

PEMODELAN DUA DIMENSI THERMO-ELASTOVISKOPLASTIS PROSES
PEMBENTUKAN ALUMINIUM DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Wahyu Kurniawan¹⁾, Aris Sandi²⁾, Martin Andre Setyawan³⁾,
Akhdad Tito Fismatika⁴⁾, Farhan As'ari⁵⁾

^{1,2,3,4,5)}Program Studi D-II Perawatan Mesin Pengolah Hasil Perkebunan Politeknik LPP Yogyakarta

¹⁾whu@polteklpp.ac.id, ²⁾aris@polteklpp.ac.id, ³⁾mtn@polteklpp.ac.id,

⁴⁾tito@polteklpp.ac.id, ⁵⁾fhn@polteklpp.ac.id

ABSTRACT

Formability is related to the maximum strain that can be achieved in one stage of the deformation process. Aluminum under normal conditions has quite good formability, although not as good as mild steel, however, this formability can be improved by increasing the temperature during the forming process. This research aims to model two-dimensional thermo elasto-viscoplastics in a simple forming process, visualize the modeling results, determine the influence of the main modeling parameters on stress-strain analysis, compare (validate) the results of the Fortran program modeling with commercial modeling software that has been tested. The temperature distribution simulation results show valid results with a difference of around 0.28%. The validation results of the effect of temperature on displacement and beam stress produce equivalent data, namely differences of -0.25 mm and 5.19 MPa respectively.

ABSTRAK

Sifat mampu bentuk berhubungan dengan regangan maksimum yang dapat dicapai dalam satu tahap proses deformasi. Aluminium dalam kondisi normal mempunyai sifat mampu bentuk yang cukup baik meski tak sebaik baja ringan, namun demikian sifat mampu bentuk ini bisa ditingkatkan dengan menambah temperatur selama proses pembentukan. Penelitian ini bertujuan memodelkan dua dimensi thermo elasto-viskoplastis pada proses pembentukan sederhana, memvisualisasikan hasil pemodelan, mengetahui pengaruh parameter utama pemodelan terhadap analisa tegangan-regangan, membandingkan (validasi) hasil pemodelan program Fortran dengan pemodelan *software* komersial yang telah teruji. Hasil simulasi distribusi temperatur menunjukkan hasil yang valid dengan selisih sekitar 0.28%. Hasil validasi pengaruh temperatur terhadap displacement dan tegangan beam menghasilkan data yang setara yaitu selisih masing-masing -0.25 mm dan 5.19 MPa.

Kata kunci : pemodelan; thermo elastoviscoplastic; proses pembentukan; program fortran

1. PENDAHULUAN

Paduan aluminium diproduksi dan digunakan dalam berbagai bentuk pada bidang industri. Keuntungan dari paduan logam ini ringan, tahan korosi, tahan panas, dan konduktivitas listrik yang baik.

Aplikasi pemanfaatan paduan aluminium masih jauh di belakang baja meskipun paduan aluminium memiliki kekuatan, *weight ratio*, dan ketahanan terhadap korosi yang baik. Hal ini dikarenakan masalah biaya dan *formability* paduan aluminium, dimana pada temperatur ruangan umumnya *formability* lebih rendah dibandingkan pada kondisi temperatur tinggi. Sedangkan baja karbon rendah telah umum digunakan oleh industri karena *formability* sangat baik pada temperatur kamar, kekuatan dan kehalusan permukaan yang baik, serta biaya rendah.

Kebutuhan produk berkualitas mendorong pentingnya perencanaan, simulasi dan optimasi dalam proses pembentukan. Perencanaan proses pembentukan dengan metode "*trial & error*" yang secara tradisional diterapkan ternyata membutuhkan waktu dan biaya besar. Metode elemen hingga (FEM) merupakan salah satu metode pemodelan lokal yang

Fotran (Pratomo, 2009). Hal ini berdasarkan pertimbangan masalah lisensi dan fleksibilitas modifikasi program atau *subroutine* baru. Pada penelitian tersebut adalah belum adanya program pembentukan material yang dipengaruhi oleh parameter thermal, sedangkan *formability* paduan aluminium pada temperatur ruang cukup rendah.

Melanjutkan penelitian sebelumnya, pada penelitian ini akan ditambahkan parameter thermal, sehingga output dari program dapat divisualisasikan dalam bentuk grafik dua dimensi perubahan geometri, distribusi temperatur, distribusi tegangan dan simpangan, selanjutnya hasil pemodelan program Fortran divalidasi dengan software komersial untuk melihat tren plastisitas dan simpangan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

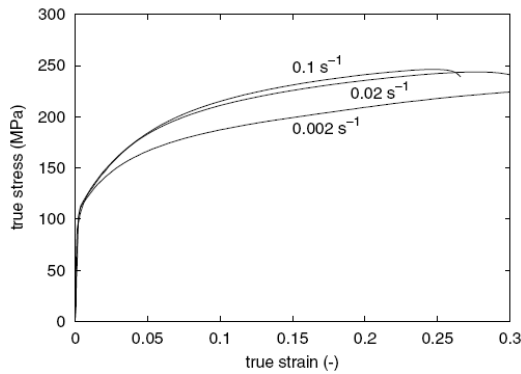
Paduan aluminium (seri 6xxx) dalam industri otomotif banyak digunakan karena kekuatan yang sangat baik, *weight ratio* yang tinggi, tahan korosi, dan mampu las yang baik (Tomasz T, 2022). Namun, *formability* dan kualitas permukaan produk akhir dari paduan aluminium tidak baik jika pengolahan dilakukan pada temperatur kamar. Sejumlah penelitian

telah dilakukan pada paduan ini untuk dimanfaatkan sebagai bahan bodi otomotif. Hasil terbaru penelitian menunjukkan bahwa formability paduan aluminium meningkat pada kisaran temperatur 200 OC sampai 300 OC dan kualitas permukaan produk akhir telah dicapai lebih baik. (Toros, 2008)

Proses warm forming dimaksudkan untuk mengatasi formability dengan menggunakan temperatur tinggi di bawah temperatur rekristalisasi (Tebbe dan Kridli, 2004). Proses warm forming telah dipelajari selama bertahun-tahun, misalnya pada 1970-an dan 1980-an ((Shehata et al., 1978), (Wilson, 1988)).

Formability paduan aluminium mengalami perbaikan dengan kenaikan temperatur yang seragam, tapi hasil terbaik diperoleh dengan menggunakan gradien temperature (Ciemiorek M,2022). Formability sangat bergantung pada komposisi paduan aluminium, paduan seri 6xxx memiliki formability relatif baik. Kerugiannya adalah setelah mengalami deformasi, paduan aluminium seri ini memiliki permukaan yang tidak rata. Cacat permukaan yang tidak diinginkan bisa dihilangkan dengan proses pembentukan pada temperatur tinggi (Boogaard et al., 2006). Karena alasan ini, seri aluminium 6xxx digunakan untuk panel dalam kendaraan.

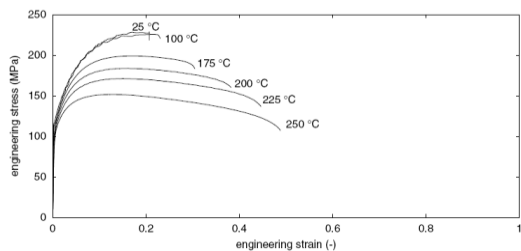
Peningkatan laju regangan mempengaruhi peningkatan tegangan alir material viskoplastis ((Boogard, 2002), (Benallal et al., 2003), (Ganesh et al., 2004)).



Sumber : Boogaard, 2002

Gambar 1. Pengaruh laju regangan material viskoplastis

Boogard (2002) menyatakan bahwa tegangan alir (flow stress) akan turun dengan kenaikan temperatur proses.

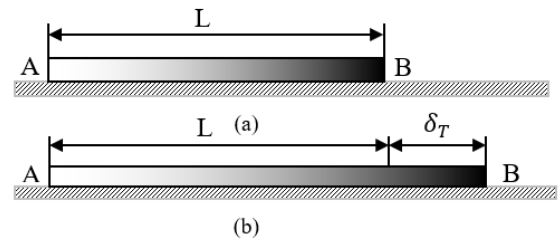


Sumber : Boogaard, 2002

Gambar 2. Pengaruh kenaikan temperatur terhadap tegangan alir

Dasar-dasar metode elemen hingga (MEH) digunakan untuk mensimulasikan pemodelan thermo elasto viscoplastic dalam teknik pembentukan. Dari prinsip energi, dimana MEH sebagai pemecahan kasus dapat diselesaikan melalui pendekatan optimasi seperti pemrograman matematis. Pendekatan MEH secara umum telah digunakan untuk analisis non-linear selama lebih dari 20 tahun. (Zhang et al., 2002).

Tegangan dalam teknik pembentukan yang terjadi selama proses manufaktur biasanya terjadi akibat adanya perubahan volume pada solidifikasi, distribusi temperatur yang tidak seragam dalam material selama pendinginan, dan / atau kendala mekanik antara cetakan dengan material. Kaitannya dengan perubahan temperatur dapat menyebabkan terjadinya perubahan dimensi pada struktur, yang selanjutnya dapat menimbulkan gaya. Gaya akibat terjadinya perubahan temperatur biasanya disebut gaya thermal. Akibat adanya perubahan temperatur juga akan menyebabkan terjadinya perubahan energi regangan.



Sumber : Penulis, 2024

Gambar 3. (a) Sebelum perubahan temperatur, dan (b) terjadi perubahan temperatur.

Persamaan Dasar Thermo-Elasto-Viskoplastis

Dalam proses pembentukan dengan asumsi dasar thermo-elasto-viskoplastis untuk problem *non-linier continua* dapat dirumuskan pada persamaan (1) bahwa laju regangan total $\dot{\epsilon}$ adalah penjumlahan dari laju regangan elastis $\dot{\epsilon}_e$, laju regangan viskoplastis $\dot{\epsilon}_{vp}$, dan laju regangan thermal $\dot{\epsilon}_{th}$, sehingga dapat ditulis laju regangan total adalah :

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_e + \dot{\epsilon}_{vp} + \dot{\epsilon}_{th} \dots \dots \dots (1)$$

dimana tanda titik diatas menunjukkan turunan terhadap waktu. Total laju tegangan hubungannya dengan laju regangan elastis :

$$\dot{\sigma} = D \dot{\epsilon}_e \dots \dots \dots (2)$$

dimana D adalah matrik elastisitas. Permulaan sifat viskoplastis dipengaruhi oleh kondisi luluh skalar, dalam bentuk :

$$F(\sigma, \epsilon_{vp}) - \sigma_0 = 0 \dots \dots \dots (3)$$

σ_0 adalah tegangan luluh uniaksial, jadi diasumsikan bahwa aliran viskoplastik terjadi jika nilai $F > \sigma_0$.

Opsi yang paling sederhana bahwa laju regangan viskoplastis hanya tergantung pada tegangan-tegangan terkini, sehingga :

$$\dot{\epsilon}_{vp} = f(\sigma) \dots \dots \dots (4)$$

Salah satu bentuk eksplisit persamaan (53) yang telah diaplikasikan secara luas adalah hukum aliran viskoplastik (Zienkiewicz et al., 1974).

$$\dot{\epsilon}_{vp} = \gamma \langle \Phi(F) \rangle \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \dots\dots\dots(5)$$

dimana $Q = Q(\sigma, \epsilon_{vp}, k)$ adalah potensial plastis, k adalah parameter pengerasan, γ adalah parameter fluiditas yang mengontrol laju aliran plastis.

Jika kasusnya $F \approx Q$, maka persamaannya menjadi :

$$\dot{\epsilon}_{vp} = \gamma \langle \sigma(F) \rangle \frac{\partial F}{\partial \sigma} = \gamma \langle \Phi \rangle a \dots\dots\dots(6)$$

dimana

$$a^T = \frac{\partial F}{\partial \sigma} = \left[\frac{\partial F}{\partial \sigma_x}, \frac{\partial F}{\partial \sigma_y}, \frac{\partial F}{\partial \sigma_z}, \frac{\partial F}{\partial \tau_{yz}}, \frac{\partial F}{\partial \tau_{zx}}, \frac{\partial F}{\partial \tau_{xy}} \right] \dots\dots\dots(7)$$

pilihan lain direkomendasikan (Zienkiewicz et al., 1974) untuk fungsi Φ :

$$\Phi(F) = e^{\frac{M(F-\sigma_0)}{\sigma_0}} - 1 \dots\dots\dots(8)$$

$$\Phi(F) = \left(\frac{F - \sigma_0}{\sigma_0} \right)^N \dots\dots\dots(9)$$

M dan N nilai konstanta

Akibat adanya perubahan temperatur T menyebabkan perubahan panjang L, dirumuskan sebagai berikut :

$$\delta_T = \alpha TL \dots\dots\dots(10)$$

Dimana α adalah koefisien ekspansi termal dan T adalah perubahan temperatur. Koefisien adalah suatu sifat mekanis dari bahan yang memiliki unit $1/^\circ F$ (dimana F° adalah derajat Fahrenheit) dalam USCS unit atau $1/^\circ C$ (dimana $^\circ C$ adalah derajat Celcius) dalam sistem SI.

Pada persamaan (59), δ_T dianggap positif bila terjadi pemuatan dan negatif bila terjadi penyusutan. Nilai α untuk steel = $6,5 \times 10^{-6} / ^\circ F$ atau $(12 \times 10^{-6}) / ^\circ C$ dan untuk paduan aluminium $\alpha = 13 \times 10^{-6} / ^\circ F$ atau $(23 \times 10^{-6}) / ^\circ C$.

Berdasarkan definisi regangan normal, kita dapat menentukan regangan akibat perubahan temperatur yang seragam. Untuk batang yang mengalami perubahan temperatur T seragam (Gambar 3.1), regangan adalah perubahan dimensi yang disebabkan oleh perubahan temperatur dibagi dengan dimensi asli. Mengingat arah aksial :

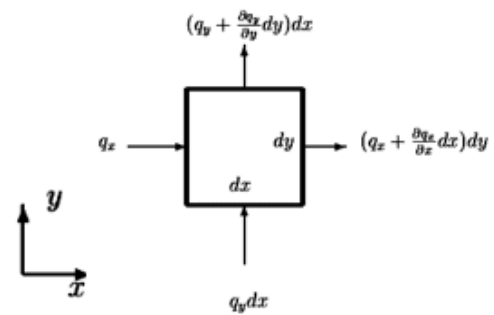
$$\epsilon_{Th} = \alpha T \dots\dots\dots(11)$$

Sehingga laju regangan thermal adalah :

$$\dot{\epsilon}_{Th} = \alpha \dot{T} \dots\dots\dots(12)$$

Tegangan pada batang seperti ditunjukkan pada gambar 3.1, jika bebas untuk memperluas, maka tidak ada tegangan pada batang. Secara umum, untuk struktur statis, perubahan temperatur yang seragam dalam satu atau lebih pada batang tidak menimbulkan

tegangan. Untuk struktur statis tak tentu, perubahan temperatur yang seragam biasanya menghasilkan tegangan (σ_T).



Sumber : Boogaard, 2006

Gambar 4. Tegangan/regangan linier dengan inisial tegangan

Pada kasus dua dimensi, akan ada dua tegangan normal yaitu ϵ_{xT} dan ϵ_{yT} dan juga ada regangan geser γ_{xyT} akibat perubahan temperatur dikarenakan perbedaan property mekanik (seperti $E_x \neq E_y$) pada arah x dan y untuk anisotropic material (lihat gambar 3.7). Matrix regangan thermal untuk anisotropik adalah :

$$\{\epsilon_T\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_{xT} \\ \epsilon_{yT} \\ \gamma_{xyT} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(13)$$

Matrik tegangan thermal pada kasus plane stress material isotropic dengan α sebagai koefisien thermal, dan T adalah kenaikan temperature adalah :

$$\{\epsilon_T\} = \begin{Bmatrix} \alpha T \\ \alpha T \\ 0 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(14)$$

Regangan geser tidak terjadi karena disebabkan perubahan temperatur dari material isotropik, yaitu hanya memuai dan menyusut.

Matrik thermal strain untuk kasus plane strain pada material isotropic adalah :

$$\{\epsilon_T\} = (1 + \nu) \begin{Bmatrix} \alpha T \\ \alpha T \\ 0 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(15)$$

3. METODOLOGI

Susunan tahapan penelitian dalam penyelesaian pemrograman komputasi thermo elasto-viskoplastic adalah sebagai berikut :

- 1. Pemodelan Dua Dimensi Thermo Elasto-viskoplastik dengan Progam Fortran**
Diketahui sebuah beam dengan dimensi 300 x 8 x 4 mm, seperti ditunjukkan pada gambar 1



Sumber : Penulis, 2024

Gambar 5. Model validasi antara Program Fortran dengan Program Komersial

- a. Pada salah satu ujung beam di beri temperatur T_1 dan ujung lainnya diberi temperatur T_2 .
- b. Temperatur dipertahankan konstan, material isotropic pada kondisi *steady*.
- c. Langkah pengerjaan pemrograman fortran thermo elasto-viscoplastic :

1. Membuat data input.
 - Kondisi batas ditentukan bahwa beam tersebut adalah :
 - *Steady*
 - *Linear*
 - *Plane stress*
 - Hanya aliran panas konduksi
 - Beam dibagi menjadi 600 element (755 node) dan jumlah material adalah 4.
 - Faktor bentuk adalah *quadrilateral element* dengan 4 titik.
 - Menentukan hubungan titik nodal pada satu element.

Misal :

ELEMENT, MATERIAL,	NODE NUMBERS				
1	1	1	2	5	4
2	1	2	3	6	5

- Untuk elemen 1 dibentuk oleh nodal 1, 2, 5, dan 4, dst....
 - Menentukan koordinat untuk tiap-tiap titik nodal.
- Misal :
- | NODE | X | Y |
|------|---------|--------|
| 1 | 30.000 | 30.000 |
| 2 | 180.000 | 30.000 |
| 3 | 330.000 | 30.000 |
| 4 | 30.000 | 38.000 |
| 5 | 180.000 | 38.000 |
| 6 | 330.000 | 38.000 |
- Untuk titik nodal 1 berada pada koordinat (30,30)
 - Untuk titik nodal 2 berada pada koordinat (180,30), dst sampai titik nodal ke 6
 - Menentukan material properties
 - Nilai konduktivitas material
 - Nilai kapasitas panas material

2. Menentukan *Dirichlet Boundary Condition* → titik nodal yang di *fixed* (diberikan temperatur)

Misal :

NODE	FIXED	TEMPR
1		100.0000
3		25.0000
4		100.0000
6		25.0000

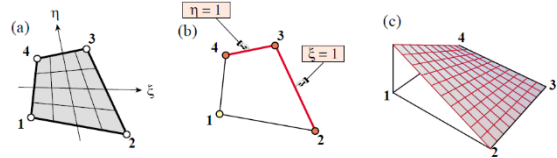
Artinya pada titik nodal 1 dan 4 diberikan temperatur sebesar 100°C

3. Shape functions

4. Integrasi numeric

Integrasi numeric yaitu untuk mengevaluasi matrik elemen yang berhubungan dengan sistem koordinat natural yaitu dengan *gauss legendre quadrature*. Artinya menempatkan titik-titik sampling pada lokasi tertentu untuk memperoleh ketelitian terbaik.

5. *Derivative* dari *shape function*



Sumber : Boogaard, 2006

Gambar 6. Empat titik bilinear quadrilateral (a) Element Geometri (b) Tepi (warna merah) tidak berisi (c) pandangan *perspective shape function* N_1^e

6. Menghitung *jacobian* dan *inverse jacobian*
Ketika kita menggunakan turunan kartesius untuk menghitung matrik kekakuan, maka mengubah turunan fungsi bentuk menjadi :
7. Menghitung *global derivative* dan $area * gauss weight$
8. Membangun matrik kekakuan elemen :
9. Menghitung faktor beban
10. *Boundary* dan *initial conditions*
Kondisi batas untuk kedua persamaan konduksi dapat dari dua jenis atau kombinasi dari kondisi *Dirichlet* (di mana batas suhu diketahui bisa juga tekanan dan kecepatan) dan atau kondisi *Neumann* (di mana fluks panas diketahui).
11. Setelah terjadi kesetimbangan distribusi temperatur, maka output temperatur dari tiap-tiap nodal dijadikan input dalam program elasto viscoplastic.
12. Komputasi dimulai dari kondisi awal saat waktu $t = 0$ (kondisi elastis statis), pada tahapan ini d^0 , $F^0, \epsilon^0, \sigma^0$ diketahui dan $\epsilon_{vp}^0 = \epsilon_T^0 = 0$
13. Saat $t = t_n$, sudah ada situasi kesetimbangan, dan $d^n, F^n, \epsilon^n, \sigma^n, \epsilon_{vp}^n, \epsilon_T^n$ diketahui, selanjutnya didefinisikan :

$$B^n = B_0 + B_{NL}(d^n) \dots \dots \dots (16)$$

$$C^n = C^n(\sigma^n, \Delta t_n) \dots \dots \dots (17)$$

$$\hat{D}^n = (D^{-1} + C^n)^{-1} \dots \dots \dots (18)$$

$$K_T^n = \int_{\Omega} [B^n]^T \hat{D}^n B^n d\Omega \dots \dots \dots (19)$$

$$\dot{\epsilon}_{vp}^n = \gamma \langle \sigma(F) \rangle \frac{\partial F}{\partial \sigma} = \gamma \langle \Phi \rangle a^n \dots \dots \dots (20)$$

14. Menghitung inkremen simpangan Δd_n :

$$\Delta d_n = [K_T^n]^{-1} \Delta V^n \dots \dots \dots (21)$$

dimana

$$\Delta V^n = \int_{\Omega} [B^n]^T \hat{D}^n \dot{\epsilon}_{vp}^n \Delta t_n d\Omega + \Delta f^n \dots \dots \dots (22)$$

menghitung inkremen tegangan $\Delta\sigma_n$:

$$\Delta\sigma^n = D^n (B^n \Delta d^n - \dot{\varepsilon}_{vp}^n \Delta t_n) + \Delta\varepsilon_{th}^n \dots\dots\dots (23)$$

15. Menghitung simpangan dan tegangan total :

$$\sigma^{n+1} = \sigma^n + \Delta\sigma^n \dots\dots\dots (24)$$

$$d^{n+1} = d^n + \Delta d^n \dots\dots\dots (25)$$

16. Menghitung laju regangan viskoplastis :

$$\dot{\varepsilon}_{vp}^{n+1} = \gamma \langle \Phi \rangle a^{n+1} \dots\dots\dots (26)$$

17. Melakukan koreksi kesetimbangan. Pertama menghitung B^{n+1} menggunakan simpangan d^{n+1} . Mensubstitusikan tegangan σ^{n+1} ke persamaan kesetimbangan dan mengevaluasi gaya residu ψ^{n+1} :

$$\psi^{n+1} = \int_{\Omega} [B^{n+1}]^T \sigma^{n+1} d\Omega + f^{n+1} \dots\dots\dots (27)$$

Menambahkan pada vektor inkremen beban semu untuk digunakan tahapan waktu berikutnya :

$$\Delta V^{n+1} = \int_{\Omega} [B^{n+1}]^T D^{n+1} \dot{\varepsilon}_{vp}^{n+1} \Delta t_{n+1} d\Omega + \Delta f^{n+1} + \psi^{n+1} \dots\dots\dots (28)$$

Cek untuk melihat apakah laju regangan viskoplastis

$\dot{\varepsilon}_{vp}^{n+1}$ mendekati nol pada setiap *Gaussian integrating point* pada seluruh struktur (dengan toleransi tertentu). Jika kondisi tunak dianggap telah tercapai komputasi dihentikan atau dilanjutkan dengan

inkremen pembebanan berikutnya. Jika $\dot{\varepsilon}_{vp}^{n+1}$ belum mendekati nol (toleransi yang ditentukan) kembali ke tahapan 2 dan mengulangi seluruh prosedur

2. Visualisasi

Visualisasi bertujuan menampilkan hasil pemrograman dalam bentuk grafik dua dimensi. Visualisasi meliputi perubahan geometri, distribusi temperatur, distribusi tegangan dan simpangan akibat adanya penambahan variasi thermal pada bahan.

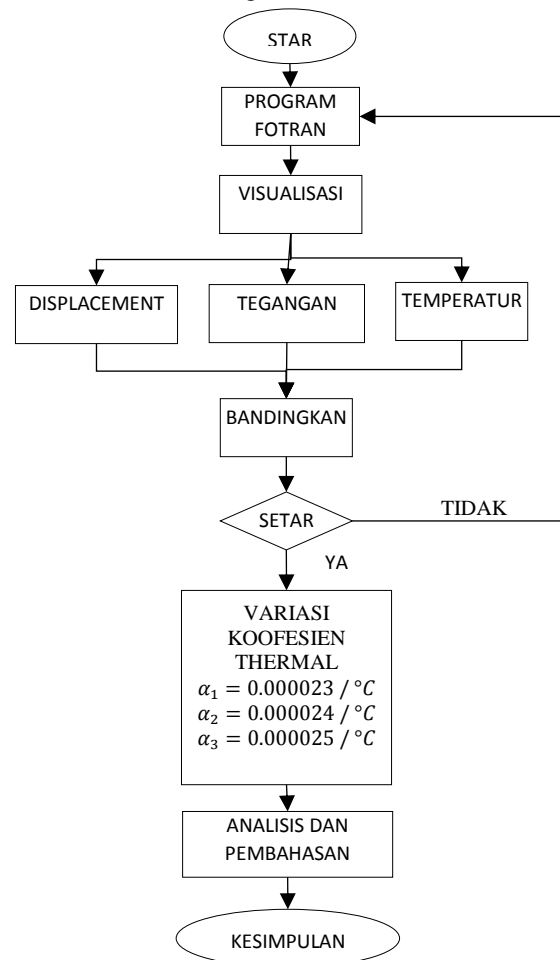
- 1) Visualisasi geometri
Menampilkan perubahan geometri berdasarkan perubahan koordinat nodal, dengan cara menambahkan simpangan nodal pada koordinat nodal tahapan waktu sebelumnya.
- 2) Visualisasi distribusi temperatur
Menampilkan distribusi temperatur sekaligus dalam hubungannya dengan perubahan geometri
- 3) Visualisasi distribusi simpangan
Menampilkan distribusi simpangan, sekaligus dalam hubungannya dengan perubahan geometri.
- 4) Visualisasi distribusi tegangan
Menampilkan perubahan distribusi tegangan, sekaligus dalam hubungannya dengan perubahan geometri.

3. Simulasi Pengaruh Parameter Pemodelan Thermo-Elasto-Viskoplastis

Parameter yang disimulasikan adalah parameter koefisien thermal. Simulasi ini bertujuan untuk

mengetahui pengaruh parameter koefisien thermal terhadap grafik tegangan-regangan akibat perubahan temperatur pada material. Cara untuk menganalisa hasil pemodelan :

1. Membuat grafik temperatur hasil dari simulasi program heat2D, untuk melihat trend perubahannya sebagai akibat pengaruh penambahan temperatur serta membandingkannya dengan referensi, jurnal atau penelitian yang telah terpublikasi
2. Membuat grafik tegangan dan *displacement* hasil simulasi program thermo elasto-viscoplastic, untuk melihat tren perubahannya sebagai akibat pengaruh penambahan temperatur serta membandingkannya dengan referensi, jurnal atau penelitian yang telah terpublikasi.
3. Seluruh tahapan penelitian diatas digambarkan dalam bentuk diagram alir berikut :



Sumber : Penulis, 2024

Gambar 7. Diagram Alir Penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengaruh Parameter Temperatur terhadap Displacement dan Tegangan Elemen Dua Dimensi

Dalam proses pembentukan dengan asumsi dasar thermo-elasto-viskoplastis untuk problem non-linier continua dapat dirumuskan pada persamaan (29) bahwa laju regangan total $\dot{\varepsilon}$ adalah penjumlahan dari

laju regangan elastis ϵ_e , laju regangan viskoplastis ϵ_{vp} , dan laju regangan thermal ϵ_{th} , dapat ditulis laju

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_e + \dot{\epsilon}_{vp} + \dot{\epsilon}_{th} \dots\dots\dots (29)$$

Akibat adanya perubahan temperatur T menyebabkan perubahan panjang L yang dirumuskan $\delta_T = \alpha TL$, dimana α adalah koefisien ekspansi termal dan T adalah perubahan temperatur.

Berdasarkan definisi regangan normal, untuk batang yang mengalami perubahan temperatur T seragam, regangan adalah perubahan dimensi yang disebabkan oleh perubahan temperatur dibagi dengan dimensi asli.

Selanjutnya mengingat arah aksial $\epsilon_{Th} = \alpha T$, sehingga laju regangan thermal adalah $\dot{\epsilon}_{Th} = \alpha \dot{T}$.

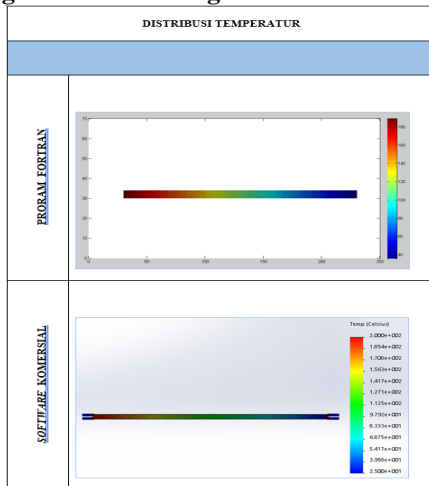
4.2. Validasi dengan Software Komersial

Program simulasi yang digunakan pada penelitian ini adalah menggunakan Program Fortran, yaitu bahasa pemrograman yang dikembangkan untuk aplikasi yang melibatkan komputasi matematis dan manipulasi data numerik, dengan memasukkan Persamaan (1) sampai dengan (29) ke dalam program fortran akan diperoleh data-data yang dapat menampilkan distribusi temperature, tegangan, regangan bahan.

4.3. Validasi distribusi temperature

Sebagai data pembanding antara simulasi program Fortran ke dalam program dan software komersial, diambil data yaitu material aluminium seri AA6xxx dengan temperatur T₁ sebesar 200°C dan T₂ sebesar 25°C ditabelkan sebagai berikut :

Tabel 1. Perbandingan distribusi temperatur Program Fortran dengan Software Komersial



Sumber : Penulis, 2024

Perbandingan visualisasi distribusi temperatur menggunakan program Fortran dan software komersial (table 1) secara kuantitatif maupun trennya menunjukkan hasil yang setara.

Perbandingan hasil distribusi temperatur untuk masing-masing nodal antara simulasi program Fortran dan software komersial ditabelkan sebagai berikut :

Tabel 2. Tabel distribusi temperatur masing-masing nodal Program Fortran dengan Software Komersial

NODAL	SOFTWARE KOMERSIAL (°C)	PROGRAM FORTAN (°C)	SELISIH
1	200.00	200.00	0.00
2	198.60	197.44	1.16
3	197.30	196.12	1.18
4	195.90	194.77	1.13
5	194.50	193.43	1.07
6	193.20	192.08	1.12
7	191.80	190.72	1.08
8	190.40	189.38	1.02
9	189.10	188.03	1.07
.....
.....
.....
120	37.30	38.32	-1.02
121	35.94	36.97	-1.03
122	34.57	35.62	-1.05
123	33.20	34.27	-1.07
124	31.84	32.92	-1.08
125	30.47	31.57	-1.10
126	29.10	30.23	-1.13
127	27.73	28.87	-1.14
128	26.37	27.56	-1.19
129	25.00	25.00	0.00
SELISIH RATA-RATA			0.56 ≈ 0.28 %

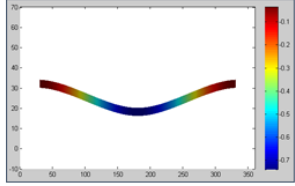
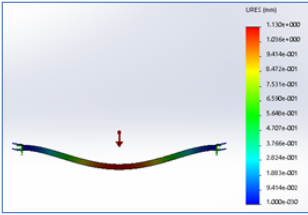
Sumber : Penulis, 2024

Perbandingan hasil simulasi pemodelan dengan program Fortran dan software komersial (tabel 2) baik secara kuantitatif maupun trennya menunjukkan hasil yang valid dengan selisih sekitar 0.28 %.

4.4. Validasi Hasil visualisasi distribusi simpangan dan tegangan dengan penambahan temperatur.

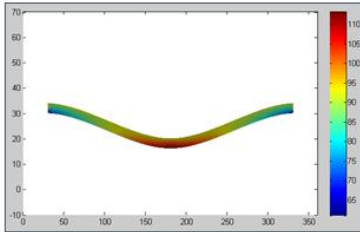
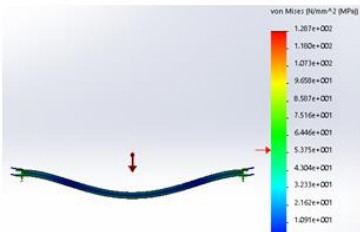
Sebagai data pembanding antara simulasi program Fortran dan software komersial, diambil data yaitu material aluminium seri AA6xxx dengan temperatur T₁ dan T₂ sebesar masing-masing 200°C ditabelkan sebagai berikut :

Tabel 3. Perbandingan displacement Program Fortran dengan Software Komersial.

DISPLACEMENT	
PROGRAM_FORTRAN	
SOFTWARE_KOMERSIAL	

Sumber : Penulis, 2024

Tabel 4. Perbandingan displacement antara Program Fortran dengan Software Komersial.

TEGANGAN	
PROGRAM_FORTRAN	
SOFTWARE_KOMERSIAL	

Sumber : Penulis, 2024

Perbandingan hasil simpangan maksimum terhadap variasi beban antara simulasi program Fortran dan *software* komersial ditabelkan sebagai berikut :

Tabel 5. Perbandingan Hasil Simulasi Simpangan Maksimum Terhadap Beban

LOAD & TEMPERATUR	PROGRAM_FORTRAN (mm)	SOFTWARE_KOMERSIAL (mm)	SELISIH (mm)
LOAD = 165 N T ₁ = 100 °C T ₂ = 100 °C	U _y (M) = -1.197	U _y (M) = -1.130	-0.067
LOAD = 165 N T ₁ = 125 °C T ₂ = 125 °C	U _y (M) = -1.209	U _y (M) = -1.130	-0.079
LOAD = 165 N T ₁ = 150 °C T ₂ = 150 °C	U _y (M) = -1.220	U _y (M) = -1.130	-0.090
LOAD = 165 N T ₁ = 175 °C T ₂ = 175 °C	U _y (M) = -1.244	U _y (M) = -1.130	-0.114
LOAD = 165 N T ₁ = 200 °C T ₂ = 200 °C	U _y (M) = -1.294	U _y (M) = -1.130	-0.164
LOAD = 165 N T ₁ = 225 °C T ₂ = 225 °C	U _y (M) = -1.383	U _y (M) = -1.130	-0.253
LOAD = 165 N T ₁ = 250 °C T ₂ = 250 °C	U _y (M) = -1.505	U _y (M) = -1.129	-0.376
LOAD = 165 N T ₁ = 275 °C T ₂ = 275 °C	U _y (M) = -1.630	U _y (M) = -1.129	-0.501
LOAD = 165 N T ₁ = 300 °C T ₂ = 300 °C	U _y (M) = -1.735	U _y (M) = -1.129	-0.606
SELISIH RATA-RATA			-0.25

Sumber : Penulis, 2024

Perbandingan hasil tegangan maksimum terhadap variasi beban antara simulasi program Fortran dan *software* komersial ditabelkan sebagai berikut :

Tabel 6. Perbandingan Hasil Simulasi Tegangan Maksimum Terhadap Beban

LOAD & TEMPERATUR	PROGRAM_FORTRAN (MPa)	SOFTWARE_KOMERSIAL (MPa)	SELISIH (MPa)
LOAD = 165 N T ₁ = 100 °C T ₂ = 100 °C	σ _{max} = 81	σ _{max} = 110	29
LOAD = 165 N T ₁ = 125 °C T ₂ = 125 °C	σ _{max} = 92	σ _{max} = 111	19
LOAD = 165 N T ₁ = 150 °C T ₂ = 150 °C	σ _{max} = 104	σ _{max} = 115	11
LOAD = 165 N T ₁ = 175 °C T ₂ = 175 °C	σ _{max} = 115	σ _{max} = 120	5
LOAD = 165 N T ₁ = 200 °C T ₂ = 200 °C	σ _{max} = 127	σ _{max} = 129	2
LOAD = 165 N T ₁ = 225 °C	σ _{max} = 138	σ _{max} = 137	-1

T ₂ = 225 °C			
LOAD = 165 N T ₁ = 250 °C T ₂ = 250 °C	σ _{max} = 150	σ _{max} = 146	-4
LOAD = 165 N T ₁ = 275 °C T ₂ = 275 °C	σ _{max} = 161	σ _{max} = 155	-6
LOAD = 165 N T ₁ = 300 °C T ₂ = 300 °C	σ _{max} = 173	σ _{max} = 164	-9
SELISIH RATA-RATA			5.19

Sumber : Penulis, 2024

Perbandingan visualisasi displacement dan tegangan menggunakan program Fortran thermo elasto-viscoplastic dan software komersial (table 3, table 4, table 5 dan table 6) secara kuantitatif maupun trennya menunjukkan hasil yang setara.

5. PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari penelitian ini dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Hasil validasi simulasi distribusi temperature antara program heat2D dengan program komersial menunjukkan hasil yang relatif seragam dengan selisih $0.56 \approx 0.28 \%$.
2. Hasil validasi simulasi antara software komersial dengan program fortran thermo elasto-viscoplastic dalam memvisualisasikan simpangan maksimum terhadap variasi temperatur jika diberikan beban yang sama. menunjukkan hasil yang relatif seragam, dengan rata-rata selisih sebesar $0.25 \text{ mm} \approx 18\%$ dimana displacement pada software komersial tidak mengalami perubahan, akan tetapi displacement pada program fortran mengalami kenaikan. Hal ini dipengaruhi oleh persamaan bahwa laju regangan total $\dot{\epsilon}$ adalah penjumlahan dari laju regangan elastis $\dot{\epsilon}_e$, laju regangan viskoplastis $\dot{\epsilon}_{vp}$, dan laju regangan thermal $\dot{\epsilon}_{th}$, dapat ditulis laju regangan total $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_e + \dot{\epsilon}_{vp} + \dot{\epsilon}_{th}$. Akibat perubahan temperature akan terjadi pertambahan laju regangan rhermal, sehingga dengan beban yang sama akan menambah jarak dari displacement beam.
3. Hasil validasi simulasi antara software komersial dengan program fortran thermo elasto-viscoplastic dalama memvisualisasikan tegangan maksimum terhadap variasi temperature jika diberikan beban yang sama menunjukkan hasil yang relatif seragam, dengan rata-rata selisih sebesar $5.19 \text{ MPa} \approx 3.17 \%$. Nilai selisih terbaik tercapai pada temperatur $150 - 250 \text{ }^\circ\text{C}$ yaitu 1.29% .

5.2. Saran

Hasil penelitian pemodelan dua dimensi thermo elasto-viskoplastis ini menarik untuk dikembangkan dengan modifikasi atau penambahan *subroutine* baru,

modifikasi atau penambahan model matematis baru, sehingga kedepan bisa digunakan untuk analisa problem pembentukan yang jauh lebih komplek, termasuk mampu mendefinisikan mekanisme *spring back*, kontak, non-kontak, dan slip nodal dalam kaitanya dengan kontak antara benda kerja, *punch*, dan *dies*.

DAFTAR PUSTAKA

Benallal A, Borvik T, Clausen A, Hopperstad O, 2003, *Dynamic strain aging, negative strain-rate sensitivity and related instabilities*, Technische mechanik, Band 23, Heft 2-4, 160-166

Boogard, A.H., 2002. *Thermally enhanced forming of aluminium sheet*, Thesis, Hengelo, The Netherland.

Boogaard, A.H., Huétink, J., 2006. *Simulation of aluminum sheet forming at elevated temperatures*. Comput. Methods Appl. 195, 6691–6709.

Ciemiorek M., Ambroziak A., Majchrowicz K., Lewandowska M., Golinski J., 2022. *Ductility and formability of ultrafine-grained 5754 aluminium alloy under various strain rates and temperatures*. Materials Science and Engineering 848, 143375.

Ganesh T, Yonggang Y.H, Jimmy Hsia K, 2004, *Fracture simulation using an elasto-viskoplastic virtual internal bond model with finite elements*, Journal of Applied Mechanics, 796-804

Pratomo A.W., 2009. *Pemodelan dua dimensi elasto-viskoplastis proses pembentukan aluminium dengan metode elemen hingga*, Thesis, Gadjah Mada University, Yogyakarta.

Tebbe, P.A., Kridli, G.T., 2004. *Warm forming of aluminium alloys: an overview and future directions*. Int. J. Mater. Prod. Technol. 21, 24–40.

Tomasz T., Sherwan M. N. , Valentin O., Delia V., Imre P, Marcin S., 2022. *Recent Developments and Future Challenges in Incremental Sheet Forming of Aluminium and Aluminium Alloy Sheets*. MDPI Metals 2022, 12, 124.

Toros S., Ozturk F., Kacar I., 2008. *Review of warm forming of aluminum–magnesium alloys*. Int. J. Mater. Process. Technol. 207, 1-12.

Zhang H.W., Xu W.L., Di S.L., Thomson P.F, 2002. *Quadratic programming method in numerical simulation of metal forming process*, Comput. Methods Appl. 191, 5555–557