

**ANALISIS PENGARUH CACAT TERHADAP TEGANGAN
MAKSIMUM DAN ZONA PLASTIS PADA BAJA API 5L B
DAN API 5L X65 YANG MENGALAMI PRA-REGANGAN
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

TUGAS AKHIR

**TRI WIATNO
123.11.006**



**PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
FAKULTAS TEKNIK DAN DESAIN
INSTITUT TEKNOLOGI DAN SAINS BANDUNG
BANDUNG
SEPTEMBER 2015**

**ANALISIS PENGARUH CACAT TERHADAP TEGANGAN
MAKSIMUM DAN ZONA PLASTIS PADA BAJA API 5L B
DAN API 5L X65 YANG MENGALAMI PRA-REGANGAN
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

TUGAS AKHIR

**TRI WIATNO
123.11.006**

Diajukan untuk Memenuhi Mata Kuliah (MM – 3200) Tugas Akhir serta
Sebagai Salah Satu Syarat dalam Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi Teknik Metalurgi dan Material



**PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
FAKULTAS TEKNIK DAN DESAIN
INSTITUT TEKNOLOGI DAN SAINS BANDUNG
BANDUNG
SEPTEMBER 2015**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Tugas Akhir ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Tri Wiatno

NIM : 123.11.006

Tanda Tangan : 18 September 2015

Tanggal :



**ANALISIS PENGARUH CACAT TERHADAP TEGANGAN
MAKSIMUM DAN ZONA PLASTIS PADA BAJA API 5L B
DAN API 5L X65 YANG MENGALAMI PRA-REGANGAN
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

TUGAS AKHIR

TRI WIATNO

123.11.006

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mendapatkan Gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material

Disetujui di : Bandung

Pada tanggal : 19 September 2015

Menyetujui,
Pembimbing Tugas Akhir,

Dr. Eng. Akhmad A. Korda, S.T., M.T.

NIP. 197412042008011011

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Metalurgi dan Material,

Dr. Eng. Akhmad A. Korda, S.T., M.T.

NIP. 197412042008011011

Dari Abu Hurairah radhiyallaahu ‘anhu, beliau berkata, “Seseorang datang kepada Rasulullah shalallahu ‘alaihi wasallam dan berkata, ‘Wahai Rasulullah, kepada siapakah aku harus berbakti pertama kali?’ Nabi shalallahu ‘alaihi wasallam menjawab, ‘Ibumu!’ dan orang tersebut kembali bertanya, ‘Kemudian siapa lagi?’ Nabi shalallahu ‘alaihi wasallam menjawab, ‘Ibumu!’ Orang tersebut bertanya kembali, ‘Kemudian siapa lagi?’ Beliau menjawab, ‘Ibumu.’ Orang tersebut bertanya kembali, ‘Kemudian siapa lagi,’ Nabi shalallahu ‘alaihi wasallam menjawab, ‘Kemudian ayahmu.’” (HR. Bukhari no. 5971 dan Muslim no. 2548)

-----oOo-----

Intelligence is not the determinant of success, but hard work is the real determinant of your success.

If you fall a thousand times, stand up millions of times because you do not know how close you are to success.



*Dengan rasa cinta dan bangga yang begitu mendalam,
Ku Persembahkan karya ini kepada kedua orang tua ku, mamah
dan bapak yang telah mendidik dan mengasihku dengan jerih
payah mu, tanpa sedikitpun lelah hingga saat ini.
Semoga Allah SWT memberikan kesehatan dan limpahan rahmat
kepada mamah dan bapak, kelak Allah mengizinkan ku
untuk membahagiakan mu sebagai tanda cinta dan baktiku
kepada mu...*

PRAKATA

Puji dan syukur saya ucapkan ke hadirat Illahi Rabbi, Allah SWT yang telah memberikan kesempatan dan kesehatan dengan berkat dan rahmat-Nya, sehingga saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini yang berjudul “**Analisis Pengaruh Cacat Terhadap Tegangan Maksimum dan Zona Plastis pada Baja API 5L B dan API 5L X65 yang Mengalami Pra-Regangan Menggunakan Metode Elemen Hingga**”. Penulisan ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Program Studi Teknik Metalurgi dan Material, Institut Teknologi dan Sains Bandung.

Laporan Tugas Akhir ini disusun berdasarkan data yang diperoleh dari hasil percobaan, yang selanjutnya diolah dan di analisis. Dalam laporan ini terdapat gambaran secara umum mengenai *pipeline*, material API 5L *grade B & X65*, pengujian tarik, simulasi menggunakan elemen hingga, percobaan dan simulasi serta data beserta pembahasan. Akan tetapi, saya menyadari bahwa masih terdapat kekurangan dan kesalahan dalam laporan ini, seperti belum lengkapnya data, serta penjabaran yang kurang jelas dan lengkap.

Dalam penyusunan laporan ini, terdapat berbagai persoalan yang saya hadapi, mulai dari lamanya proses dalam mempelajari *software* metode elemen hingga (*finite element method*) yang mengakibatkan pengambilan data menunggu waktu yang lama, akan tetapi saya berupaya untuk membuat laporan ini dengan sebaik-baiknya sehingga selesai tepat pada waktunya.

Tak ada gading yang tak retak. Untuk itu, segala kritik dan saran yang membangun sangat saya nantikan, guna memperbaiki penelitian berikutnya. Laporan Tugas Akhir ini dapat saya selesaikan berkat dukungan dan do'a dari orang – orang terdekat penulis, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan Tugas Akhir ini dirasa sangatlah sulit untuk saya selesaikan.

Untuk itu, rasa terima kasih tak lupa saya sampaikan kepada **orang tua (Ayahanda dan Ibunda)** tercinta **Bapak Iwan dan Ibu Sanih, kakak penulis Budi Suprianto & Riswanti** yang telah mencurahkan perhatian yang tak terhingga kepada penulis dengan segala jerih payahnya yang diupayakan baik dari segi moril dan materil sehingga saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini, saya meyakini selesainya Tugas Akhir ini merupakan salah satu dari ribuan do'a Ibunda dan Ayahanda yang dikabulkan oleh Allah SWT. **Bapak Dr. Eng. Akhmad A. Korda** selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir sekaligus Ketua Program Studi Teknik Metalurgi & Material, Fakultas Teknik dan Desain – ITSB yang telah menyediakan waktu, tenaga, pikiran, sumbangsih ide – ide, pengarahan dan masukan yang bermanfaat dalam penyusunan Tugas Akhir ini, beserta ilmu yang telah diberikan selama perkuliahan, baik ilmu dalam bidang Metalurgi dan Material maupun ilmu – ilmu tentang kehidupan, banyak wejangan berharga yang akan tersimpan dalam memori indah selama menuntut ilmu di ITSB, terima kasih telah memberikan inspirasi bagi saya dalam bidang akademik maupun non akademik. **Bapak Prof. Ir. Syoni Soepriyanto, M.Sc., Ph.D** selaku Dosen Wali Teknik Metalurgi dan Material angkatan 2011 yang telah membimbing kami selama perkuliahan sejak TPB hingga tingkat akhir, serta membantu dalam banyak hal dalam bidang akademik dan administrasi berkenaan dengan

perkuliahan, kami (angkatan 2011) menganggap bapak layaknya Ayah yang mengayomi dirumah kedua kami (ITSB), terimakasih atas ilmu yang telah diberikan. **Bapak Rizky Hidayat, S.T., M.T.** atas data penelitian yang diberikan dan masukan selama pengerjaan Tugas Akhir ini. **Bapak Killang Pratama, S.T., M.T.** selaku Sekretaris Prodi Teknik Metalurgi & Material ITSB yang telah banyak membantu dalam hal administrasi berkenaan dengan Tugas Akhir ini. **Dosen Penguji** yang banyak memberikan masukan yang bermanfaat bagi penyempurnaan Tugas Akhir ini. **Bapak Ir. Kemas Rifian, M.S.** yang telah membantu saya memberi masukan dan arahan tentang *finite element method*. **Bapak Septa Berti, S.T.**, staf Lab. Pengembangan Paduan dan Karakterisasi Metalurgi, FTTM ITB yang telah membantu penulis selama berada di ITB. **Bapak Dr. Roziq Himawan, M.Eng** (Puspitek - BATAN Serpong) yang telah berbagi ilmu kepada saya. **Bang Zaim**, Teknik Penerbangan FTMD ITB yang telah meluangkan waktu untuk membantu dalam belajar *finite element*. Rekan-rekan seperjuangan Teknik Metalurgi dan Material 2011, **Daken Septa A, M. Abdurrahman, Asep Jalaludin, Alfi Fajar F., Wahyu Lagang N., Sunoto Mardika, Azmitia Ningrum, Oktavia Parliyanti, Giannisa M., Pradifta Bina S., Raihan**, sahabat jauhku **Mardhatilla Amalia** atas semangat yang diberikan selama penulisan Tugas Akhir ini, teman – teman kosan mulai dari Greenleaf, Elverde, Catalonia, Nice, **Billy Bhaskara, Haryo Abiyoso, Dekil, Tyo Asmoro, Rofi, Mulia Azkaa, Agihitia, Lulut Fitra Fala, Fauzan Septiana, Aidil Luthfansyah, Arya Wicaksana, Miftah Rakhman, Rizsa Sufyan Tsaori, Regiansyah.** Sabahat di KM – ITSB **Rullyansyah, Samuel Rigen, Kattri, M. Putra N., Cindy Clara, Dedeh Wiingsih, Kristina, Asti Sulastri.** Sahabat SMP hingga kini yang masih selalu bersama **Rizky Hidayatulloh & Ferdian Radityo**, serta semua pihak yang telah memberikan bantuan moril maupun materil yang tidak dapat disebutkan satu per satu. Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga Tugas Akhir ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Bandung, September 2015

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Institut Teknologi dan Sains Bandung, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Tri Wiatno
NIM : 123.11.006
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik dan Desain
Jenis karya : Tugas Akhir

demikian pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Institut Teknologi dan Sains Bandung **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul : **Analisis Pengaruh Cacat Terhadap Tegangan Maksimum dan Zona Plastis pada Baja API 5L B dan API 5L X65 yang Mengalami Pra-Regangan Menggunakan Metode Elemen Hingga** beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Institut Teknologi dan Sains Bandung berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Bandung

Pada tanggal : 19 September 2015

Yang menyatakan,

Tri Wiatno

ABSTRAK

Industri minyak dan gas hingga saat ini masih menjadi salah satu industri yang memegang peranan penting di Indonesia. Lebih dari 38 juta rumah dan industri serta berbagai pelayanan penting lainnya bergantung pada sumberdaya ini yang dilayani oleh 800,000 mil jaringan transmisi pipa, jaringan pipa penyalur menjadi penting keberadaannya karena berfungsi sebagai media dalam proses produksi hingga penyaluran. Pada kenyataannya, pipa penyalur rentan terhadap kegagalan akibat pembebanan yang mengakibatkan terjadinya deformasi plastik, seperti *cold bending* saat instalasi, pergerakan tanah, penguluran, penggulangan, proses pengelasan baja menjadi pipa (silinder/tubular), serta *cold rolling* saat fabrikasi baja. Hal demikian memungkinkan terjadinya *pre-strain* pada baja. Selain itu, hadirnya cacat akibat proses fabrikasi, instalasi maupun korosi perlu dipertimbangkan dikarenakan dapat mempengaruhi sifat mekanis pada baja yang telah mengalami *pre-strain*. Pada penelitian ini dilakukan pemodelan dan simulasi tegangan menggunakan *finite element method* dengan model *gauge length* spesimen uji tarik yang terdapat cacat berupa takikan pada baja API 5L B dan API 5L X65 yang telah mengalami *pre-strain* 5%, 7.5%, dan 10%, kedalaman takikan 1 mm, 3 mm, & 5 mm. Sifat material yang telah mengalami *pre-strain* tanpa cacat diperoleh dari penelitian sebelumnya dan digunakan sebagai data sifat material dalam pemodelan. Simulasi dilakukan dengan pembebanan uniaksial, besarnya beban yang diterapkan adalah sebesar *ultimate tensile strength* dari hasil pengujian eksperimen (data sekunder) material *pre-strain* dengan takik. Tegangan maksimum di ujung takik hasil simulasi dibandingkan dengan pendekatan analitik, didapatkan bahwa tegangan maksimum diujung takikan membesar seiring dengan bertambahnya kedalaman takik, sedangkan nilai kuat tarik (*ultimate tensile strength*) berbanding terbalik dengan hasil tegangan maksimum baik itu hasil *finite element method* maupun analitik. Simulasi tegangan menggunakan *finite element method* memberikan hasil lebih teliti karena memperhitungkan luas area nominal di bawah takik. Konsentrasi tegangan terbesar untuk hasil *finite element method* adalah 6833.60 MPa, 7526.70 MPa, dan 7569.90 MPa untuk API 5L B serta 7641.10 MPa, 8386.40 MPa, dan 8477.80 MPa untuk API 5L X65 dikedalaman takik 5 mm pada tiap perlakuan *pre-strain* (5%, 7.5%, dan 10%). Kekuatan tarik (UTS) terendah terjadi pada takikan 5 mm (*pre-strain* 5%, 7.5%, dan 10%) untuk API 5L B 299.02 MPa, 235.72 MPa dan 233.32 MPa serta API 5L X65 284.57 MPa, 316.72 MPa, 320.71 MPa. Hasil dari rasio σ_{\max}/UTS (Faktor Konsentrasi Tegangan, Kt) untuk material API 5L X65 sebesar 26.43 dikedalaman takik 5 mm (*pre-strain* 10%) lebih kecil dari API 5L B (Kt = 32.44), sehingga API 5L X65 lebih rentan terhadap takikan dikarenakan hanya dibutuhkan tegangan maksimum yang lebih kecil untuk menyebabkan kegagalan. Besarnya *plastic zone* linier dengan kedalaman takik. Semakin besar *plastic zone* maka semakin mudah material mengalami kegagalan.

Kata kunci : *tegangan maksimum, ujung takik, pre-strain, finite element method, API 5L B & API 5L X65.*

ABSTRACT

Oil and gas industries still became the one from many industries who play an important role in Indonesia. More than 38 million houses, industries and many important services depends on this resources which served by 800.000 mil pipeline transmission. The presence of pipeline transmission is important because the function to be production until transmission media. At the actual condition pipeline is fragile to failure due to stress that cause platic deformation, like cold bending that happened when the installation of pipeline, movements of ground, stretch, rolling, the effect from making pipe with welding process and cold rolling from fabrication itself. Because the presence of several factor, pre strain can exist on the pipe. Besides that, defects from fabrication, installation or corrosion must be calculated, remember the defect affects mechanical characteristic from the steel pipe which have encounter pre strain. In this study, the effect from pre strain and notch will be modelized and simulated using finite element method, with gauge length of the tensile test specimen will be given defect like notch. The specimen that used on this testing are API 5L B steel and API 5L X65 steel, with 5%, 7.5% and 10% pre strain variation, and 1 mm, 2 mm and 5 mm notch variation. Mechanical properties from the pre strained steel was obtained from previous study and used as simulation datas. In the simulation, the stress have given uniaksial stress. The applied stress in the simulation same as the ultimate tensile strength from experimental testing of pre strained material with notch (secondary data). The maximum stress at the tip notch for simulation's result compared with analytical approaching, the result that obtained that maximum stress at the tip notch will be increased with the addition of the notch, while the ultimate tensil strength of the specimen reversed with the maximum strength from finite element method or analytical results. The results from finite element method giving more an accurate result, cause calculating the nominal area under the notch. The biggest stress concentration from finite element method are 6833.60 MPa, 7526.70 MPa and 7569.90 MPa for API 5L B specimen and 7641.10 MPa, 8386.40 MPa and 8477.80 MPa untuk API 5L X65 on 5 mm deep notch for each pre starin (5%, 7%, 10%) respectively. The lowes ultimate tensile strength occurs on 5 mm deep notch (pre strain 5%, 7.5% 10%) for API 5L B specimen are 299.02 MPa, 235.72 MPa and 233.32 MPa respectively and API 5L X65 specimen are 284.57 MPa, 316.72 MPa and 320.71 MPa. The ratio of σ_{\max}/UTS (stress concentration factor, Kt) for API 5L X65 is 26.34 on 5 mm notch (pre-strain 10%), this result was lower compared to API 5L B (Kt = 32.44), so API 5L X65 is more susceptible to notch cause the low maximum stress that required to trigger the failure. The bigger gauge of linear plastic zone with notch increased, will be easier the failure happened.

Keyword : *maximum stress, tip of the notch, pre-strain, finite element method, API 5L B and API 5L X65.*

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
MOTTO	iv
PERSEMBAHAN.....	v
PRAKATA	vi
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	viii
ABSTRAK	ix
<i>ABSTRACT</i>	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar belakang.....	1
1.2 Tujuan dan Manfaat Penelitian	5
1.3 Rumusan Masalah	5
1.4 Ruang Lingkup.....	5
1.5 Metodologi Penelitian.....	5
1.6 Sistematika Penulisan	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Pipa Jaringan	10
2.2 Baja Paduan Berkekuatan Tinggi (<i>High-Strength Low-Alloy Steel</i>)	11
2.2.1 Baja API 5L B dan API 5L X65	13
2.3 Pengerasan Regaang (<i>Strain Hardening</i>).....	15
2.4 Konsentrasi Tegangan dan Penguatan Takikan	16
2.4.1 Konsentrasi tegangan	16
2.4.2 Penguatan takikan	17
2.5 Pengujian Tarik	18
2.6 Metode Elemen Hingga / <i>Finite Element Method</i> (FEM)	20
BAB III DATA, PEMODELAN DAN HASIL SIMULASI	
3.1 Percobaan.....	25
3.1.1 Pengujian tarik	25
3.1.2 Pembebanan pada model <i>gauge length</i> dengan <i>software Finite Element Method</i>	27
3.2 Sifat Mekanis Material API 5L B dan API 5L X65 yang Mengalami Pra-regangan	28
3.3 Pemodelan dan Simulasi.....	29
3.3.1 Peralatan	29
3.3.2 Pemodelan geometri.....	30
3.3.3 Simulasi	30

3.4 Data dan Hasil Simulasi.....	32
3.4.1 Data pengujian eksperimental	32
3.4.2 Data hasil simulasi menggunakan <i>finite element</i> <i>Method</i>	33
BAB IV PEMBAHASAN	
4.1 Nilai Konsentrasi Tegangan pada Tegangan Maksimum.....	36
4.2 Hubungan Konsentrasi Tegangan Terhadap Pra-Regangan dan Kedalaman Takik	42
4.3 Nilai Radius Zona Plastis (<i>Plastis Zone</i>) pada Material yang Mengalami Pra-Regangan	44
BAB V SIMPULAN	
5.1 Simpulan	48
5.2 Saran	48
DAFTAR PUSTAKA	49

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 <i>Trans-Asean Pipeline Project</i>	1
Gambar 1.2 Skematik Metodologi Penelitian	6
Gambar 2.1 Ilustrasi pipa jaringan <i>onshore</i> dan <i>offshore</i>	10
Gambar 2.2 Skema pengerasan regang.....	16
Gambar 2.3 (a) Geometri permukaan dan internal crack ; (b) skematik profil tegangan sepanjang $x - x'$ dalam 2a, penjelasan tambahan posisi ujung retak.....	17
Gambar 2.4 Kurva tegangan – regangan hasil uji tarik	19
Gambar 2.5 Elemen yang lazim digunakan pada analisa FEM.....	21
Gambar 2.6 (a) Elemen persegi empat sederhana untuk menjelaskan analisa elemen hingga ; (b) dua elemen digabungkan menjadi model struktur	21
Gambar 2.7 Contoh pemodelan dengan metode elemen hingga/FEM	27
Gambar 3.1 Standar spesimen uji tarik ^[13]	25
Gambar 3.2 Spesimen uji tarik (a) as received ; (b) pre-strain 5% ; (c) pre-strain 7.5% ; (d) pre-strain 10%.....	27
Gambar 3.3 Spesimen yang telah di pre-strain dan diberi takikan (notch).....	27
Gambar 3.4 Diagram alir pemodelan dan simulasi menggunakan ANSYS	29
Gambar 3.5 Hasil gambar yang telah di buat bidang permukaan.....	30
Gambar 3.6 Hasil <i>meshing</i>	31
Gambar 3.7 (a) Hasil simulasi pada <i>gauge length</i> ; (b) perbesaran gambar yang menunjukkan tegangan maksimum dan minimum.	31
Gambar 4.1 Tegangan maksimum pada ujung takikan menurut pendekatan analitik dan metode elemen hingga untuk API 5L B yang mengalami pra-regangan 5%, 7.5%, dan 10%....	36
Gambar 4.2 <i>Trendline</i> tegangan maksimum pada ujung takikan menurut pendekatan analitik dan metode elemen hingga dihubungkan dengan kuat tarik (UTS) as received untuk API 5L B	37
Gambar 4.3 Tegangan maksimum pada ujung takikan menurut pendekatan analitik dan metode elemen hingga untuk API 5L X65 yang mengalami pra-regangan 5%, 7.5%, dan 10%	38
Gambar 4.4 <i>Trendline</i> tegangan maksimum pada ujung takikan menurut pendekatan analitik dan metode elemen hingga dihubungkan dengan kuat tarik (UTS) as received untuk API 5L X65	38
Gambar 4.5 Faktor konsentrasi tegangan, K_t , (Rasio σ_{max}/UTS) untuk material API 5L B yang mengalami pra-regangan 5%, 7.5% dan 10%	41
Gambar 4.6 Faktor konsentrasi tegangan, K_T , (Rasio σ_{max}/UTS) untuk material API 5L X65 yang mengalami pra-regangan 5%, 7.5% dan 10%	41

Gambar 4.7 Pengaruh pre-strain terhadap tegangan maksimum diujung takik hasil <i>finite element method</i> pada kedalaman takik 1 mm, 3 mm, dan 5 mm untuk API 5L B	42
Gambar 4.8 Pengaruh pre-strain terhadap tegangan maksimum diujung takik hasil <i>finite element method</i> pada kedalaman takik 1 mm, 3 mm, dan 5 mm untuk API 5L X65	43
Gambar 4.9 <i>Plastic zone</i> untuk material API 5L B pre-strain 5%, 7.5%, dan 10% kedalaman takik 1 mm, 3 mm dan 5 mm (atas ke bawah) melalui pendekatan analitik	44
Gambar 4.10 <i>Plastic zone</i> untuk material API 5L X65 pre-strain 5%, 7.5%, dan 10% kedalaman takik 1 mm, 3 mm dan 5 mm (atas ke bawah) melalui pendekatan analitik	45
Gambar 4.11 Kuat tarik API 5L B dengan titik awal kuat tarik <i>as received</i> ...	46
Gambar 4.12 Kuat tarik API 5L X65 dengan titik awal kuat tarik <i>as received</i>	47

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Jenis Pipa Penyalur berdasarkan Material yang diangkut	11
Tabel 2.2 Beberapa contoh baja HSLA	12
Tabel 2.3 Pengaruh unsur padu terhadap sifat mekanis baja.....	13
Tabel 2.4 Sifat Mekanis API 5L B dan API 5L X65	14
Tabel 2.5 Komposisi kimia baja API 5L B dan API 5L X65	15
Tabel 3.1 Dimensi standar spesimen uji tarik	26
Tabel 3.2 Ketebalan material API 5L B dan API 5L X65	26
Tabel 3.3 Sifat mekanis API 5L B yang mengalami pra-regang.....	28
Tabel 3.4 Sifat mekanis API 5L X65 yang mengalami pra-regang.....	28
Tabel 3.5 Hasil pengujian tarik API 5L B dengan perlakuan pra-regangan dan kedalaman takikan.....	28
Tabel 3.6 Hasil pengujian tarik API 5L X65 dengan perlakuan pra-regangan dan kedalaman takikan.....	32
Tabel 3.7 Tegangan maksimum di ujung takikan (<i>notch</i>) analitik dan simulasi API 5L B.....	33
Tabel 3.8 Tegangan maksimum di ujung takikan (<i>notch</i>) analitik dan simulasi API 5L X65	33
Tabel 3.9 Nilai faktor konsentrasi tegangan analitik dan FEM.....	34
Tabel 3.10 Radius zona plastis (<i>plastic zone</i>) untuk API 5L B.....	35
Tabel 3.11 Radius zona plastis (<i>plastic zone</i>) untuk API 5L X65.....	35

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A Langkah membuat model <i>gauge length</i> menggunakan AutoCaD (Autodesk 2013).....	52
LAMPIRAN B Langkah – langkah simulasi menggunakan ANSYS Workbench 2015.....	58
LAMPIRAN C Hasil Simulasi tegangan menggunakan ANSYS Workbench 2015.....	65
LAMPIRAN D Contoh result “ <i>Solution Information</i> ” ANSYS untuk spesimen API 5L B notch 1 mm.....	70
LAMPIRAN E Resume Hasil ANSYS.....	81
LAMPIRAN F Perhitungan K_I dan r_y	85