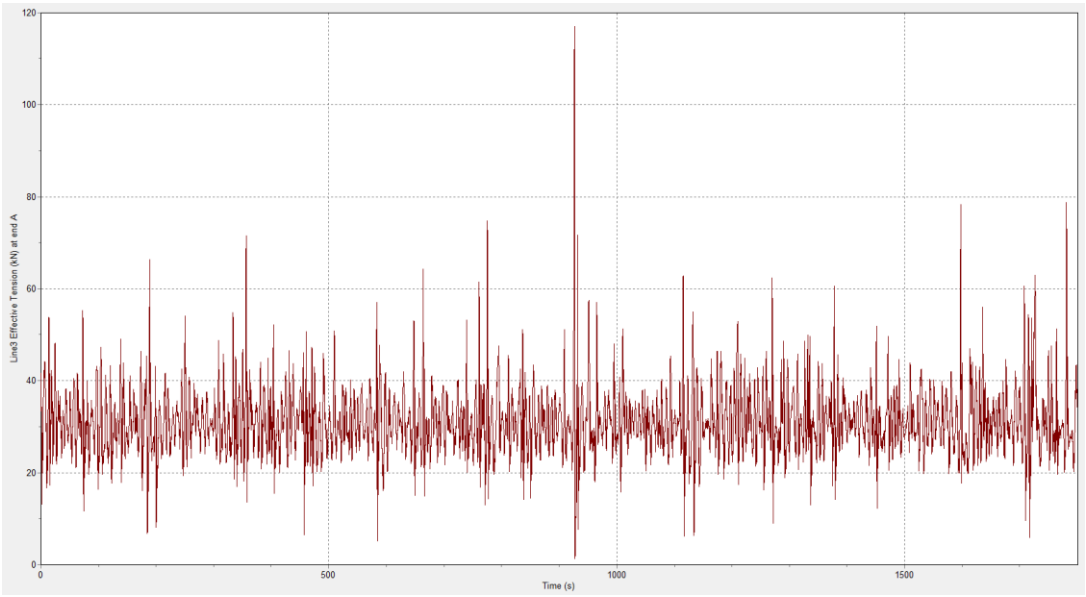
Case 14



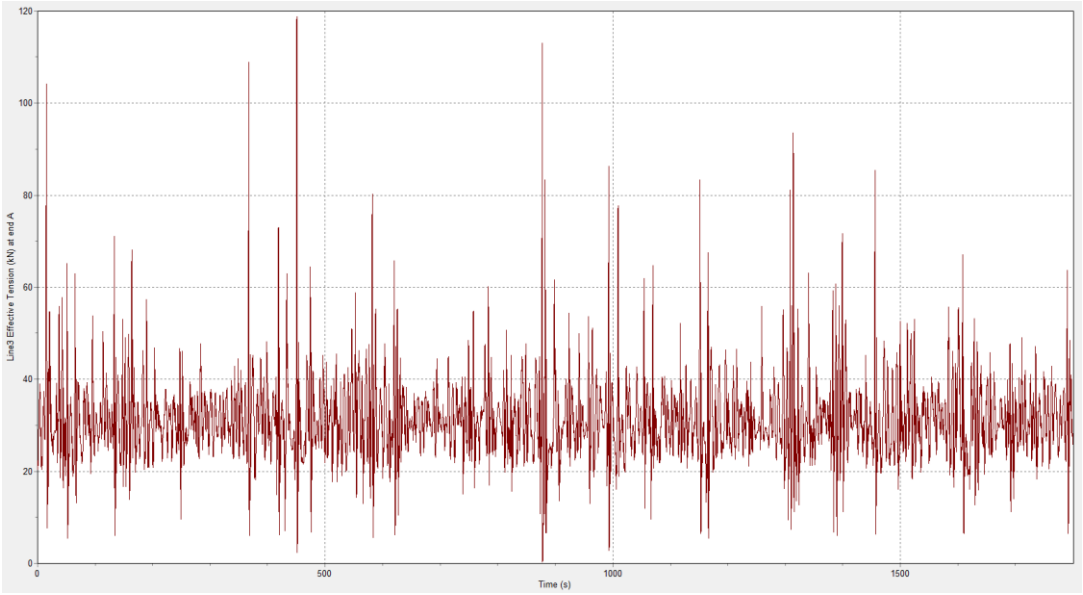
Case 15



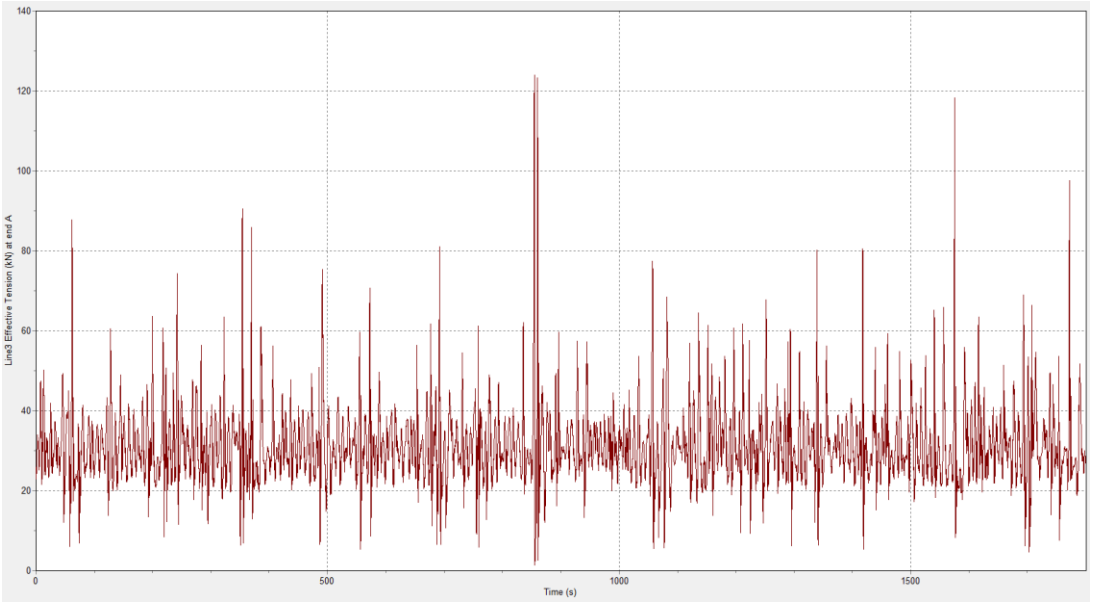
Case 16



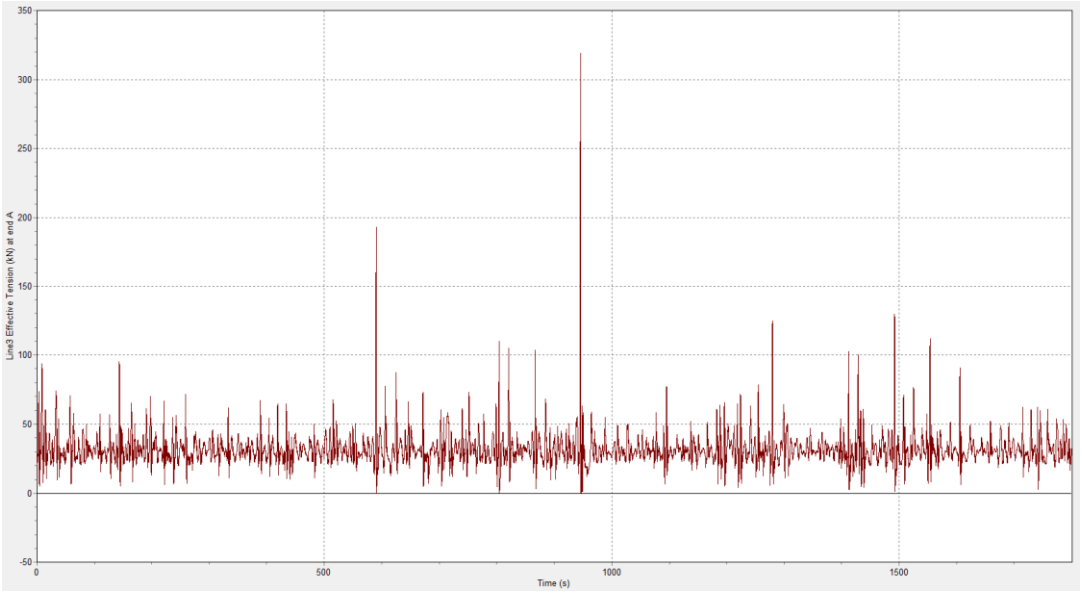
Case 17



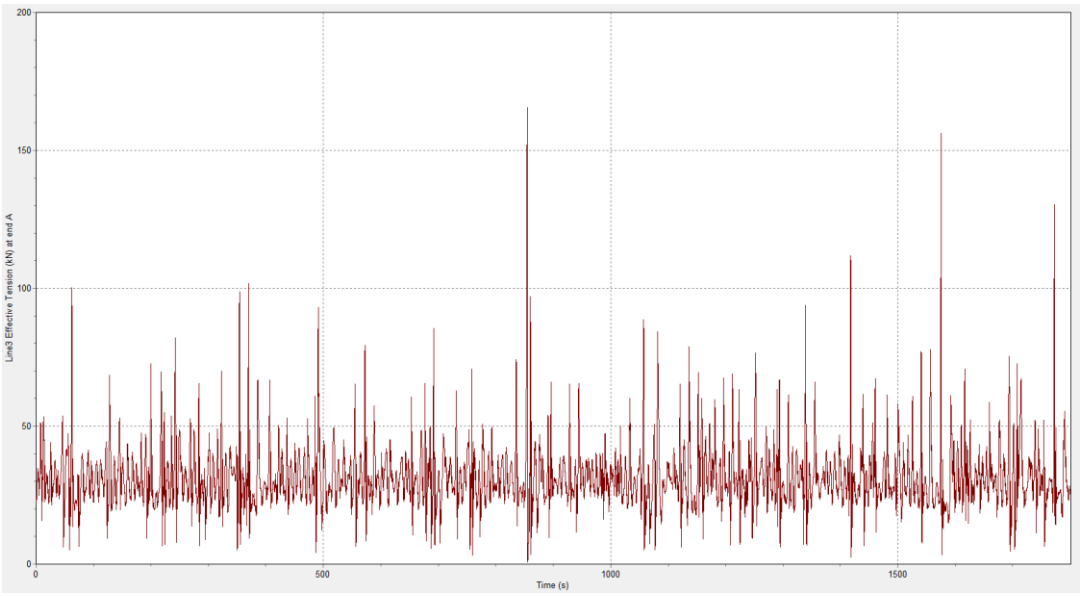
Case 18



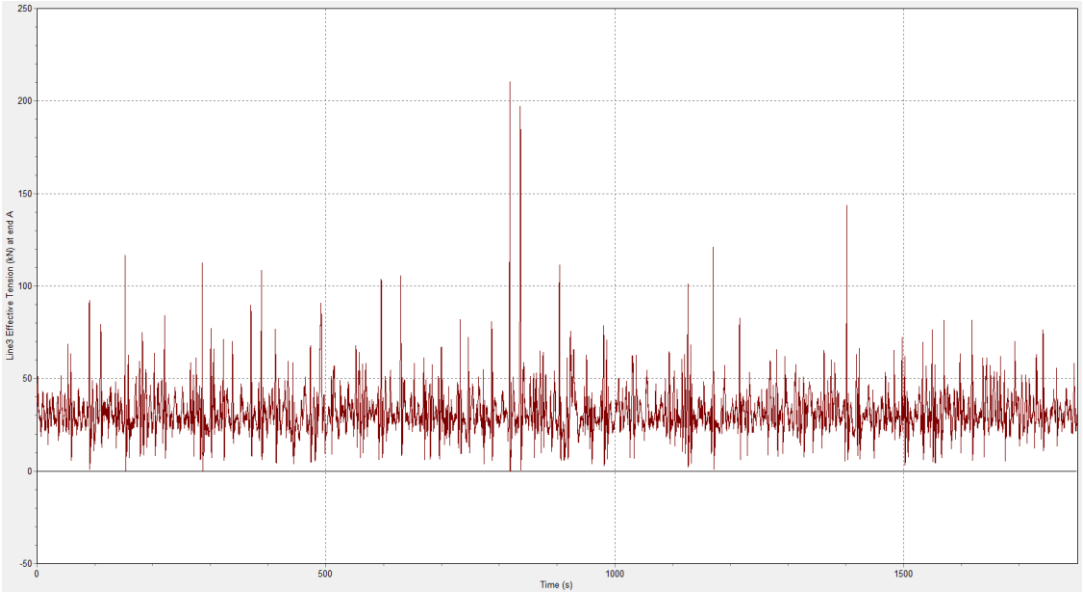
Case 19



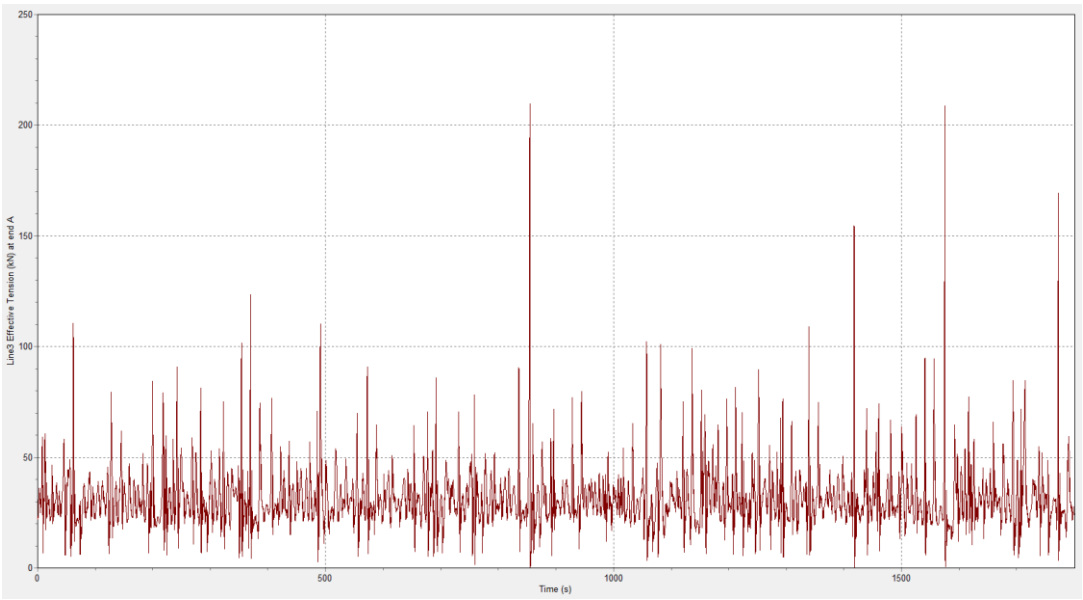
Case 20



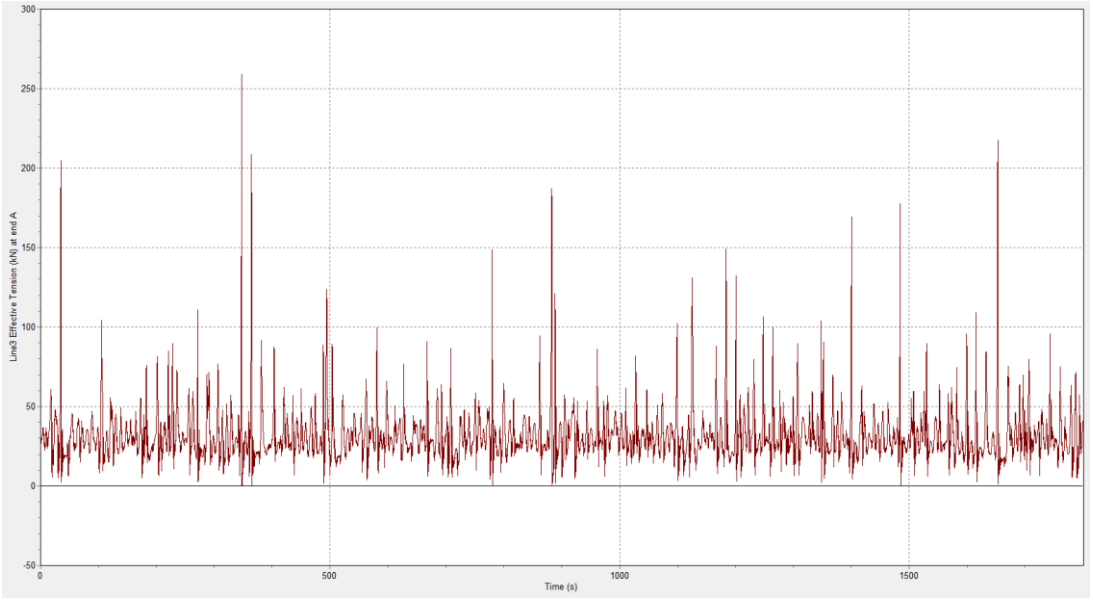
Case 21



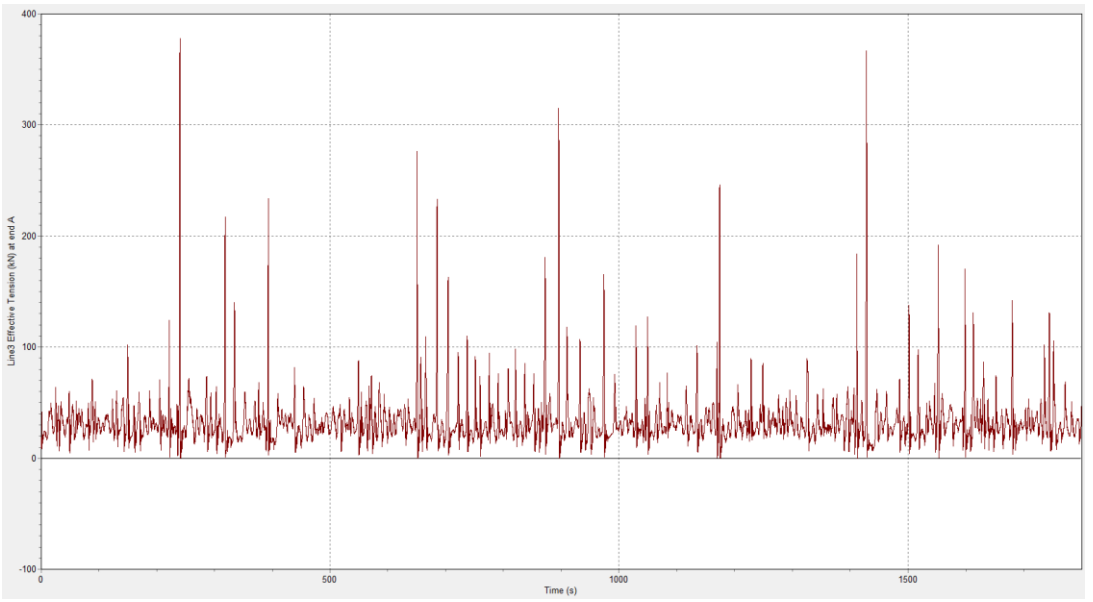
Case 22



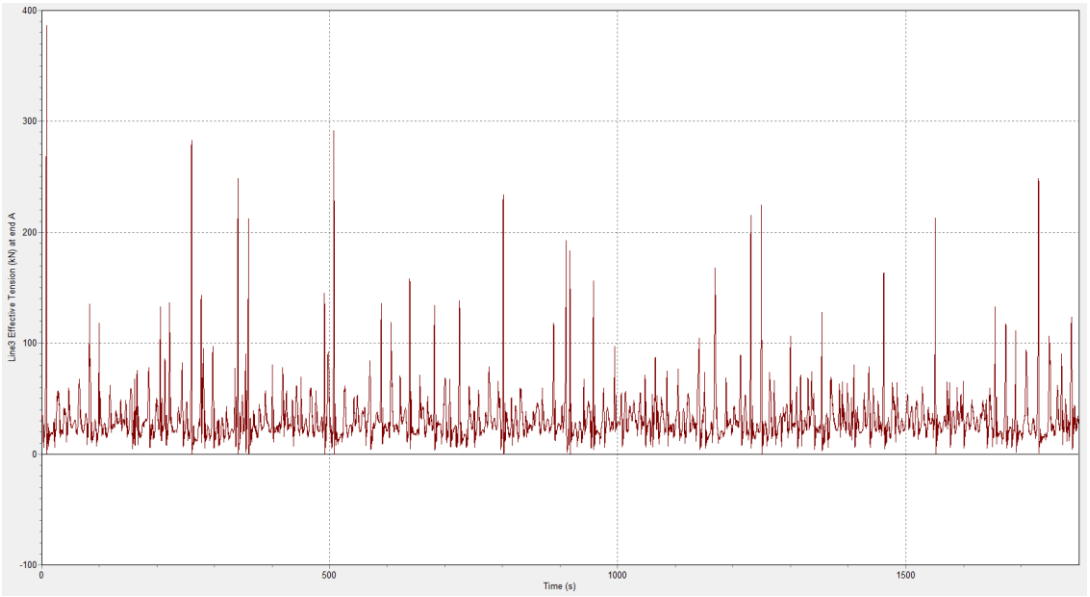
Case 23



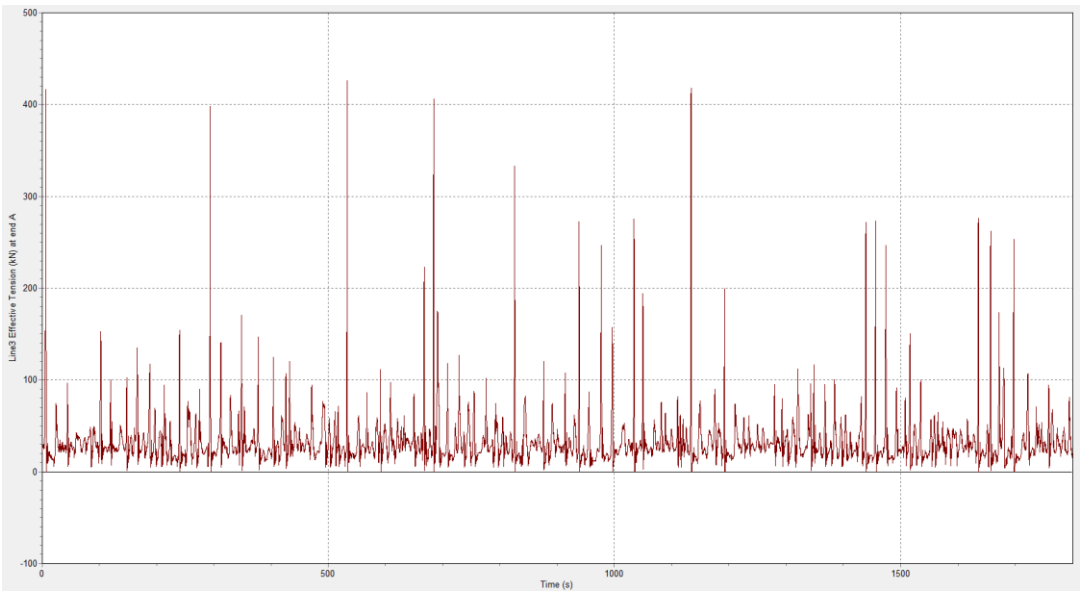
Case 24



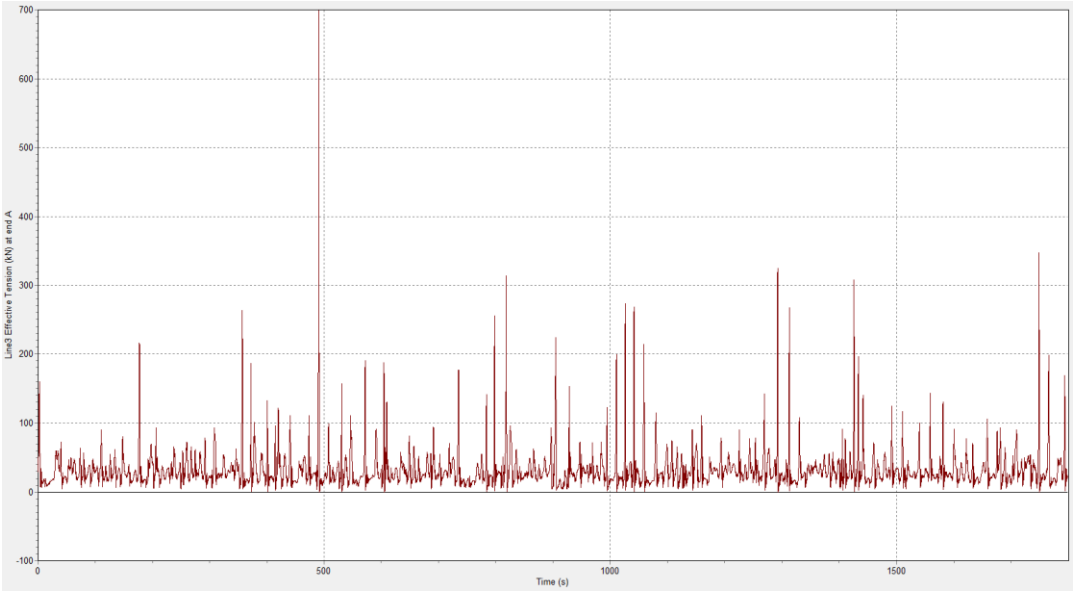
Case 25



Case 26

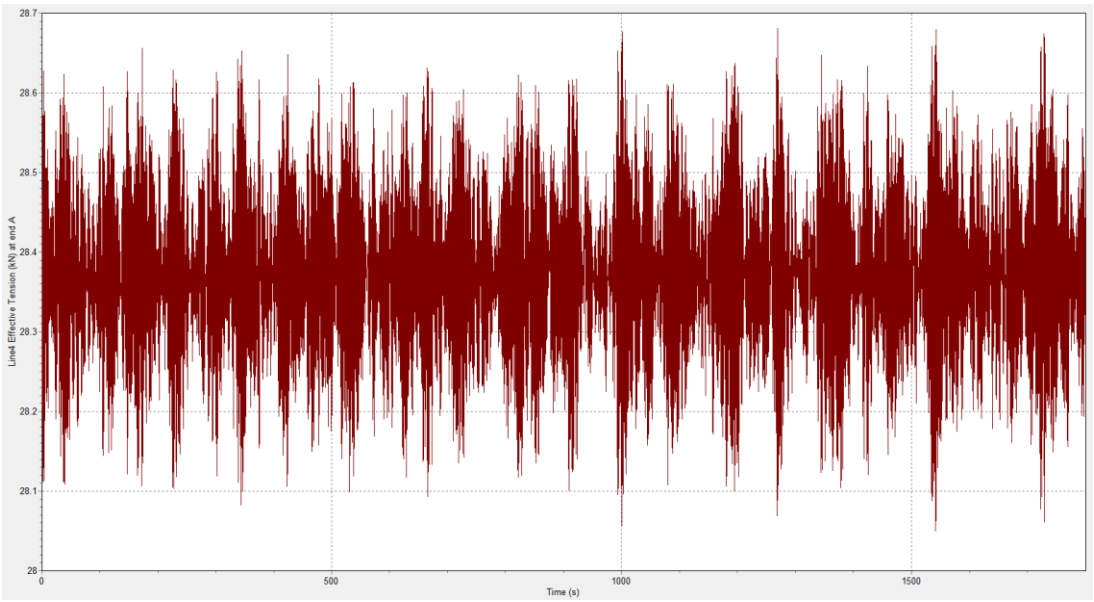


Case 27

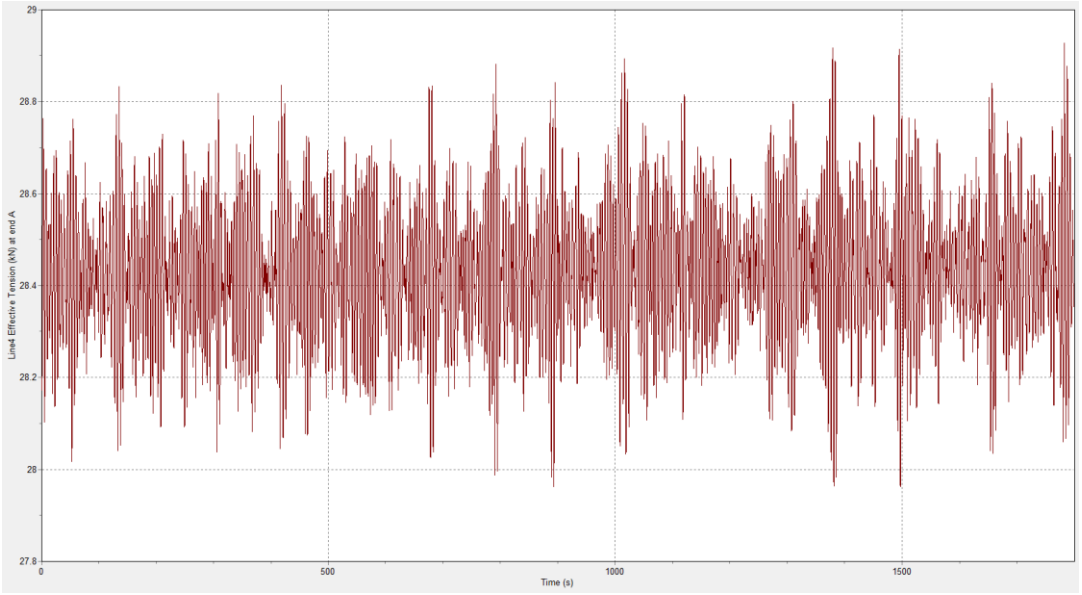


Grafik Seri Waktu *Effective Tension End A Anchor Chain 4* Pada Konfigurasi Asimetris

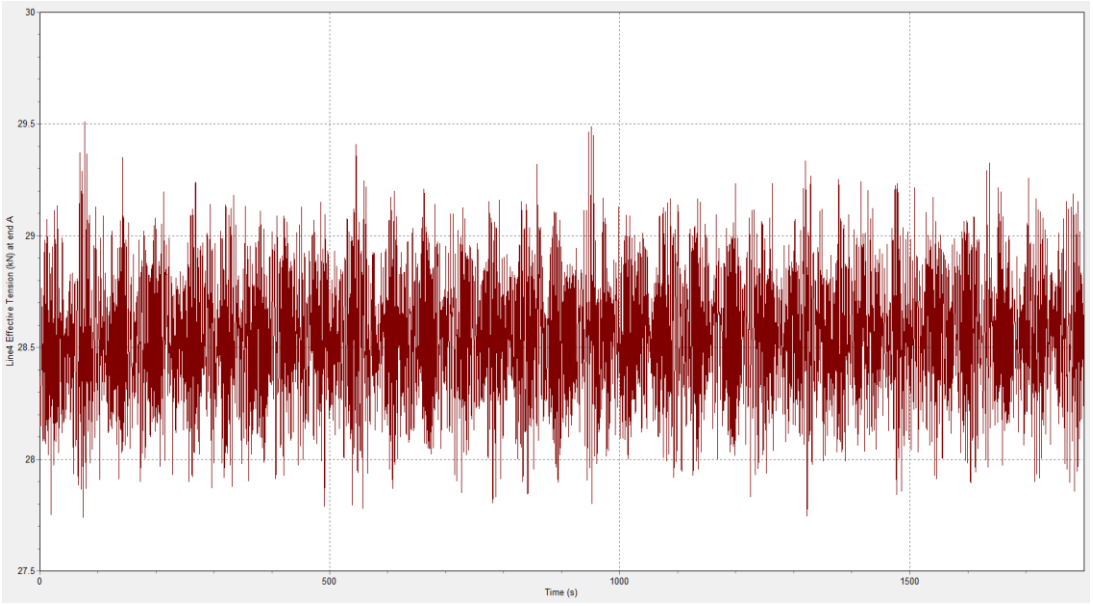
Case 1



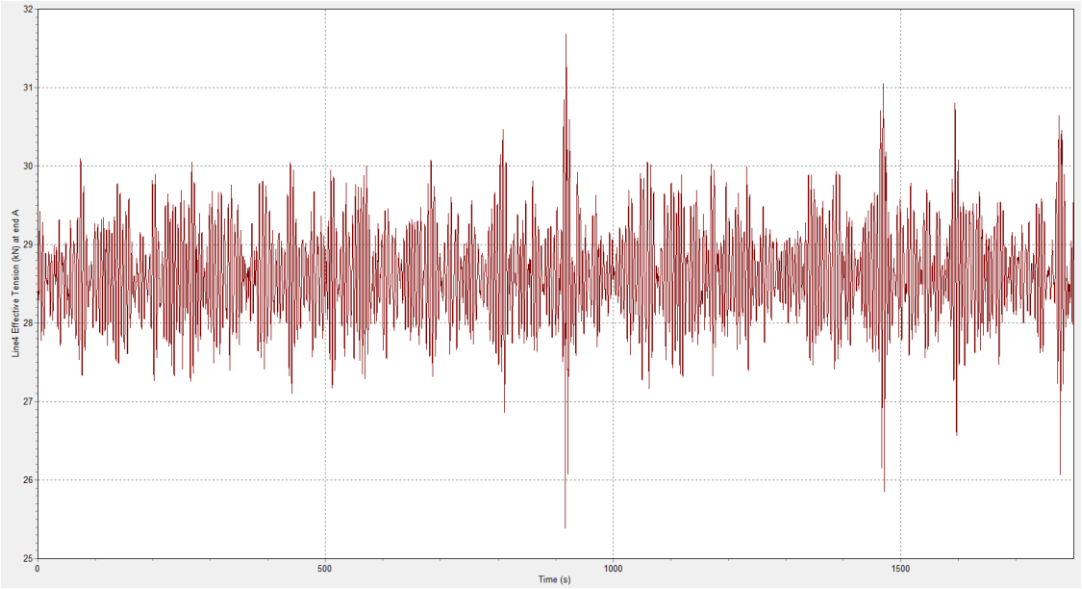
Case 2


29
28.8
28.6
28.4
28.2
28
27.8
Line4 Effective Tension (kN) at end A
0
500
1000
1500
Time (s)

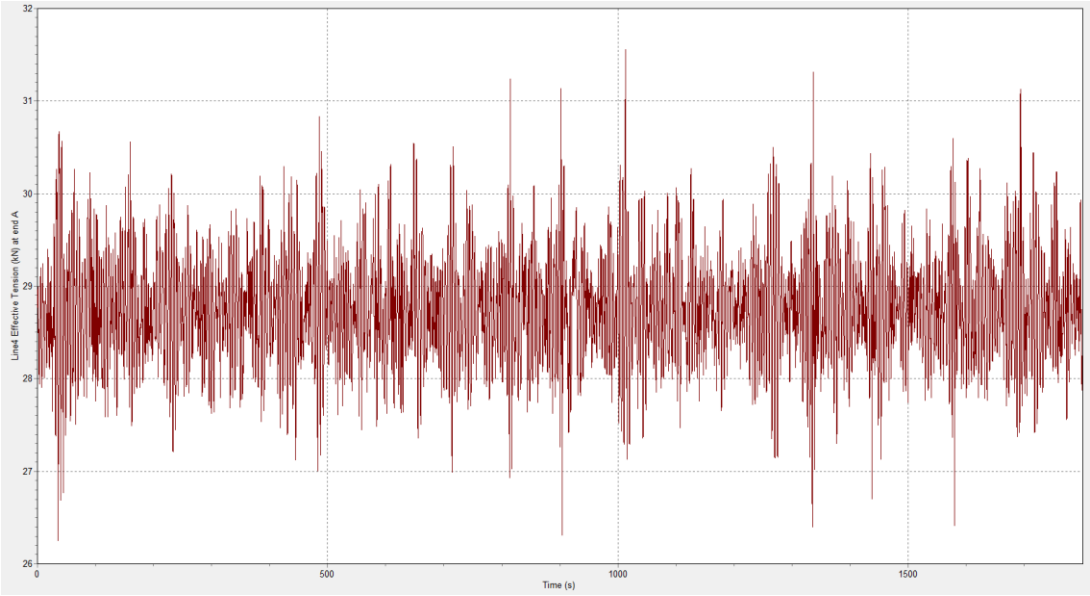
Case 3


30
29.5
29
28.5
28
27.5
Line4 Effective Tension (kN) at end A
0
500
1000
1500
Time (s)

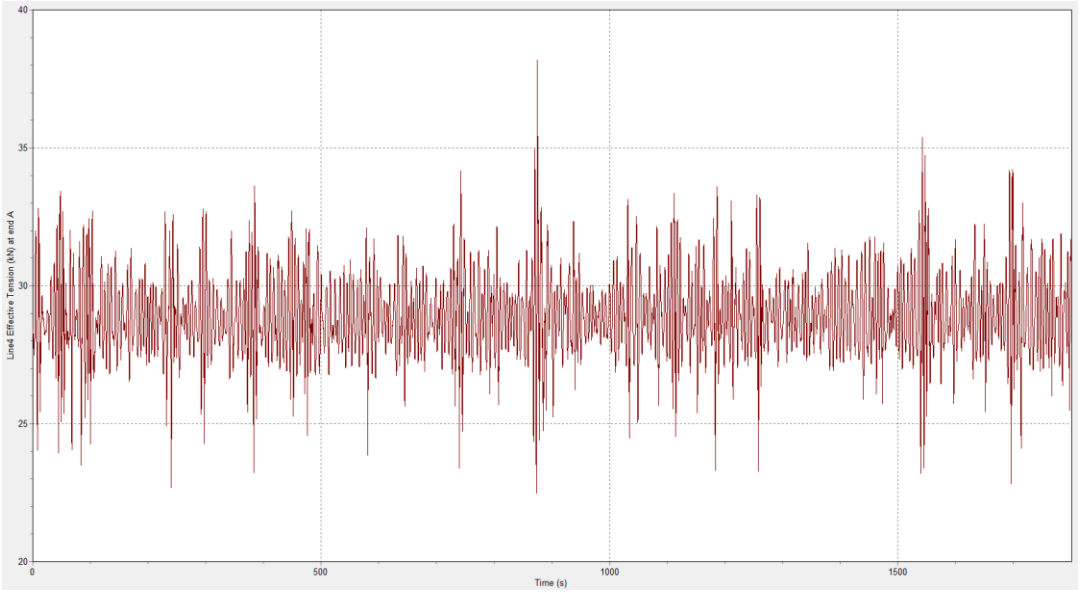
Case 4


Line4 Effective Tension (kN) at end A
32
31
30
29
28
27
26
25
0
500
1000
1500
Time (s)

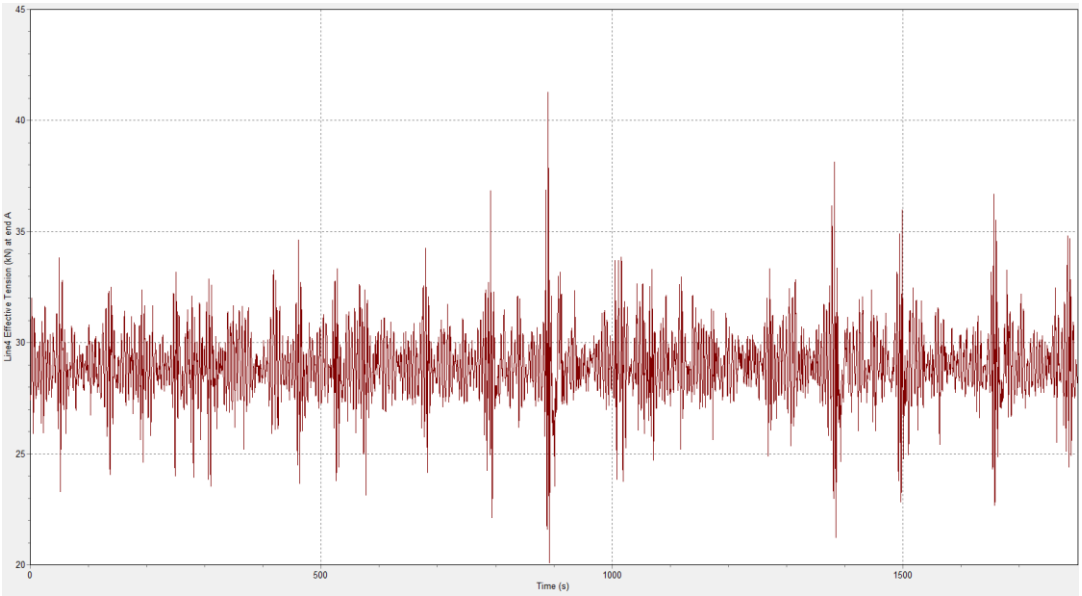
Case 5


Line4 Effective Tension (kN) at end A
32
31
30
29
28
27
26
0
500
1000
1500
Time (s)

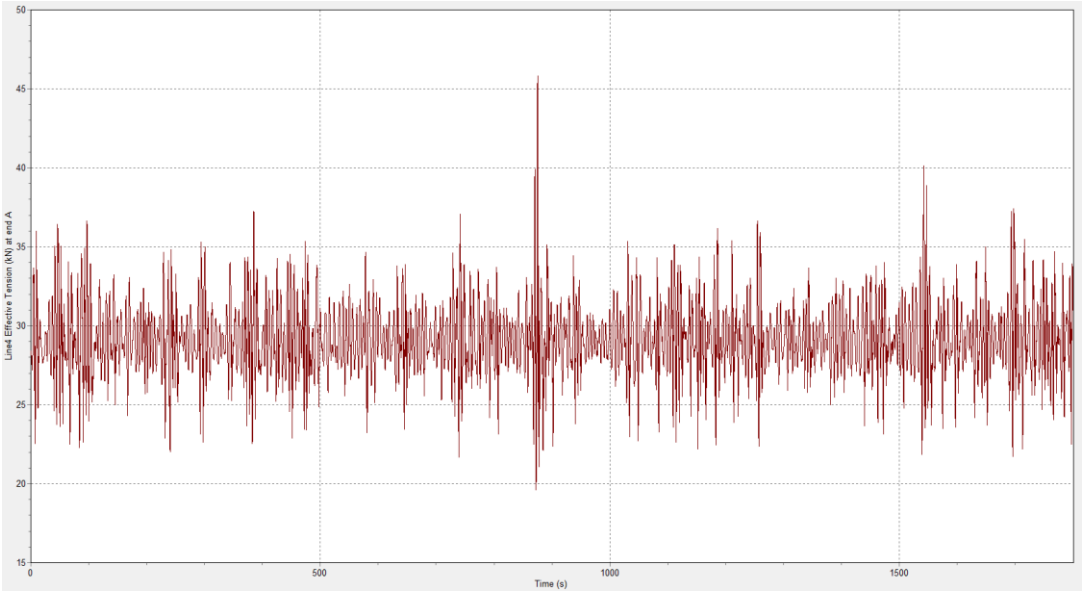
Case 6


Line4 Effective Tension (kN) at end A
40
35
30
25
20
0
500
1000
1500
Time (s)

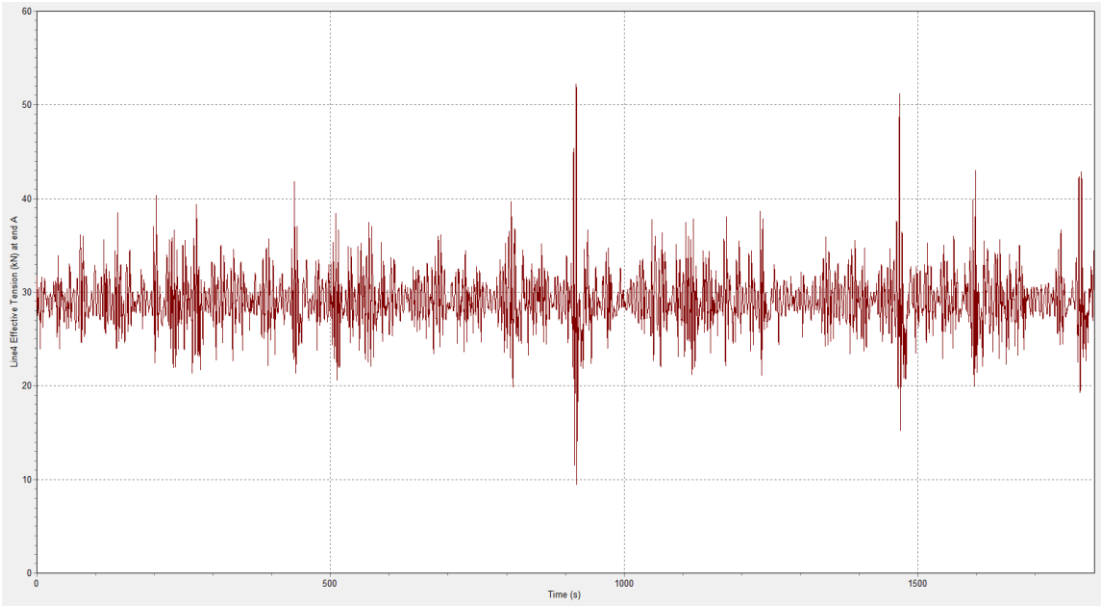
Case 7


Line4 Effective Tension (kN) at end A
45
40
35
30
25
20
0
500
1000
1500
Time (s)

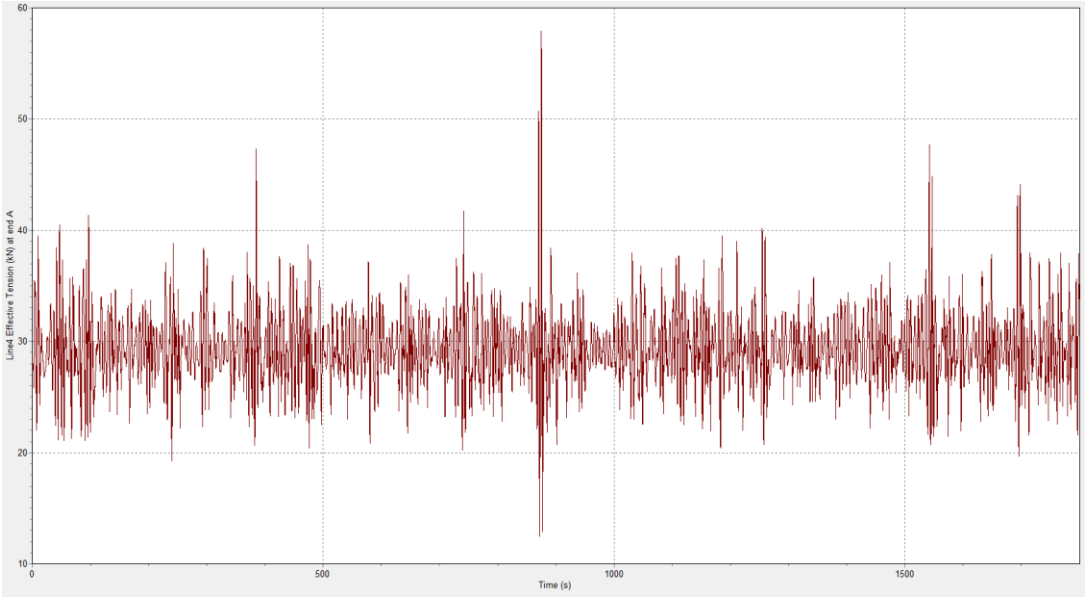
Case 8


Line4 Effective Tension (kN) at end A
Time (s)
50
45
40
35
30
25
20
15
0
500
1000
1500

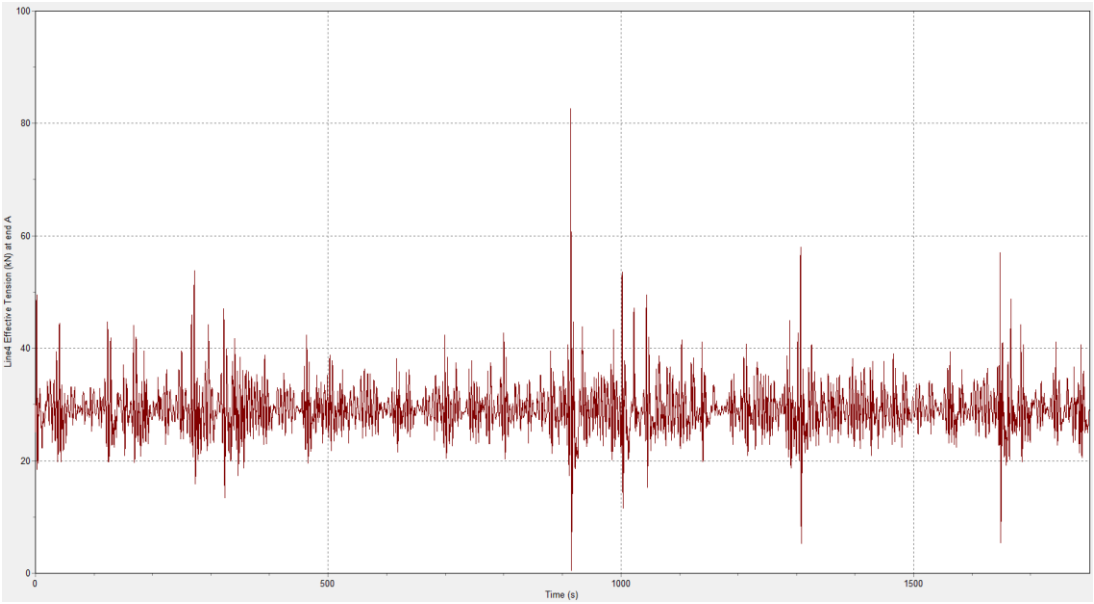
Case 9


Line4 Effective Tension (kN) at end A
Time (s)
60
50
40
30
20
10
0
0
500
1000
1500

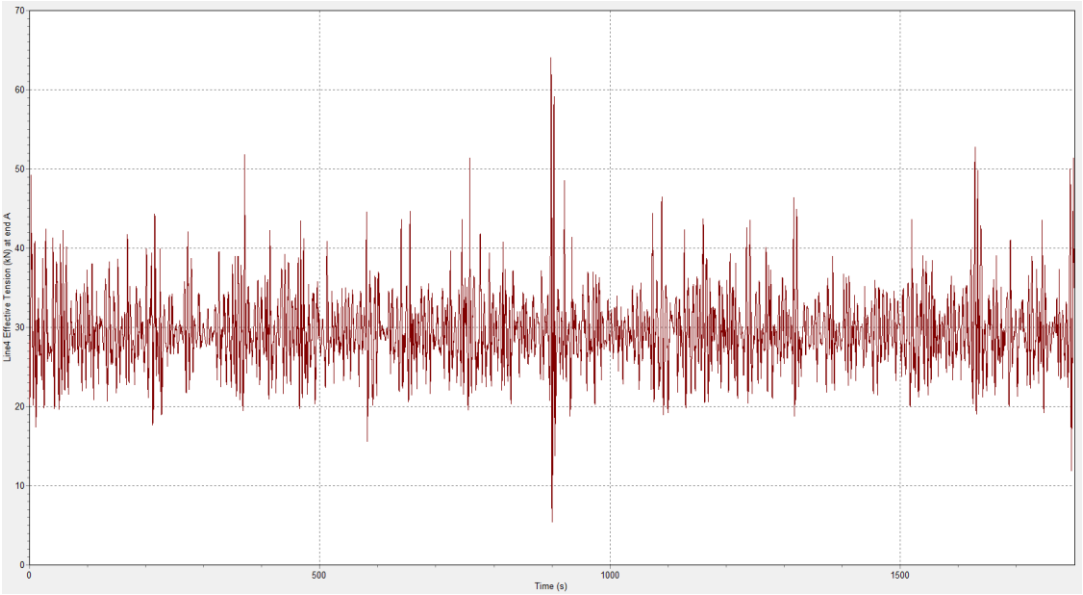
Case 10



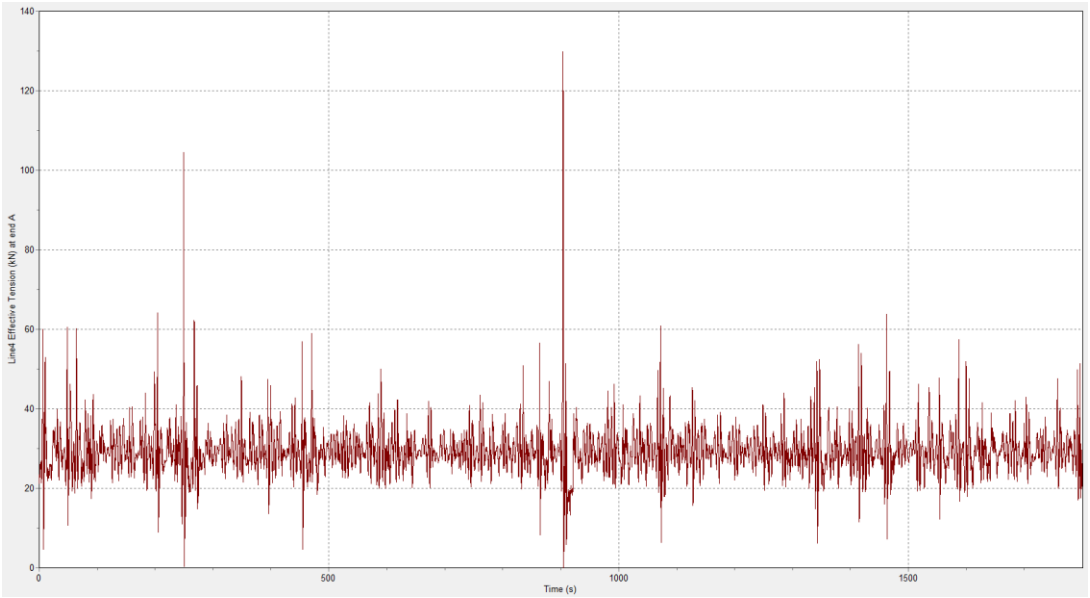
Case 11



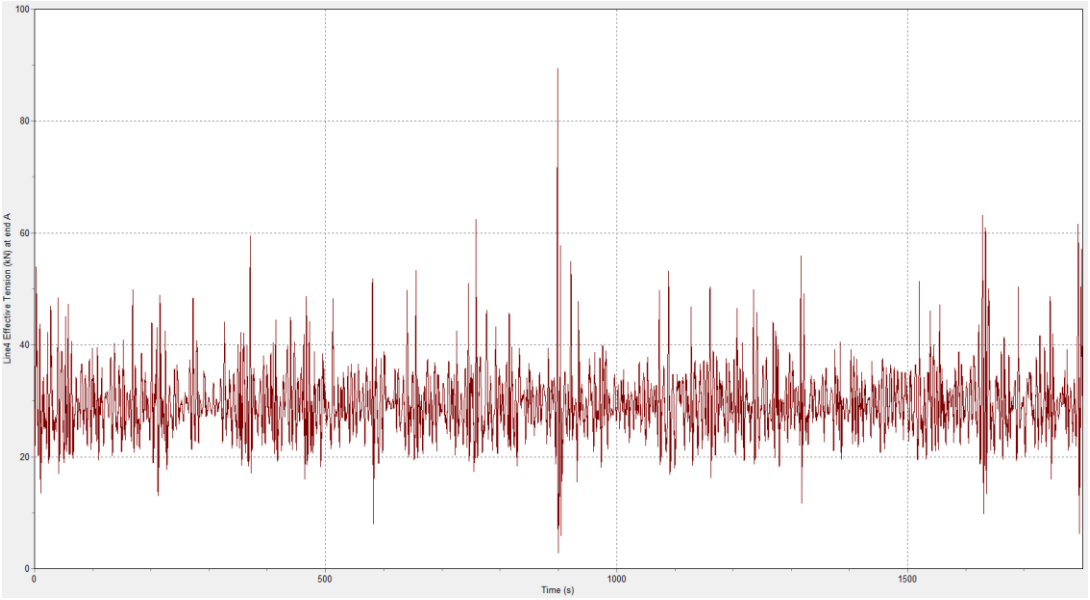
Case 12



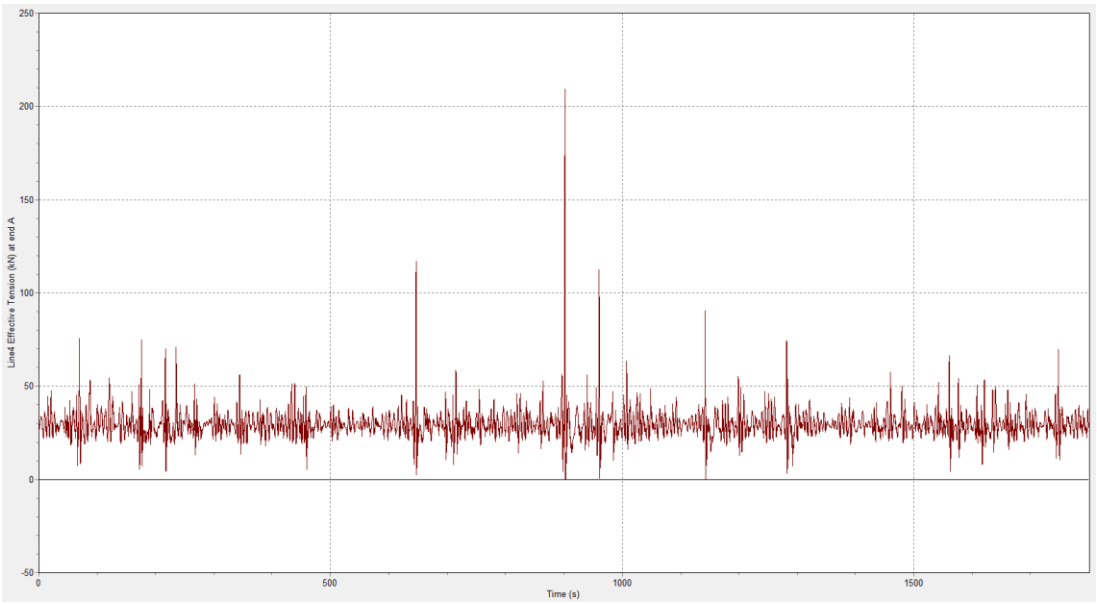
Case 13



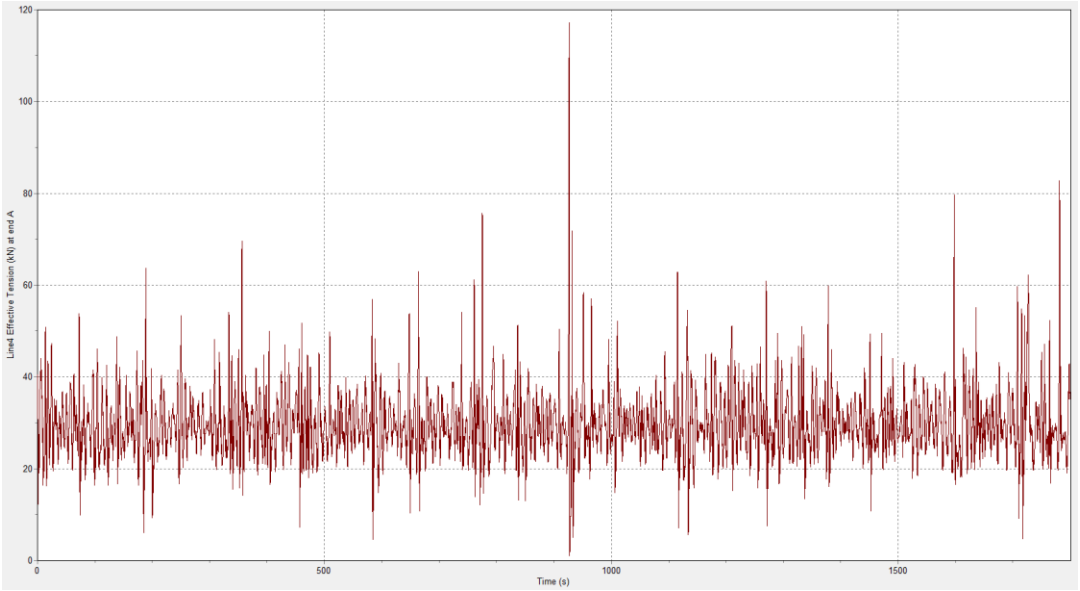
Case 14



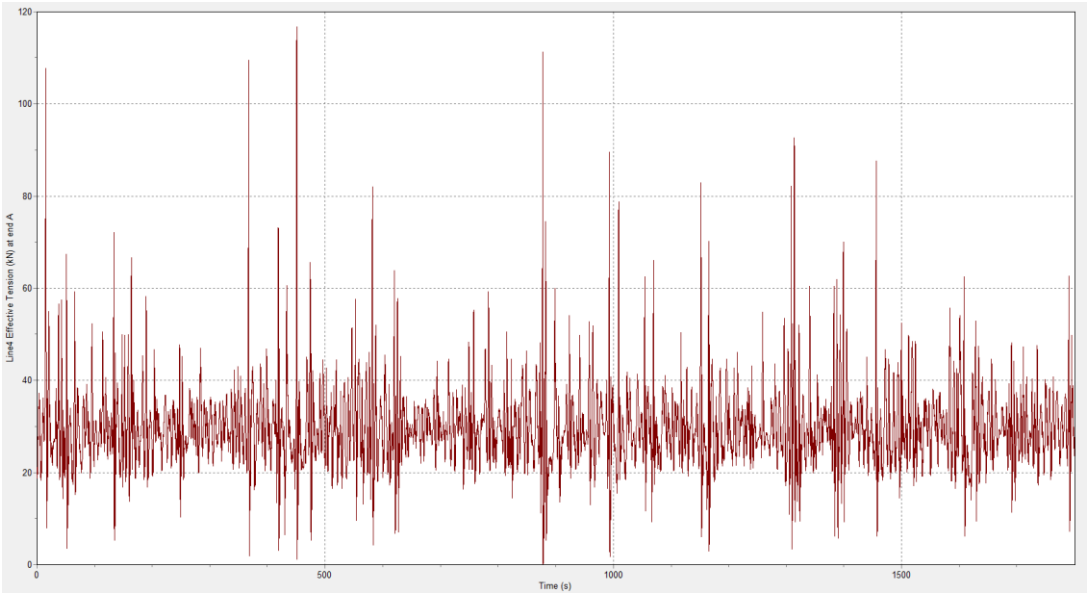
Case 15



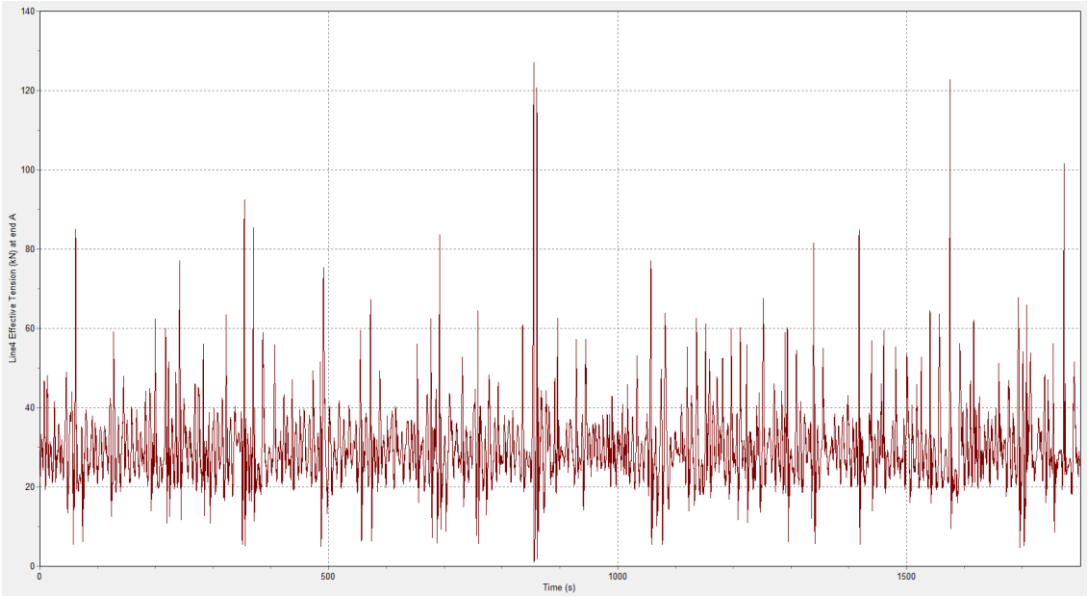
Case 16



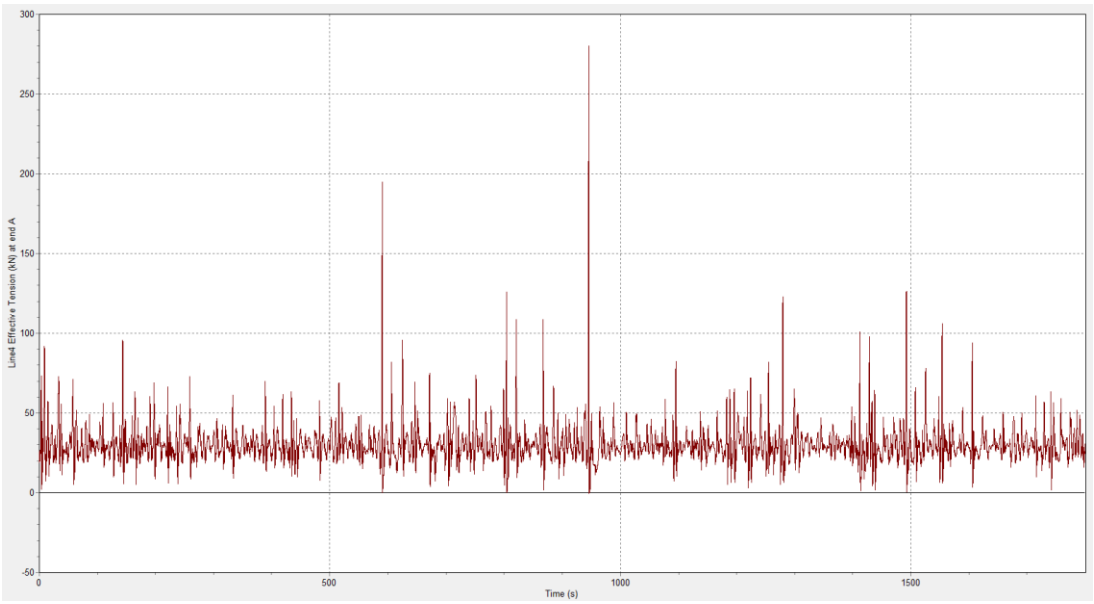
Case 17



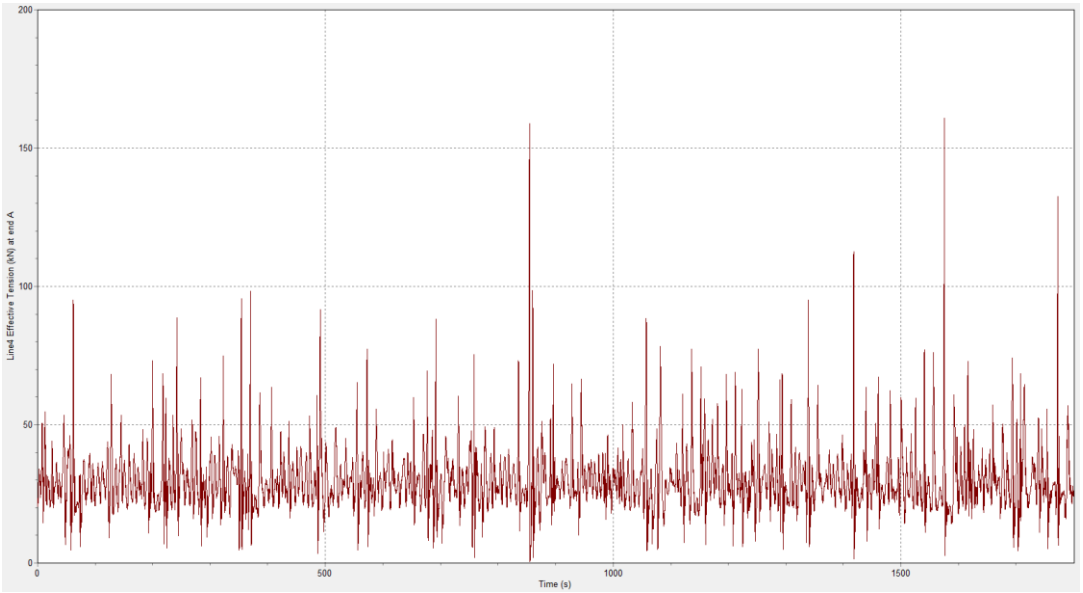
Case 18



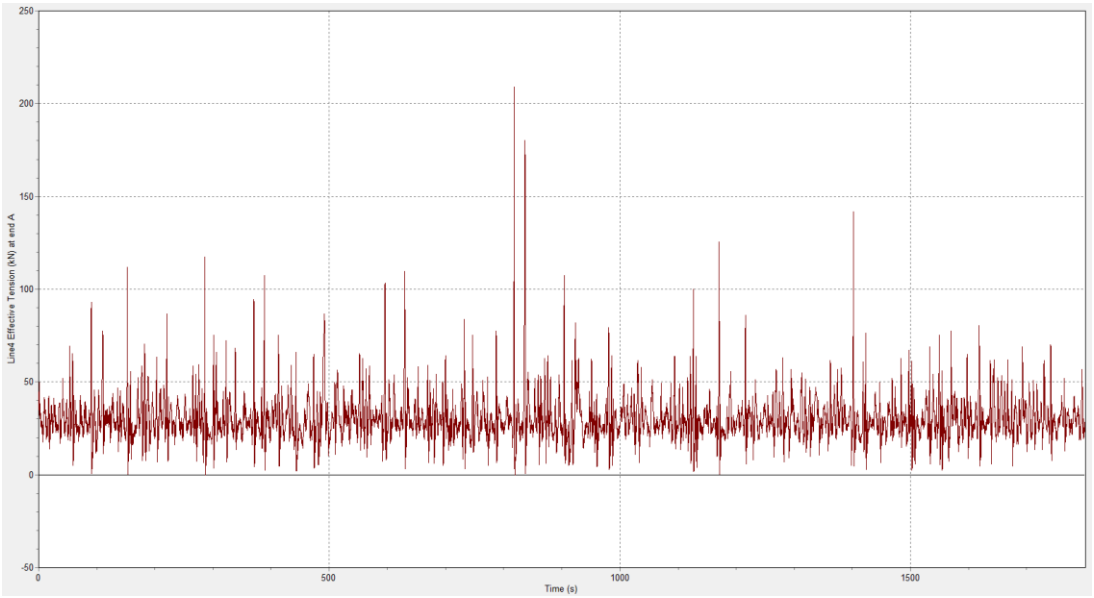
Case 19



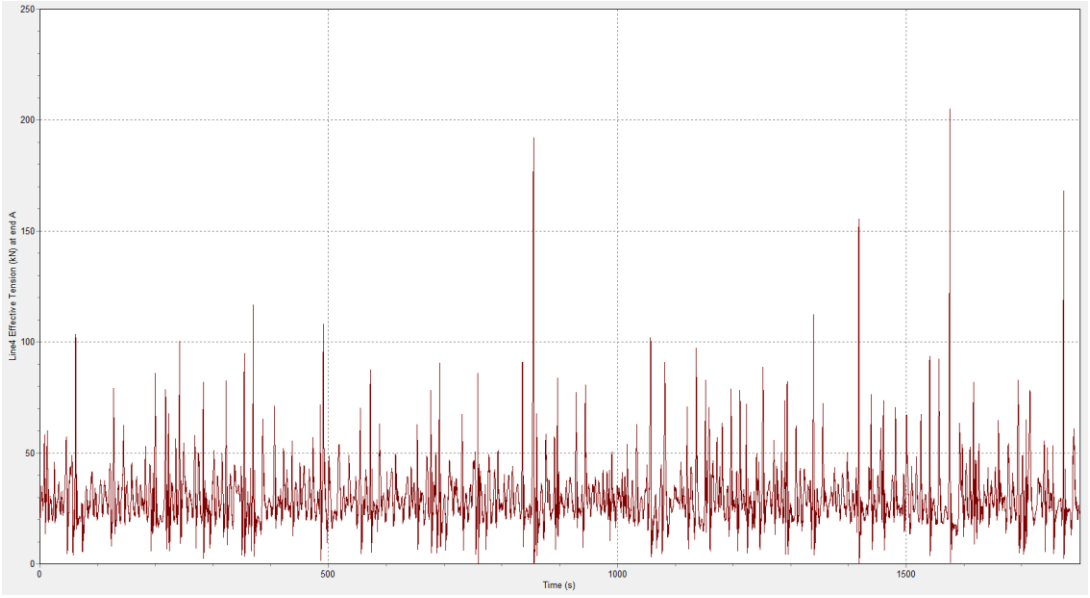
Case 20



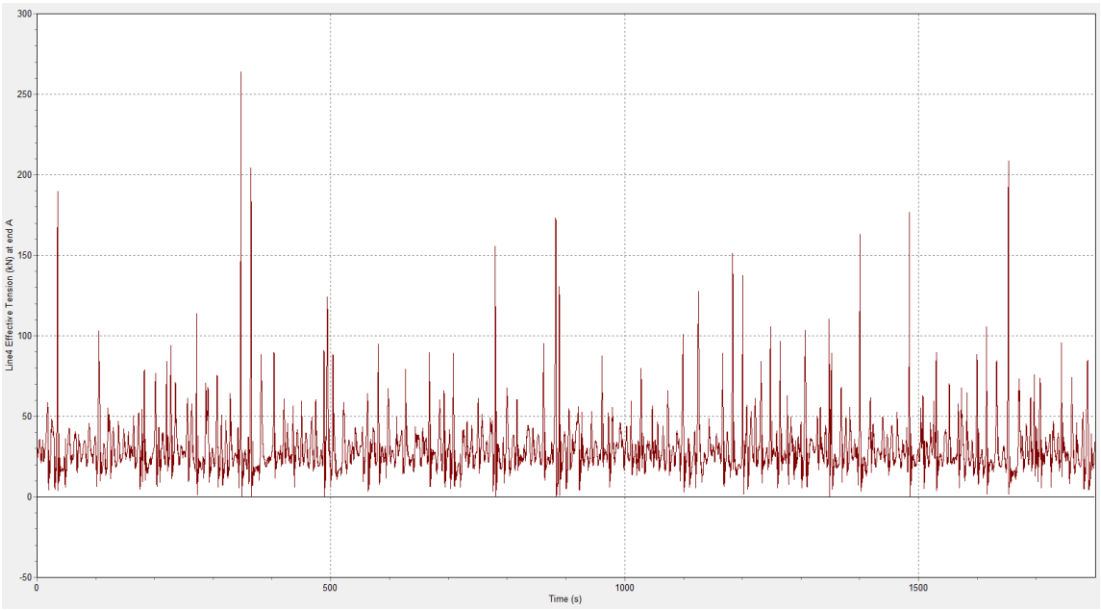
Case 21



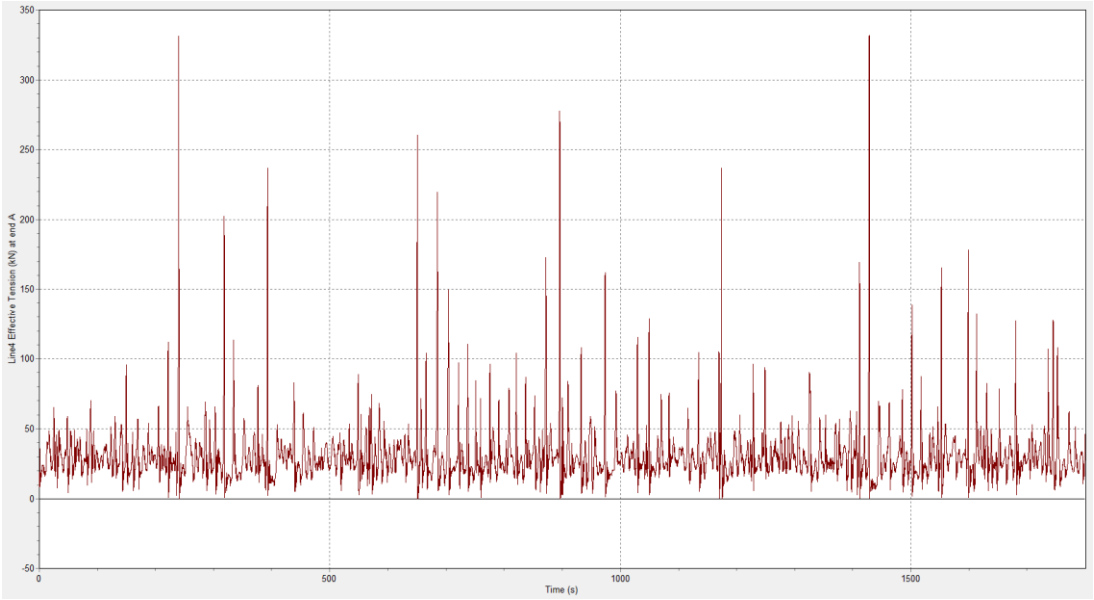
Case 22



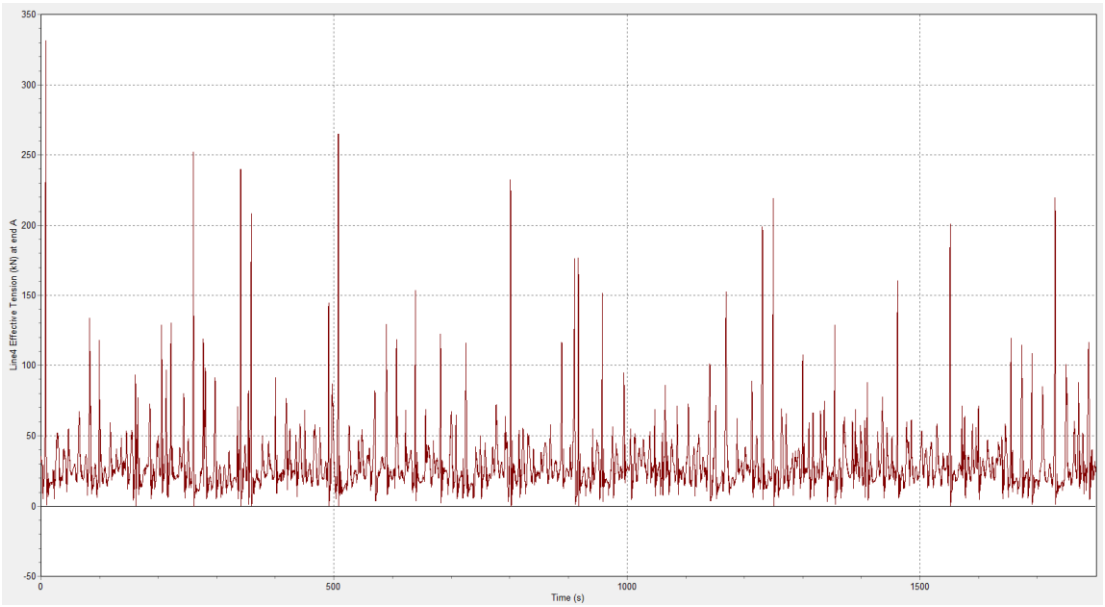
Case 23



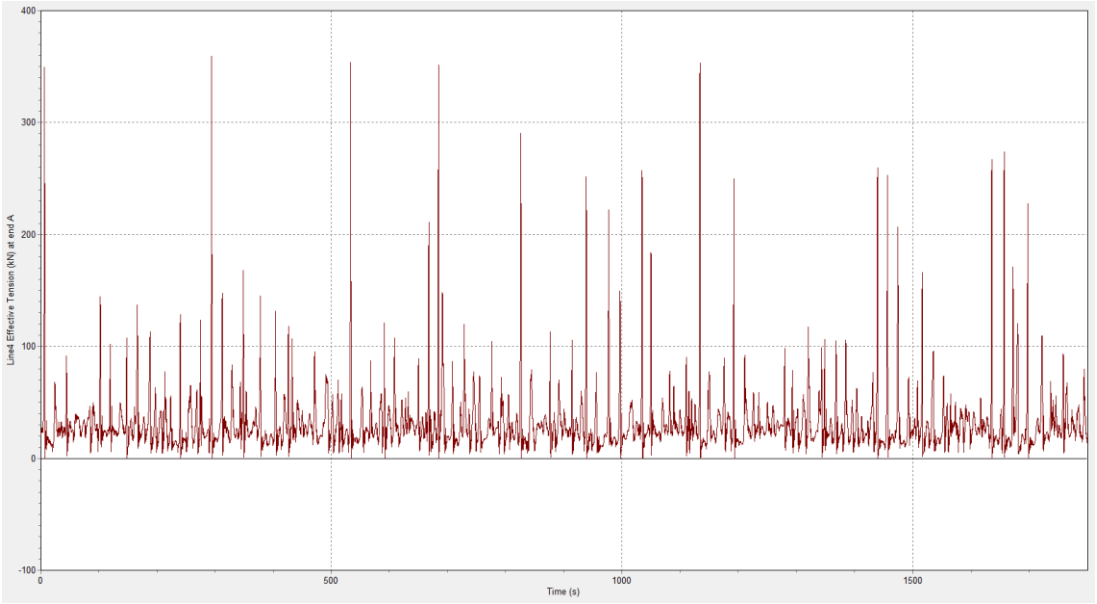
Case 24



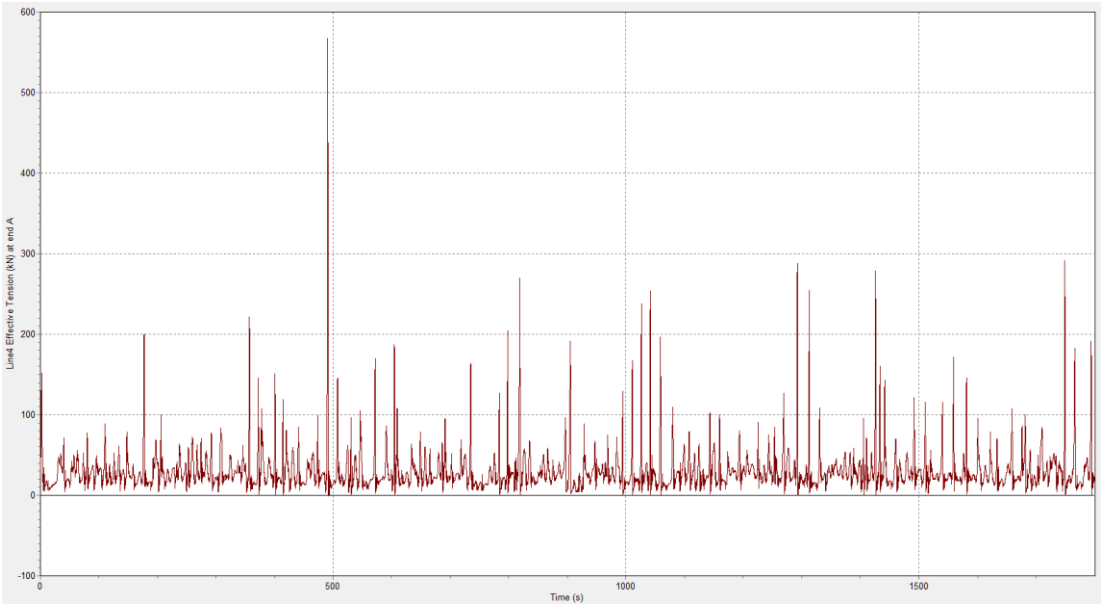
Case 25



Case 26

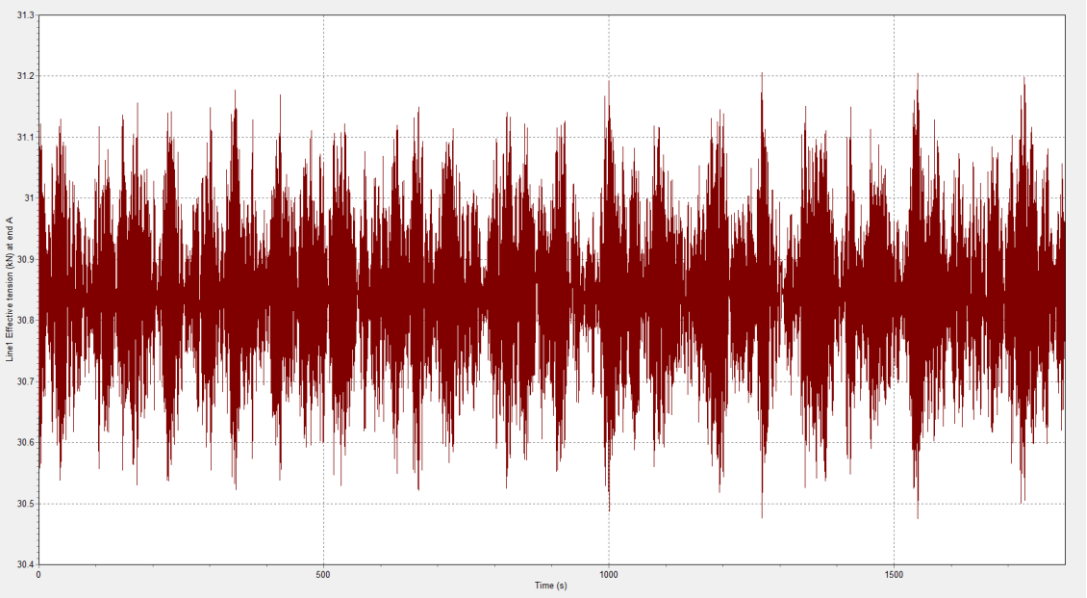


Case 27

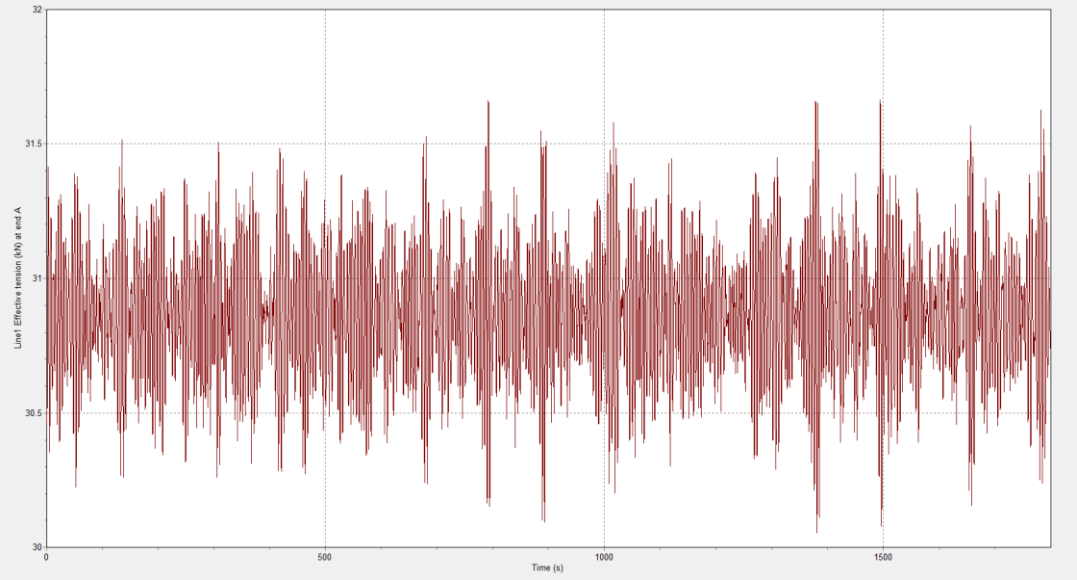


Grafik Seri Waktu *Effective Tension End A Anchor Chain 1* Pada Konfigurasi Simetris

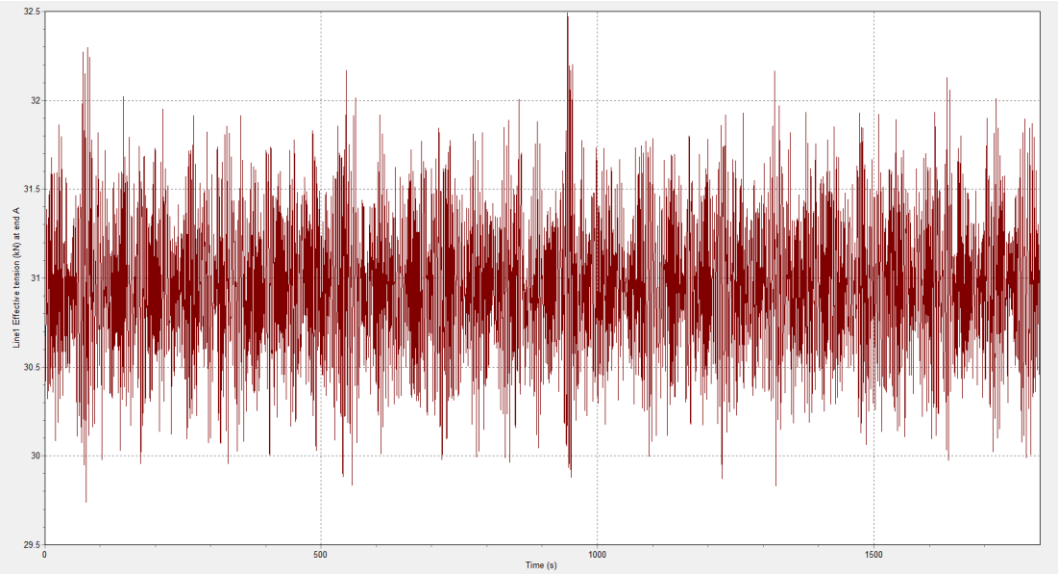
Case 1



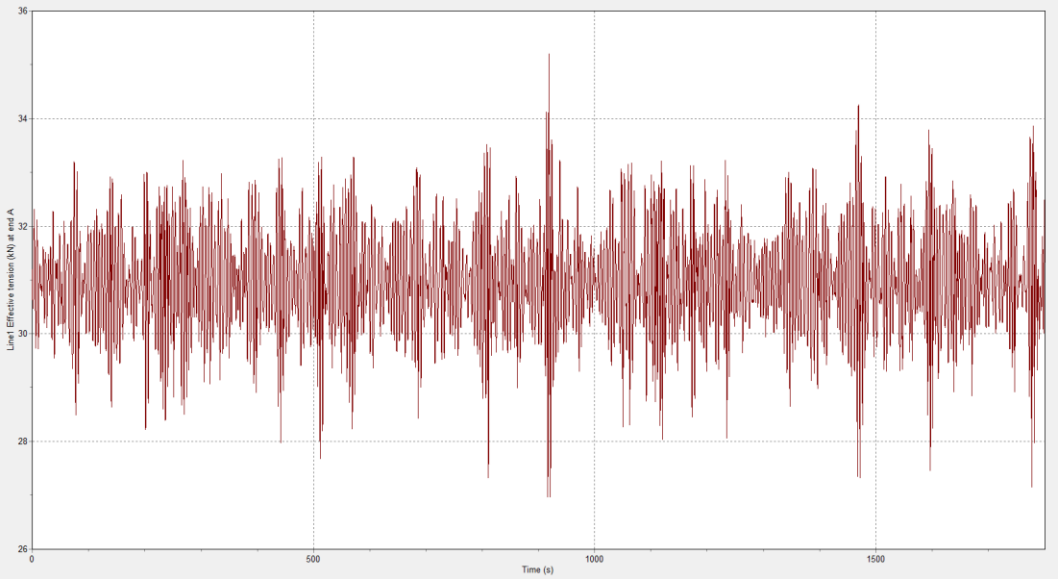
Case 2



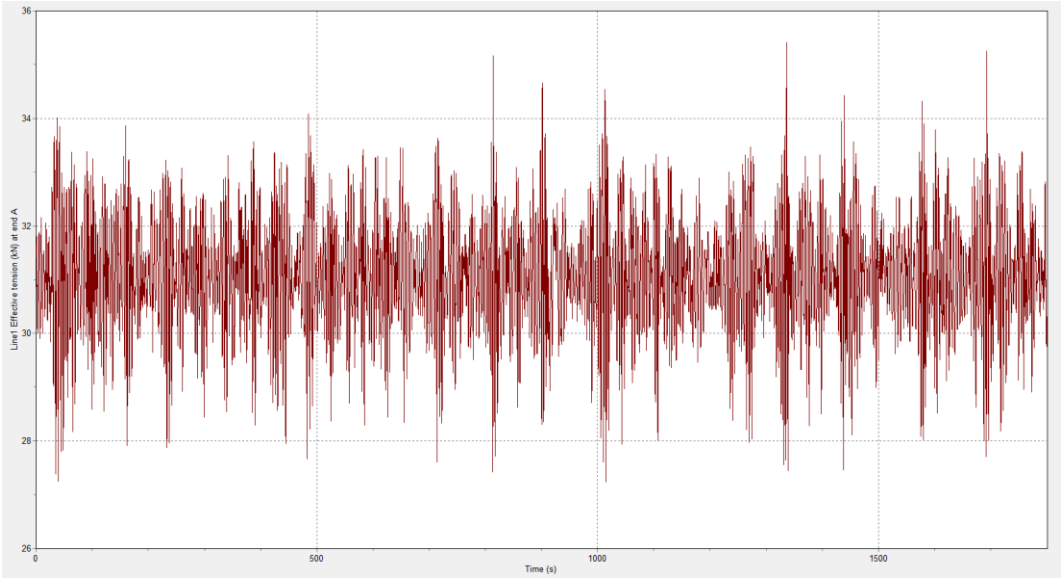
Case 3


32.5
32
31.5
31
30.5
30
29.5
Line1 Effective tension (kN) at end A
0
500
1000
1500
Time (s)

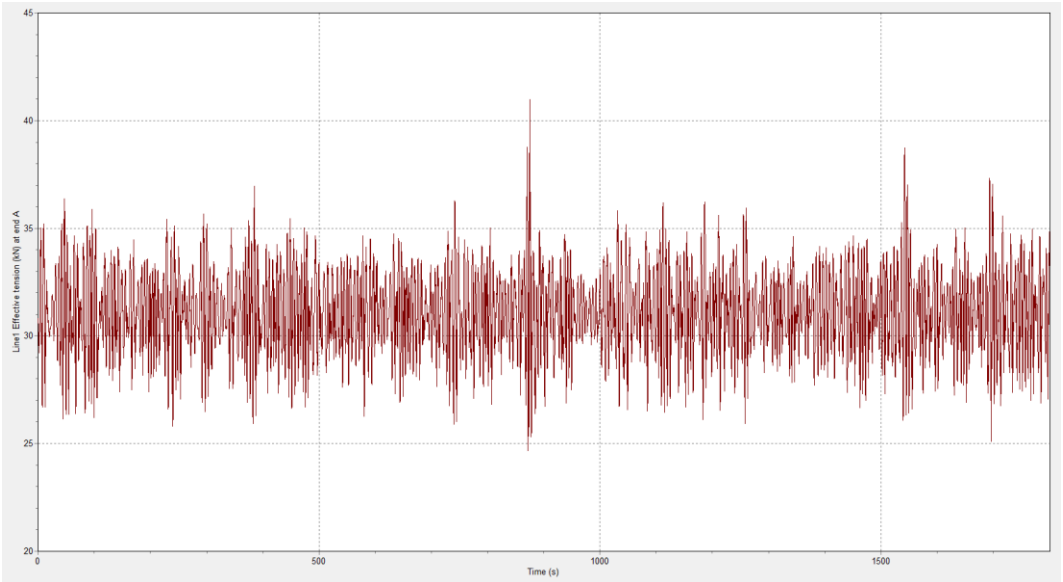
Case 4


36
34
32
30
28
26
Line1 Effective tension (kN) at end A
0
500
1000
1500
Time (s)

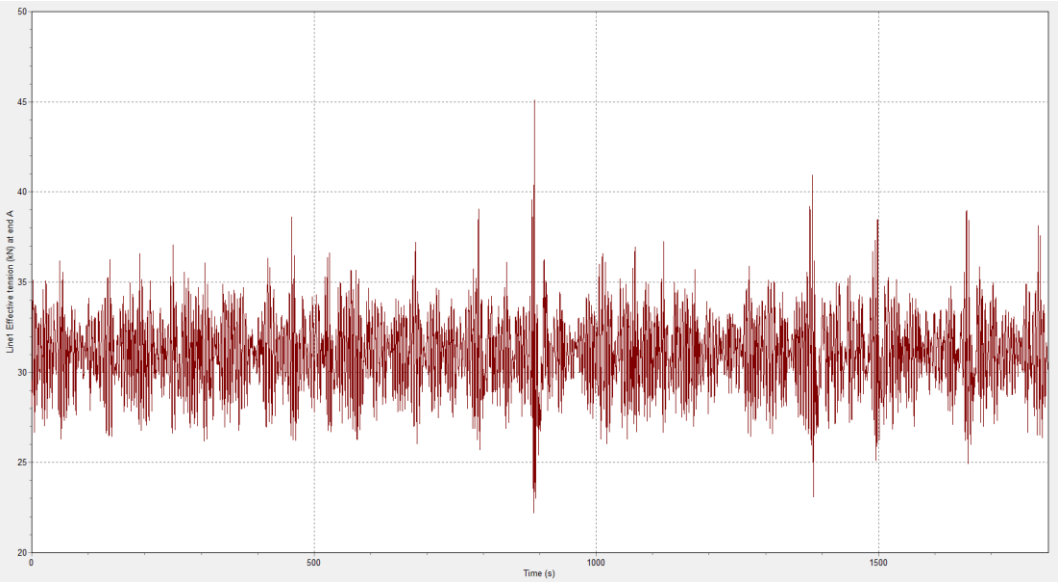
Case 5


Line1 Effective tension (kN) at end A
Time (s)
36
34
32
30
28
26
0
500
1000
1500

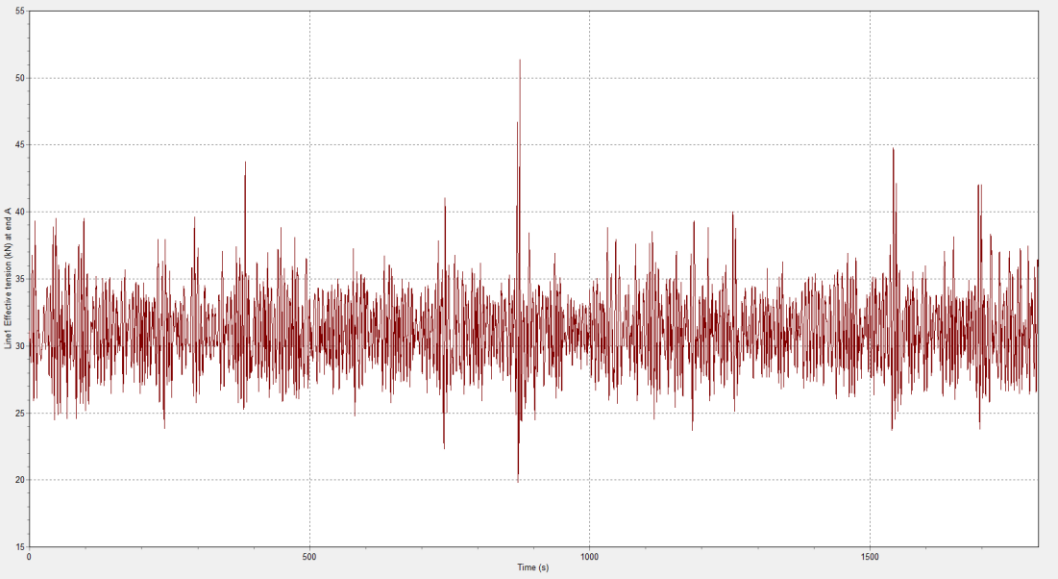
Case 6


Line1 Effective tension (kN) at end A
Time (s)
45
40
35
30
25
20
0
500
1000
1500

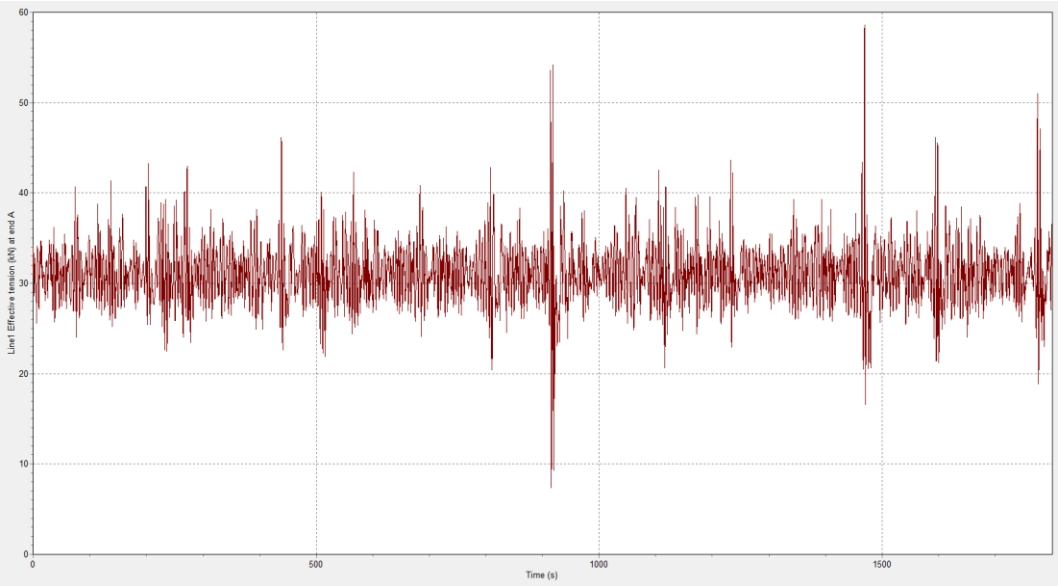
Case 7


Line1 Effective tension (kN) at end A
Time (s)
50
45
40
35
30
25
20
0
500
1000
1500

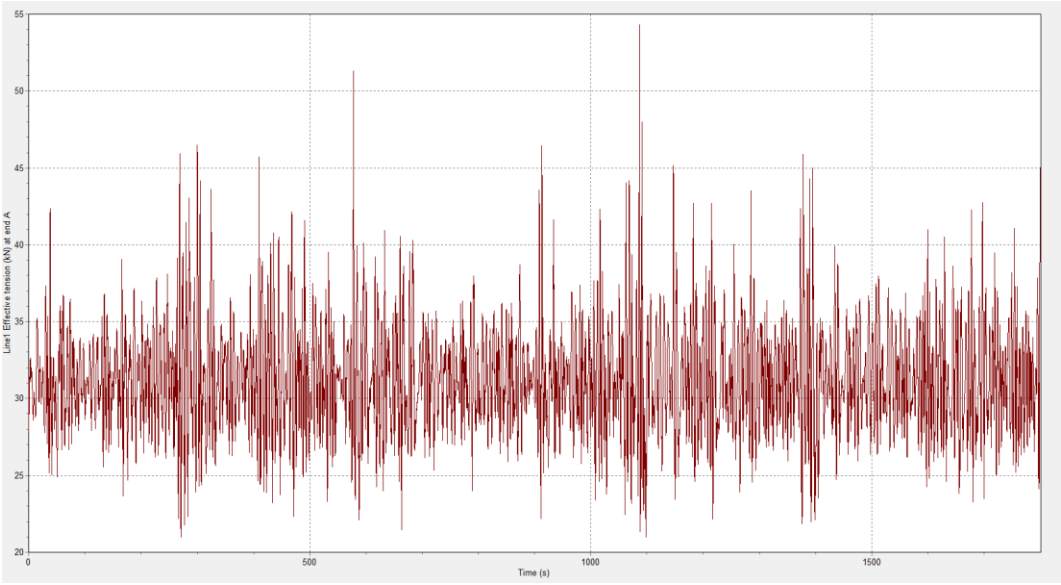
Case 8


Line1 Effective tension (kN) at end A
Time (s)
55
50
45
40
35
30
25
20
15
0
500
1000
1500

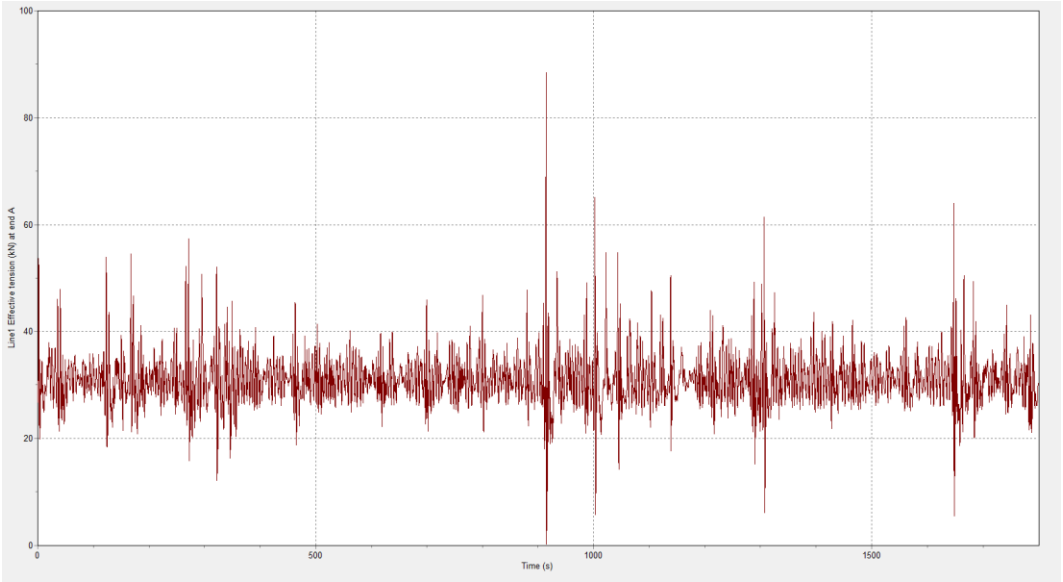
Case 9



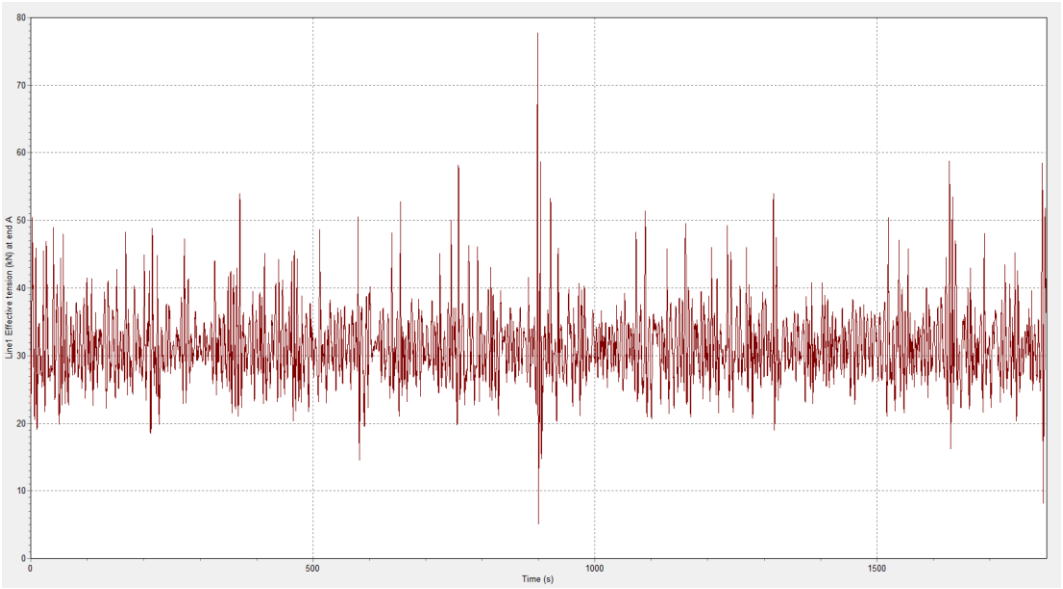
Case 10



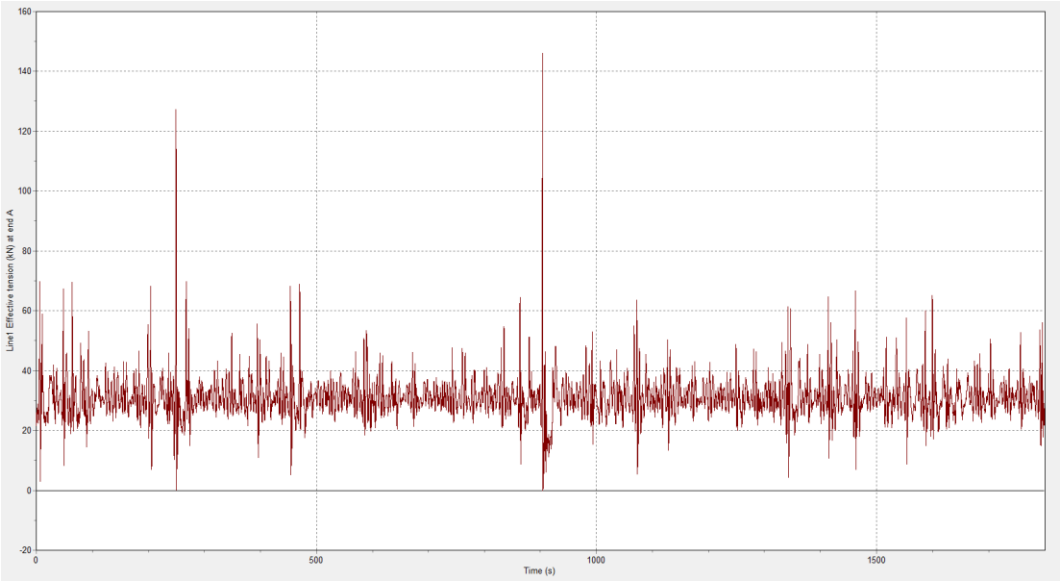
Case 11



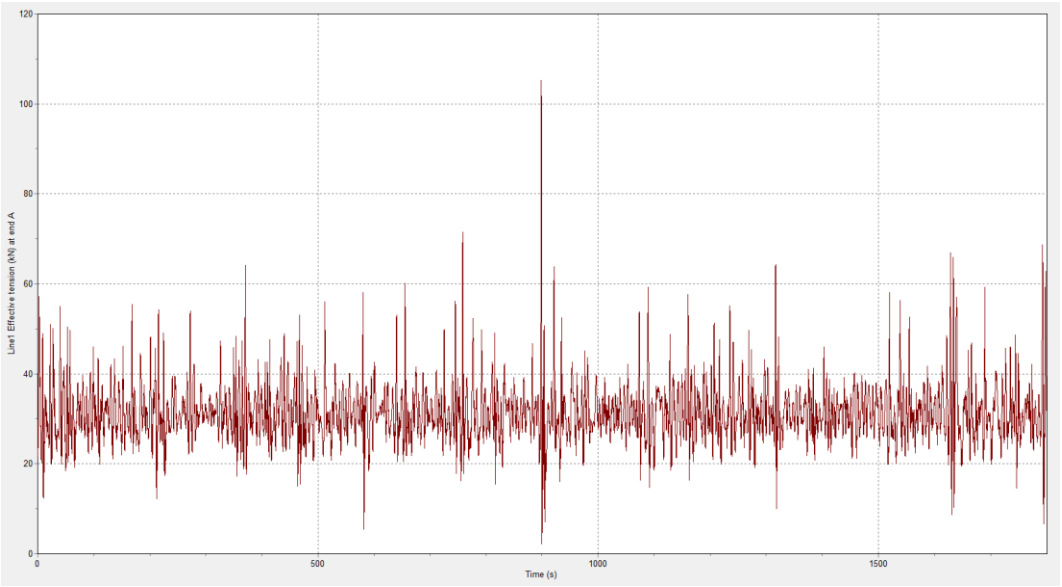
Case 12



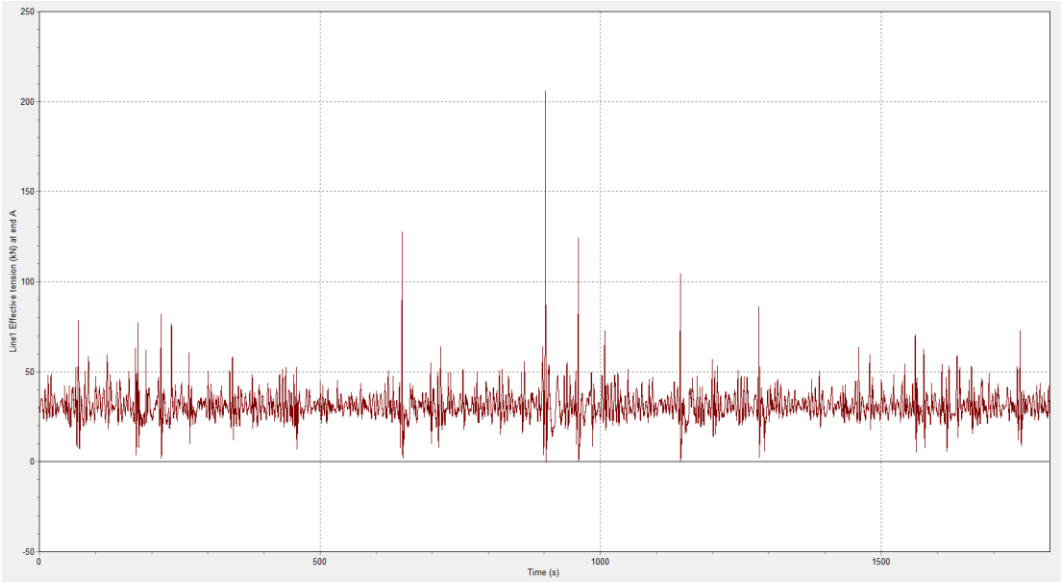
Case 13



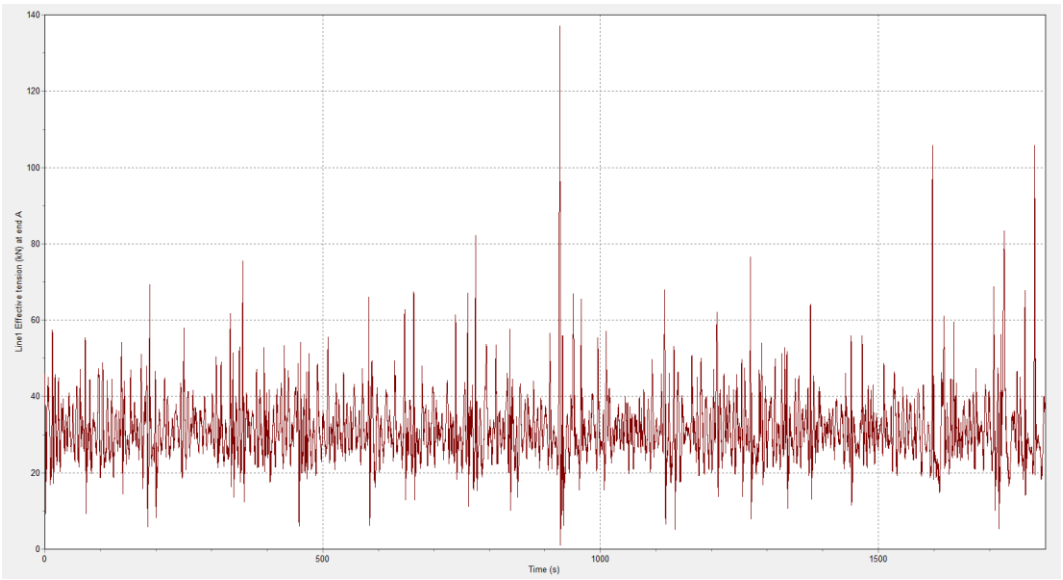
Case 14



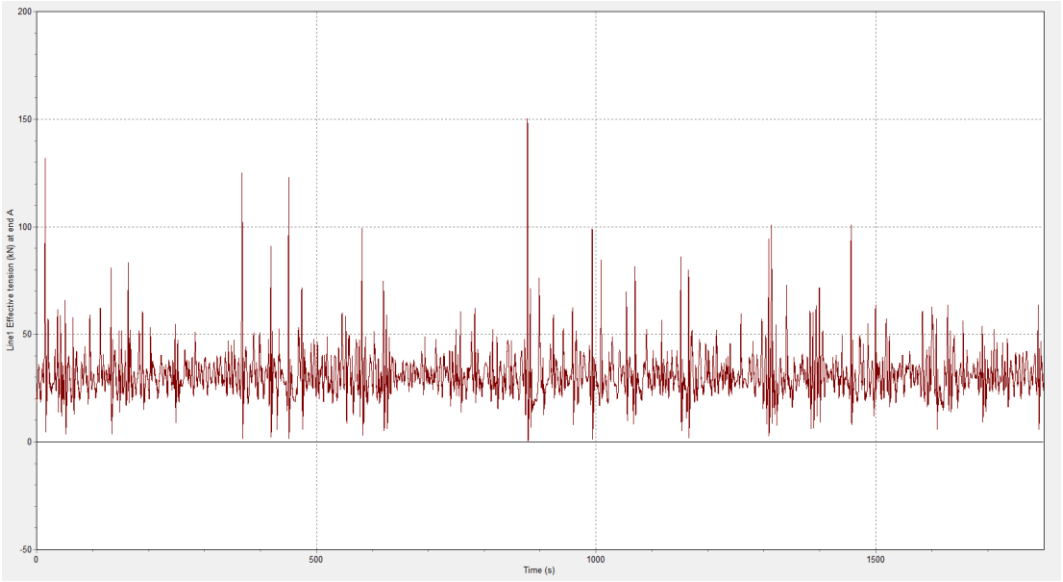
Case 15



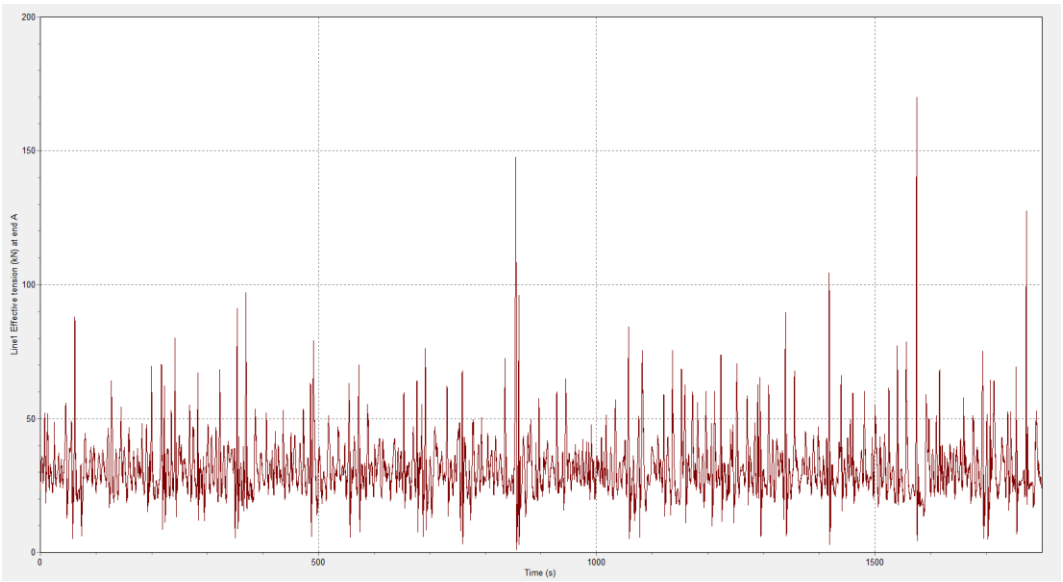
Case 16



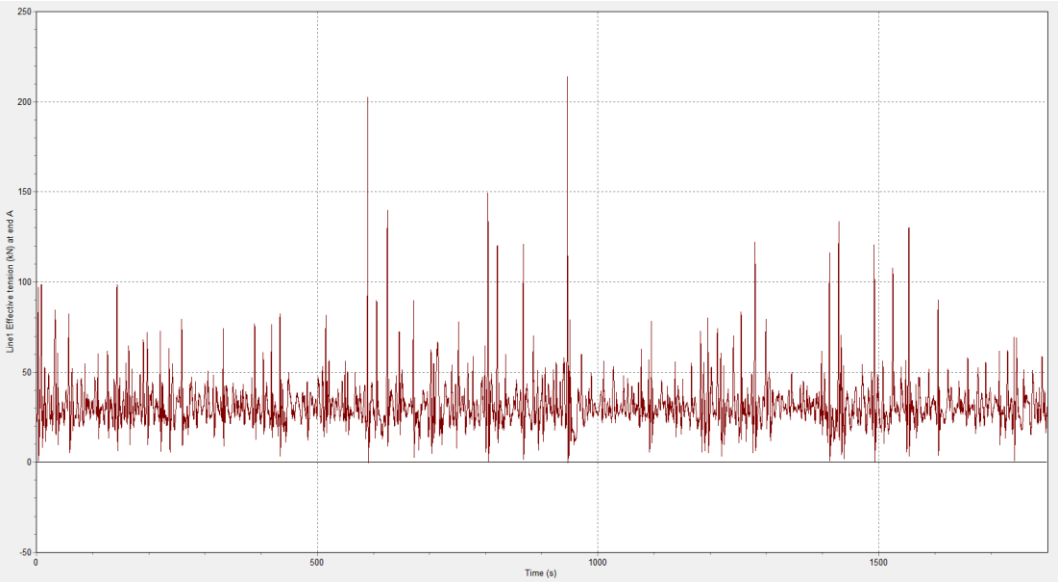
Case 17



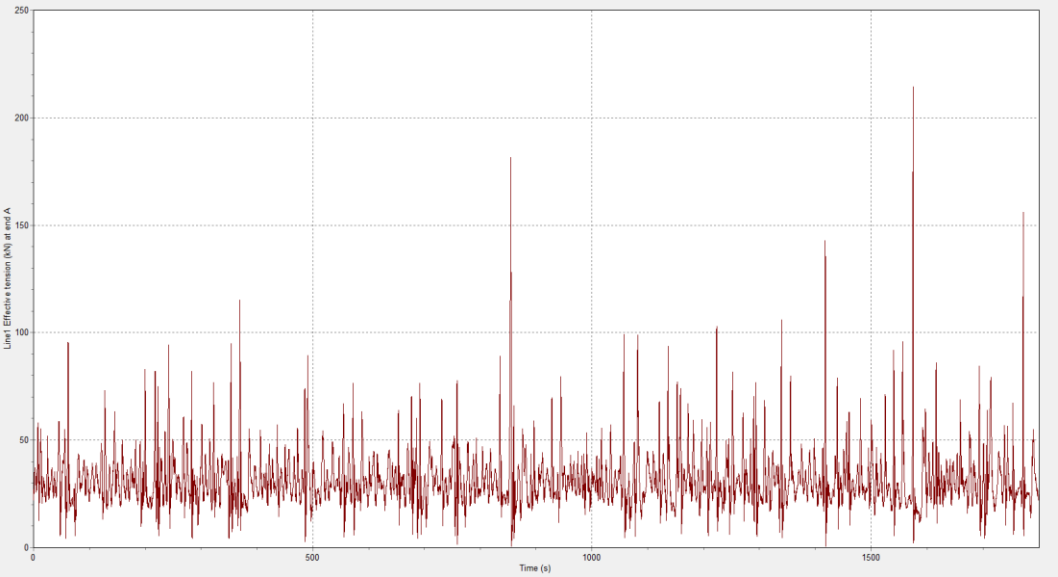
Case 18



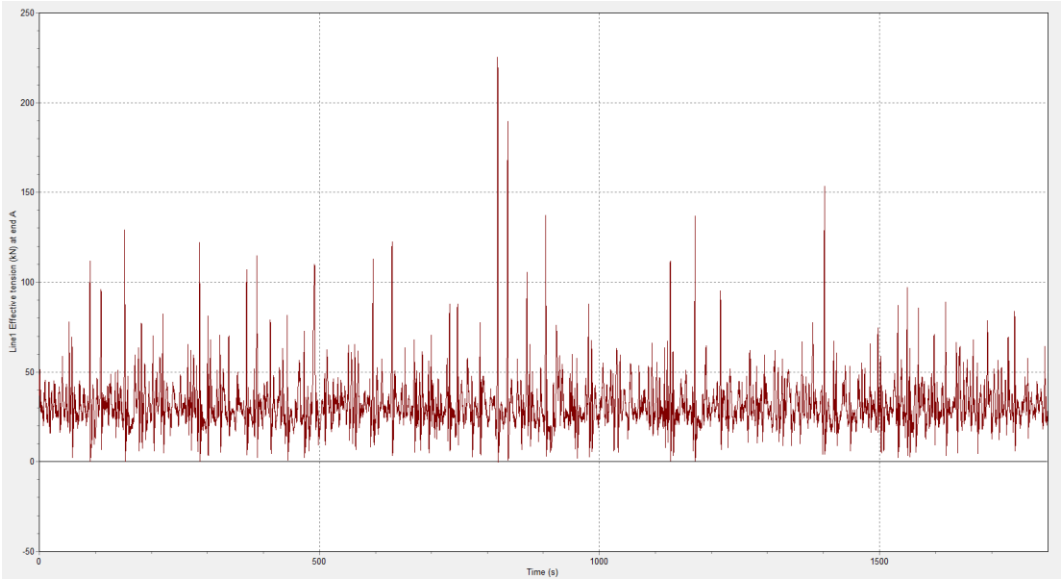
Case 19



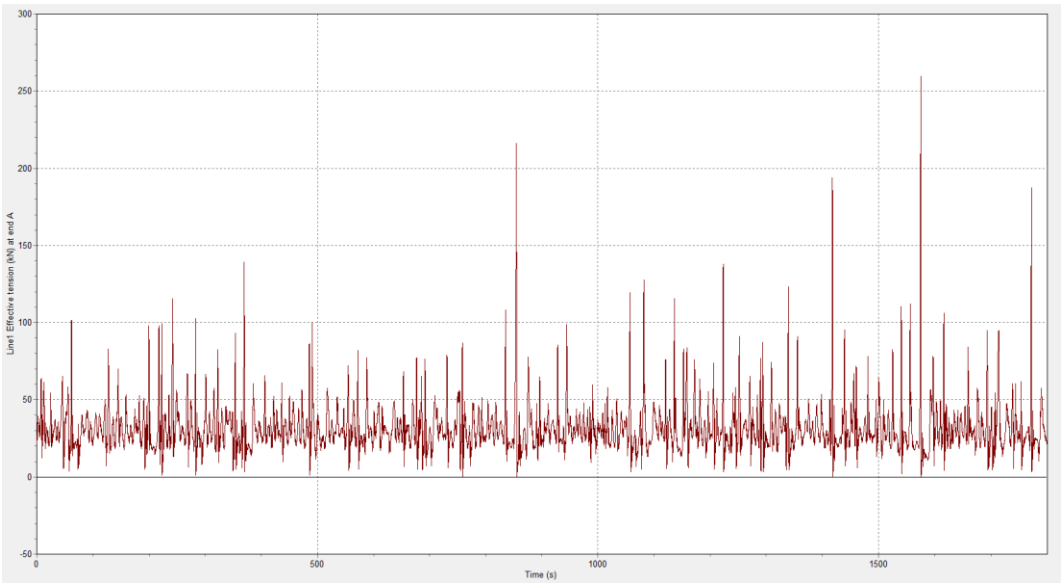
Case 20



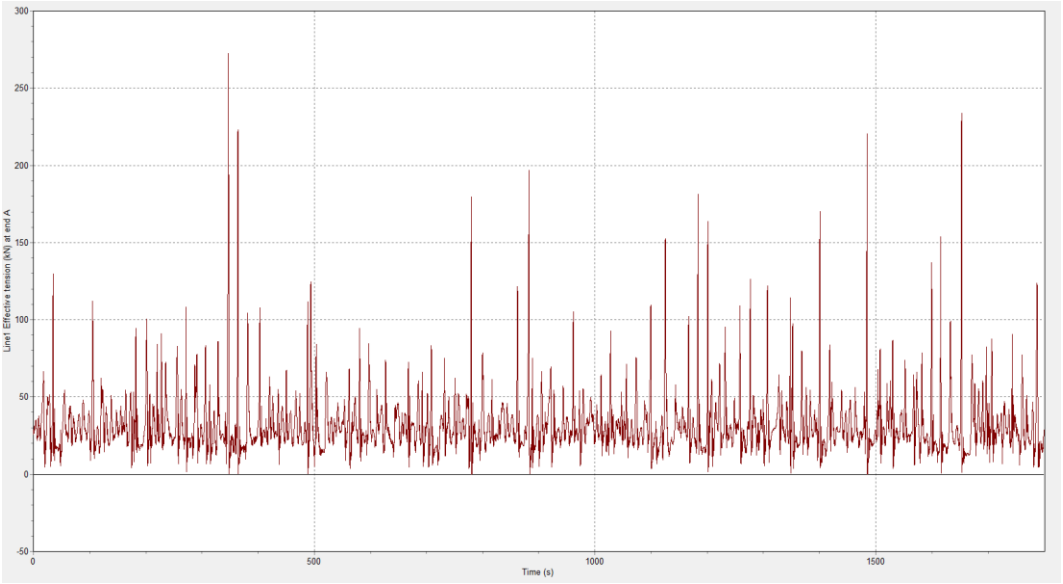
Case 21



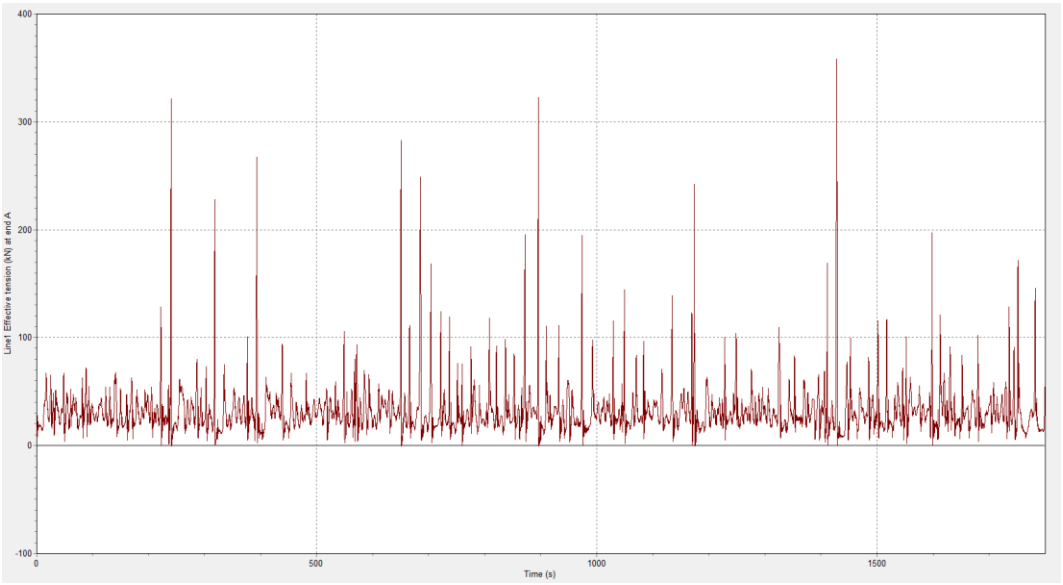
Case 22



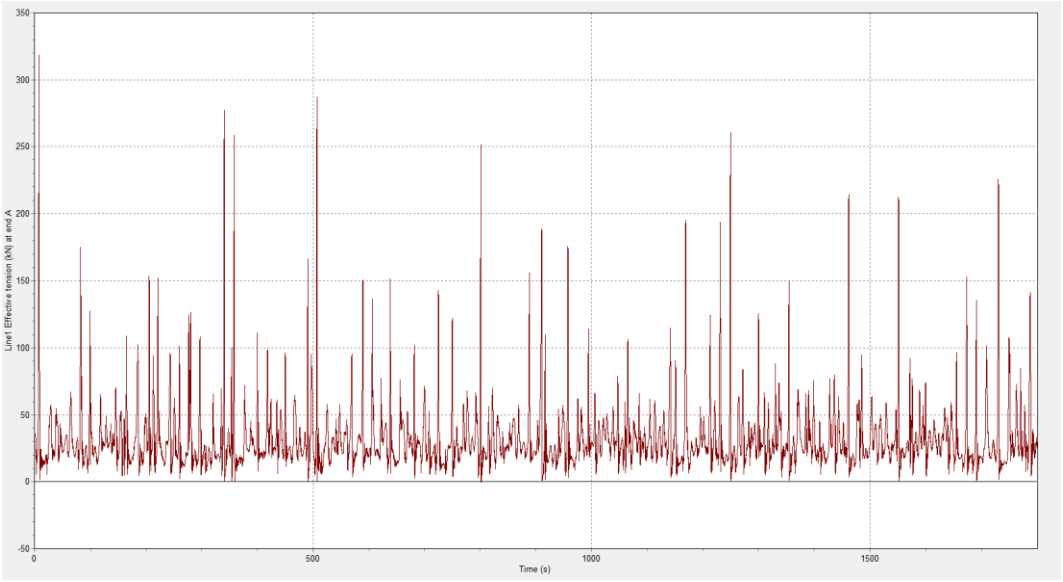
Case 23



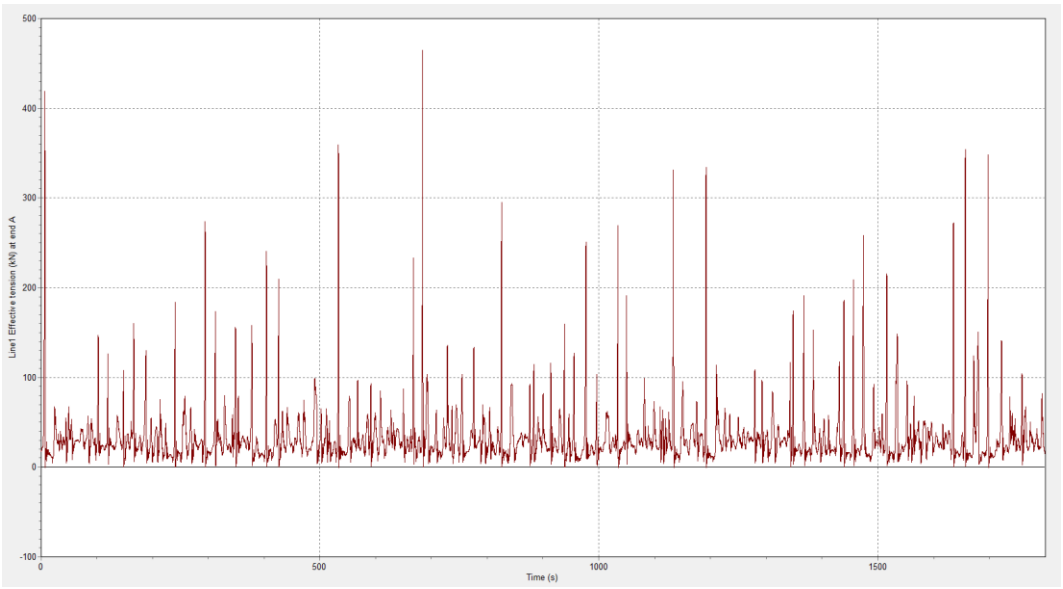
Case 24



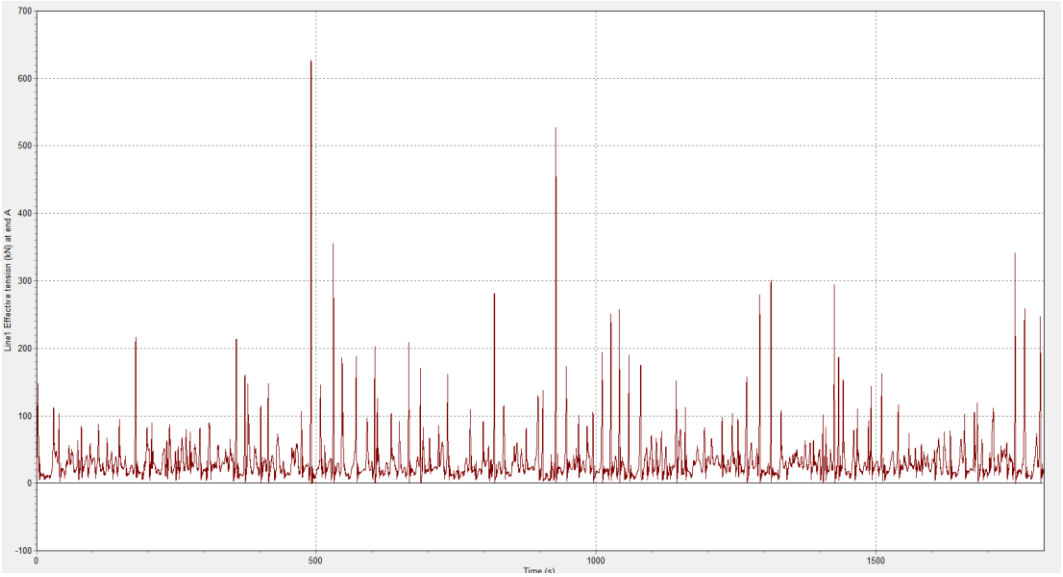
Case 25



Case 26

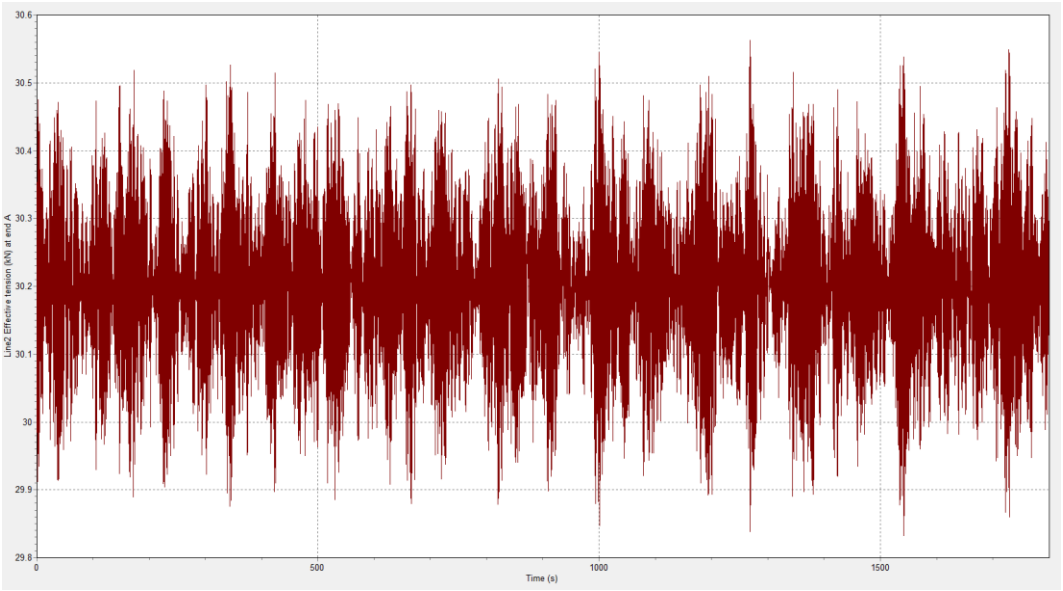


Case 27

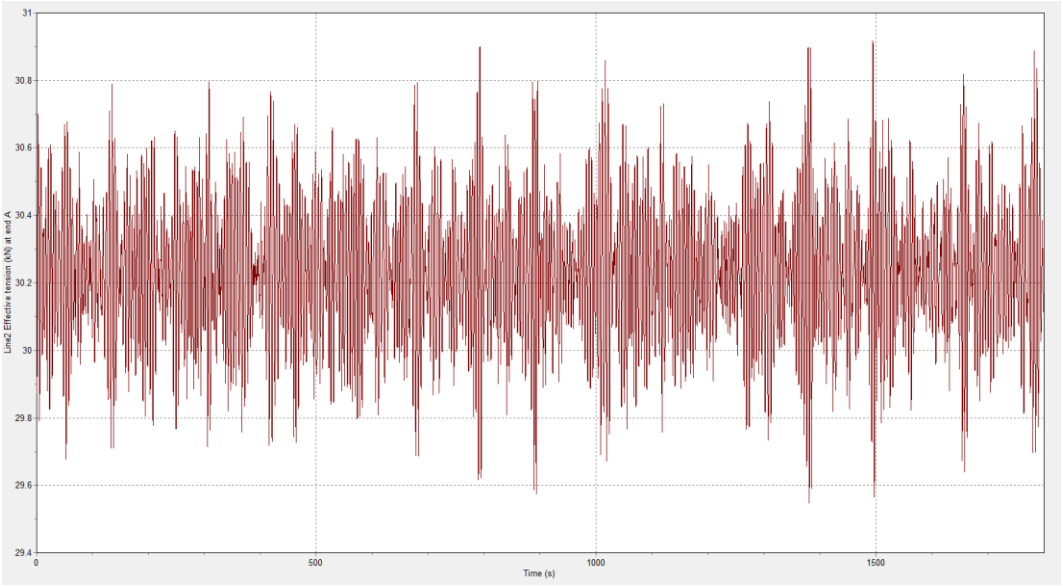


Grafik Seri Waktu *Effective Tension End A Anchor Chain 2* Pada Konfigurasi Simetris

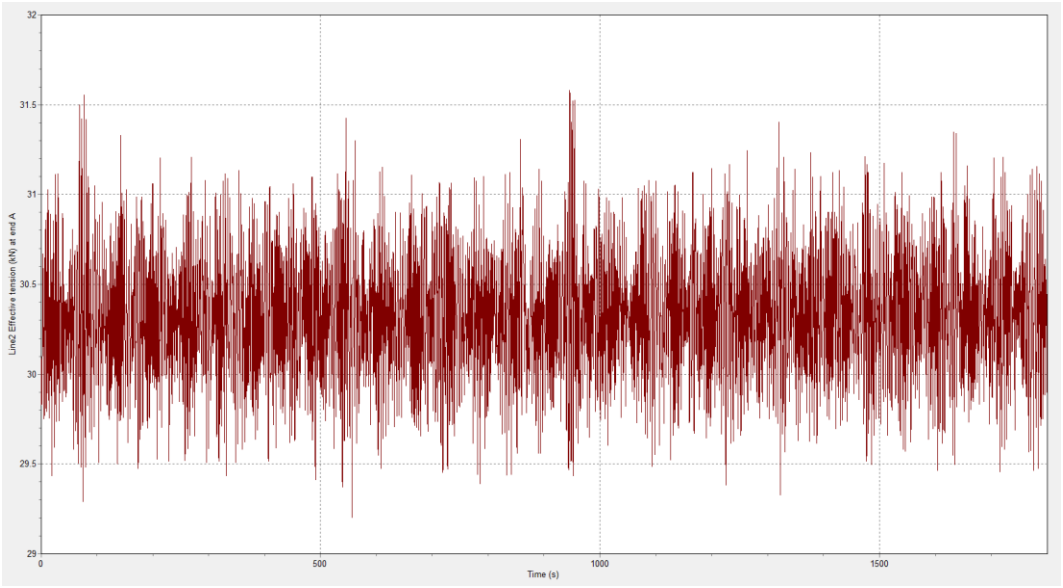
Case 1



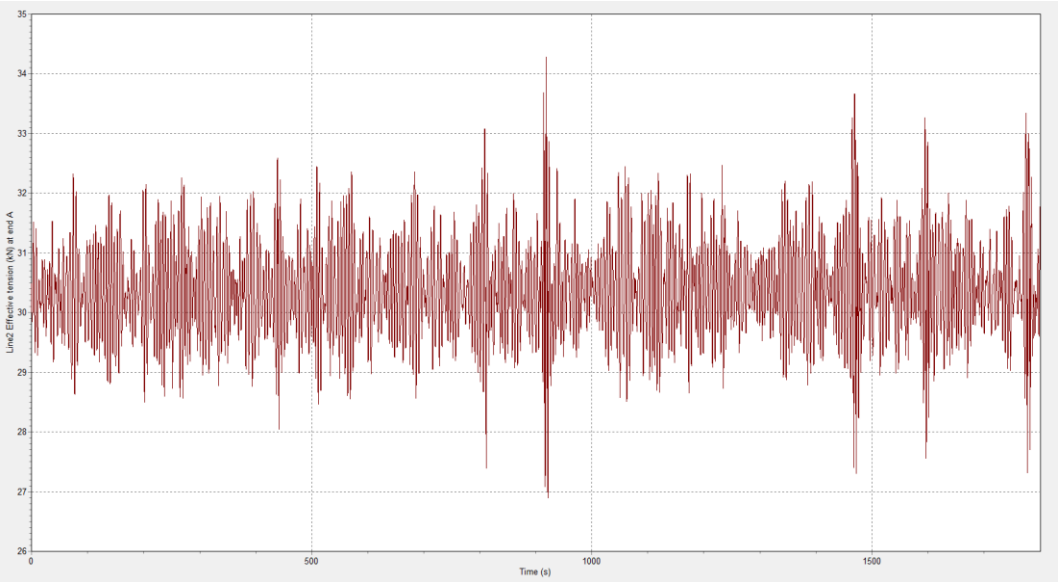
Case 2


Line2 Effective tension (kN) at end A
31
30.8
30.6
30.4
30.2
30
29.8
29.6
29.4
0
500
1000
1500
Time (s)

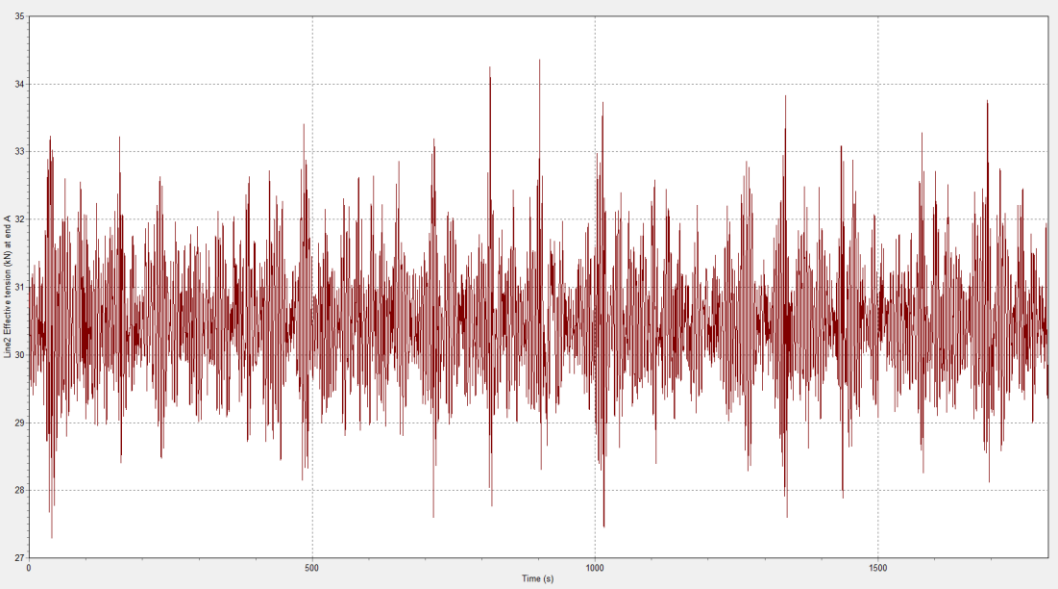
Case 3


Line2 Effective tension (kN) at end A
32
31.5
31
30.5
30
29.5
29
0
500
1000
1500
Time (s)

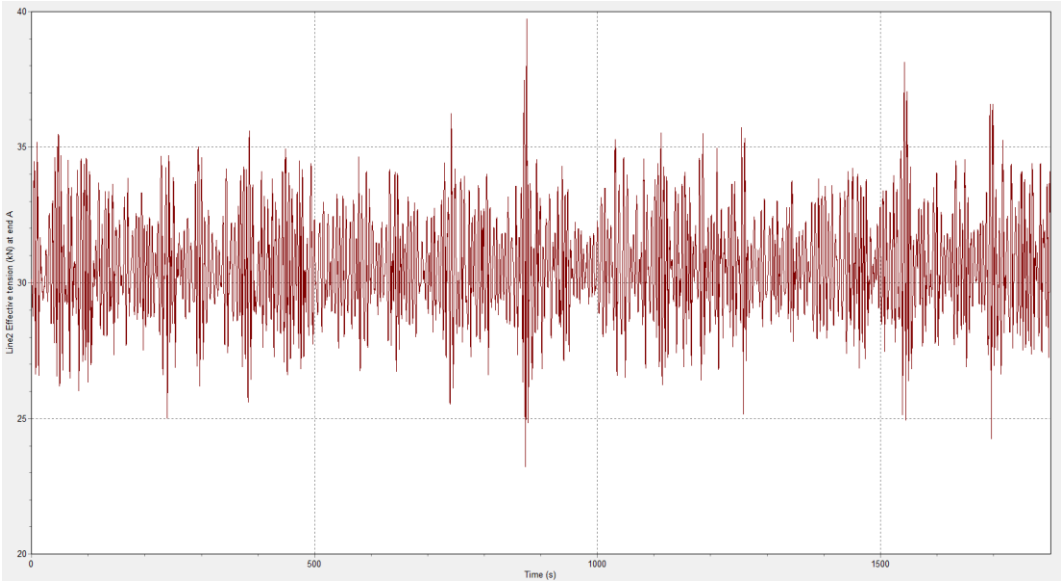
Case 4


Line2 Effective tension (kN) at end A
Time (s)
35
34
33
32
31
30
29
28
27
26
0
500
1000
1500

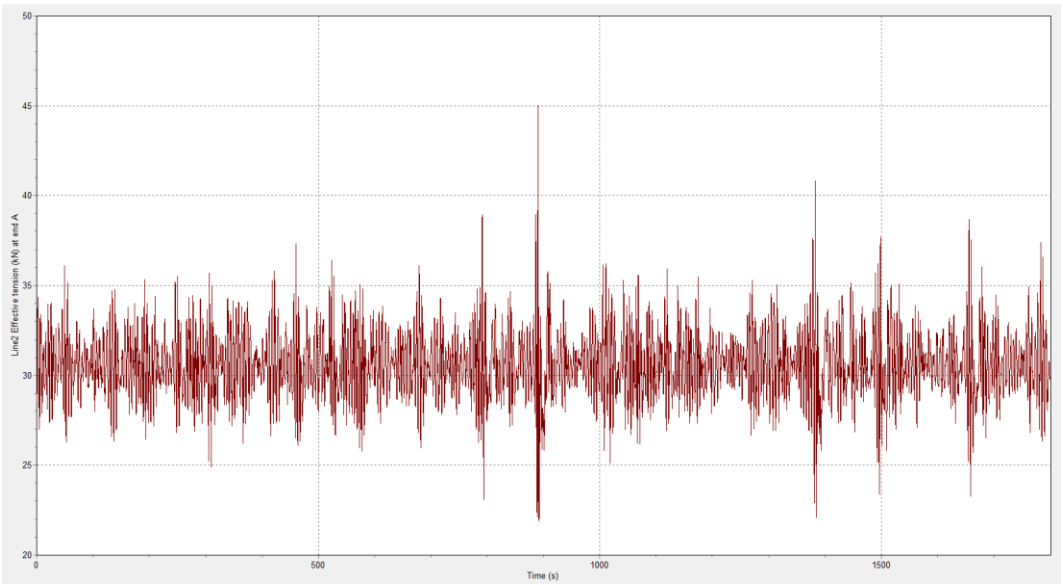
Case 5


Line2 Effective tension (kN) at end A
Time (s)
35
34
33
32
31
30
29
28
27
0
500
1000
1500

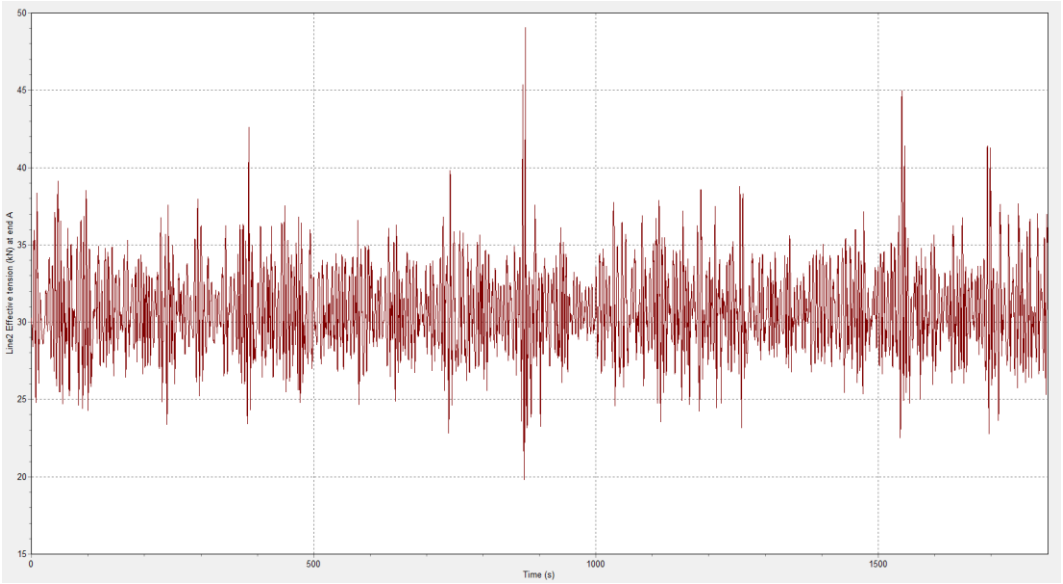
Case 6


Line2 Effective tension (kN) at end A
Time (s)
40
35
30
25
20
0
500
1000
1500

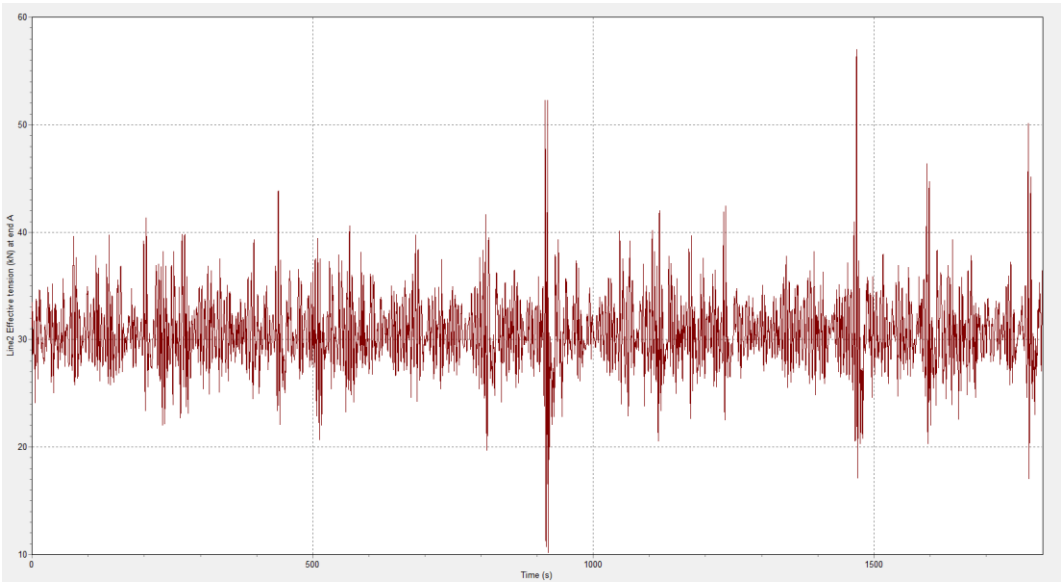
Case 7


Line2 Effective tension (kN) at end A
Time (s)
50
45
40
35
30
25
20
0
500
1000
1500

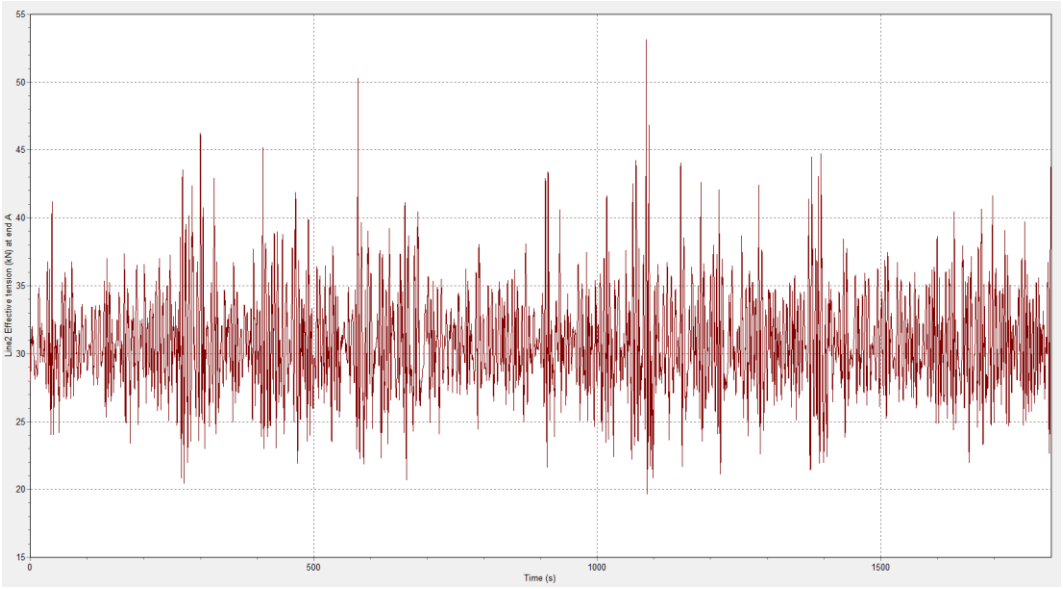
Case 8


Line2 Effective tension (kN) at end A
Time (s)
50
45
40
35
30
25
20
15
0
500
1000
1500

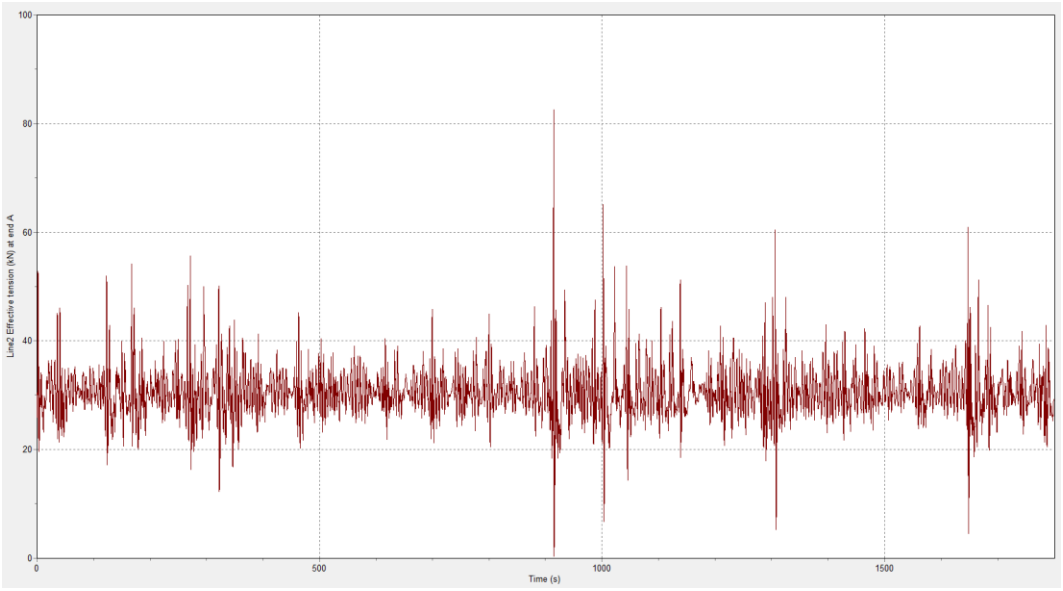
Case 9


Line2 Effective tension (kN) at end A
Time (s)
60
50
40
30
20
10
0
500
1000
1500

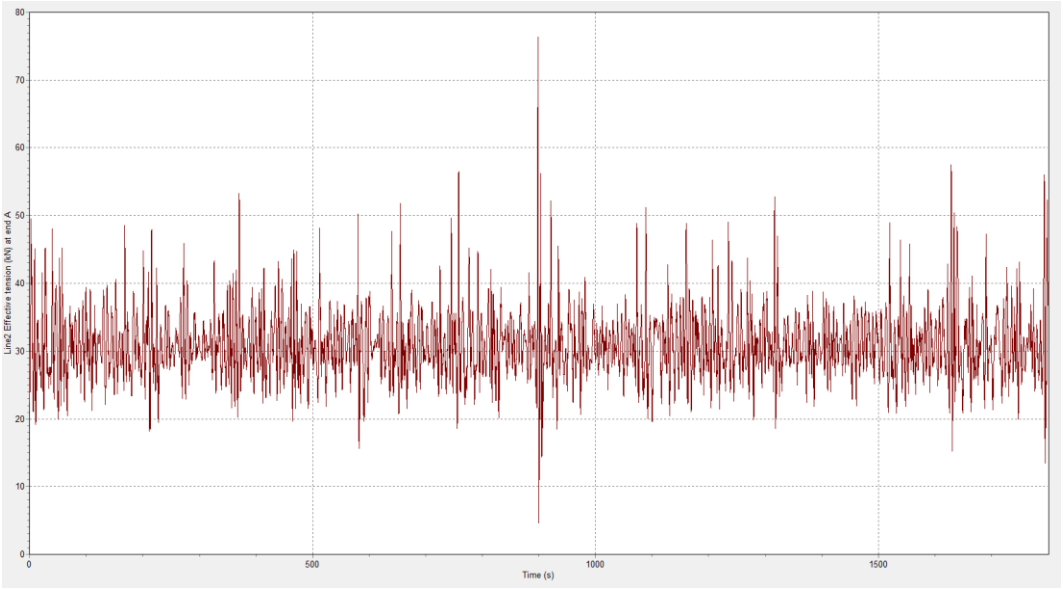
Case 10



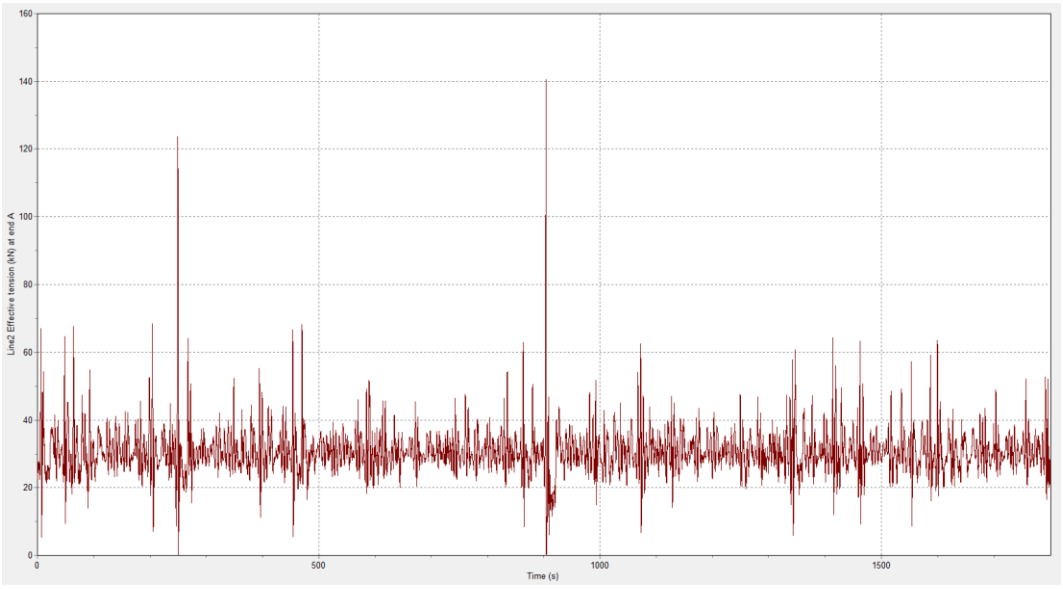
Case 11



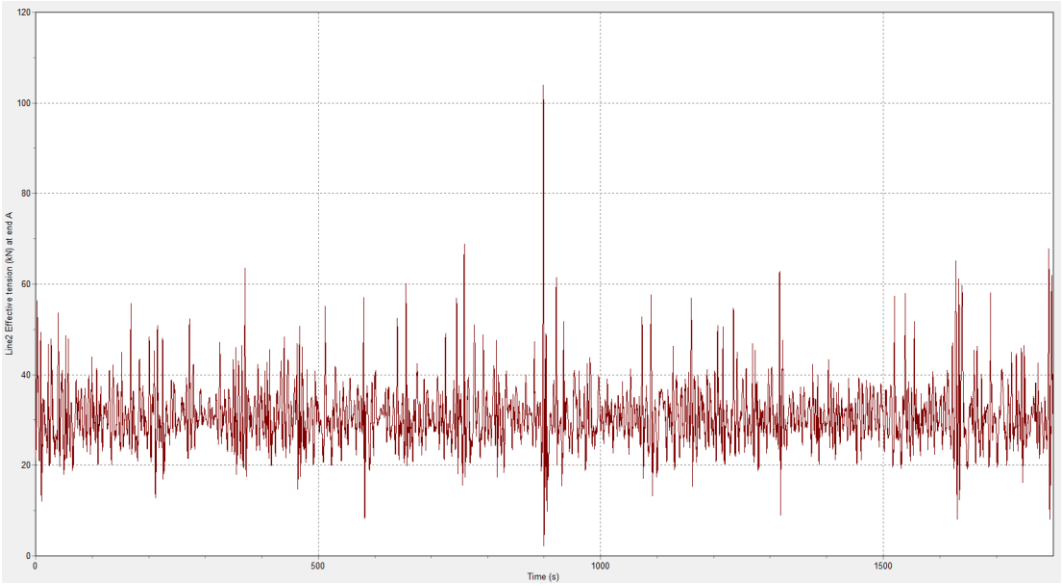
Case 12



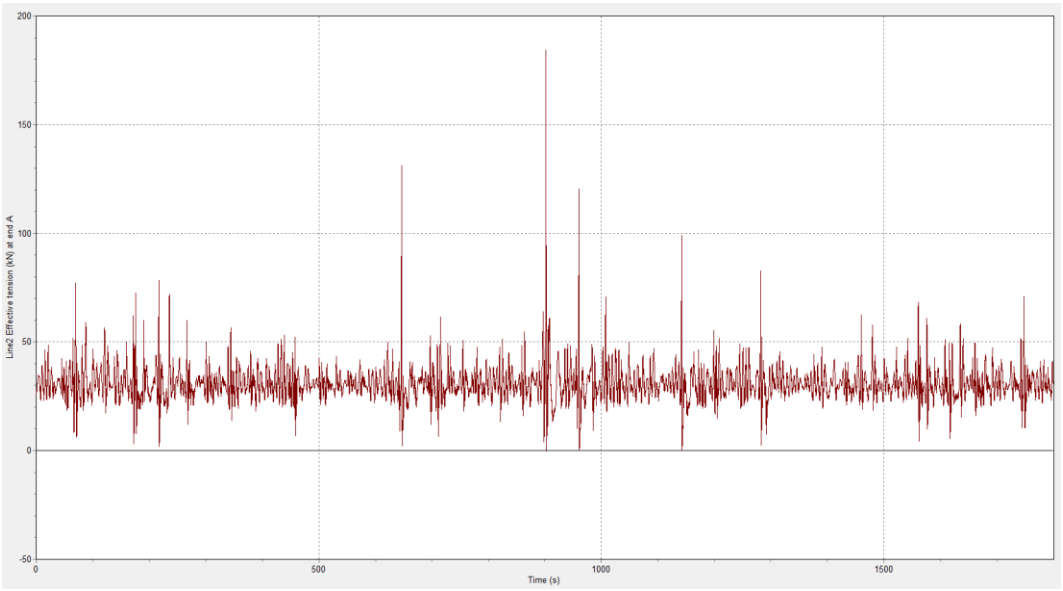
Case 13



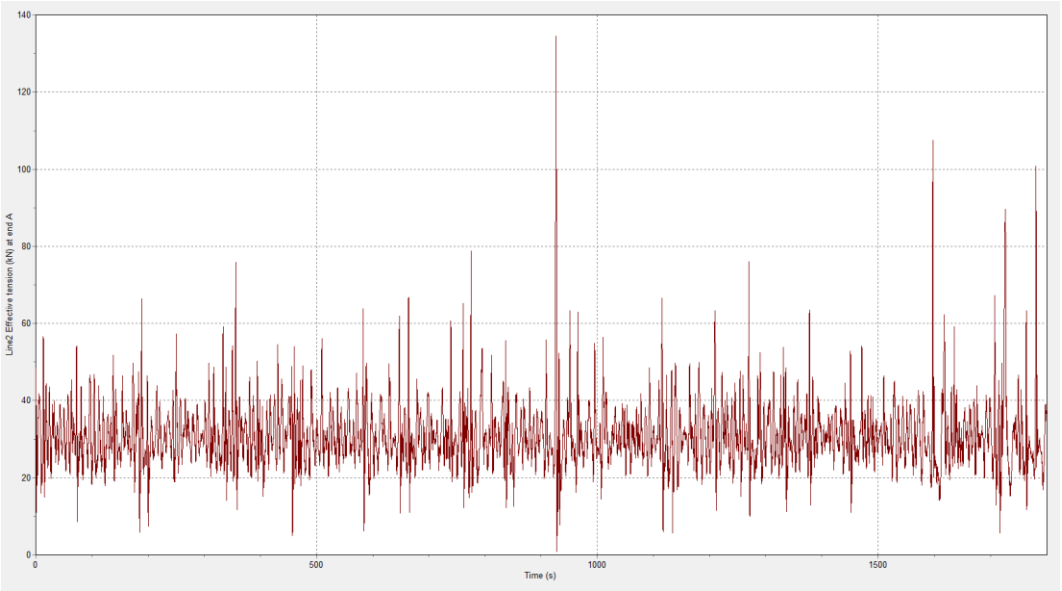
Case 14



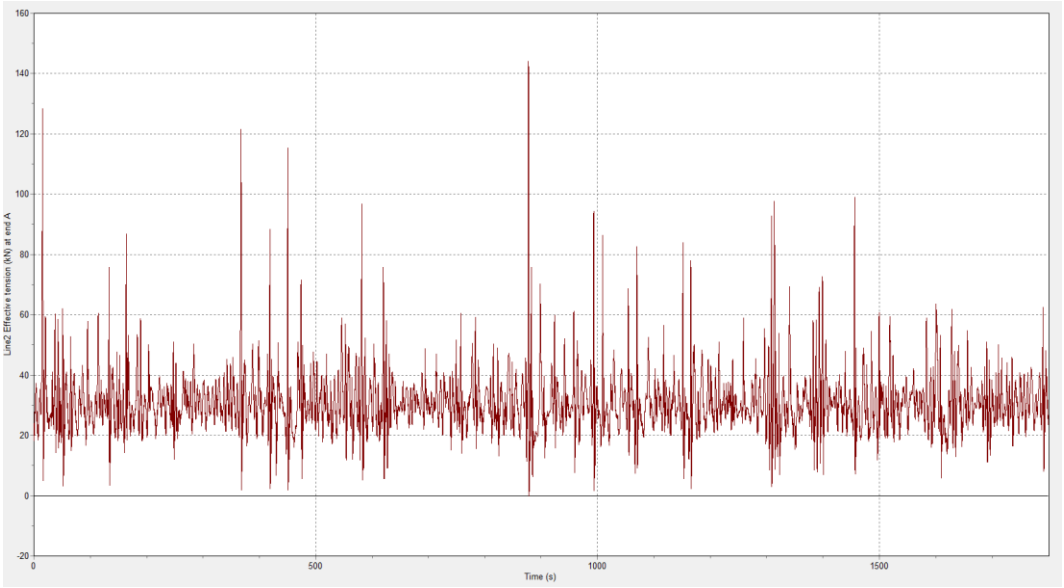
Case 15



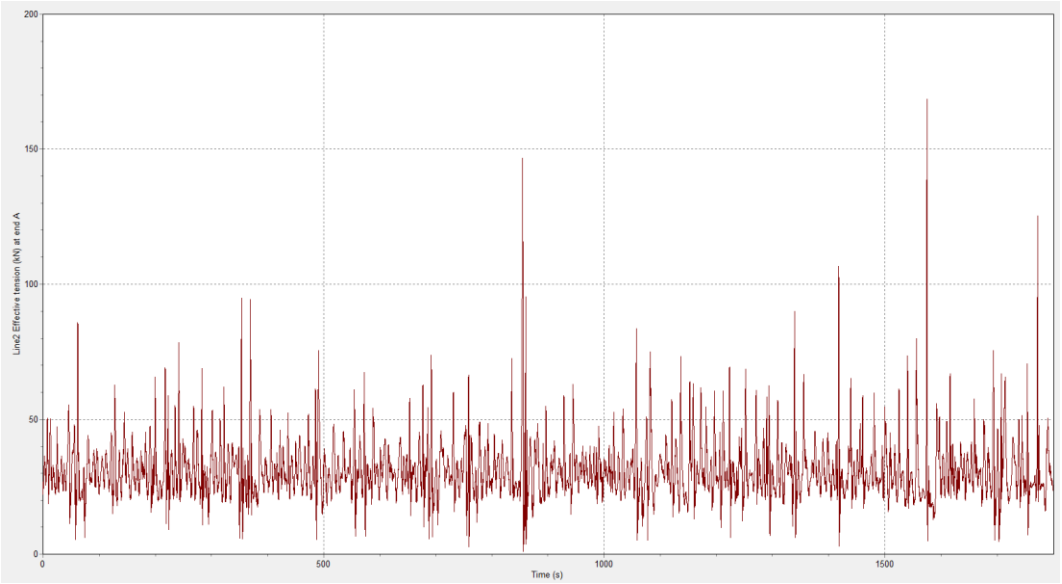
Case 16



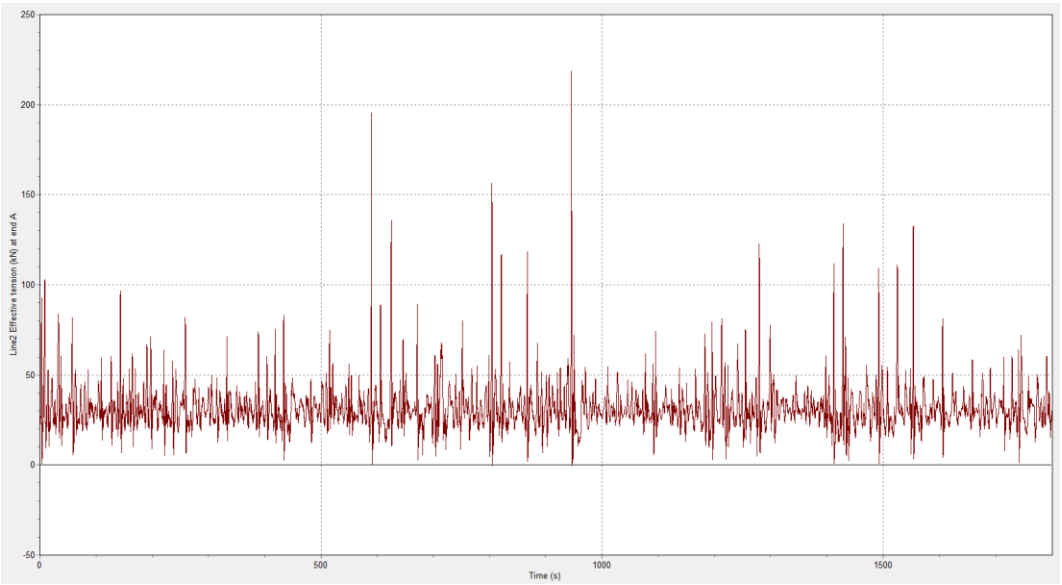
Case 17



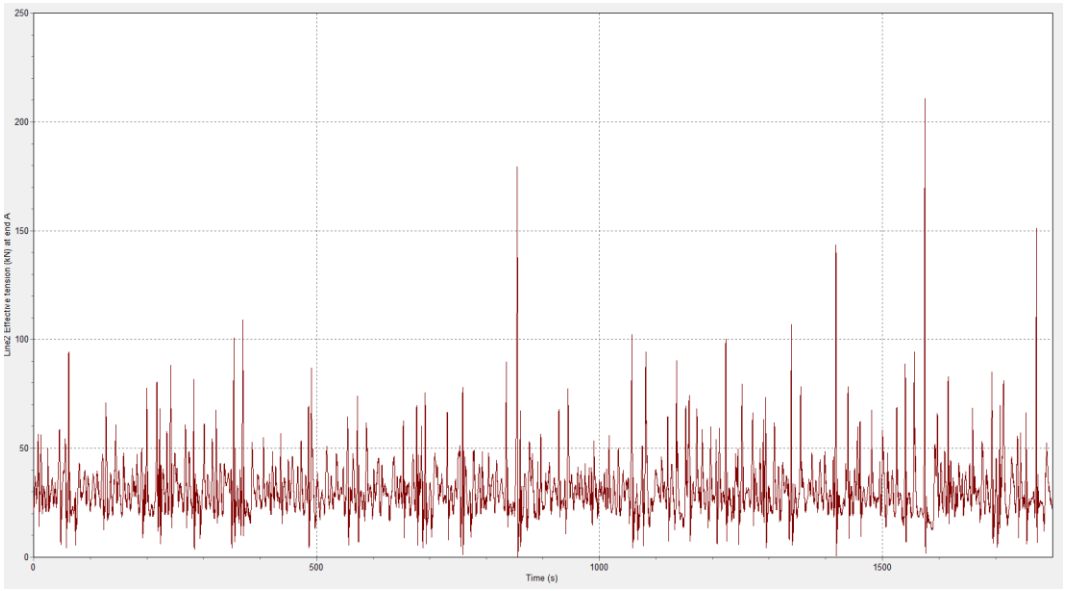
Case 18



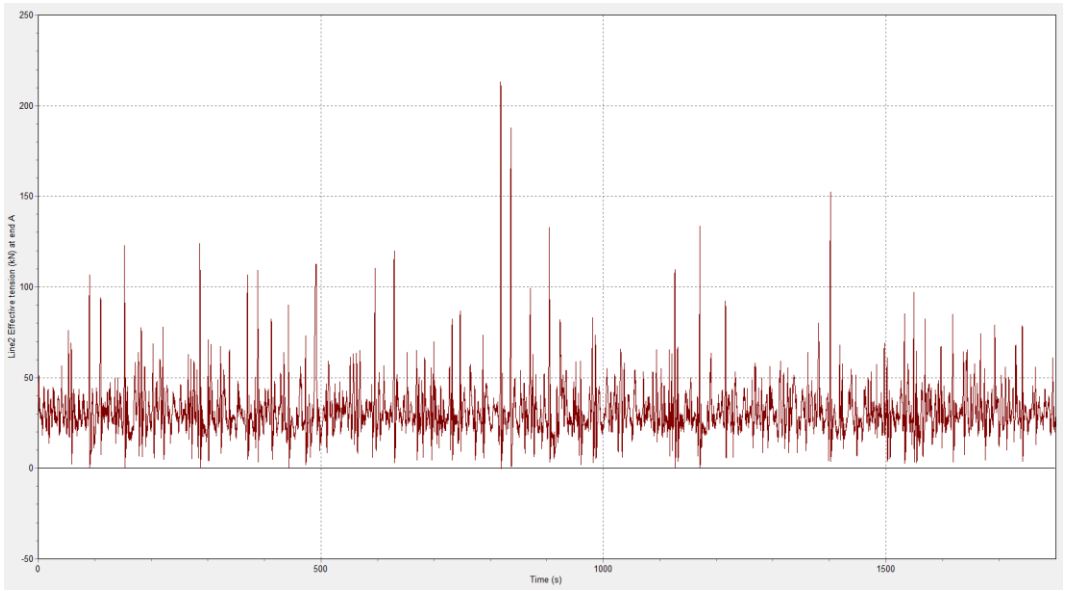
Case 19



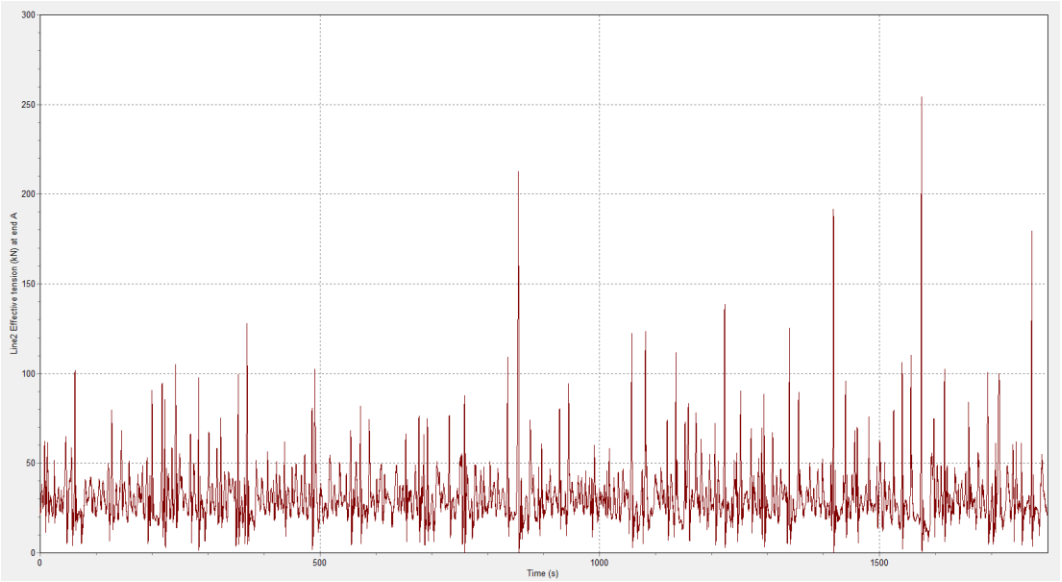
Case 20



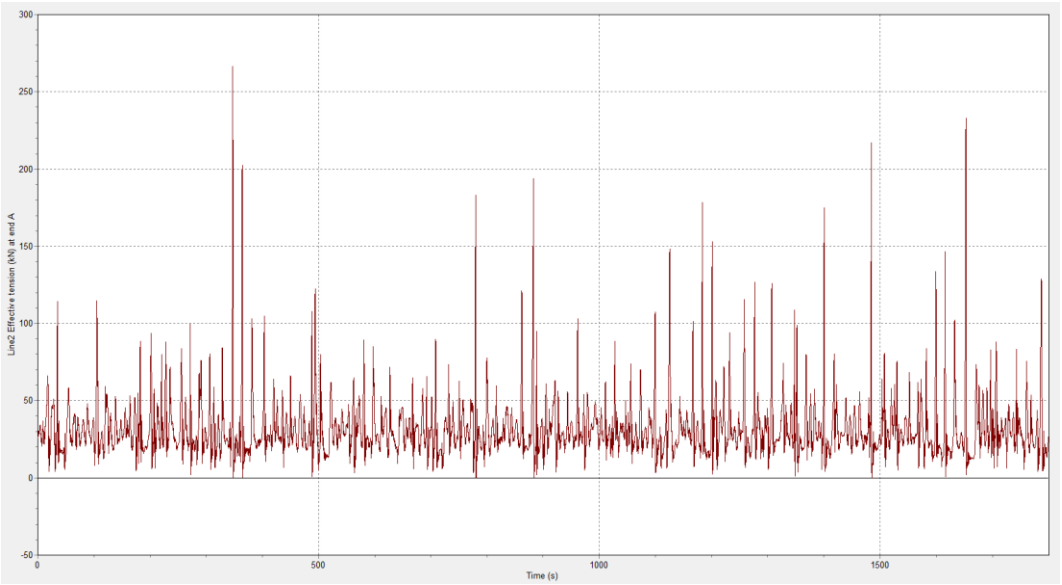
Case 21



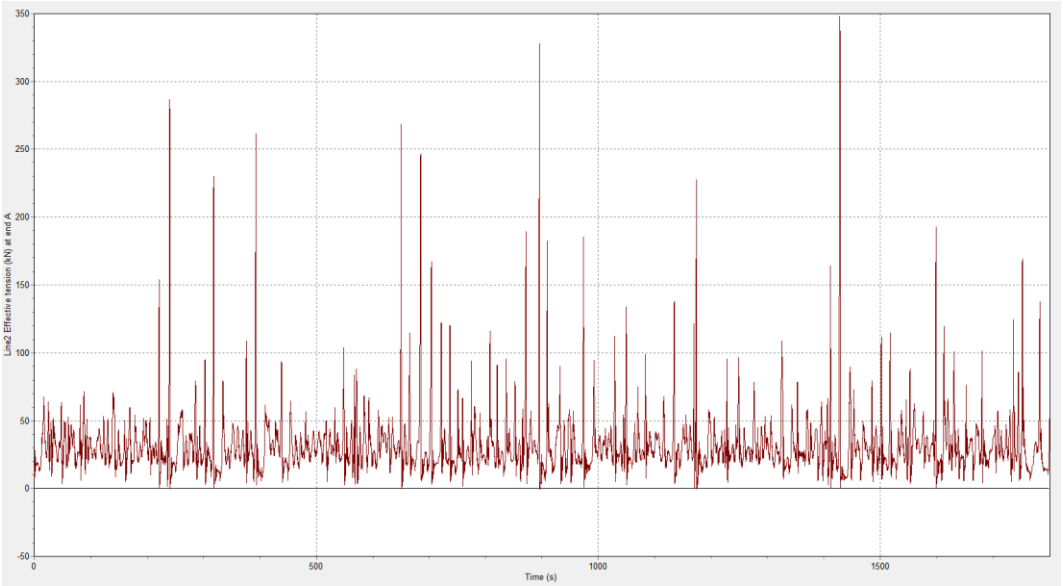
Case 22



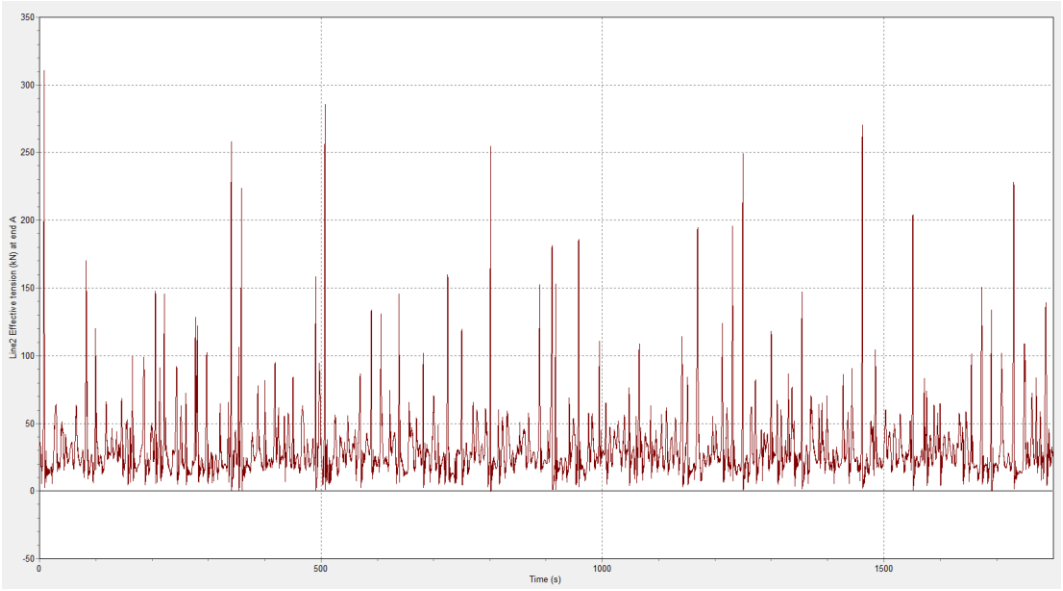
Case 23



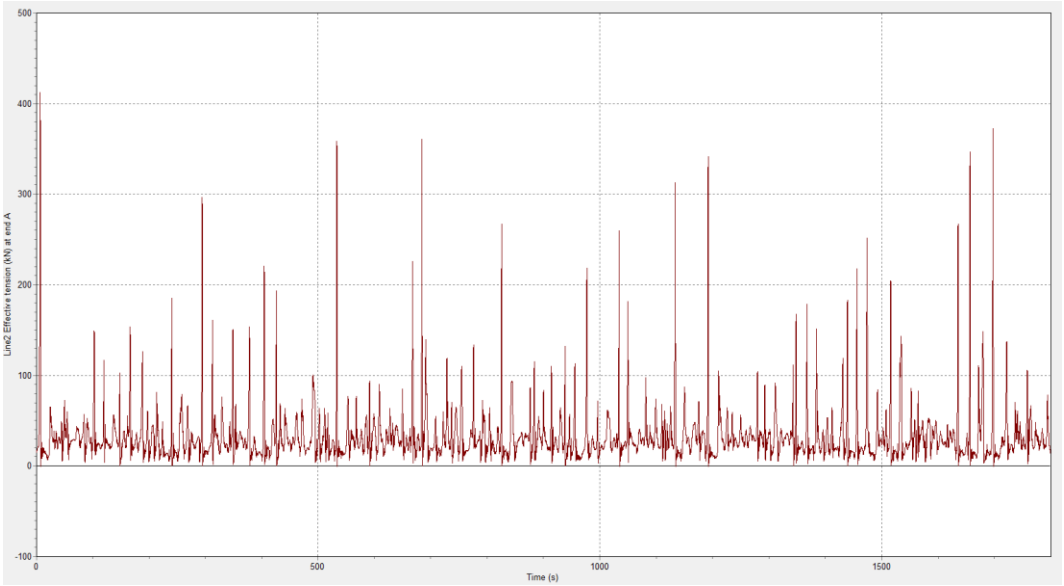
Case 24



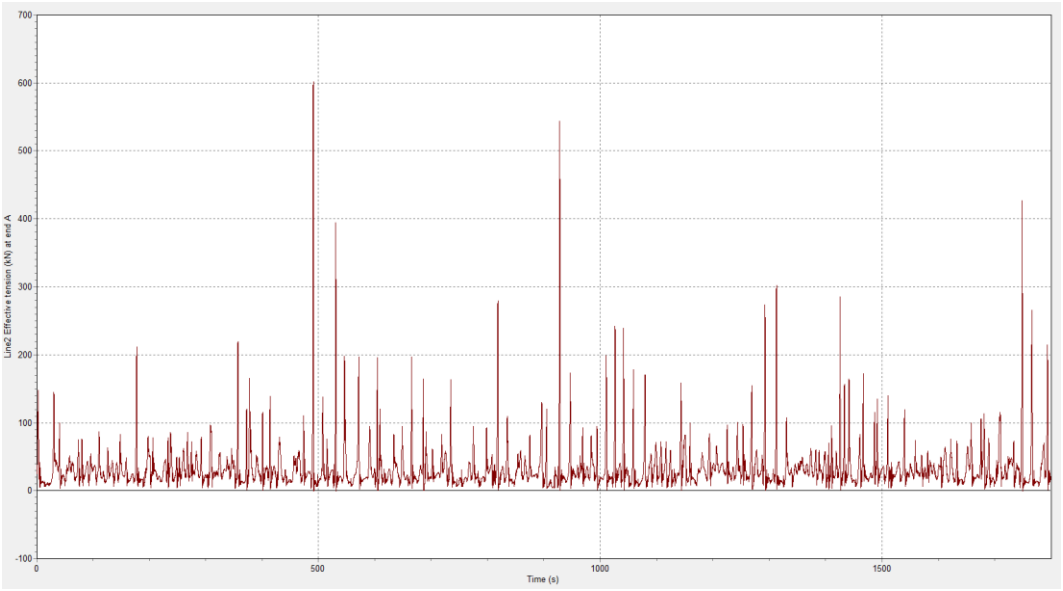
Case 25



Case 26

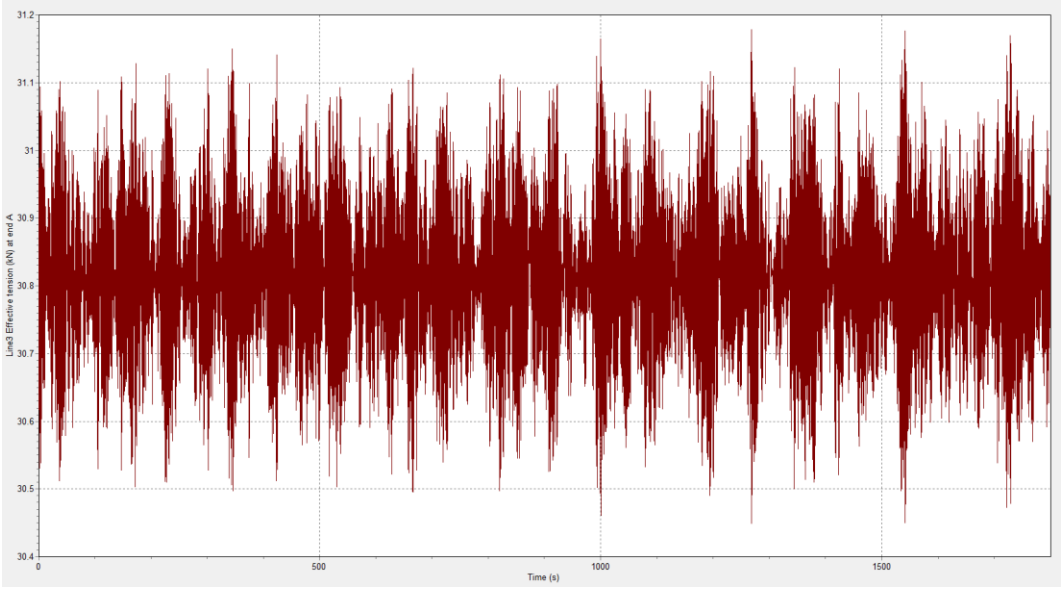


Case 27

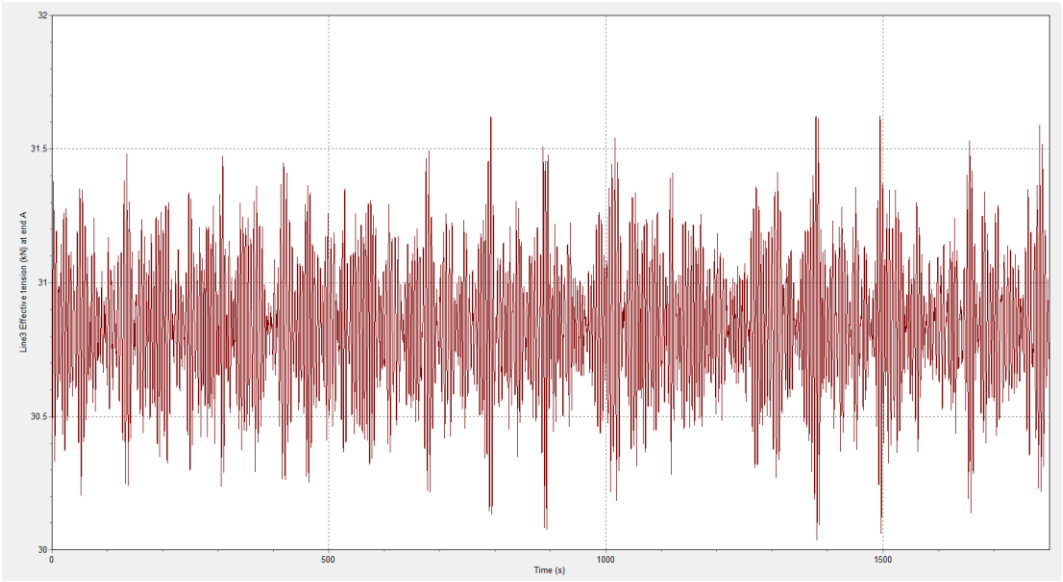


Grafik Seri Waktu *Effective Tension End A Anchor Chain 3* Pada Konfigurasi Simetris

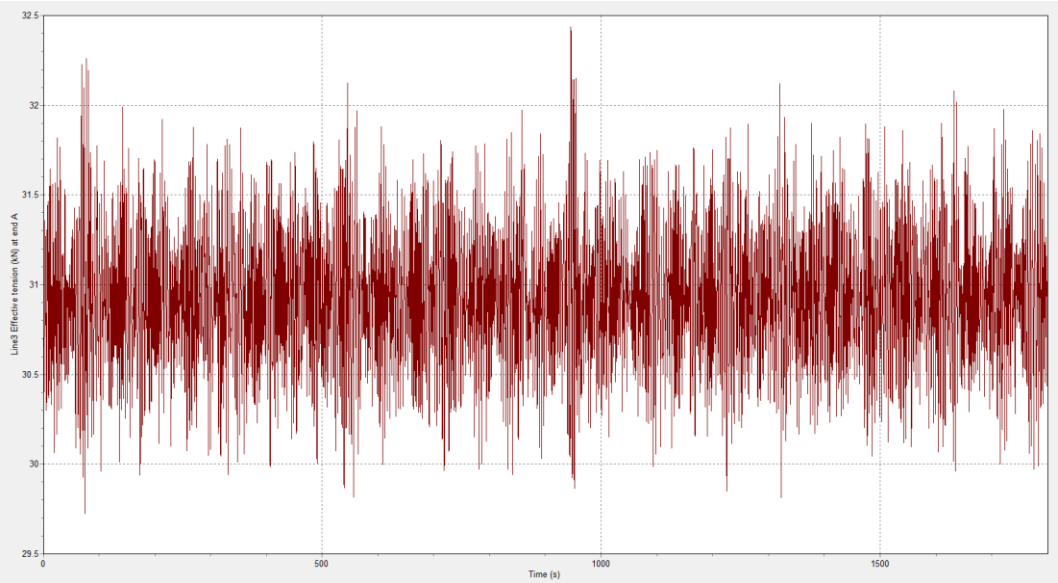
Case 1



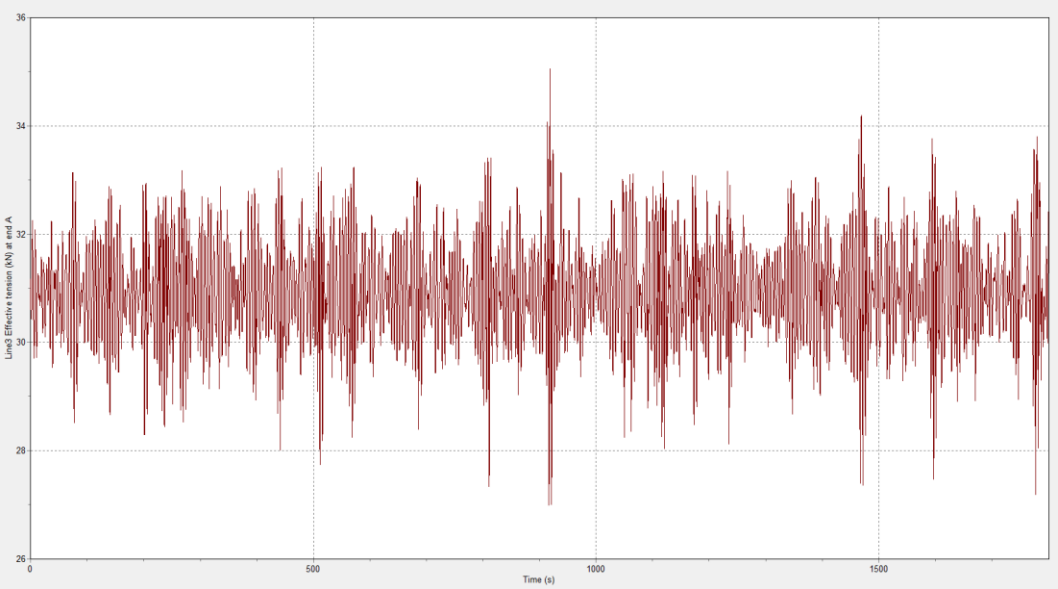
Case 2



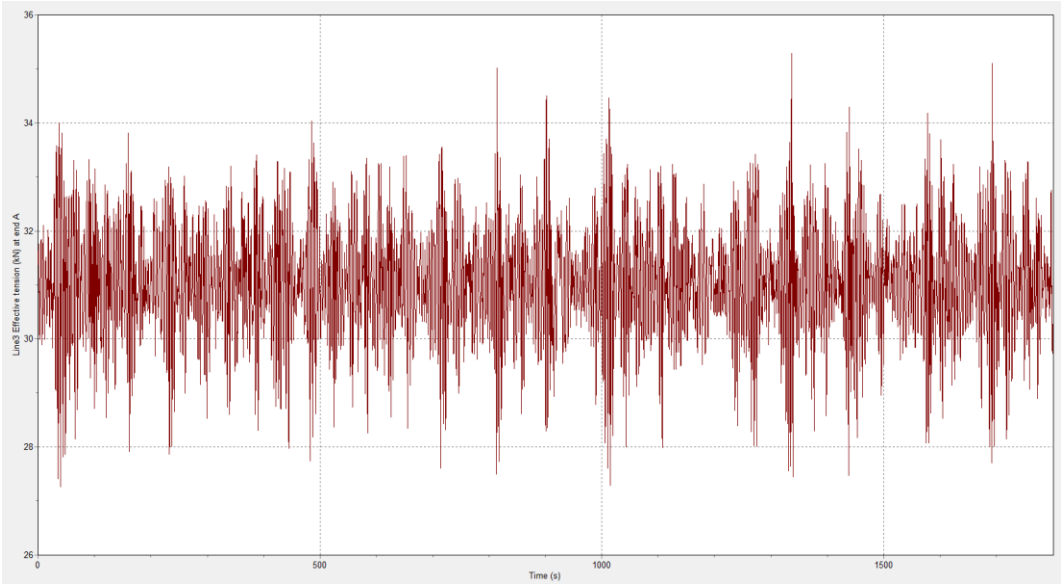
Case 3


32.5
32
31.5
31
30.5
30
29.5
Line3 Effective tension (kN) at end A
0
500
1000
1500
Time (s)

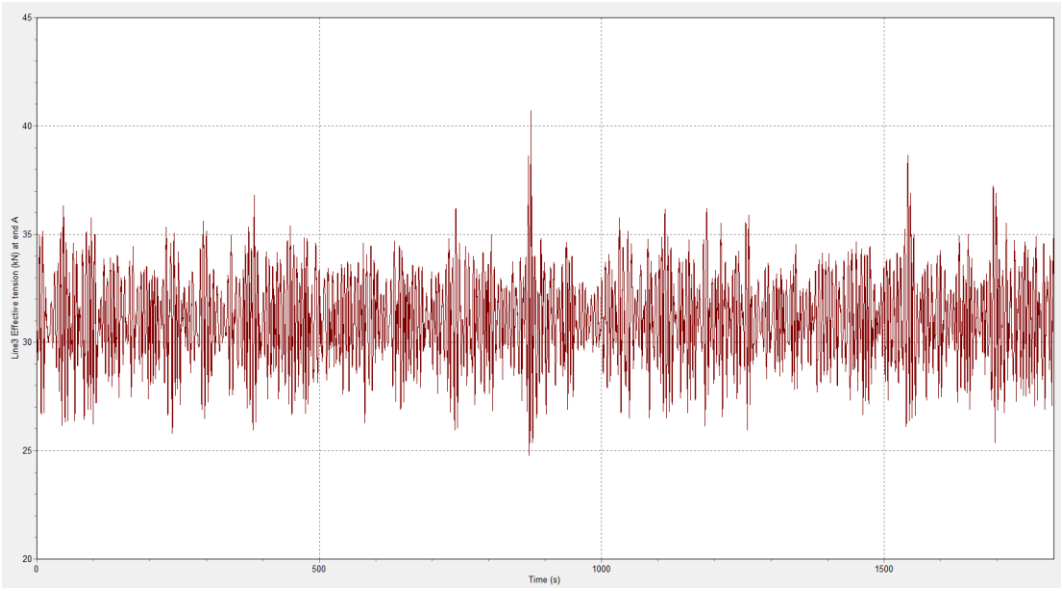
Case 4


36
34
32
30
28
26
Line3 Effective tension (kN) at end A
0
500
1000
1500
Time (s)

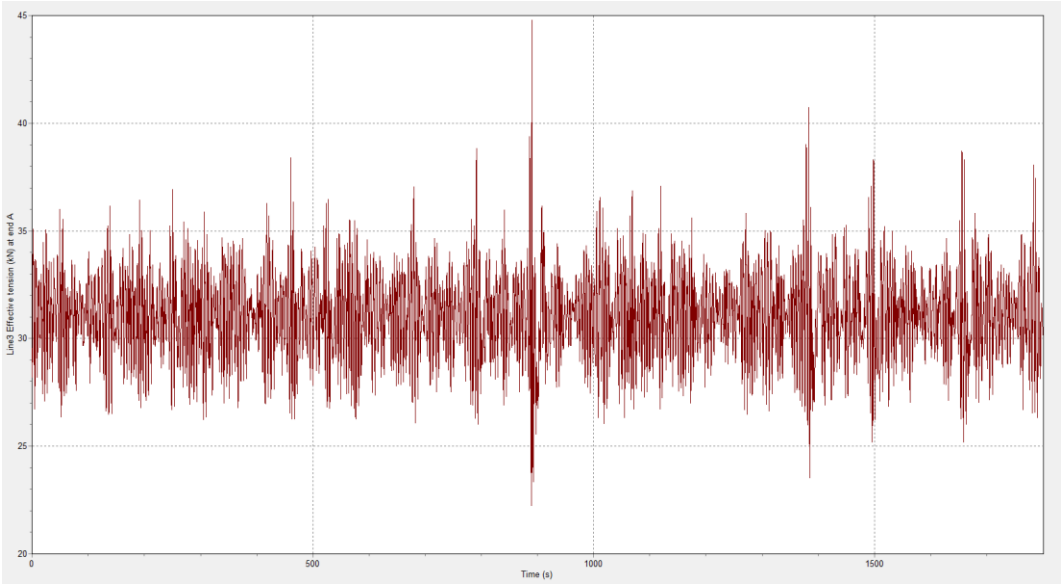
Case 5


Line3 Effective tension (kN) at end A
36
34
32
30
28
26
0
500
1000
1500
Time (s)

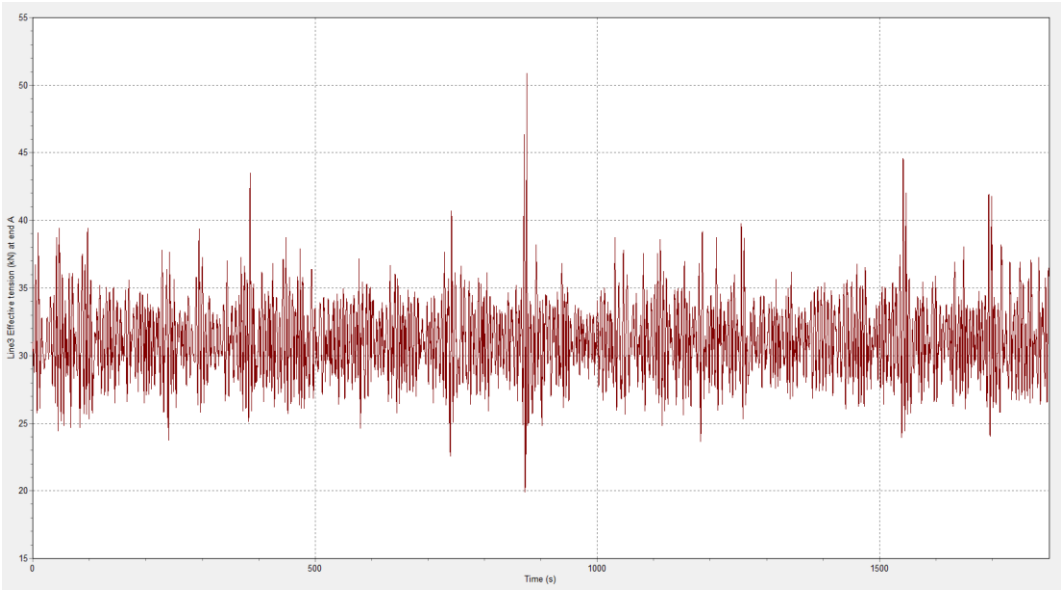
Case 6


Line3 Effective tension (kN) at end A
45
40
35
30
25
20
0
500
1000
1500
Time (s)

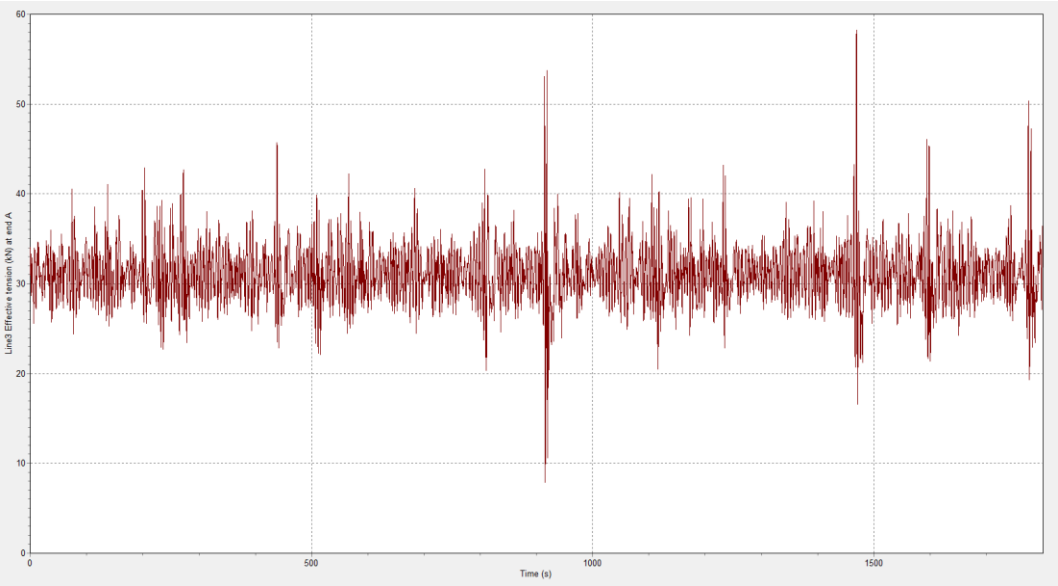
Case 7


Line3 Effective tension (kN) at end A
45
40
35
30
25
20
0
500
1000
1500
Time (s)

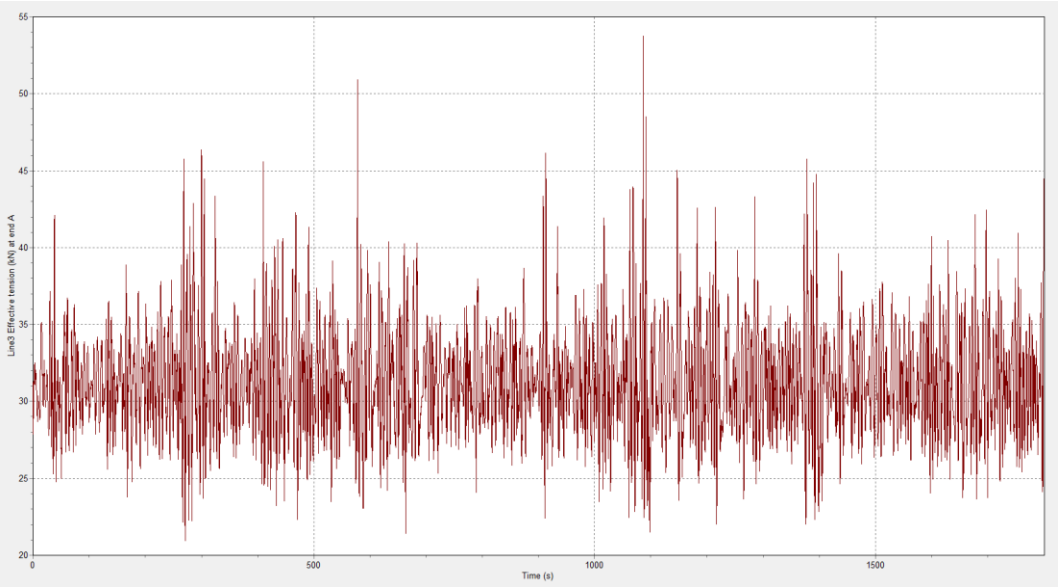
Case 8


Line3 Effective tension (kN) at end A
55
50
45
40
35
30
25
20
15
0
500
1000
1500
Time (s)

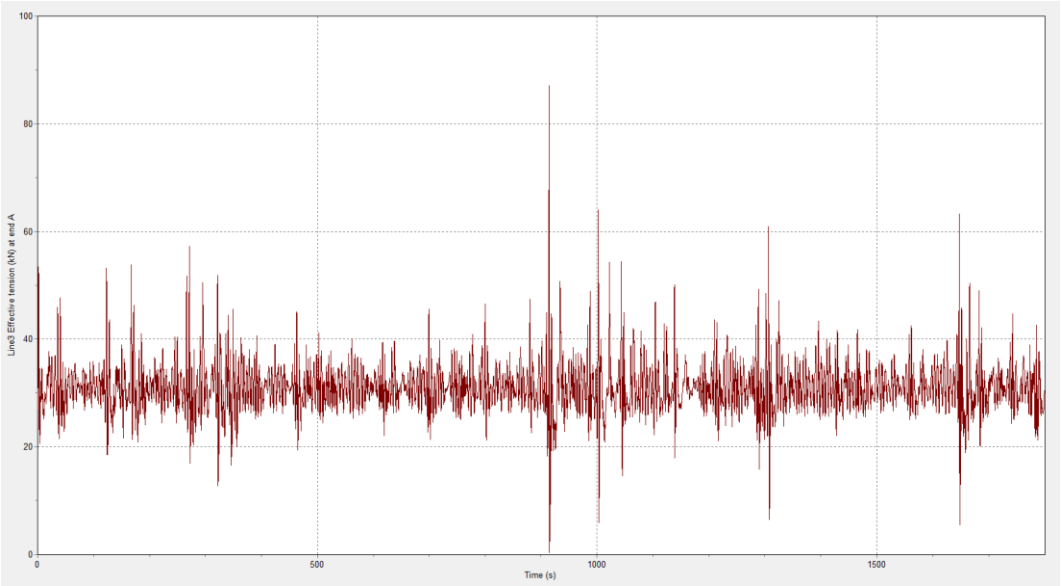
Case 9



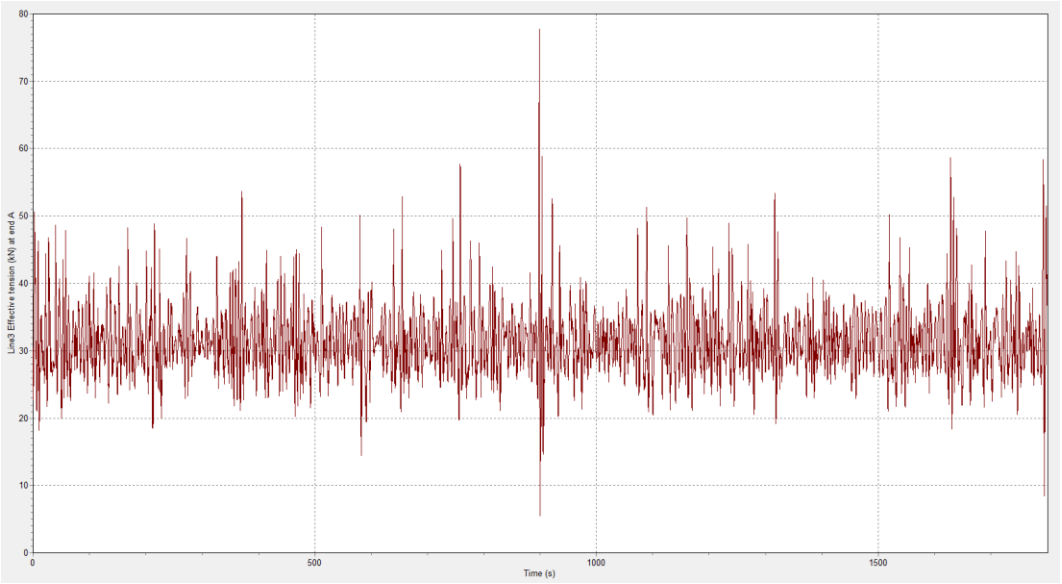
Case 10



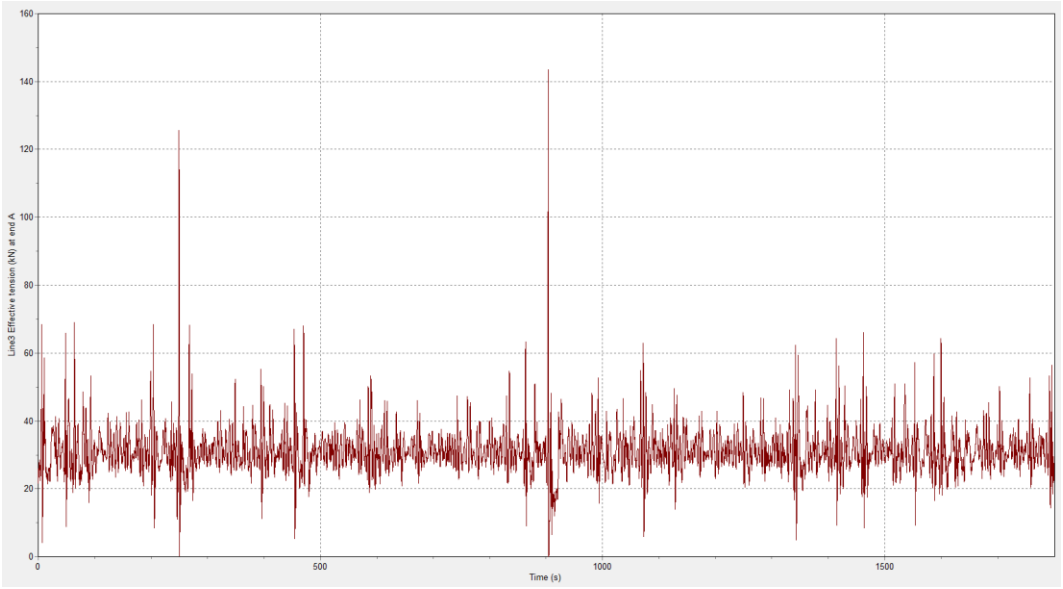
Case 11



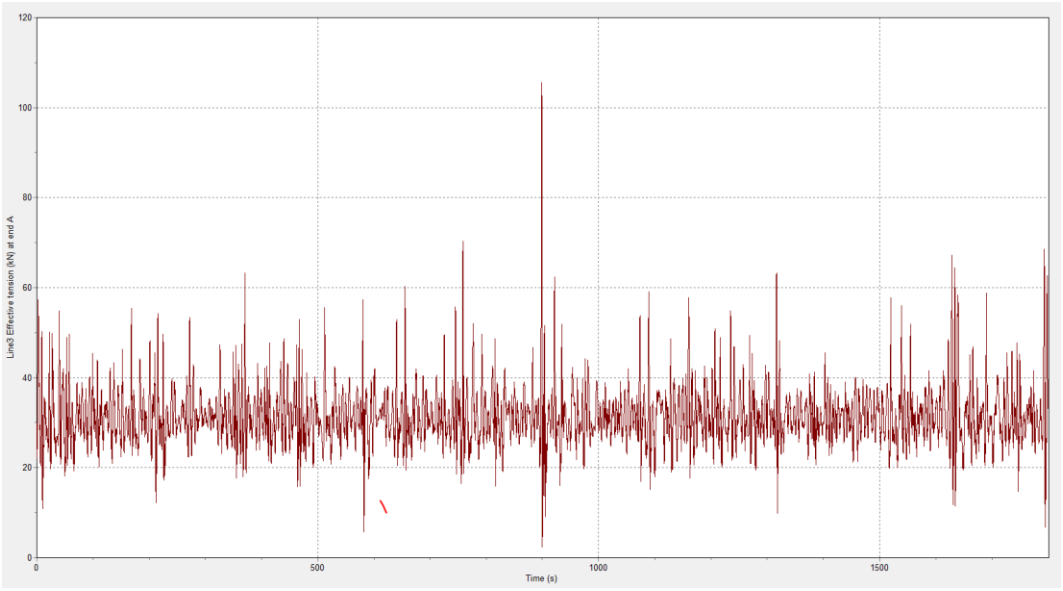
Case 12



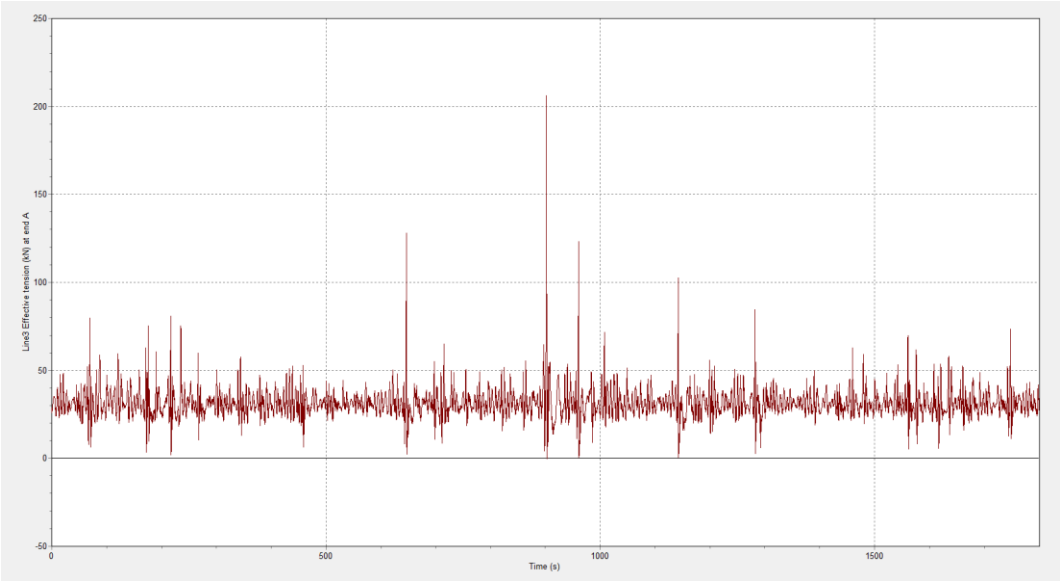
Case 13



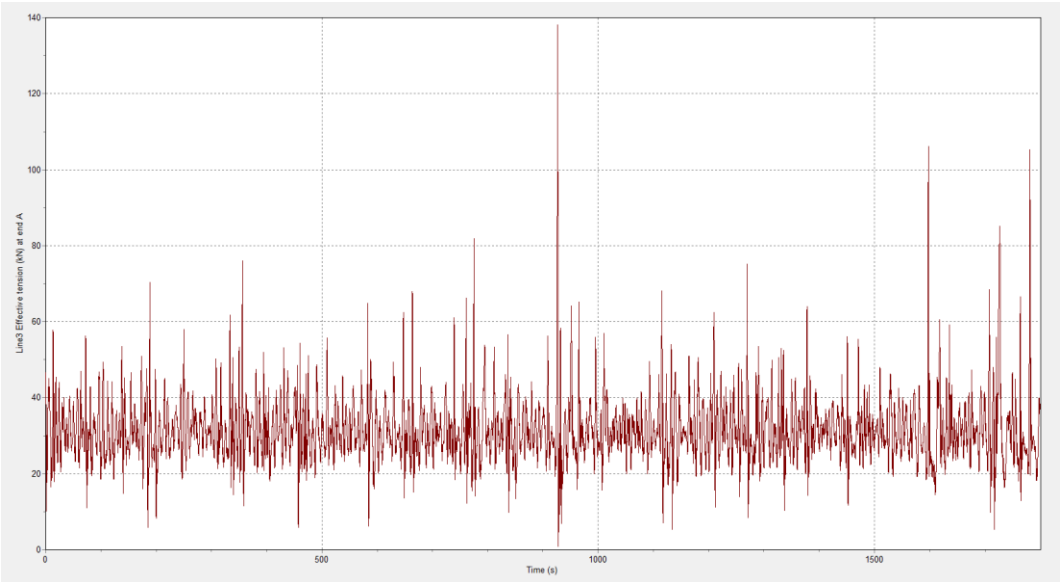
Case 14



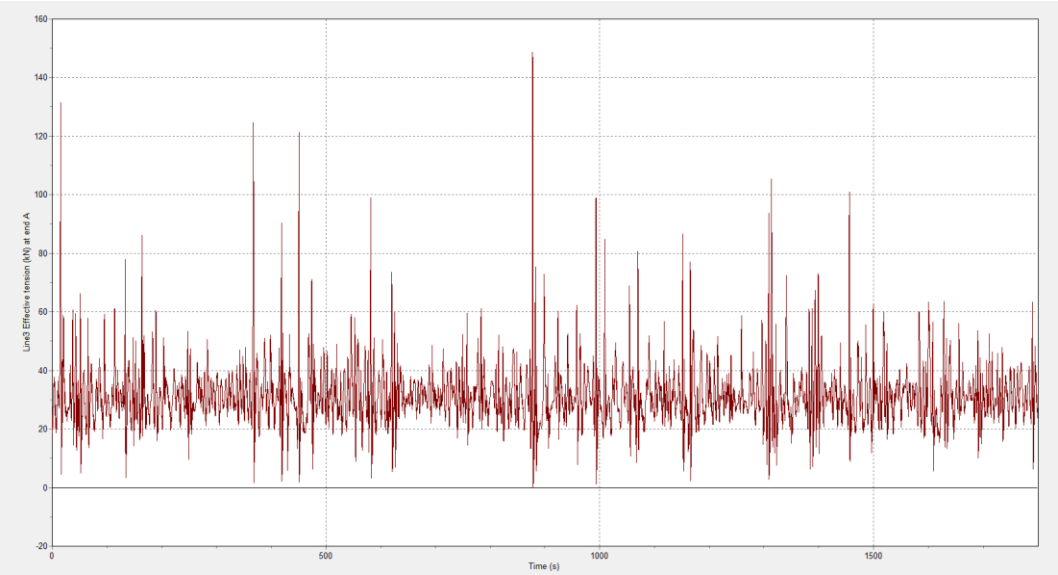
Case 15



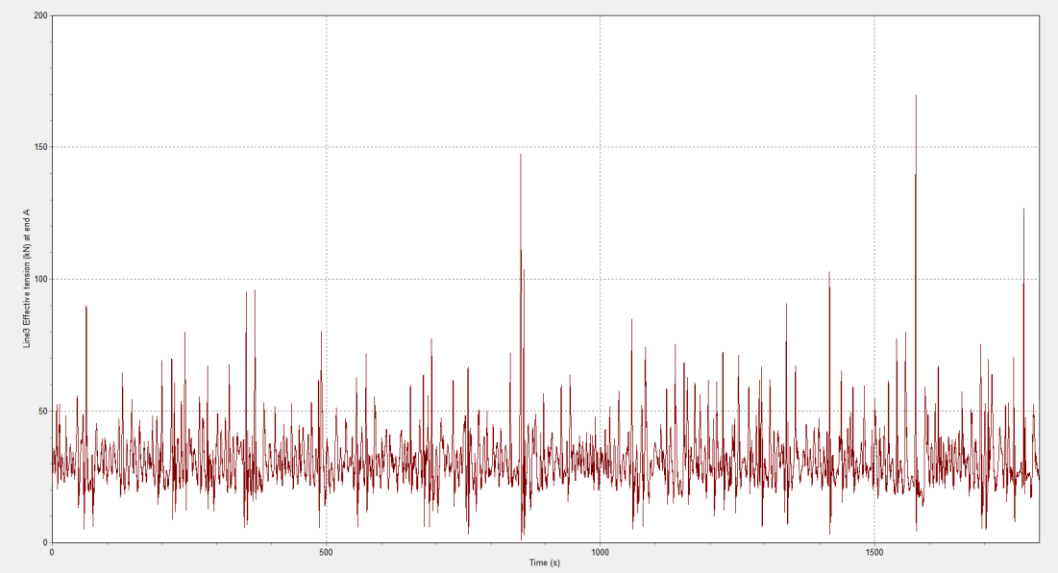
Case 16



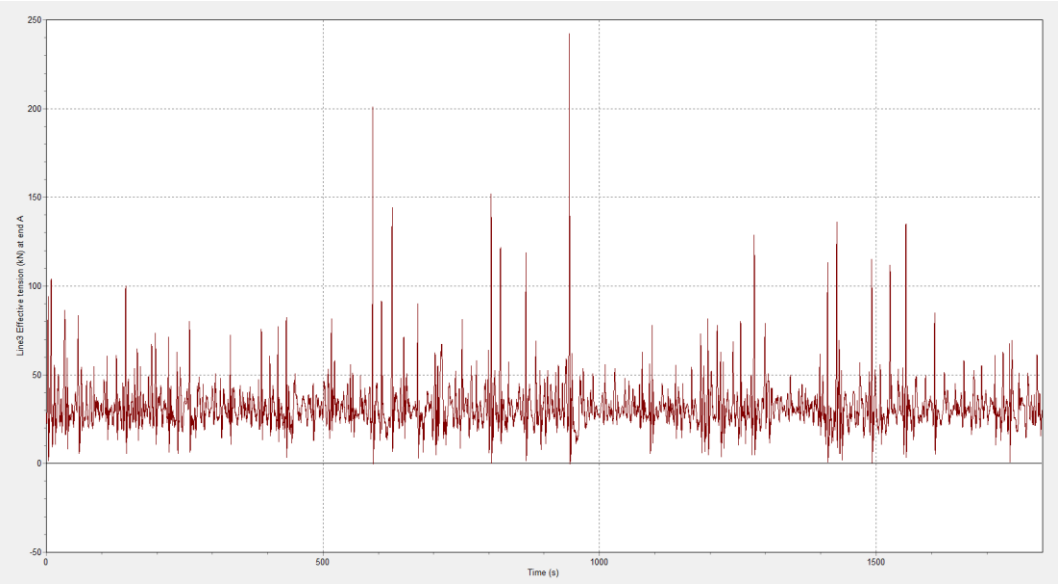
Case 17



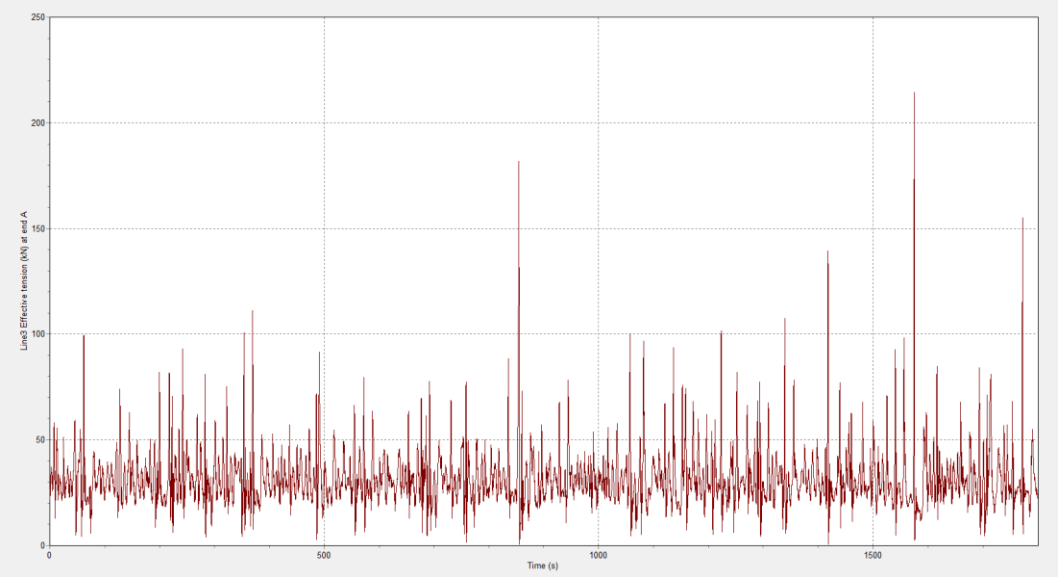
Case 18



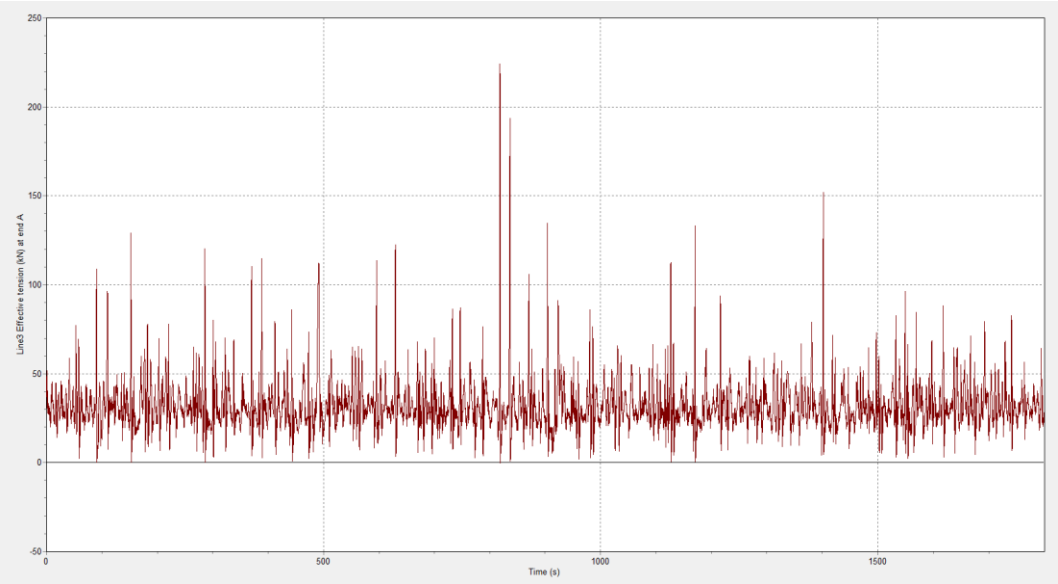
Case 19



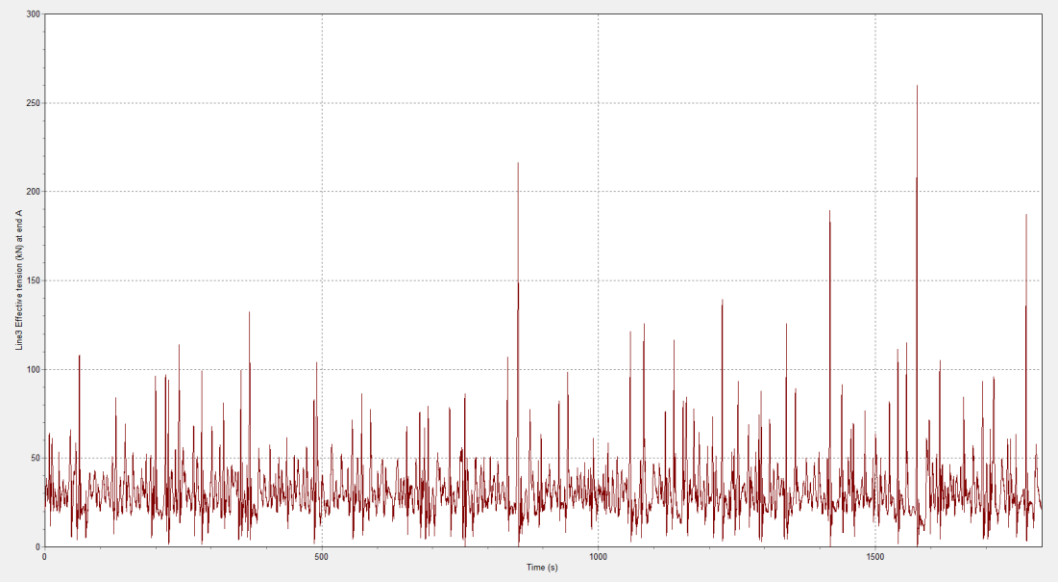
Case 20



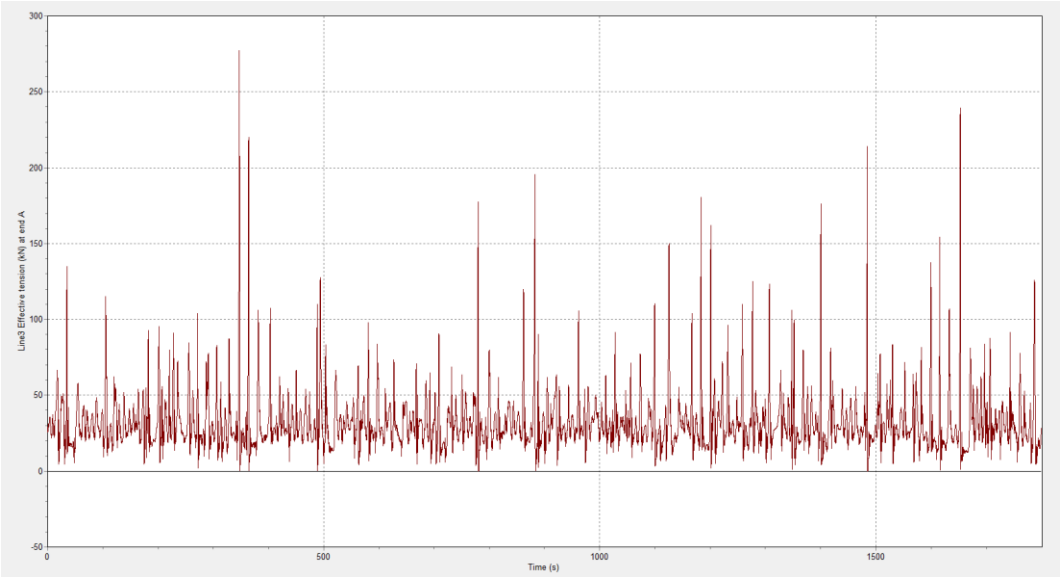
Case 21



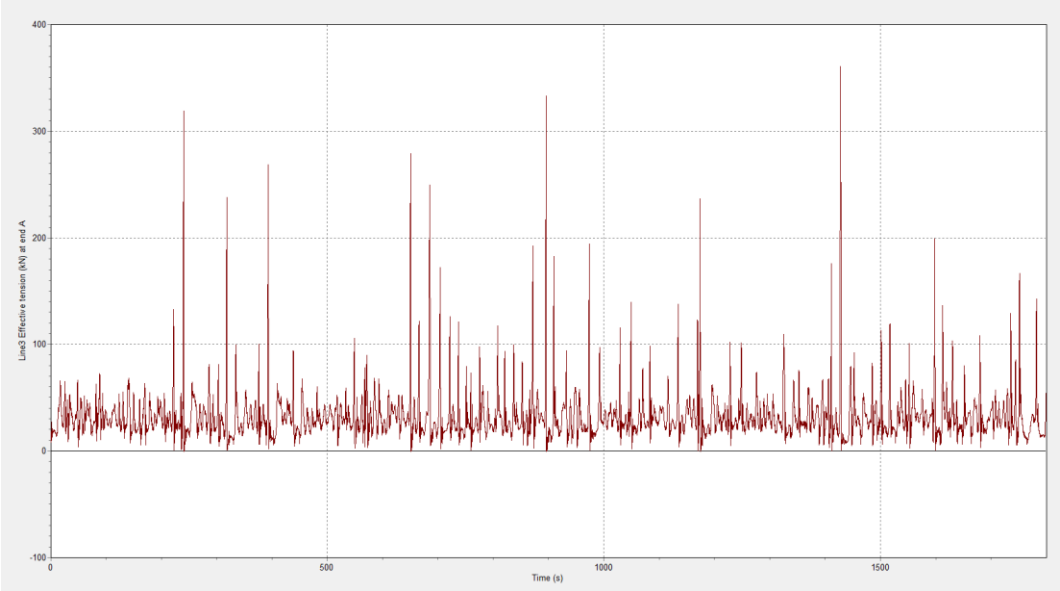
Case 22



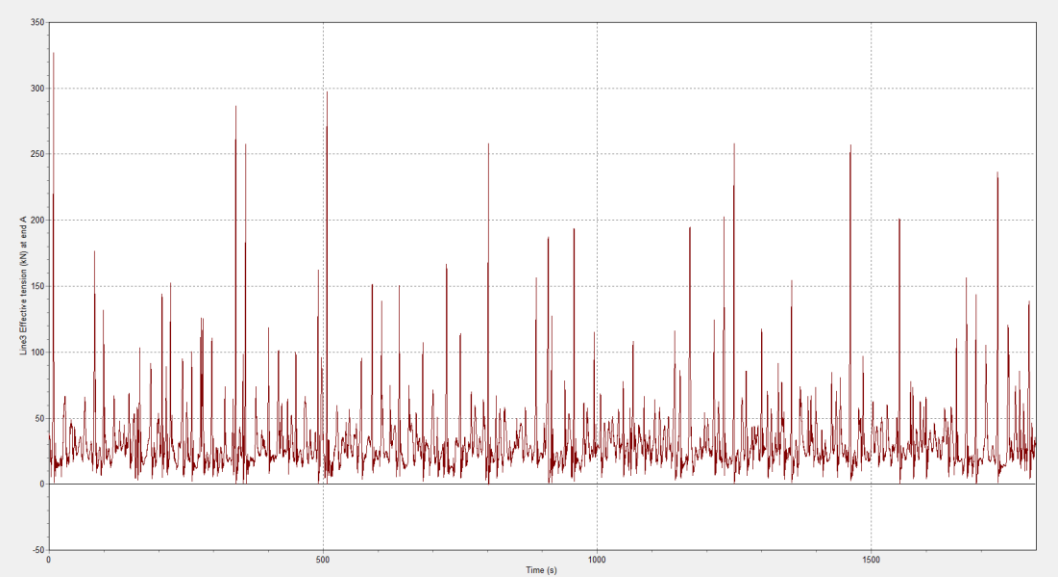
Case 23



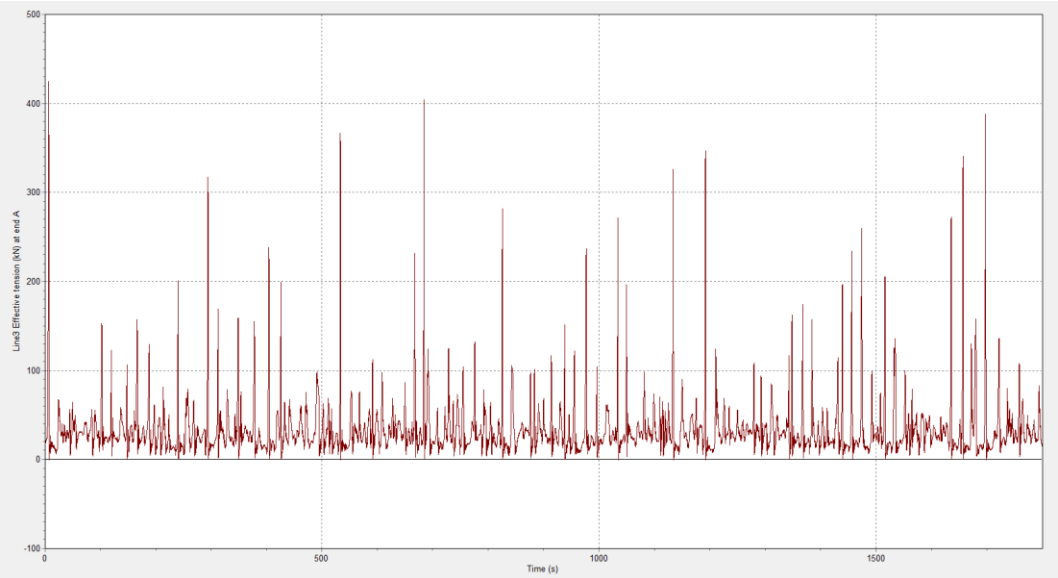
Case 24



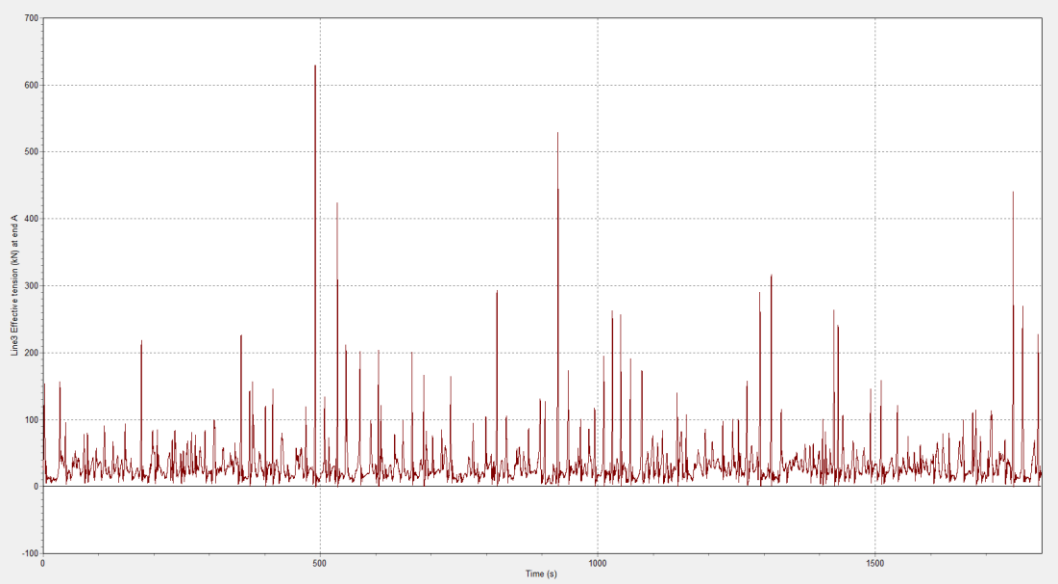
Case 25



Case 26

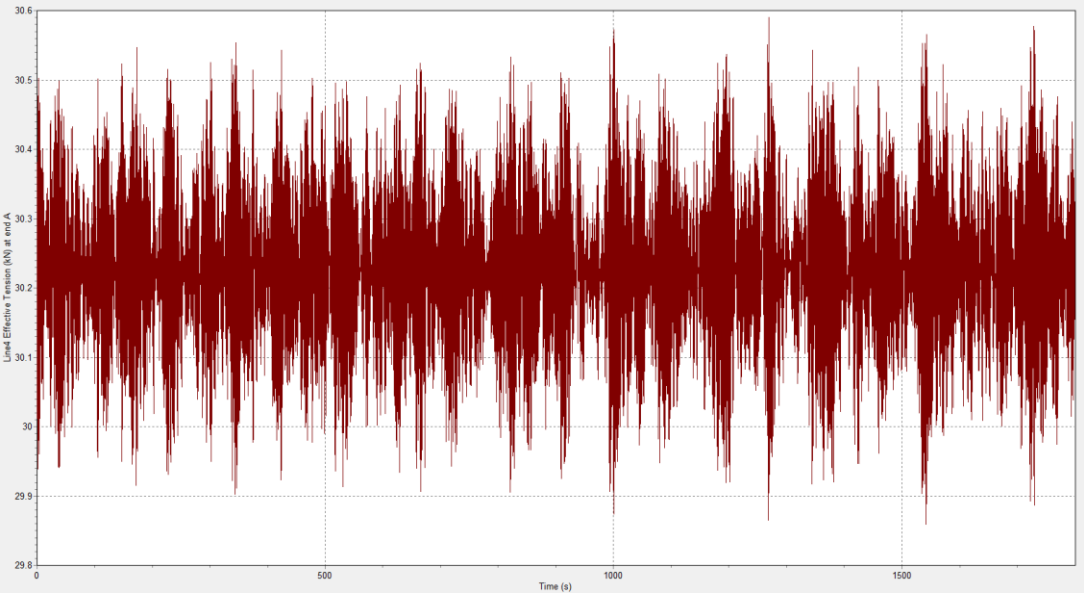


Case 27

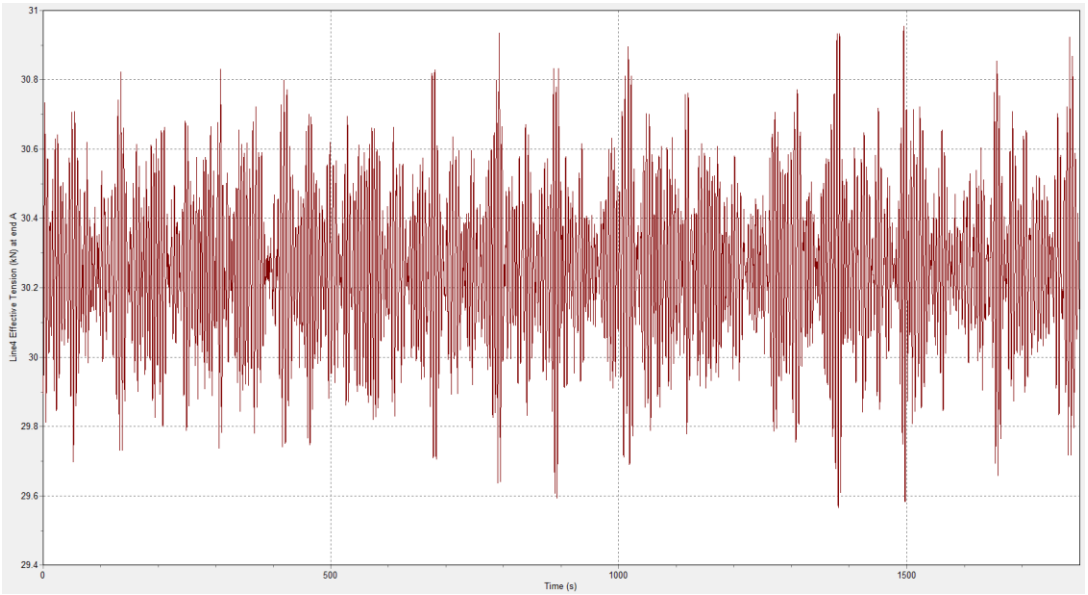


Grafik Seri Waktu *Effective Tension End A Anchor Chain 4* Pada Konfigurasi Simetris

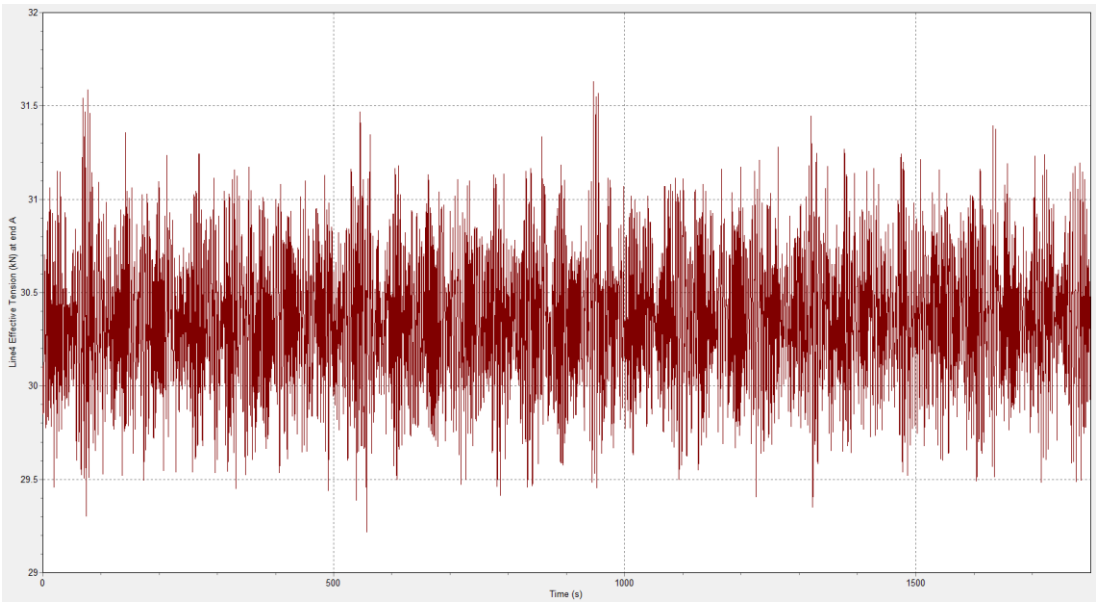
Case 1



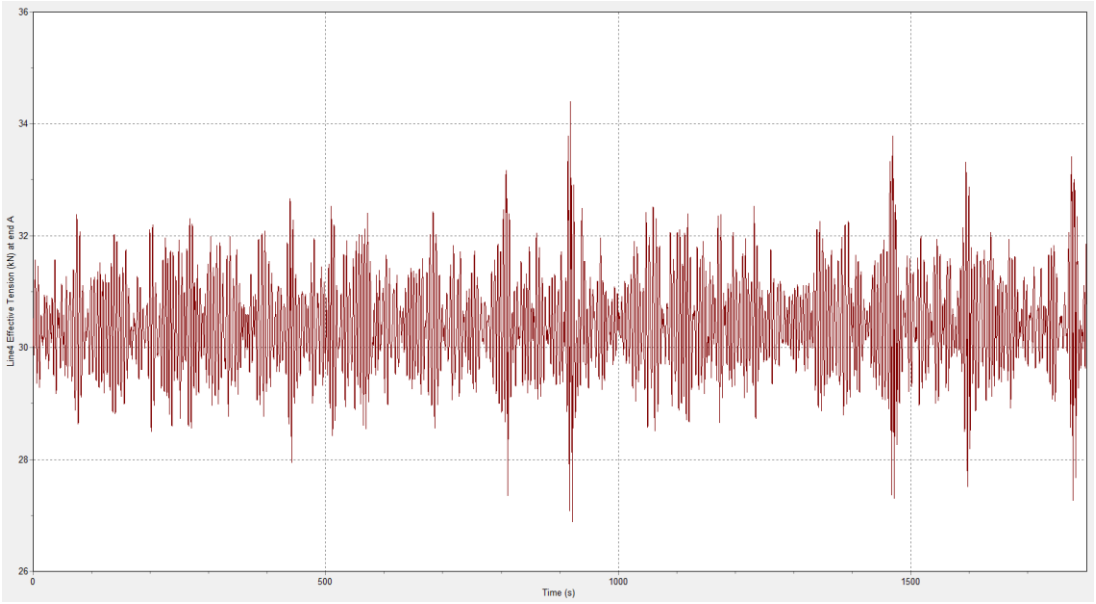
Case 2


Line4 Effective Tension (kN) at end A
Time (s)
31
30.8
30.6
30.4
30.2
30
29.8
29.6
29.4
0
500
1000
1500

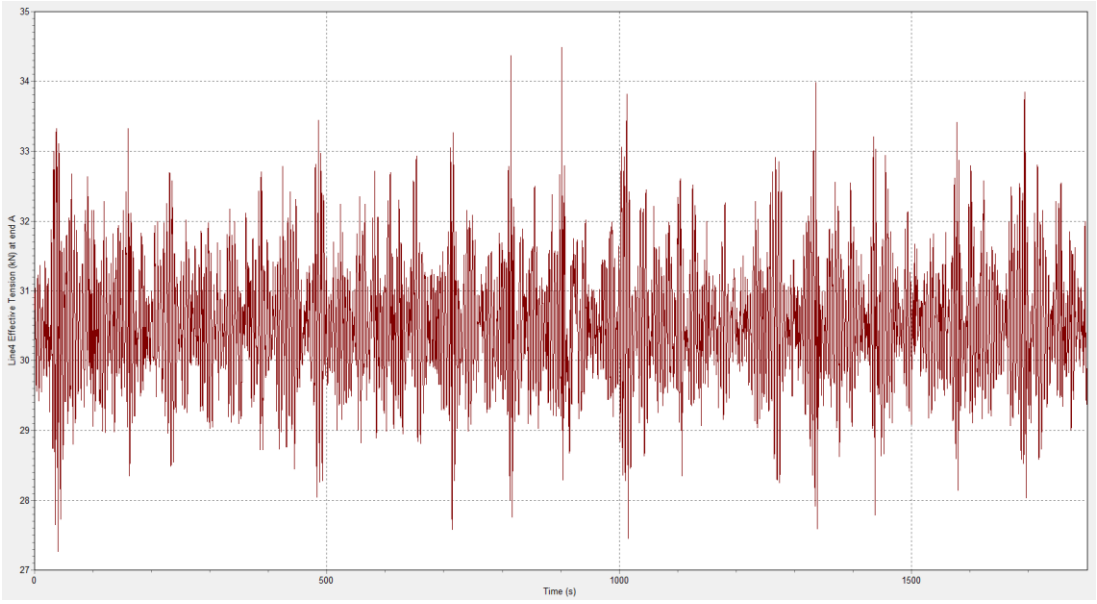
Case 3


Line4 Effective Tension (kN) at end A
Time (s)
32
31.5
31
30.5
30
29.5
29
0
500
1000
1500

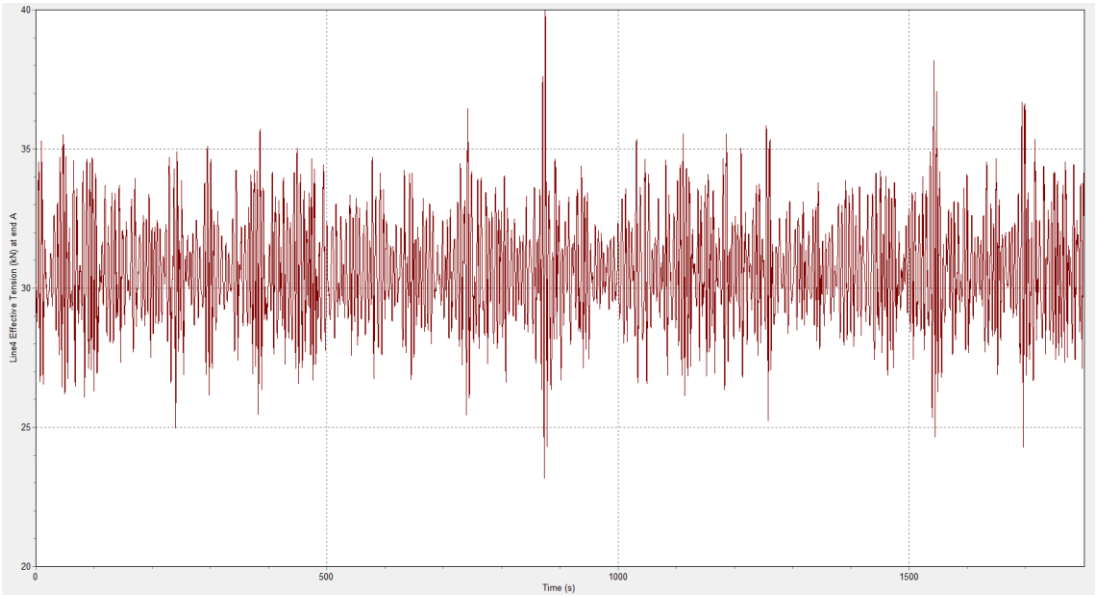
Case 4


Line4 Effective Tension (kN) at end A
Time (s)
36
34
32
30
28
26
0
500
1000
1500

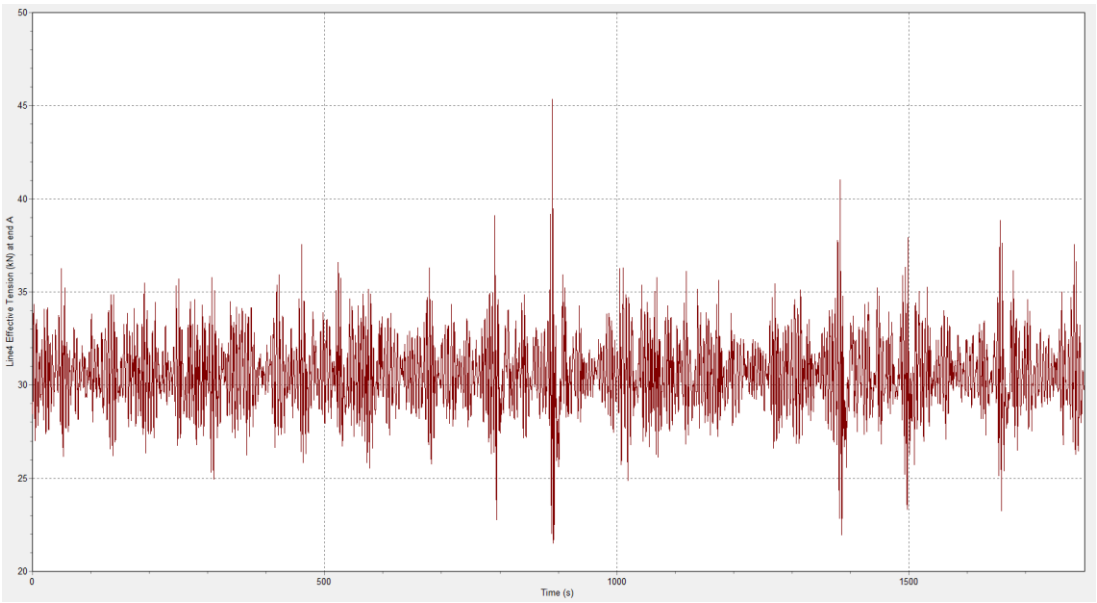
Case 5


Line4 Effective Tension (kN) at end A
Time (s)
35
34
33
32
31
30
29
28
27
0
500
1000
1500

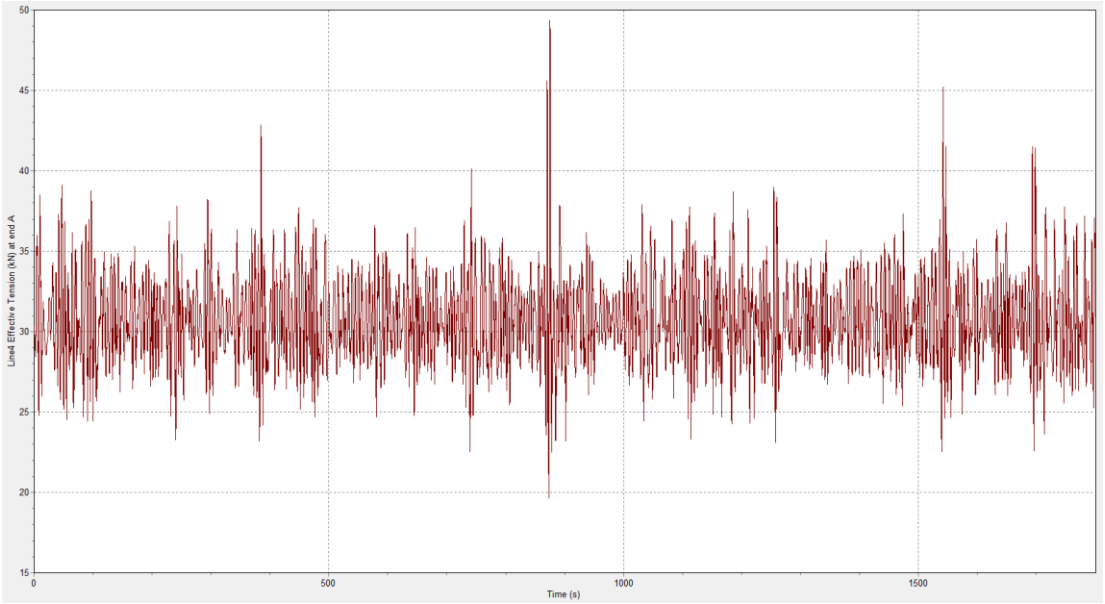
Case 6


Line4 Effective Tension (kN) at end A
40
35
30
25
20
0
500
1000
1500
Time (s)

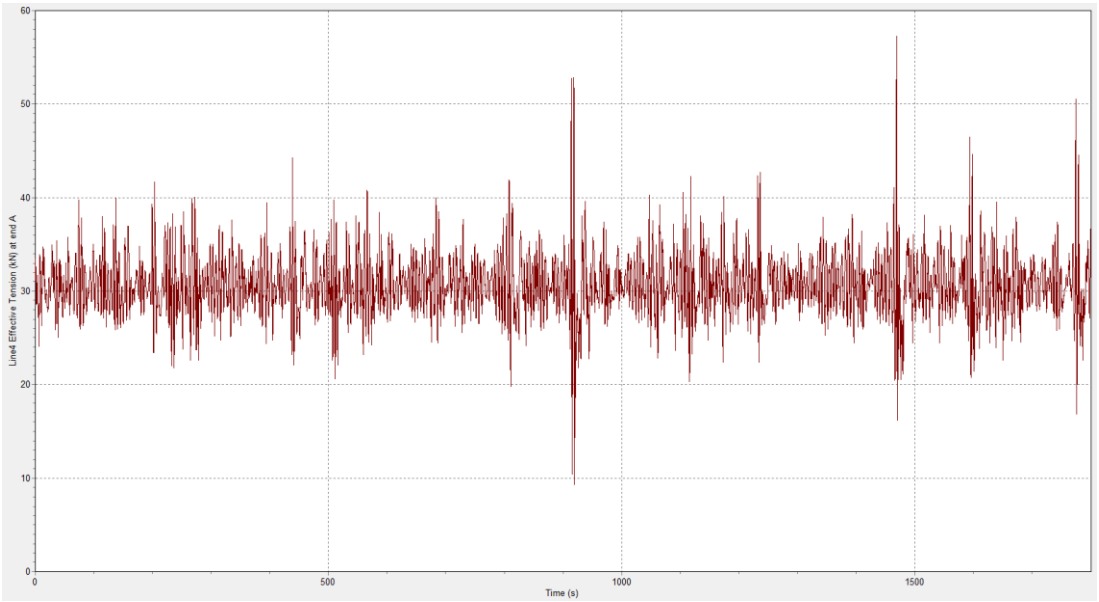
Case 7


Line4 Effective Tension (kN) at end A
50
45
40
35
30
25
20
0
500
1000
1500
Time (s)

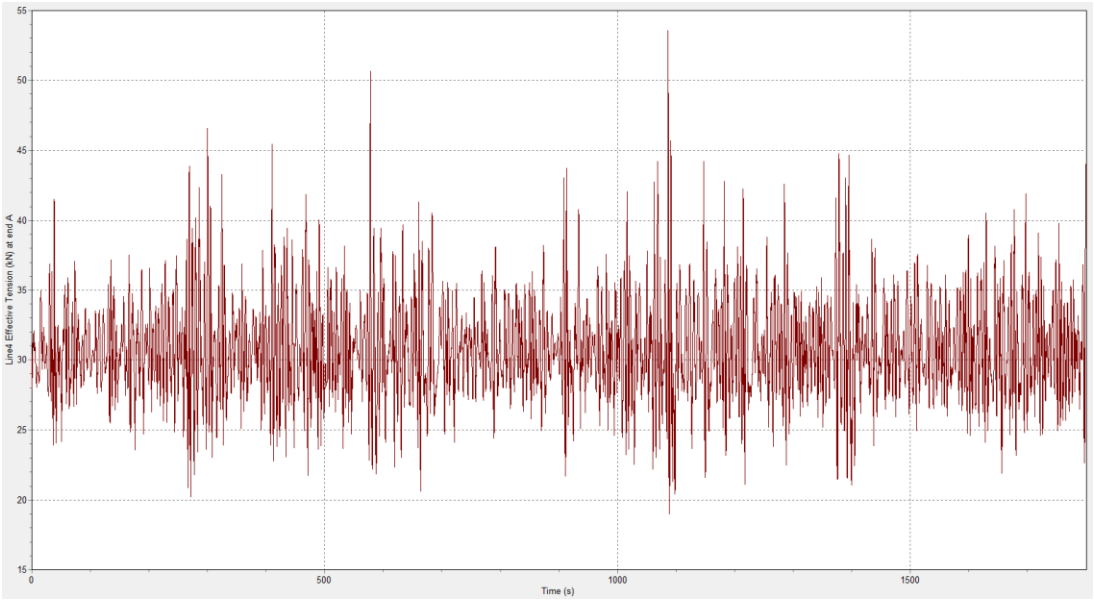
Case 8


Line4 Effective Tension (kN) at end A
Time (s)
50
45
40
35
30
25
20
15
0
500
1000
1500

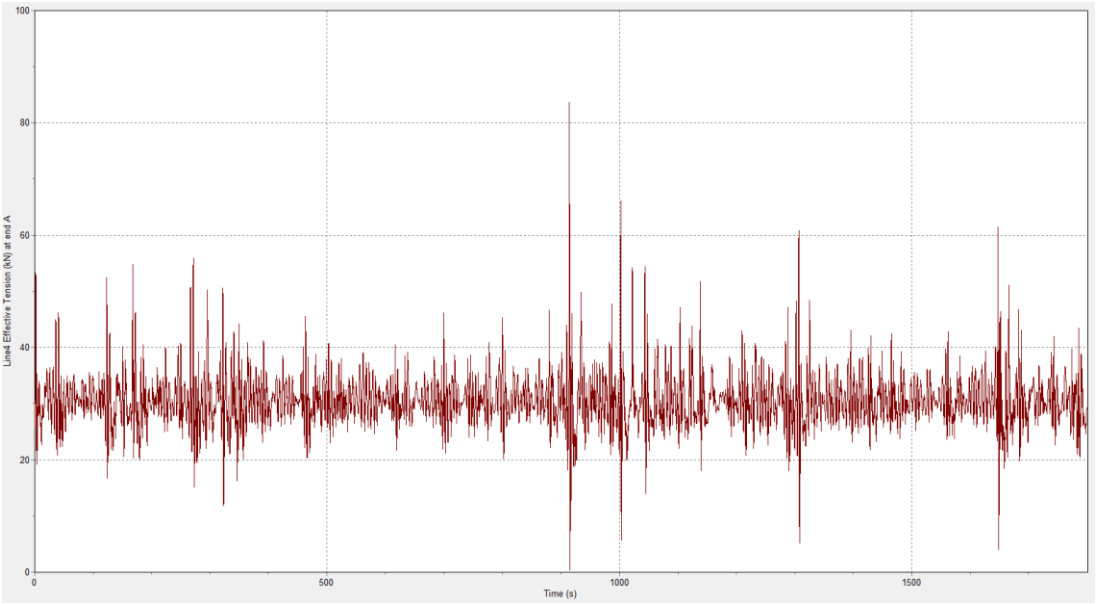
Case 9


Line4 Effective Tension (kN) at end A
Time (s)
60
50
40
30
20
10
0
0
500
1000
1500

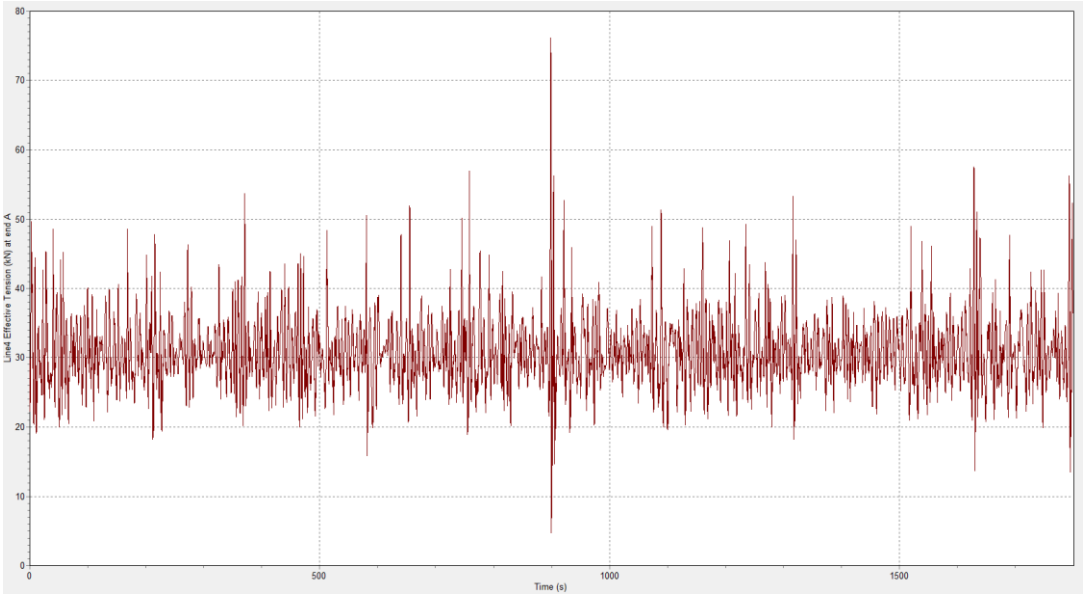
Case 10



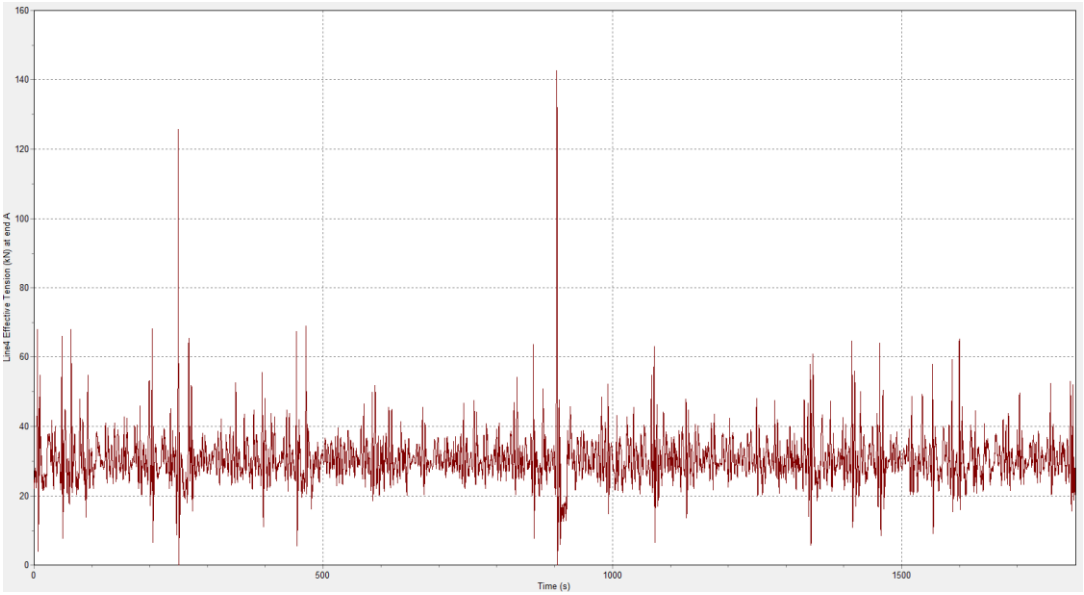
Case 11



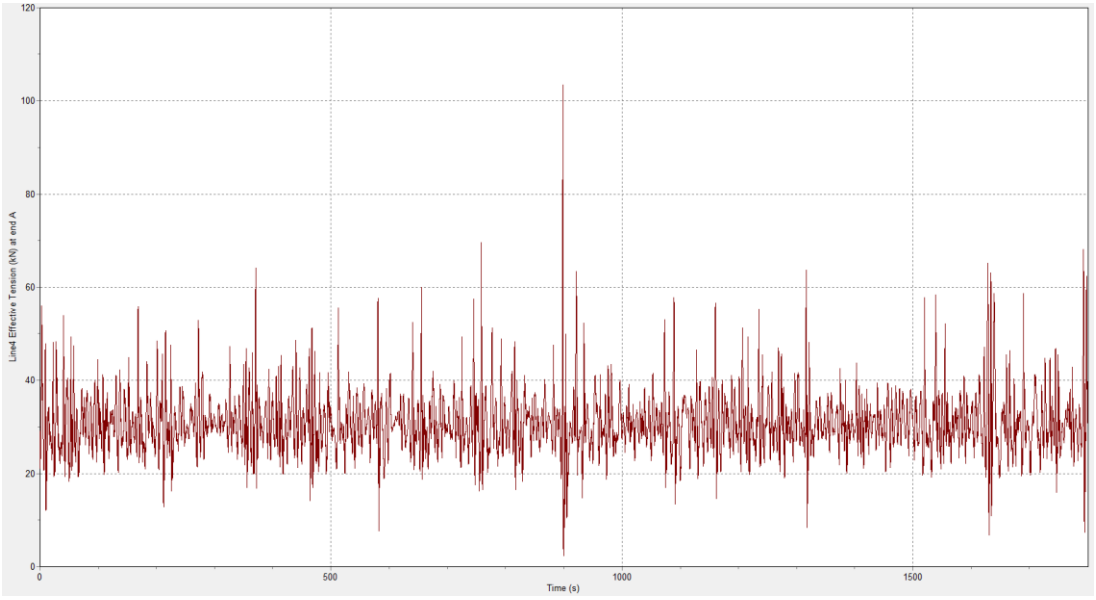
Case 12



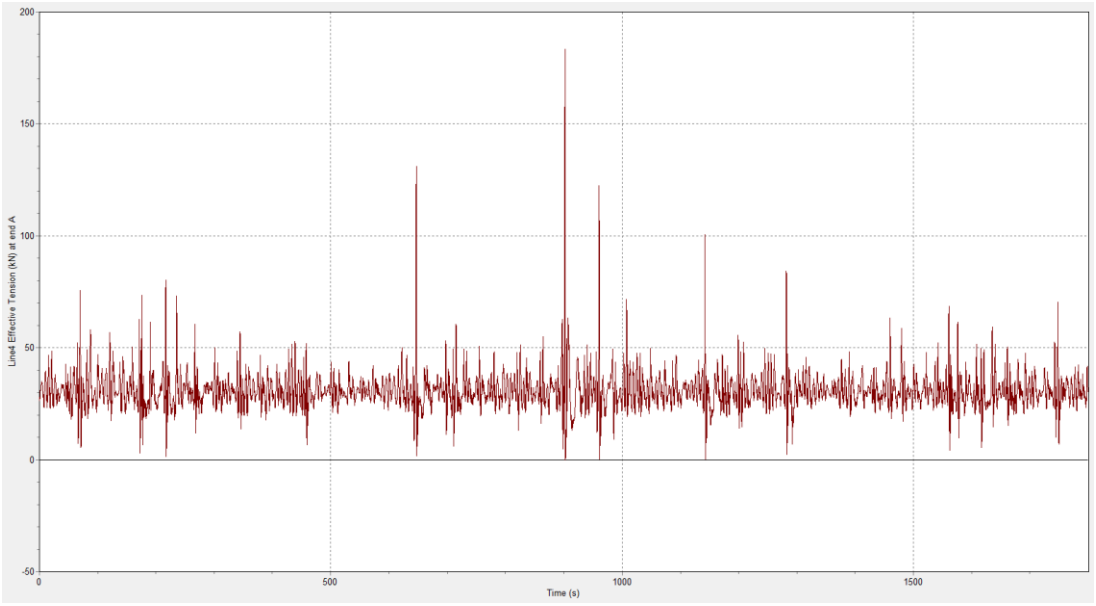
Case 13



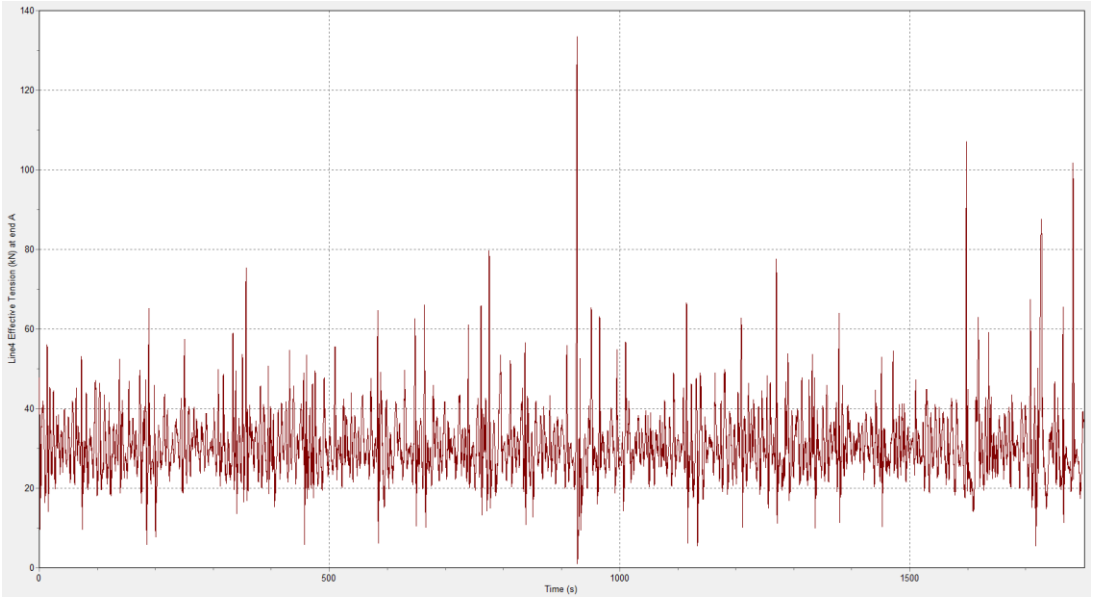
Case 14



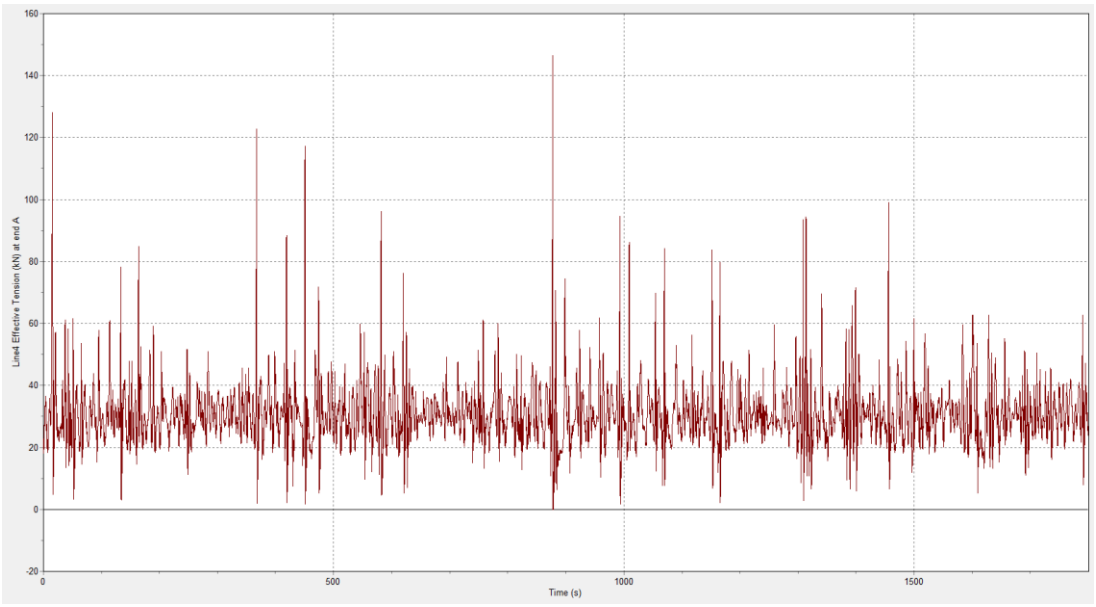
Case 15



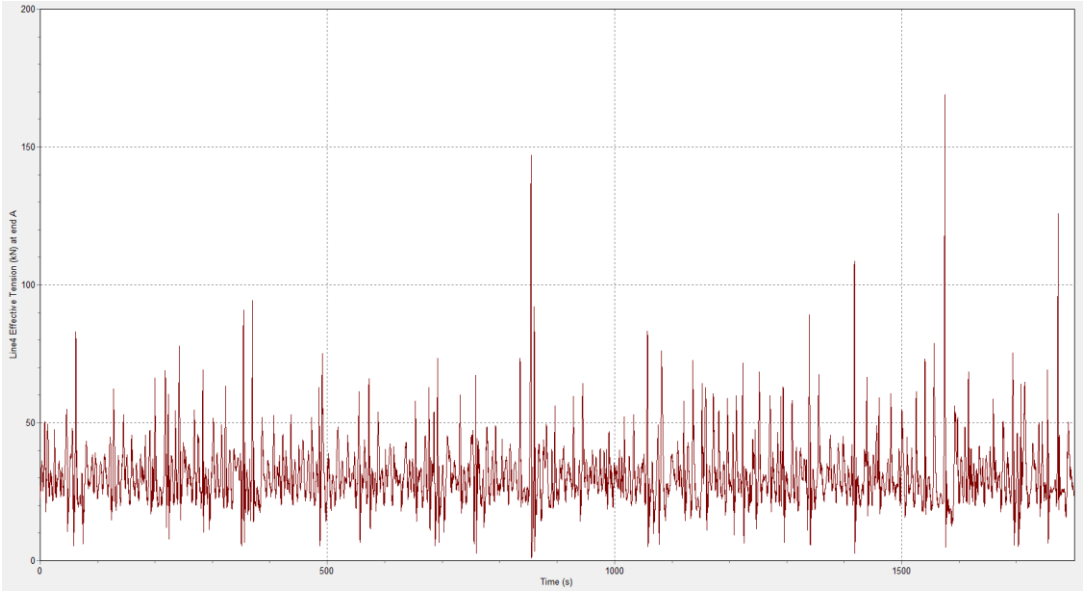
Case 16



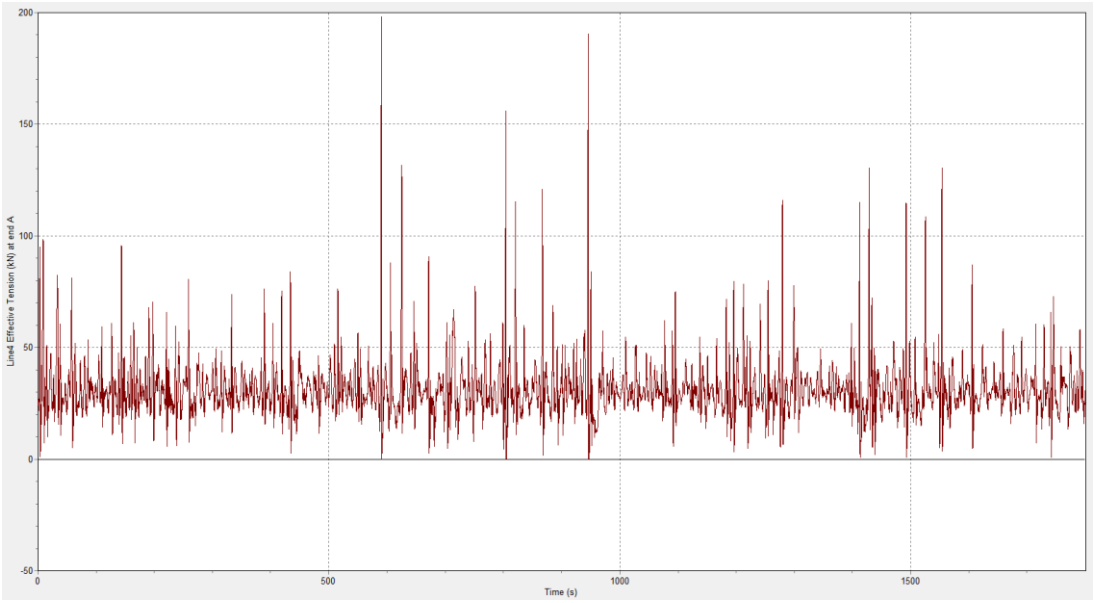
Case 17



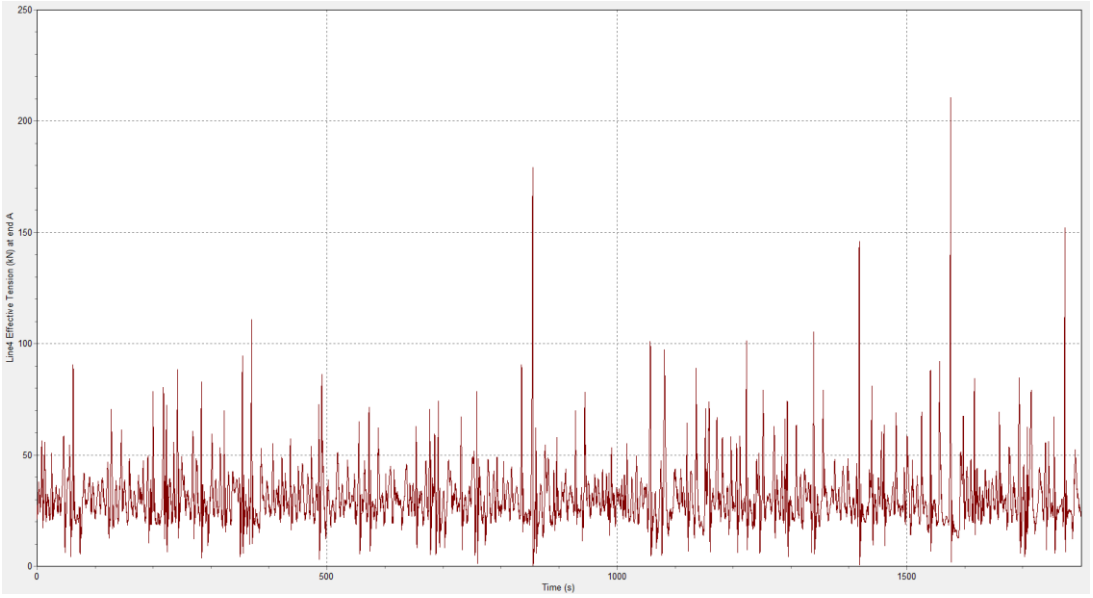
Case 18



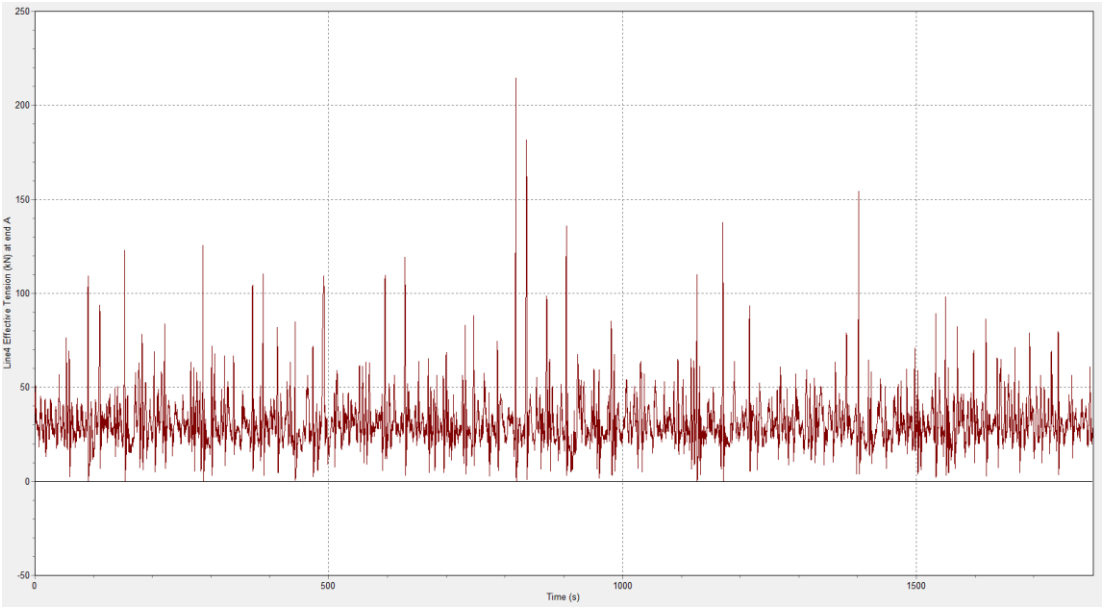
Case 19



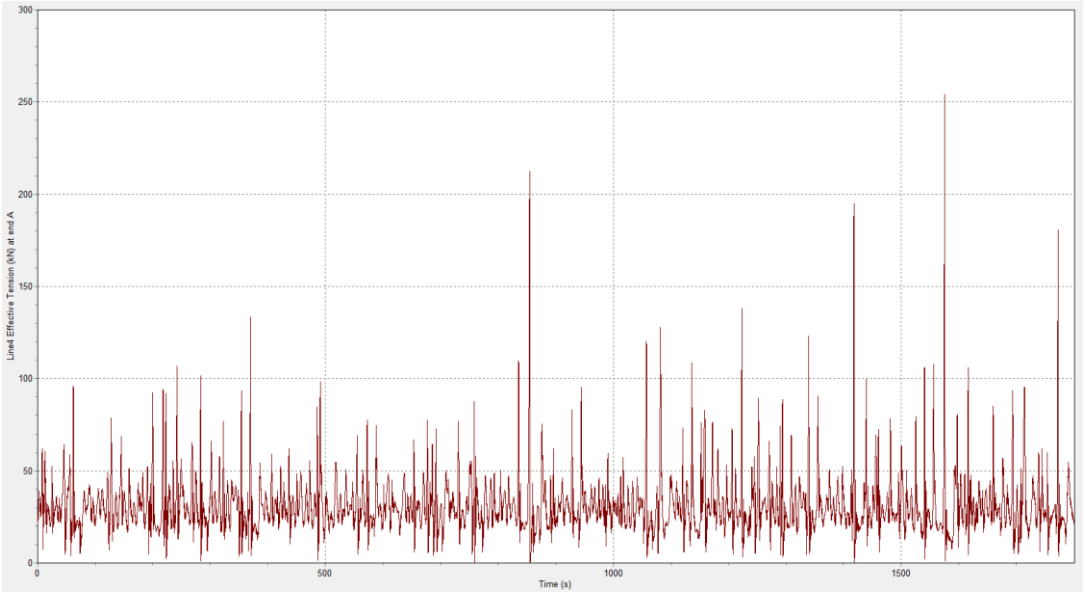
Case 20



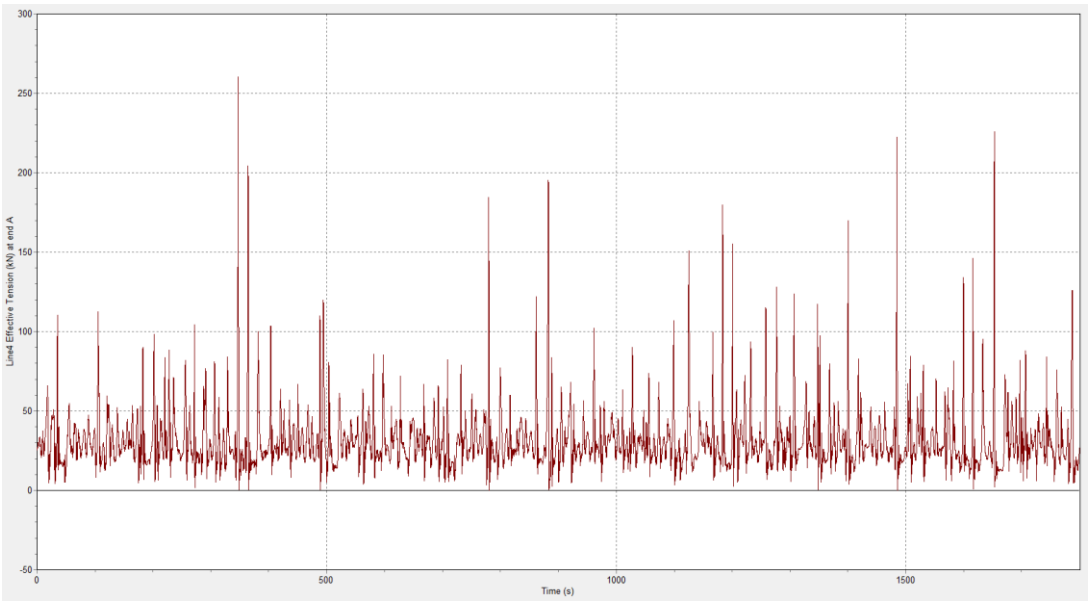
Case 21



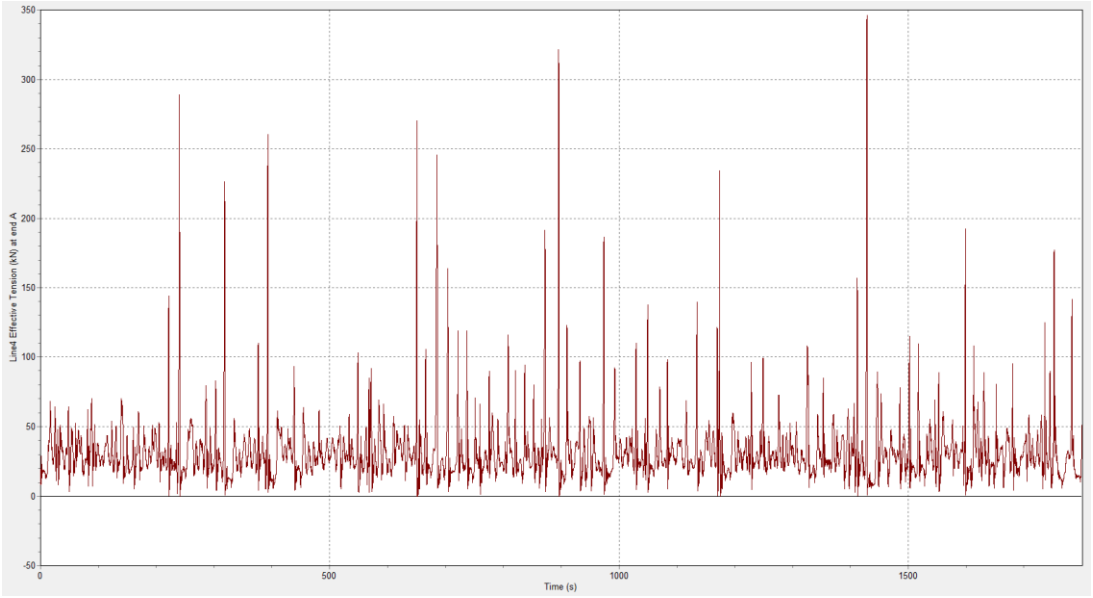
Case 22



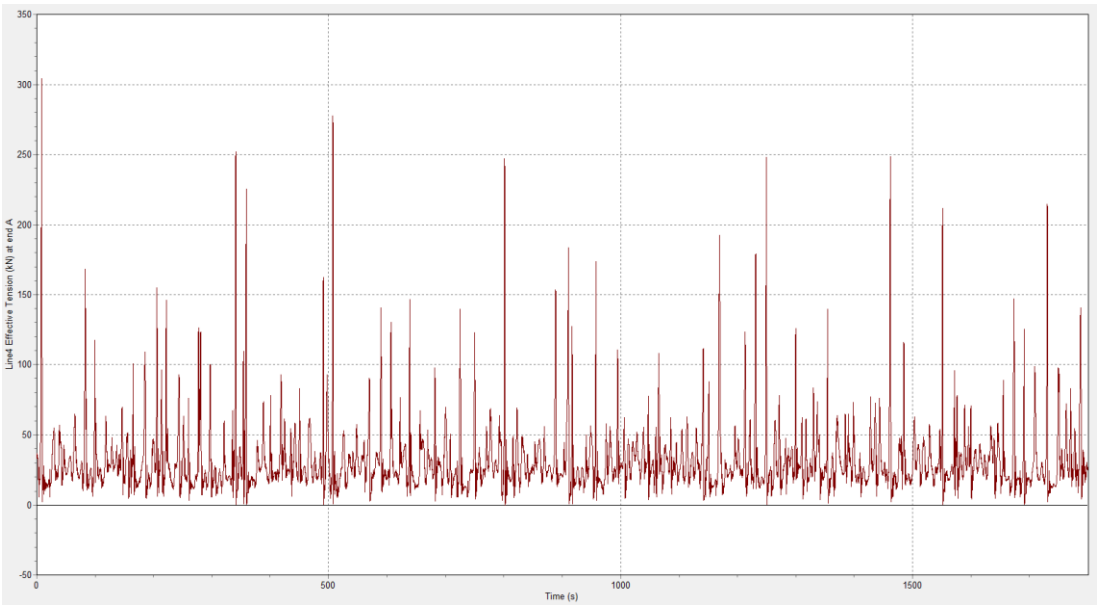
Case 23



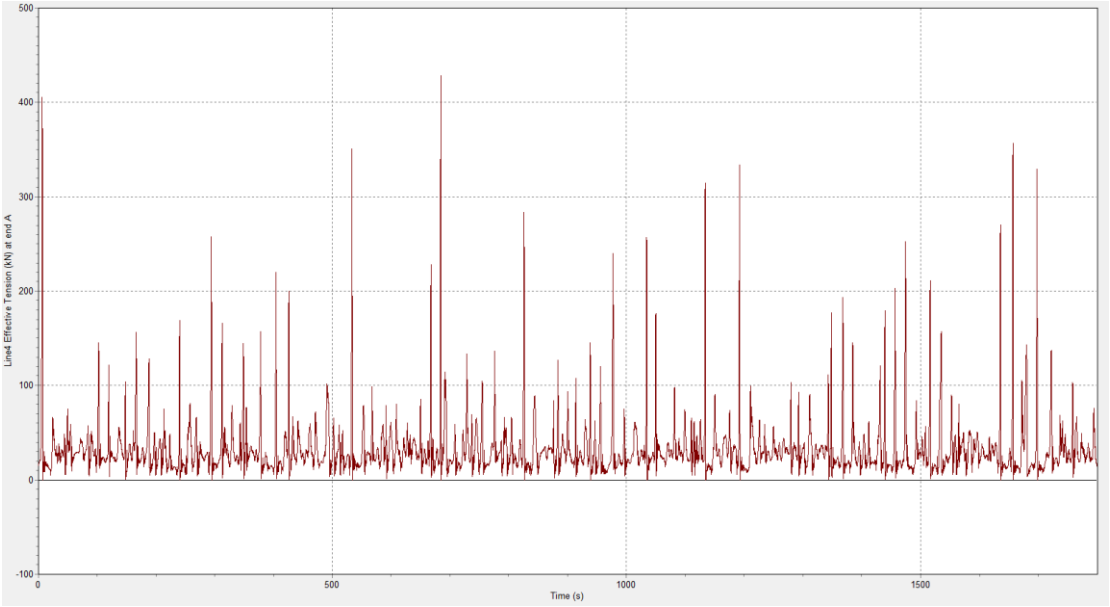
Case 24



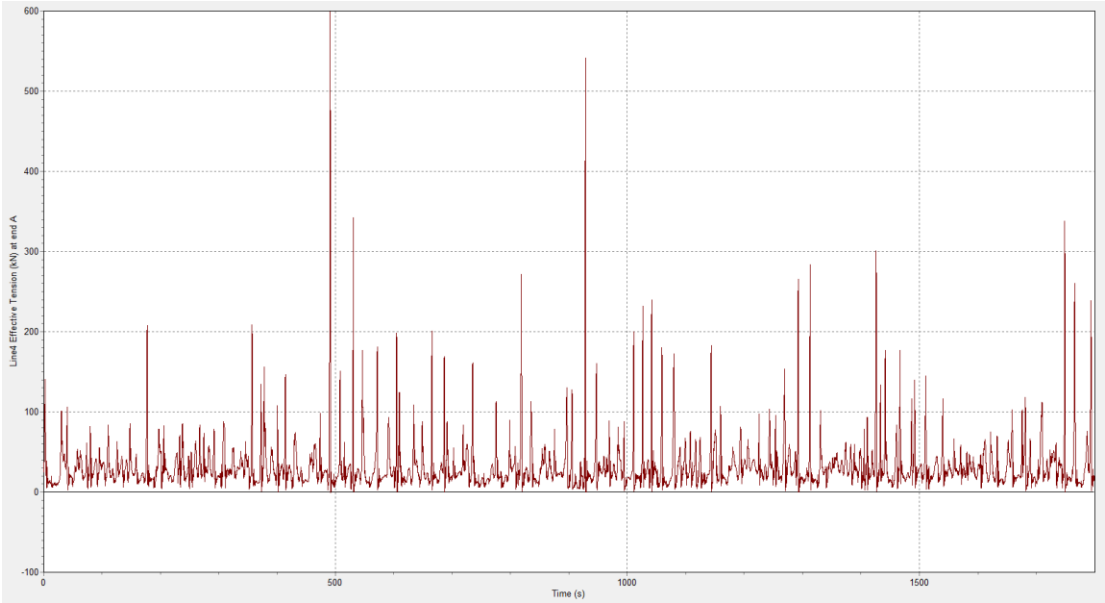
Case 25



Case 26



Case 27



BIODATA PENULIS

Revy Maghriza lahir pada tanggal 29 April 1998, Surabaya. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara pasangan Sentot Efendi dan Nur Farida. Penulis telah menempuh beberapa jenjang pendidikan formal mulai dari SD Negeri Petemon XIII Surabaya pada tahun 2004-2010. Kemudian melanjutkan studi di SMP Negeri 3 Surabaya pada tahun 2010-2013 dan SMA Negeri 6 Surabaya pada tahun 2013-2016. Setelah lulus sekolah, penulis diterima di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya pada tahun 2016. Selama masa perkuliahan, penulis sangat aktif berorganisasi di Himatekla FTK ITS, BEM FTK ITS, dan SPE ITS SC. Selain itu penulis juga aktif dalam seminar dan workshop. Penulis juga sempat menjadi partisipan dalam kegiatan studi ekskursi yang diadakan oleh ITS IO (International Office) di universitas NTUST dan NTNU, Taiwan. Pada tahun ketiga masa perkuliahan, penulis melaksanakan program kerja praktik di bagian SBU Marine and Offshore dan Divisi Research and Development PT. Biro Klasifikasi Indonesia selama dua bulan. Penulis terdaftar sebagai anggota Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. Penulis memiliki ketertarikan pada *offshore structure* yang membuat penulis mempelajari bidang keahlian perancangan dan produksi bangunan lepas pantai yang memiliki fokus pada sistem tambat. Ketertarikan tersebut yang mendasari penulis untuk membuat Tugas Akhir yang berjudul "Analisis Umur Kelelahan Sistem Tambat Akibat Pengaruh Ketidaksimetrisan Konfigurasi *Mooring System* 4x1 Pada *Single Point Mooring*". Motto penulis adalah *"Life is tough, so you have to be tougher than life to change the world"*. Dengan motto tersebut, penulis berharap agar selama hidupnya selalu bisa membanggakan dan membahagiakan keluarga, serta bermanfaat bagi bangsa dan negara.