

**ANALISIS FORMING LIMIT DIAGRAM PADA MATERIAL  
BAJA DUAL PHASE 780 KETEBALAN 1.5 MM, 2.0 MM, DAN  
2.5 MM DENGAN METODE SIMULASI ABAQUS**



**Disusun sebagai salah satu syarat menyelesaikan Program Studi Strata I pada  
Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik**

**Oleh:**

**DIMAS ADI PRASETYO**

**D 200 170 050**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SURAKARTA**

**2021**

**HALAMAN PERSETUJUAN**

**ANALISIS *FORMING LIMIT DIAGRAM* PADA MATERIAL BAJA DUAL  
PHASE 780 KETEBALAN 1.5 MM, 2.0 MM, DAN 2.5 MM DENGAN  
METODE SIMULASI ABAQUS**

**PUBLIKASI ILMIAH**

Oleh:

**DIMAS ADI PRASETYO**

**D 200 170 050**

**Telah diperiksa dan disetujui oleh:**

**Dosen Pembimbing**



**Ir. Tri Widodo Besar Riyadi, ST., M.Sc., Ph.D**

**NIK 895**

**HALAMAN PENGESAHAN**

**ANALISIS FORMING LIMIT DIAGRAM PADA MATERIAL BAJA DUAL  
PHASE 780 KETEBALAN 1.5 MM, 2.0 MM, DAN 2.5 MM DENGAN  
METODE SIMULASI ABAQUS**

Oleh

**DIMAS ADI PRASETYO**

**D 2001700 50**

**Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji  
Fakultas Teknik Program Studi Teknik Mesin.**

**Universitas Muhammadiyah Surakarta**

**Pada hari Senin, 26 Juli 2021**

**Dan dinyatakan telah memenuhi syarat**

**Dewan Penguji :**

1. **Ir. Tri Widodo Besar Riyadi, S.T., M.Sc., Ph.D.** (.....) (Ketua Dewan Penguji)
2. **Ir. Bibit Sugito, M.T.** (.....) (Anggota I Dewan Penguji)
3. **M Al Fatih Hendrawan, S.T., M.T.** (.....) (Anggota II Dewan Penguji)

**Dekan**




**Rois Fathoni, S.T., II.Sc. Ph.D**

#### **PERNYATAAN**

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam publikasi ilmiah ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Apabila kelak terbukti ada ketidakbenaran dalam pernyataan saya di atas, maka akan saya pertanggungjawabkan sepenuhnya.

Surakarta, 25 Agustus 2021



**Dimas Adi Prasetyo**

D200170050

# **ANALISIS FORMING LIMIT DIAGRAM PADA MATERIAL BAJA DUAL PHASE 780 KETEBALAN 1.5 MM, 2.0 MM, DAN 2.5 MM DENGAN METODE SIMULASI ABAQUS**

## **Abstrak**

Pada penelitian ini bertujuan untuk menentukan Forming Limmit Diagram pada saat terjadinya necking dan fracture dengan material Dual Phase 780, serta untuk mengetahui pengaruh ketebalan pelat terhadap Forming Limmit Diagram. Pengujian FLD dengan standar nakajima dilakukan dengan metode simulasi dengan menggunakan software Abaqus/CAE. Pada simulasi ini menggunakan jenis pemodelan kerusakan yaitu GTN Model. Untuk mengetahui keakuratan simulasi pengujian FLD, hasil simulasi dibandingkan dengan data litelatur hasil eksperimen yang dilakukan oleh Amaral. Hasil simulasi menggunakan GTN model memiliki akurasi yang baik dalam menentukan Forming Limmit Curve at Necking (FLCN) dan juga Forming Limmit Curve at Fracture dari material Dual Phase 780 dimana sangat sesuai dengan hasil eksperimen dan dapat memprediksi patahan/fracture yang terjadi. Ketebalan pelat tidak mempengaruhi posisi Forming Limmit Curve at Fracture (FLCF) namun hanya mempengaruhi waktu, dimana pada umumnya ketebalan dari pelat membuat kecepatan pelat lebih cepat.

**Kata Kunci :** FLD, Dual Phase 780, Nakajima, GTN Model

## **Abstract**

This study aims to determine the Forming Limit Diagram at the time of necking and fracture with Dual Phase 780 material, and to determine the effect of plate thickness on the Forming Limit Diagram. FLD testing with Nakajima standard is done by simulation method using Abaqus/CAE software. This simulation uses the type of damage modeling, namely the GTN Model. To determine the accuracy of the FLD test simulation, the simulation results are compared with the literature data from experiments conducted by Amaral. The simulation results using the GTN model have good accuracy in determining the Forming Limit Curve at Necking (FLCN) and also the Forming Limit Curve at Fracture of the Dual Phase 780 material which is very consistent with the experimental results and can predict fractures that occur. The thickness of the plate does not affect the position of the Forming Limit Curve at Fracture (FLCF) but only affects the time, where in general the thickness of the plate makes the plate speed faster.

**Kata Kunci :** FLD, Dual Phase 780, Nakajima, GTN Model

## 1.PENDAHULUAN

Latar Belakang dari penelitian ini adalah Perkembangan teknologi yang sangat pesat di era globalisasi saat ini telah memberikan banyak manfaat dalam kemajuan diberbagai aspek sosial. Berkembangnya teknologi menjadi terciptanya suatu produk yang baru dan memiliki kualitas yang lebih baik. Penggunaan teknologi oleh manusia dalam membantu menyelesaikan pekerjaan merupakan hal yang lumrah terjadi saat ini. Perkembangan teknologi ini juga harus diikuti dengan perkembangan pada Sumber Daya Manusia (SDM). Manusia sebagai pengguna teknologi harus mampu memanfaatkan teknologi yang ada saat ini, maupun perkembangan teknologi tersebut selanjutnya. Adaptasi manusia dengan teknologi baru yang telah berkembang wajib untuk dilakukan melalui pendidikan. Hal ini dilakukan agar generasi penerus tidak tertinggal dalam hal teknologi baru. Dengan begitu, teknologi dan pendidikan mampu berkembang bersama seiring dengan adanya generasi baru sebagai penerus generasi lama.

Dengan adanya perkembangan didunia pendidikan ini maka berkembang pula cara untuk mengetahui berbagai hal salah satunya yaitu simulasi. *Forming Limmit Diagram* ( FLD ) merupakan cara untuk menentukan titik fracture yang terjadi dan FLD sendiri terdiri dari tiga cara yaitu eksperimen, perhitungan, dan simulasi. Akan tetapi jika menggunakan eksperimen akan banyak mengeluarkan biaya yang sangat besar dan juga waktu yang lama maka dari itu penelitian ini menggunakan simulasi untuk memodelkan FLD.

*Forming Limmit Diagram* (FLD) adalah representasi grafik dari batas-batas pembentukan; yaitu, tekanan mayor dan minor saat *necking* terjadi. meskipun retakan adalah batas akhir dalam operasi pembentukan FLD dapat dihasilkan dengan memetakan kriteria kegagalan pada grafik dua sumbu yang mewakili regangan mayor dan minor.( Marciniak et al, 2002) [1]

Pada penelitian ini dilakukan pemodelan dengan menggunakan standar *dies* nakajima untuk mengetahui nilai regangan mayor dan regangan minor dari rata rata bahan *Dual Phase 780*. Pengujian ini dijadikan sebagai sumber data yang mampu

memberikan informasi mengenai karakteristik dari bahan *Dual Phase 780* itu sendiri.

Pada penelitian ini juga akan dilakukan variasi tebal untuk mengetahui kemampuan bentuk dari material DP 780 dengan beberapa variasi ketebalan menggunakan metode *Forming Limmit Diagaram* ( FLD ). Dimana *Forming Limmit Diagaram* ( FLD ) sendiri terbagi menjadi 3 metode yaitu dengan metode eksperimen, perhitungan dan metode elemen hingga. Pada penelitian ini menggunakan metode elemen hingga dengan membandingkan data yang diperoleh dari eksperimen dengan data yang diperoleh dari metode elemen hingga. Dengan metode tersebut kita dapat menentukan kombinasi kondisi yang tepat untuk melakukan pembentukan dengan plat *Dual Phase 780*.

Pada penelitian ini hasil dari perbandingan data menjadi acuan apakah sebuah metode elemen hingga sudah berhasil dilakukan atau tidak. Hal ini mengacu kepada pernyataan Safarian, P. (2015) [2] yang menyatakan bahwa perbedaan nilai regangan dapat diterima sebesar kurang dari 10%. dari metode itu dipakai untuk melakukan pembentukan plat *Dual Phase 780* dengan berbagai variasi dengan tujuan untuk menentukan kondisi yang tepat pada plat *Dual Phase 780*

Perumusan masalah pada penelitian ini adalah Bagaimana memodelkan simulasi *FLD* dengan standar Nakajima menggunakan software Abaqus/CAE.

Bagaimana cara memprediksi kegagalan yang terjadi pada material *Dual Phase 780* menggunakan *Forming Limmit Diagram* pada saat *Necking* dan *Fracture* dan bagaimana pengaruh ketebalan pelat dual phase 780 terhadap *Forming Limit Diagram*

Tujuan dari penelitian ini adalah Mengetahui validasi hasil pemodelan simulasi menggunakan software Abaqus/CAE dengan hasil eksperimen pada pengujian FLD material *Dual Phase 780*. Mengetahui *Forming Limit Diagram* pada saat *Necking* pada pengujian FLD material *Dual Phase 780*. Mengetahui *Forming Limit Diagram* pada saat *Fracture* pada pengujian FLD material *Dual Phase 780*. Mengetahui pengaruh ketebalan pelat terhadap *Forming Limit Diagram*

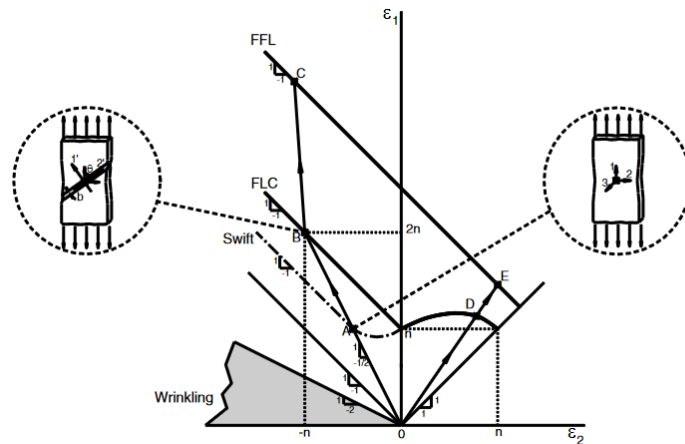
Merujuk pada R. Amaral (2017) dkk. Memodelkan *Forming Limmits Diagram* ( FLD ) dengan menggunakan standart test Nakajima. Perbandingan model dengan

parameter GTN ( *Gurson Teeevard Neddleman* ) dan *Johnsoon Cook*. Dengan material yang digunakan DP780, Pemodelan berhasil dengan mengkalibrasi data dari eksperimen dengan data dari simulasi. Hasilnya didapati prerentase yang akurat dengan hasil yang mendekati data eksperimen yaitu parameter GTN (Gurson Teeevard Neddleman)[3] dan juga oleh Safdarian (2018). Melakukan simulasi dengan software abaqus menggunakan GTN ( *Gurson Teeevard Neddleman* ) model untuk memprediksi *Forming Limit Diagram (FLD)* dan *Forming Limit Stress Diagram (FLSD)* apakah hasil data dari eksperimen dan simulasi hampir sama. Material yang digunakan adalah lembaran plat *aluminium AA6061*. Hasil simulasi dicocokkan dengan data eksperimen, dan didapati bahwa hasil simulasi dapat memprediksi secara akurat dengan hasil eksperimen.[4]

Uji Tarik merupakan proses pengujian tarik bertujuan untuk mengetahui kekuatan tarik benda uji. Pengujian tarik untuk menentukan kekuatan tarik dimaksudkan untuk mengetahui berapa nilai kekuatan dari suatu material. Pembebanan tarik adalah pembebanan yang diberikan pada benda dengan memberikan gaya tarik berlawanan arah pada salah satu ujung benda.[7]

Diagram batas pembentukan (FLD) adalah representasi grafik dari batas-batas pembentukan; yaitu, tekanan mayor dan minor saat necking terjadi. meskipun retakan adalah batas akhir dalam operasi pembentukan FLD dapat dihasilkan dengan memetakan kriteria kegagalan pada grafik dua sumbu yang mewakili regangan mayor dan minor. Regangan mayor dan minor dapat diukur menggunakan lembaran pelat. Teknik umum yang digunakan pada plat adalah menggunakan pola lingkaran, garis atau titik yang teratur, atau pola yang diterapkan secara acak saat terjadi tegangan deformasi. Regangan mayor didefinisikan sebagai regangan pada arah regangan maksimum. Sedangkan regangan minor adalah regangan tegak lurus dengan regangan mayor.





Gambar 1.1 Kurva Forming Limit Diagram FLCF dan FLCN

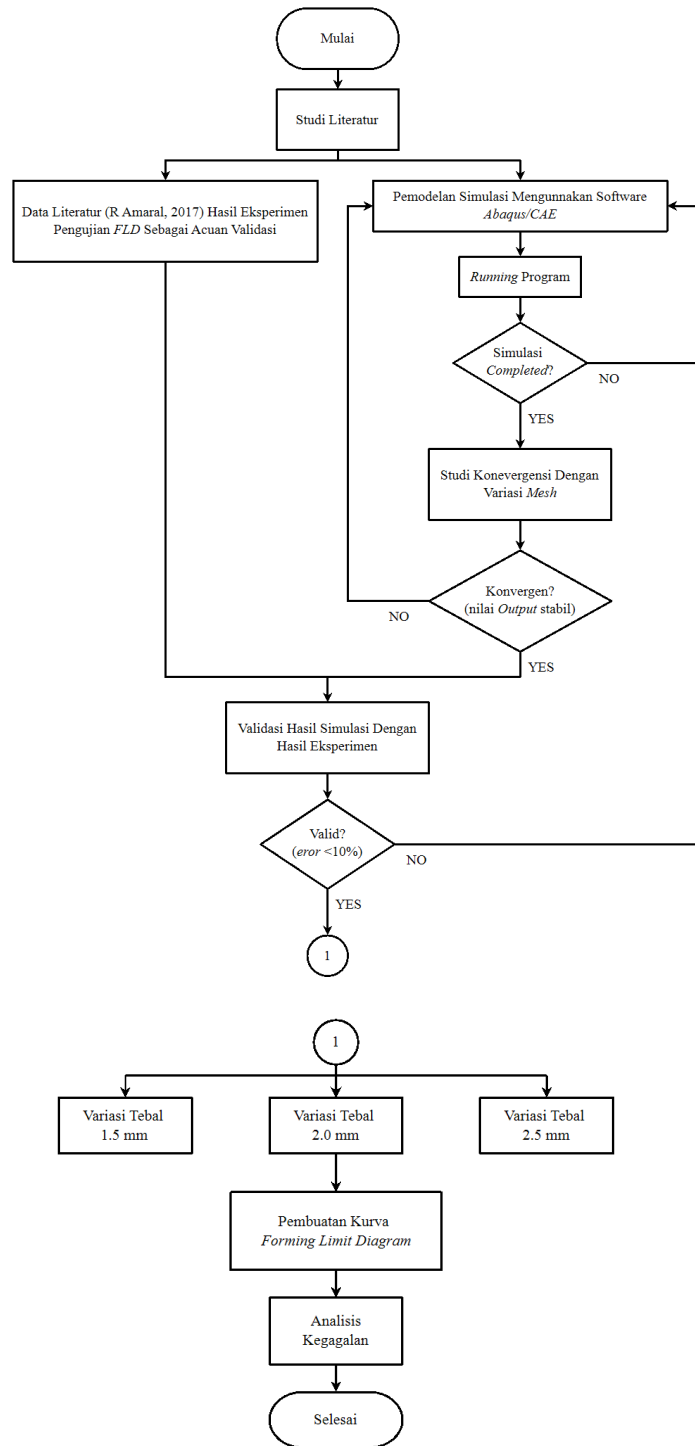
GTN ( Gurson Tveergard Neddlemaan ) *damage model* merupakan model kerusakan *Gurson Tveergard Needleman* (GTN) digunakan untuk menentukan kurva batas pembentukan lembaran logam. Model asli yang diusulkan oleh Gurson selanjutnya diperpanjang oleh Tveergard dan Needleman. Skema GTN damage model sendiri ditunjukkan pada gambar Berdasarkan persamaan dari *GTN model*, sembilan koefisien perlu ditentukan yaitu  $f_0, f_c, f_N, f_f, \epsilon_N, S_N, q_1, q_2,$  dan  $q_3$ . Ketepatan dalam pemilihan koefisien tersebut diperlukan agar hasil prediksi dari patahan menggunakan *GTN model* berhasil

Metode elemen hingga/ *Finite Element Method (FEM)*, terkadang disebut sebagai analisis elemen hingga/ *Finite Element Analysis (FEA)*, adalah teknik komputasi yang digunakan untuk mendapatkan solusi perkiraan masalah nilai batas dalam bidang teknik. Secara sederhana, masalah nilai batas adalah masalah matematika di mana satu atau lebih variabel tak bebas harus memenuhi persamaan diferensial di manapun dalam domain yang diketahui variabel bebas dan memenuhi kondisi tertentu di batas domain.

Masalah nilai batas disebut juga masalah bidang. Bidang adalah domain yang diminati dan paling sering mewakili sebuah struktur fisik. [11]

## 2.METODE

### Diagram Alir Metode Penelitian



Gambar 2.1 Diagram Alir Penelitian

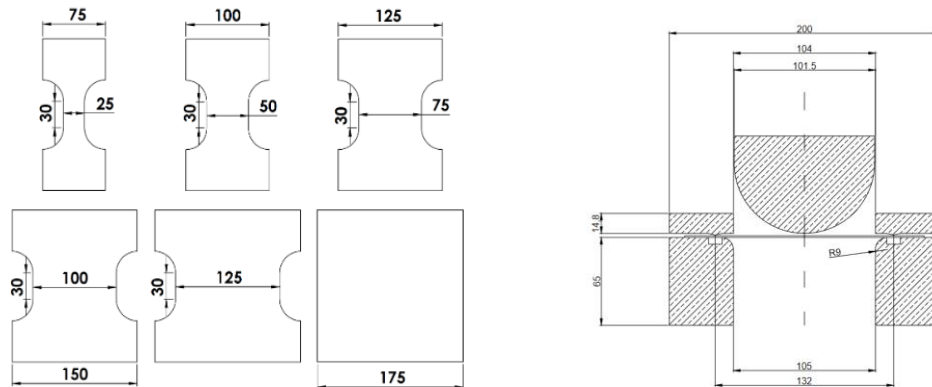
Dalam simulasi ini diperlukan komputer dengan spesifikasi yang mampu untuk menjalankan proses simulasi dengan baik. Software yang digunakan untuk pemodelan ini adalah *Abaqus/CAE 6.14-5*. Adapun spesifikasi komputer yang digunakan adalah sebagai berikut.

- Processor : Intel (R) Core (TM) i7-5820K CPU @3.30 GHz
- Memory : 16384 MB RAM
- VGA : NVIDIA GeForce GTX 950
- Operating System : Windows 8.1 Pro 64-bit

Langkah-langkah Pemodelan Dengan *Abaqus/CAE*

- Membuat Part

Pemodelan *Part* merupakan langkah pertama dalam simulasi, yaitu menentukan geometri benda kerja yang akan di uji. Pada simulasi ini menggunakan material DP 780 dengan kelengkapan dimensi sebagai berikut:



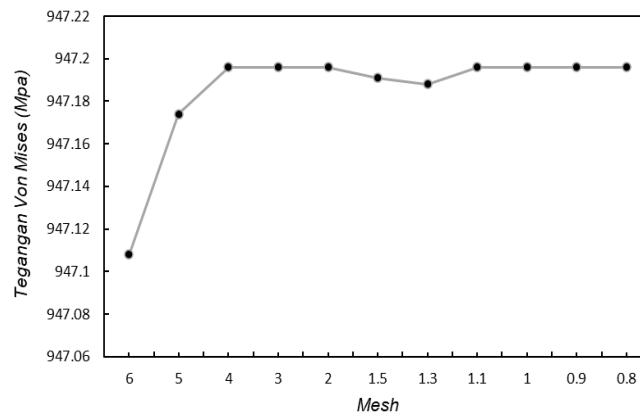
Gambar 2.2 Bentuk dari standar part nakajima

- Memasukan Property
- Melakukan Assembly
- Konfigurasi Step
- Konfigurasi Interactions
- Konfigurasi Load And Boundary Condition
- Konfigurasi Mesh
- Membuat job

- Memunculkan Visualitazion

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Studi konvergensi adalah suatu analisis untuk menentukan jumlah elemen dengan akurat yang bisa diterima dalam suatu analisis berbasis metode elemen hingga. Analisa dilakukan dengan membandingkan ukuran elemen yang berbeda-beda, perbandingan pada pengujian menggunakan nilai *Stress Von Mises*. Dalam Studi Konvergensi ini menggunakan plat tebal 0.9 mm dengan tekanan konstan. Tabel 4.1 menunjukkan ukuran mesh yang digunakan dalam penelitian yaitu 6, 5, 4, 3, 2, 1.5, 1.3, 1.1, 1, 0.9, dan jumlah elemennya.



Gambar 3.1 Studi konvergensi pada Tegangan von Mises dengan variasi ukuran elemen

Validasi penelitian ini dilakukan untuk mengetahui keakuratan hasil simulasi. dengan cara membandingkan dengan hasil eksperimen yang diperoleh dari pengujian yang dilakukan oleh R. Amaral dkk. [3]. Pada penelitian tersebut, plat dengan variasi lebar yang berbeda dengan menggunakan material *Dual phase 780* dan ketebalan 0.8 mm. Dalam validasi ini nilai beban (*load*) dan *displacement* dari titik *reference punch* pada pengujian FLD dijadikan sebagai acuan. Hasil simulasi dikatakan valid apabila nilai penyimpangan (*error*) kurang dari 10%.

Tabel 3.1. Perbandingan nilai beban dengan eksperimen

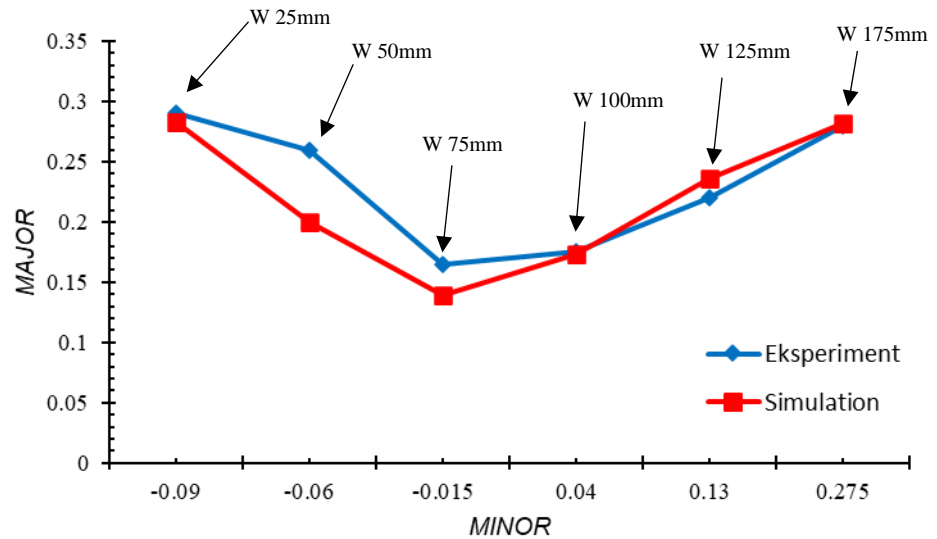
<b>Beban, Load (N)</b>				
<b>Lebar Spesimen (mm)</b>	<b>Eksperimen (N)</b>	<b>Simulasi (N)</b>	<b>Penyimpangan (N)</b>	<b>Error (%)</b>
25	13421.29	13405	16.29	0.12
50	27094.03	28872.2	-1778.77	6.56
75	26028.08	25059.3	968.78	3.72
100	34659.47	35634.5	-975.03	2.81
125	54238.71	55813.5	1574.79	2.90
175	75033.11	77340.3	-2307.19	3.07
		<b>Average</b>	<b>-416.855</b>	<b>1.92</b>

Tabel 3.2. Perbandingan nilai displacement dengan eksperimen

<b>Displacement</b>				
<b>Lebar Spesimen (mm)</b>	<b>Eksperimen (mm)</b>	<b>Simulasi (mm)</b>	<b>Penyimpangan (mm)</b>	<b>Error (%)</b>
25	19.34	19.992	-0.652	3.36
50	19.04	19.127	-0.087	0.46
75	14.61	14.425	0.214	1.24
100	16.16	16.335	-0.173	1.07
125	21.35	21.009	-0.340	1.58
175	25.10	25.001	0.099	0.39
		<b>Average</b>	<b>-0.043</b>	<b>0.28</b>

*Forming Limits Diagram* pada saat *necking* biasa disebut dengan *Forming Limit Curve at Necking* (FLCN). Untuk menggambarkan FLCN dari hasil simulasi pengujian FLD material baja Dual Phase 780 tebal 0.8 mm maka nilai regangan mayor dan regangan minor harus diidentifikasi terlebih dahulu. Nilai tersebut diambil dari salah satu elemen pada pelat yang mengalami *necking*.

Data nilai maksimum regangan mayor dan regangan minor pada saat *necking* dari hasil eksperimen yang dilakukan oleh R.Amaral [3] dan hasil simulasi pada penelitian ini kemudian ditampilkan menjadi *FLCN*. Pada bagian kanan atau daerah yang mempunyai nilai rasio regangan ( $\rho$ ) mayor/minor positif menunjukkan bahwa kurva batas pemebentukan dari hasil eksperimen dan simulasi memiliki nilai yang hampir sama.



Gambar 3.2 Perbandingan *Forming Limits Diagram* Eksperimen dan Simulasi Plat baja Dual Phase 780

Nilai regangan mayor dan regangan minor dari data hasil eksperimen dengan hasil simulasi terdapat penyimpangan (*error*). Penyimpangan tersebut diperoleh dari selisih antara hasil eksperimen dengan hasil simulasi lalu dibagi dengan hasil eksperimen. Nilai penyimpangan rata-rata dari regangan mayor dan regangan minor pada semua spesimen sebesar 5%.

Tabel 3.3 Penyimpangan Nilai Regangan Mayor dan Regangan Minor

Lebar Spesimen (mm)	Selisih Regangan		Error Regangan		Error (%)
	Mayor	Minor	Mayor	Minor	
25	0.283	-0.141	0.006	0.051	2.89%
50	0.200	-0.077	0.059	0.017	3.87%
75	0.139	-0.025	0.025	0.010	1.80%
100	0.172	-0.010	0.002	0.050	2.64%
125	0.235	0.016	-0.015	0.113	4.89%
175	0.282	0.276	-0.002	-0.001	-0.18%

*Forming Limits Diagram* pada saat *fracture* biasa disebut dengan *Forming Limmit Curve at Fracture* (FLCF). Untuk menggambarkan FLCF dari hasil simulasi pengujian FLD material baja Dual Phase 780 tebal 0.8 mm maka nilai regangan mayor dan regangan minor harus diidentifikasi terlebih dahulu. Nilai tersebut diambil dari titik awal saat kurva garis sudah mulai mendatar atau saat titik awal terjadinya *fracture*

Untuk mengetahui pengaruh ketebalan pelat terhadap *Forming Limit Diagram*, simulasi dengan ketebalan 1.5 mm, 2.0 mm dan 2.5 mm dilakukan setelah hasil simulasi pengujian FLD pada pelat baja Dual Phase 780 dengan tebal 0.8 mm berhasil. Seperti pada simulasi FLD ketebalan Pelat 0.8 mm, nilai regangan mayor dan regangan minor variasi tebal 1.5 mm, 2.0 mm dan 2.5 mm dari masing-masing spesimen harus diidentifikasi terlebih dahulu.

Hasil simulasi untuk semua variasi ketebalan menunjukkan adanya perbedaan waktu yang ditempuh dalam kurva pembentukan plat baja Dual-Phase 780.

#### **4. PENUTUP**

Kesimpulan yang dapat diambil dalam penelitian ini telah disimulasikan *Forming Limmit Diagram* yang dialami oleh pelat dengan bahan Dual Phase 780. bisa ditarik kesimpulan sebagai adalah Pemodelan pengujian *FLD* menggunakan *GTN Damage Model* pada *software* Abaqus/CAE 6.14 valid, karena nilai penyimpangan rata-ratanya dari beban maksimal dan *displacement* untuk semua spesimen di bawah 10%, dimana rata-rata penyimpangan beban maksimal sebesar 6.56%. dan rata-rata penyimpangan *displacement* sebesar 3.36%. Simulasi menggunakan *GTN Damage Model* memiliki akurasi yang cukup baik dalam menentukan *Forming Limit Curve at Necking* (FLCN) dari material Dual Phase 780 dimana sangat sesuai dengan hasil dari eksperimen. Adapun penyimpangan rata-rata nilai maksimum regangan mayor dan regangan minor pada saat *necking* semua spesimen sebesar 4.89%. Ketika nilai regangan pelat *Dual Phase 780* berada di atas *Forming Limit Curve at Fracture* (FLCF) maka pelat akan mengalami *fracture*. Bentuk *fracture* yang terjadi pada simulasi hampir sama dengan bentuk *fracture* pada eksperimen. Hal ini menandakan bahwa selain untuk mengetahui kurva batas pembentukan, simulasi

dengan GTN Damage Model bisa digunakan untuk memprediksi patahan/fracture yang terjadi. Ketebalan pelat tidak mempengaruhi posisi *Forming Limit Curve at Fracture (FLCF)* namun secara umum akan menaikkan waktu saat terjadi *fracture* dalam posisi tertentu.

Saran berdasarkan penelitian yang telah dilakukan. Penulis berharap untuk penelitian yang dilakukan selanjutnya. Untuk penelitian selanjutnya, harus lebih cermat dalam memasukan parameter-parameter yang digunakan dalam proses simulasi. Aspek penting dalam penelitian *Forming Limmit Diagram* adalah meshing, dalam proses ini penelitian harus sangat teliti. Peneliti melakukan pemodelan dengan jenis *Ductile Damage* selain *GTN Damage Model*, seperti pemodelan dengan *Johnson Cook Damage Model*

#### **DAFTAR PUSTAKA**

- Z. Marciniak, J. L. Duncan, and S. J. Hu, 2002 “Mechanics of Sheet,”
- P. Safarian, 2015 “Finite Element Modeling and Analysis Validation,”
- R. Amaral and A. D. Santos, 2018 “Formability prediction for AHSS materials using damage models,”
- R. Safdarian, 2018 “Mechanics Forming limit diagram prediction of 6061 aluminum by GTN damage model,”
- A. Kami, B. Mollaei, A. Sadough, and D. Sorin, 2015 “Journal of Materials Processing Technology Numerical determination of the forming limit curves of anisotropic sheet metals using GTN damage model,”
- S. Gatea, D. Xu, H. Ou, and G. McCartney, 2018 “Evaluation of formability and fracture of pure titanium in incremental sheet forming,”
- R. D. Salindeho, J. Soukota, and R. Poeng, 2018 “Pemodelan pengujian tarik untuk menganalisis sifat mekanik material,”
- N. J. Den Uijl and L. J. Carless, 2012 “Advanced metal-forming technologies for automotive applications,” *Adv. Mater. Automot.*
- S. Gatea, H. Ou, B. Lu, and G. McCartney, 2017 “Modelling of ductile fracture in single point incremental forming using a modified GTN model,”
- I. Khalaf Irthia, 2014 “Process Analysis and Design in Micro Deep Drawing Utilizing a Flexible Die THESIS Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in the School of Engineering at the University of Glasgow,”
- D. V. Hutton, 2004 “UploadFile\_2613.pdf.”