

Simulasi Proses Active Hydro-Mechanical Drawing dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga pada Material Aluminium AlMg₃

Sri Raharno^{1, a *}, Puji Rianto^{2, b} dan Yatna Yuana Martawirya^{3, c}

¹Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

^aharnos@ftmd.itb.ac.id, ^briantopuji@yahoo.com, ^cyatna@ftmd.itb.ac.id

Abstrak

Pada makalah ini akan dibahas tentang simulasi proses *active hydro-mechanical drawing* (AHMD) dengan menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga LS-DYNA pada material AlMg₃. Proses simulasi ini digunakan untuk mendapatkan parameter proses yang sesuai pada proses *sheet metal forming* material AlMg₃ sehingga akan didapatkan produk dengan kualitas baik. Parameter proses yang diamati adalah radius tepi *die*, gradien kenaikan tekanan dan koefisien gesek. Sedangkan keluaran yang didapatkan adalah distribusi ketebalan *blank*, gaya reaksi *blank holder*, waktu gagal, dan penetrasi maksimum yang terjadi. Berdasarkan data keluaran tersebut akan diperoleh ukuran radius tepi *die* minimum yang tidak menyebabkan *necking*, kebutuhan gaya penekanan *blank holder* serta koefisien gesek optimum sehingga didapatkan distribusi ketebalan *blank* yang merata. Benda kerja aluminium AlMg₃ yang dimodelkan pada penelitian ini mempunyai diameter 400 mm dengan ketebalan 1 mm. Lubang *die* dimodelkan berdiameter 350 mm. Fluida bertekanan dimodelkan menjadi tekanan yang bekerja langsung pada membran karet. *Die* dan *blank holder* diberi kondisi batas tetap dan memiliki *clearance* terhadap *blank* sebesar 0,1 mm pada kondisi awal. Proses pembentukan berlangsung selama 3,5 detik dan diasumsikan berlangsung pada temperatur 25⁰C. Kesimpulan yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah rasio radius tepi *die* terhadap ketebalan *blank* agar tidak terjadi *necking* pada daerah tepi *die* adalah minimum 20 kali dengan koefisien gesek lebih kecil dari 0,1. Lebih lanjut, gaya *blankholder* yang dibutuhkan untuk menahan *blank* sehingga tidak mengalami *wrinkle* selalu berubah terhadap waktu. Salah satu optimasi yang bisa dilakukan terhadap koefisien gesek yaitu memperkecil koefisien gesek antara karet dengan *blank*.

Kata kunci : *active hydro mechanical drawing*, metode elemen hingga, aluminium AlMg₃.

Pendahuluan

Peningkatan teknologi karena permintaan pasar merupakan salah satu faktor yang mendorong kemajuan teknologi[1]. Teknologi manufaktur merupakan salah satu teknologi yang terus dikembangkan. Hal tersebut juga terjadi pada teknologi *sheet metal forming*. Saat ini proses *deep drawing* telah dikembangkan menjadi *hydro mechanical deep drawing* (HMDD) dan *active hydro mechanical drawing* (AHMD).

Pada sisi yang lain, karakteristik mesin dan peralatan yang digunakan dalam proses manufaktur sangat mempengaruhi kualitas produk, laju produksi, dan biaya produksi[2]. Hal ini juga berlaku pada proses *sheet metal forming*, untuk menghasilkan produk yang optimum diperlukan pemilihan peralatan dan

parameter proses yang sesuai. Salah satu cara untuk menentukan parameter proses adalah dengan melakukan proses manufaktur terkait secara langsung. Untuk proses *sheet metal forming*, cara seperti ini tentu saja akan membutuhkan waktu dan biaya yang relatif lama dan tinggi karena dibutuhkan proses *trial-error* pembuatan *die*. Simulasi proses *sheet metal forming* dengan basis metode elemen merupakan alternatif penyelesaian masalah tersebut.

Beberapa tahun belakangan ini istilah mobil ramah lingkungan sering menjadi perbincangan masyarakat Indonesia. Salah satu indikator mobil ramah lingkungan adalah produksi gas buang yang rendah. Secara umum, produksi gas buang mobil dapat dikurangi dengan cara mengurangi massa mobil itu sendiri. Berdasarkan penelitian, setiap pengurangan massa mobil sebanyak

100 kg akan mengurangi produksi gas CO₂ sebanyak 9 gram per km[3]. Penggunaan aluminium dibandingkan baja seperti pada mobil konvensional untuk pembuatan beberapa komponen mobil adalah pilihan yang baik untuk pengurangan massa mobil karena massa jenis aluminium sekitar sepertiga massa jenis baja.

Secara umum, aluminium mempunyai sifat yang berbeda dengan baja, sehingga proses *sheet metal forming* yang diterapkan pada material baja tidak serta merta dapat diterapkan juga pada material aluminium. Proses *deep drawing* pada material aluminium akan menghasilkan kualitas permukaan yang lebih buruk jika dibandingkan dengan proses AHMD[4]. Selain itu, kegagalan pada *deep drawing* sangat dipengaruhi oleh radius tepi *punch*, sedangkan pada AHMD hal ini tidak berpengaruh.

Pada penelitian ini akan dilakukan pemodelan proses AHMD. Pemodelan proses AHMD menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga LS-Dyna. Parameter proses yang diamati adalah radius tepi *die*, gradien kenaikan tekanan dan koefisien gesek. Sedangkan keluaran yang didapatkan adalah distribusi ketebalan *blank*, gaya reaksi *blank holder*, waktu gagal, dan penetrasi maksimum yang terjadi. Berdasarkan data keluaran tersebut akan diperoleh ukuran radius tepi *die* minimum yang tidak menyebabkan *necking*, kebutuhan gaya penekanan *blank holder* serta koefisien gesek optimum sehingga didapatkan distribusi ketebalan *blank* yang merata.

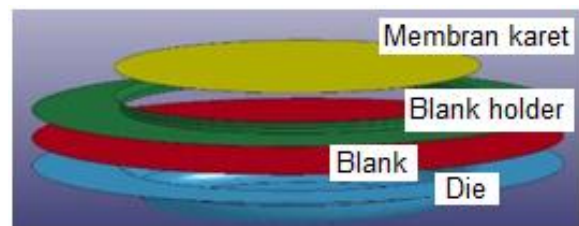
Material yang digunakan sebagai objek dalam penelitian ini adalah AlMg₃. Material AlMg₃ merupakan material yang sering digunakan pada produk-produk dari industri otomotif, kapal, makanan dan arsitektur. Benda kerja yang dijadikan sebagai objek penelitian dimodelkan berdiameter 400 mm, ketebalan 1 mm. Model *die* dimodelkan sebagai *die* berlubang dengan diameter 350 mm. Fluida bertekanan dimodelkan menjadi tekanan yang langsung bekerja pada membran karet. *Die* dan *blank holder* diberi kondisi batas tetap dan memiliki *clearance* terhadap *blank* sebesar 0,1 mm pada kondisi awal. Proses pembentukan berlangsung selama 3,5

detik dan diasumsikan berlangsung pada temperatur 25⁰C.

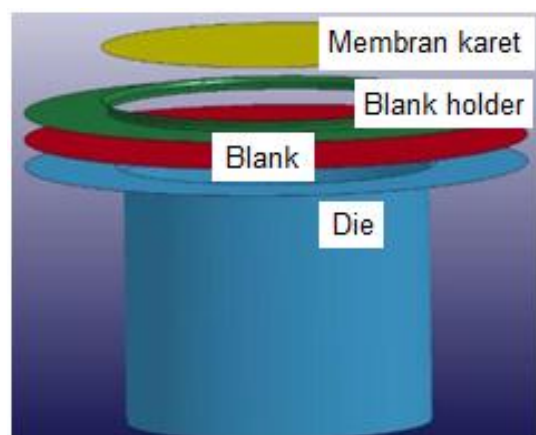
Pemodelan Proses

Pada penelitian ini komponen-komponen dari AHMD yang dimodelkan adalah membran karet, *blank holder*, *blank material* dan *die*. Gambar 1 dan Gambar 2 merupakan model elemen hingga AHMD yang digunakan pada penelitian ini. Dua model tersebut tersebut dibuat menggunakan Autodesk Inventor 2012 dan kemudian dilakukan proses *meshing* menggunakan LS-Pre Post.

Kombinasi parameter pada proses simulasi dicantumkan pada Tabel 1. Parameter yang terlibat dalam proses simulasi adalah jenis *die*, radius tepi *die*, tekanan, koefisien gesek global dan lokasi koefisien gesek lokal. Secara total dalam simulasi ini terdapat 33 kombinasi proses.



Gambar 1. Komponen model sistem AHMD dengan *die* berlubang tanpa tembus



Gambar 2. Komponen model sistem AHMD dengan *die* berlubang tembus

Tabel 1. Kombinasi parameter proses simulasi

No	jenis die		radius tepi die [mm]					tekanan [Mpa]				
	berlubang	tidak berlubang	5	10	15	20	25	1	2	4	6	10
1	v		v									v
2	v			v								v
3	v				v							v
4	v					v						v
5	v						v					v
6	v							v				v
7	v								v			v
8	v									v		v
9	v										v	v
10	v								v			
11	v									v		
12	v										v	
13	v											v
14	v			v								v
15	v				v							v
16	v					v						v
17	v						v					v
18	v							v				
19	v								v			
20	v									v		
21	v										v	
22		v					v					
23			v					v				
24				v					v			
25					v					v		
26						v					v	
27							v					v
28								v				
29									v			
30										v		
31											v	
32												v
33												v

Tabel 1. (Lanjutan)

No	koefisien gesek global					lokasi koefisien gesek lokal*															
	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	karet	holder	die													
1		v																			
2			v																		
3				v																	
4					v																
5						v															
6	v																				
7				v																	
8					v																
9						v															
10							v														
11								v													
12									v												
13										v											
14	v																				
15				v																	
16					v																
17						v															
18							v														
19								v													
20									v												
21										v											
22											v										
23												v									
24													v								
25														v							
26															v						
27	v																				
28																v					
29																	v				
30																		v			
31																			v		
32																				v	
33																					v

*nilai koefisien gesek statik $\mu_s = 0,0001$ dengan kontak yang terjadi adalah antara blank dengan karet, holder, atau die.

Tekanan pada simulasi proses AHMD ini merupakan parameter proses yang divariasikan. Pada Gambar 3 ditunjukkan kurva pembebanan perubahan tekanan yang diberikan. Tekanan yang diberikan pada simulasi ini berubah terhadap waktu dengan tekanan maksimum pada posisi tiga detik setelah pembebanan (lihat Gambar 3)



Gambar 3. Kurva perubahan tekanan terhadap waktu

Sifat mekanik material karet silikon yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2. Sedangkan sifat mekanik material dan kurva uji tarik AlMg₃ dapat dilihat pada Tabel 3 dan Gambar 4 secara berturut-turut.

Tabel 2. Sifat mekanik karet silikon[6]

Sifat	Nilai
Rapat massa	2300 kg/m ³
Poisson rasio	0,49
Modulus elastisitas	0,05 Gpa
Modulus geser	0,02 Gpa

Tabel 3. Sifat mekanik AlMg₃[7]

Sifat	Nilai
Rapat massa	2650 kg/m ³
Modulus elastisitas	70 GPa
Poisson rasio	0,33
Yield strenght	0,18 GPa
Regangan maksimum	18%



Gambar 4. Kurva uji tarik AlMg₃[8]



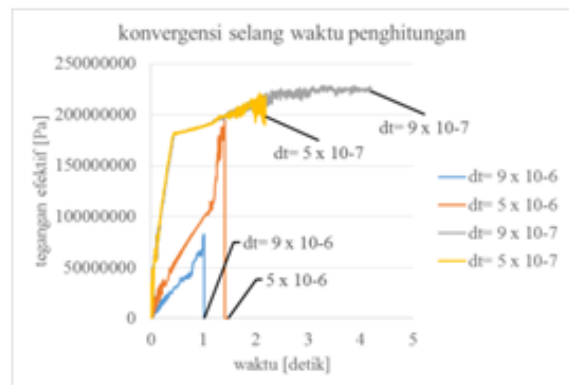
Gambar 5. Hasil uji konvergensi ukuran elemen

Uji Konvergensi Model

Secara umum, hasil penghitungan metode elemen hingga merupakan perkiraan solusi dan selalu timbul *error* selama proses penghitungan. Untuk mendekati nilai solusi dengan nilai sebenarnya atau memperkecil *error* yang terjadi maka perlu dilakukan uji konvergensi. Berbeda dengan simulasi statik yang hanya membutuhkan satu jenis uji konvergensi yaitu ukuran atau jumlah elemen, simulasi dinamik membutuhkan dua jenis uji konvergensi wajib dan satu jenis konvergensi opsional. Ketiga uji konvergensi tersebut yaitu uji konvergensi ukuran atau jumlah elemen, uji konvergensi selang waktu penghitungan atau iterasi, dan konvergensi waktu pencuplikan data.

Dalam penelitian ini, hasil uji konvergensi ukuran atau jumlah elemen ditunjukkan pada Gambar 5. Data uji konvergensi pada Gambar 5 diambil saat simulasi berjalan selama dua detik dengan selang waktu penghitungan $2,5 \times 10^{-7}$ detik dan selang waktu pencuplikan data 0,001 detik. Kriteria konvergensi berdasarkan prosentase *error* yang digunakan pada penelitian ini adalah $error \leq 1\%$ berarti sangat bagus, $1\% < error \leq 5\%$ berarti bagus, $5\% < error \leq 10\%$ berarti cukup, $error > 10\%$ berarti buruk[9]. Berdasarkan kriteria tersebut, maka hasil uji konvergensi pada penelitian ini termasuk dalam kategori bagus.

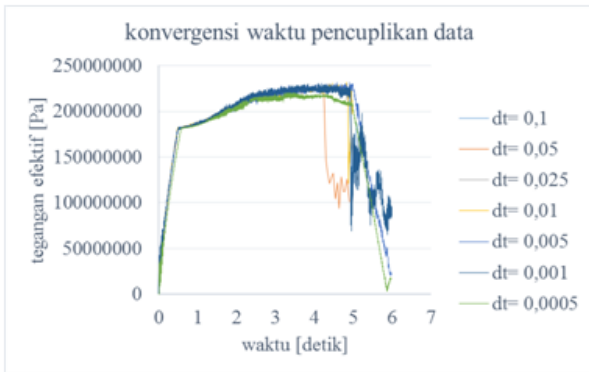
Uji konvergensi kedua yang dilakukan pada penelitian ini adalah uji konvergensi selang waktu penghitungan (*timestep*). Hasil uji ini ditunjukkan pada Gambar 6. Berdasarkan sampel selang waktu yang dipilih yaitu 9×10^{-6} , 5×10^{-6} , 9×10^{-7} , dan 5×10^{-7} detik, mengacu pada Gambar 6, pada penelitian ini dipilih selang waktu penghitungan 9×10^{-7} detik.



Gambar 6. Kurva uji konvergensi selang waktu penghitungan (*timestep*)

Uji konvergensi ketiga yang dilakukan pada penelitian ini adalah uji konvergensi selang waktu pencuplikan data. Uji ini bertujuan untuk menghindari adanya data penting yang tidak tercatat. Uji konvergensi ini tidak berpengaruh terhadap hasil penghitungan. Secara umum, semakin kecil selang waktu penghitungan yang diambil akan mengurangi data yang tidak tercatat dengan konsekuensi antara lain terdapat banyak data yang tidak berguna yang ikut tercatat sehingga membutuhkan media penyimpanan yang besar. Hasil pengujian ini ditunjukkan pada Gambar 7. Berdasarkan hasil uji tersebut

dipilih selang waktu pencuplikan data adalah 0,005 detik.

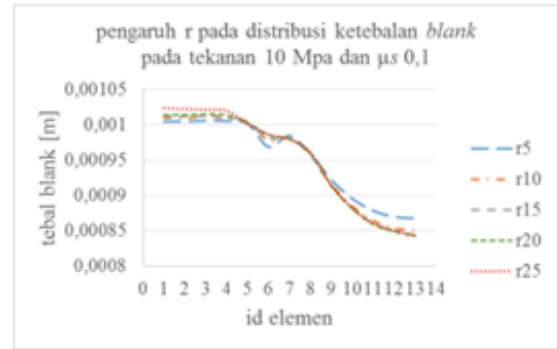


Gambar 7. Hasil uji konvergensi waktu pencuplikan data

Analisis Hasil Simulasi Model

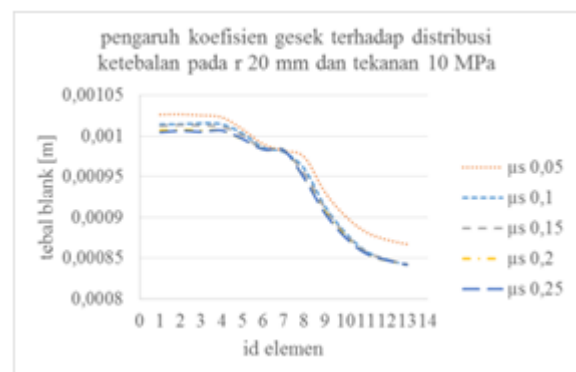
Radius tepi *die* (r) merupakan salah satu parameter proses yang penting pada proses *sheet metal forming*. Hal ini disebabkan karena proses *necking* dan sobek pada benda kerja sering terjadi pada daerah tepi *die*. Pada proses *deep drawing* ukuran radius tepi *die* yang dianjurkan adalah 10 kali lebih besar dari tebal *blank*[5]. Walaupun proses AHMD memiliki prinsip kerja yang serupa dengan proses *deep drawing*, parameter proses yang ada pada keduanya bisa berbeda.

Berdasarkan simulasi proses AHMD, radius tepi *die* minimum agar tidak terjadi *necking* lokal adalah sebesar 20 mm (lihat Gambar 8). Fenomena *necking* ditandai dengan penurunan ketebalan dari tepi *blank* ke bagian tengah *blank* yang tidak kontinu (terbentuk lembah sebagai akibat perubahan ketebalan yang tidak kontinu). Berdasarkan hasil simulasi, lembah terjadi di antara elemen 5 dan 7 dan kedalaman lembah semakin besar ketika radius tepi *die* diperkecil. Daerah tersebut berada pada daerah radius tepi *die*, sehingga dapat disimpulkan bahwa ukuran radius tepi *die* menjadi salah satu penyebab terjadinya *necking* dan rasio minimum antara radius tepi *die* dengan ketebalan *blank* agar *necking* tidak terjadi adalah 20.



Gambar 8. Pengaruh r pada distribusi ketebalan *blank* pada tekanan 10 MPa dan kekasaran permukaan μ 0,1

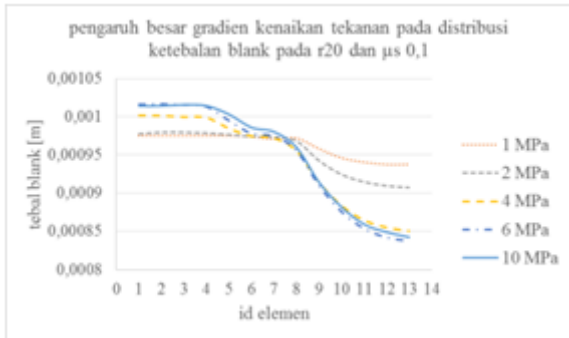
Berdasarkan simulasi yang dilakukan, koefisien gesek optimum tanpa terjadi *necking* untuk radius tepi *die* 20 mm (r_{20}) adalah 0,1. Nilai tersebut diperoleh melalui simulasi dengan berbagai kondisi koefisien gesek yang berbeda. Berdasarkan Gambar 9, semakin kecil koefisien gesek maka *necking* atau lembah yang terbentuk semakin kecil serta koefisien gesek sehingga tidak terjadi *necking* adalah kurang dari 0,1. Pada sisi yang lain, jika koefisien gesek terlalu kecil akan mengakibatkan biaya yang dibutuhkan untuk memperkecil koefisien gesek. Koefisien gesek antara 0,05 sampai dengan 0,1 merupakan koefisien gesek yang umum digunakan pada proses pembentukan logam. Dengan demikian, koefisien gesek 0,05 sampai dengan 0,1 merupakan koefisien gesek optimum yang dipilih.



Gambar 9. Pengaruh koefisien gesek terhadap distribusi ketebalan *blank* pada r 20 mm dan tekanan 10 MPa

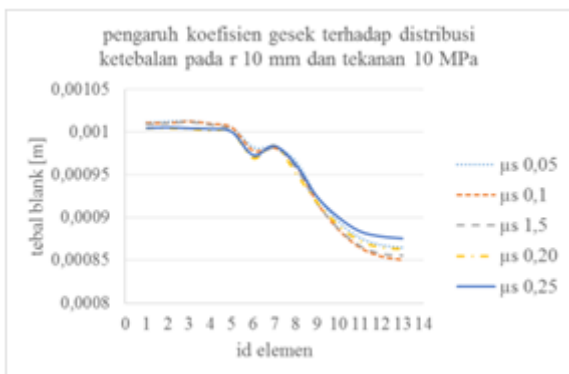
Secara umum gradien kenaikan tekanan tidak menyebabkan terjadinya *necking* pada radius tepi *die* r_{20} tetapi berpengaruh pada distribusi ketebalan *blank* (lihat Gambar 10).

Gradien kenaikan tekanan yang lebih rendah akan menghasilkan distribusi ketebalan *blank* yang lebih merata akan tetapi akan membutuhkan waktu lebih lama untuk mendapatkan penetrasi yang sama dibandingkan dengan gradien kenaikan tekanan yang lebih tinggi.

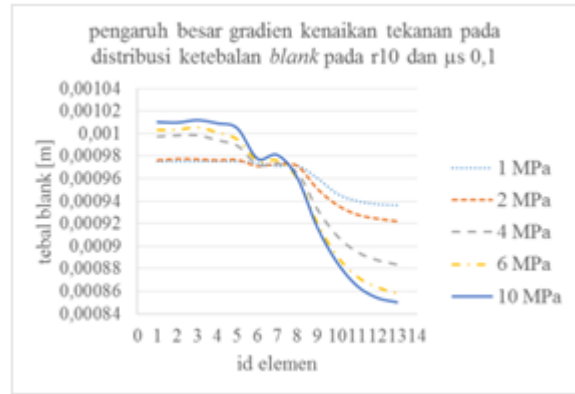


Gambar 10. Pengaruh besar gradien kenaikan tekanan pada distribusi ketebalan *blank* pada r20 dan μ 0,1

Selanjutnya, hasil simulasi pada kasus radius tepi *die* 10 mm (r10) didapatkan hasil bahwa fenomena *necking* yang terjadi tidak bisa dihilangkan walaupun digunakan batas bawah koefisien gesek yang biasa digunakan pada pembentukan logam yaitu sebesar 0,05 (lihat Gambar 11). Hal tersebut juga terjadi pada kasus gradien kenaikan tekanan (lihat Gambar 12), dibutuhkan gradien kenaikan tekanan lebih rendah dari 0,33 MPa/detik (kurva tekanan 1 MPa) untuk menghilangkan fenomena *necking* yang terjadi. Akibat dari hal ini dibutuhkan waktu yang lebih lama untuk mendapatkan penetrasi yang diinginkan agar tidak terjadi *necking*.

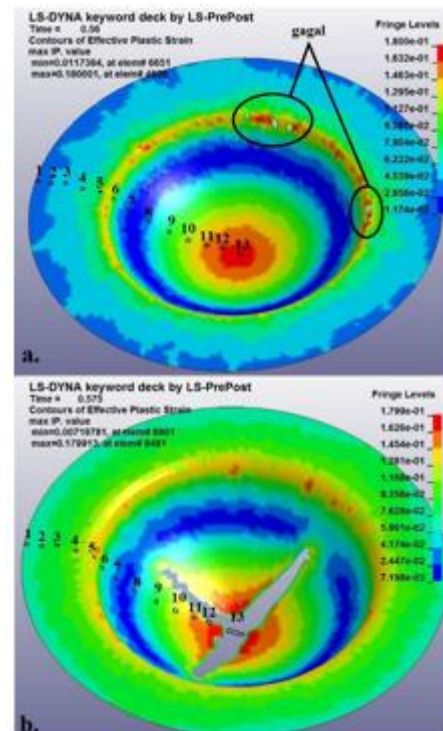


Gambar 11. Pengaruh koefisien gesek terhadap distribusi ketebalan *blank* pada r10 dan tekanan 10 MPa



Gambar 12. Pengaruh gradien kenaikan tekanan pada distribusi ketebalan *blank* pada r10 dan μ 0,1

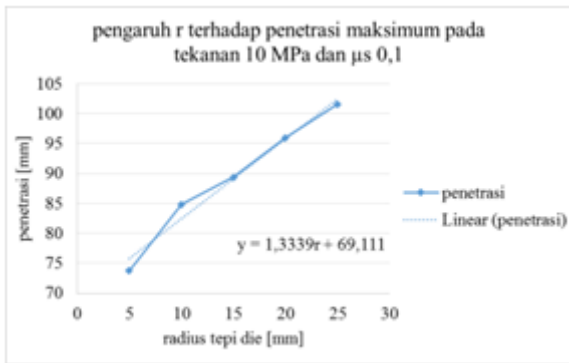
Necking merupakan salah satu indikator pada bagian tersebut akan mengalami kegagalan. Pada Gambar 13 bagian (a) diperlihatkan kegagalan yang terjadi akibat *necking* pada daerah tepi *die*. Pada Gambar 13 bagian (b) diperlihatkan kegagalan yang terjadi bukan disebabkan oleh *necking* pada daerah tepi *die*.



Gambar 13. Distribusi regangan plastik efektif dan mode kegagalan pada kasus (a) r5 dan (b) r25 pada tekanan 10 MPa dan μ 0,1

Secara umum, radius tepi *die* yang besar akan mengakibatkan penetrasi maksimum yang terjadi semakin besar. Seperti yang diperlihatkan pada Gambar 14, radius tepi *die*

dan penetrasi maksimum memiliki hubungan yang relatif linear.



Gambar 14. Pengaruh r terhadap penetrasi maksimum pada tekanan 10 MPa dan $\mu_s 0,1$

Secara mendasar, pemilihan gradien kenaikan tekanan optimum didasarkan pada penetrasi maksimum yang mampu dicapai dan distribusi ketebalan *blank*. Berdasarkan dua kriteria tersebut maka gradien kenaikan yang dianggap optimum baik pada kasus r10 maupun r20 adalah sesuai kurva tekanan 4 MPa atau 1,33 MPa/detik seperti yang ditampilkan pada Gambar 15. Penambahan penetrasi yang terjadi setelah melewati tekanan tersebut tidak begitu signifikan bahkan menurun pada kasus r20. Hal tersebut terjadi karena *blank* mengalami kegagalan sebelum mencapai tekanan maksimum. Selain itu, gradien kenaikan tekanan yang semakin besar mengakibatkan distribusi ketebalan *blank* semakin tidak merata.

Kurva penetrasi pada Gambar 15 dapat digunakan sebagai acuan dalam pemilihan gradien kenaikan tekanan tanpa melakukan simulasi. Sebagai contoh sebuah bengkel ingin membuat benda dengan kedalaman mangkuk 70 mm dan ukuran radius tepi *die* maksimum yang diijinkan adalah 10 mm. Jika menggunakan kurva penetrasi seperti yang diperlihatkan pada Gambar 15, maka bengkel tersebut dapat memilih kurva r10 dengan tekanan 4 MPa. Kondisi tersebut dipilih karena penetrasi maksimum yang terjadi melebihi 70 mm dan distribusi ketebalan *blank* paling merata jika dibandingkan dengan tekanan 6 MPa, atau 10 MPa.

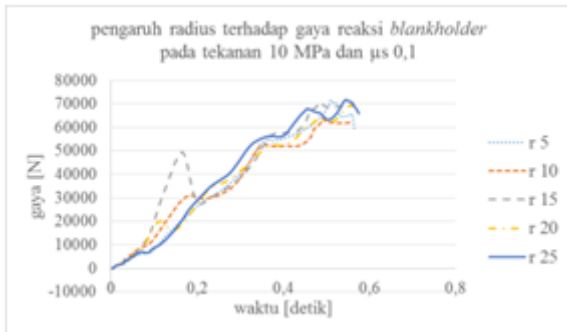


Gambar 15. Pengaruh besar gradien kenaikan tekanan terhadap penetrasi maksimum pada kekasaran permukaan 0,1

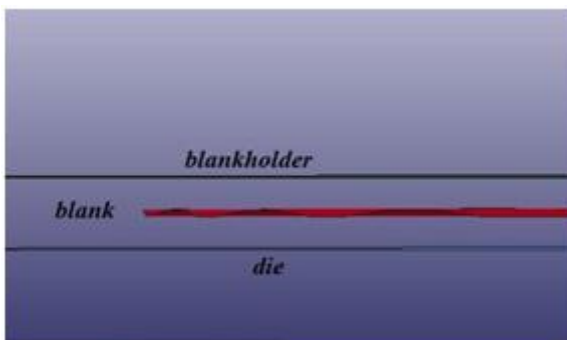
Setelah dilakukan simulasi pada berbagai kondisi parameter yang berbeda ternyata diperoleh gaya reaksi *blank holder* yang berbeda sebagai akibat berkontak dengan *blank* (lihat Gambar 16). Selain itu, gaya reaksi *blankholder* juga berubah terhadap waktu. Kebutuhan gaya *blank holder* bernilai sama dengan gaya reaksi *blank holder*. Hal ini menunjukkan bahwa kebutuhan gaya *blank holder* akan berbeda pada parameter dan waktu yang berbeda. Secara umum, gaya *blank holder* yang diberikan harus sesuai dengan kebutuhan. Gaya *blank holder* yang tidak sesuai dengan kebutuhan akan mengakibatkan terjadinya fenomena *wrinkle*, *necking*, dan sobek[10]. *Wrinkle* terjadi dikarenakan adanya beban tekan pada daerah *flange*. *Wrinkle* tersebut akan berusaha terus membesar dan menekan *blank holder*. Dikarenakan *blank holder* diberi kondisi batas yang tetap maka *wrinkle* yang terjadi tidak bisa membesar. Hal tersebut berakibat pada gaya normal antara *blank holder* dengan *blank* akibat menahan terbentuknya *wrinkle* secara umum akan terus meningkat. Fenomena *Wrinkle* yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 17.

Radius tepi *die* berpengaruh terhadap besar kecil lonjakan kebutuhan gaya *blank holder* pada saat awal membran karet berkontak dengan *blank*. Pada Gambar 16 diperlihatkan bahwa radius tepi *die* 5 mm dan 25 mm mengakibatkan kenaikan gaya reaksi *blank holder* yang relatif linear. Akan tetapi radius tepi *die* 15 mm mengakibatkan lonjakan gaya reaksi *blank holder* yang paling besar pada saat awal berkontak, kemudian gaya reaksi tersebut turun dan mengikuti pola seperti gaya

reaksi *blank holder* pada radius tepi *die* yang lainnya. Hal tersebut menunjukkan bahwa pemilihan radius tepi *die* optimum akan menyebabkan gaya reaksi *blank holder* berubah secara relatif linear dan akan didapatkan produk dengan hasil yang baik. Perubahan kenaikan tekanan yang relatif linear akan mempermudah operator dalam mengoperasikan mesin jika dibanding dengan gaya yang berfluktuasi.



Gambar 16. Pengaruh radius terhadap gaya reaksi *blankholder* pada tekanan 10 MPa dan μ 0,1

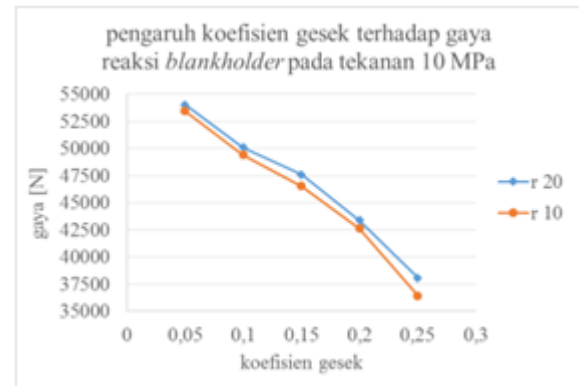


Gambar 17. Fenomena *wrinkle* yang terjadi

Berdasarkan hasil simulasi, radius tepi *die* optimum pada kasus ini adalah 25 mm. Radius tepi *die* 5 mm bukan merupakan radius optimum walaupun perubahan gaya reaksi *blank holder* terhadap waktu relatif linear. Hal tersebut dikarenakan radius tepi *die* 5 mm dapat menyebabkan terjadinya *necking* di sekitar radius tepi *die*.

Kombinasi koefisien gesek besar dan radius tepi *die* kecil secara umum akan menurunkan gaya *blank holder* (lihat Gambar 18). Meskipun demikian seperti sudah diulas pada bagian sebelum ini, koefisien gesek di atas 0,1 dan radius tepi *die* di bawah 20 mm akan menyebabkan *necking*. Dengan demikian dapat diketahui bahwa dalam proses AHMD

terdapat beberapa parameter yang harus dipertimbangkan agar produk yang dihasilkan masih di dalam batas toleransi serta waktu dan biaya produksi serendah mungkin.

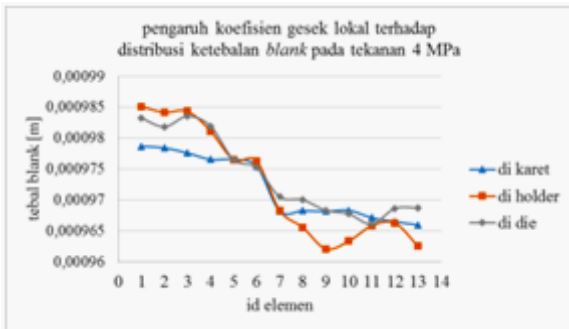


Gambar 18. Pengaruh koefisien terhadap gaya reaksi pada tekanan 10 MPa dengan waktu pencuplikan data 0,35 detik

Koefisien gesek lokal adalah istilah yang digunakan pada makalah ini untuk menyebut koefisien gesek antara *blank* dengan karet, *blankholder*, atau *die* yang dibedakan dengan koefisien gesek lain. Perubahan koefisien gesek lokal bertujuan untuk mengetahui distribusi ketebalan *blank* terhadap posisi koefisien gesek lokal yang berbeda. Koefisien gesek lokal yang digunakan pada penelitian ini adalah 0,0001. Koefisien gesek lokal yang sangat kecil ini jika dibandingkan koefisien global bertujuan untuk menghasilkan perbedaan hasil simulasi yang cukup signifikan sehingga mempermudah proses optimasi. Apabila perbedaan distribusi ketebalan *blank* diketahui akibat perbedaan letak koefisien gesek lokal maka optimasi dengan ongkos rendah dapat dilakukan. Hal tersebut bisa terjadi karena urutan prioritas untuk memperkecil koefisien gesek telah diketahui.

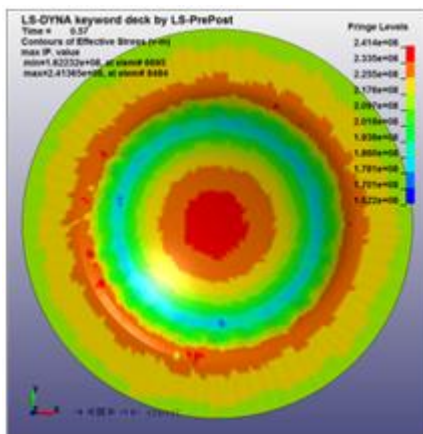
Berdasar hasil simulasi (lihat Gambar 19), koefisien gesek yang kecil antara *blank* dan karet mengakibatkan distribusi ketebalan *blank* lebih merata jika dibandingkan dengan memperkecil koefisien pada tempat lain. Dengan demikian, jika suatu perusahaan menginginkan distribusi ketebalan *blank* merata tetapi dana yang digunakan terbatas maka perusahaan tersebut dapat memperkecil koefisien gesek antara *blank* dengan karet

sebagai prioritas jika dibanding dengan memperkecil koefisien gesek ditempat lain.

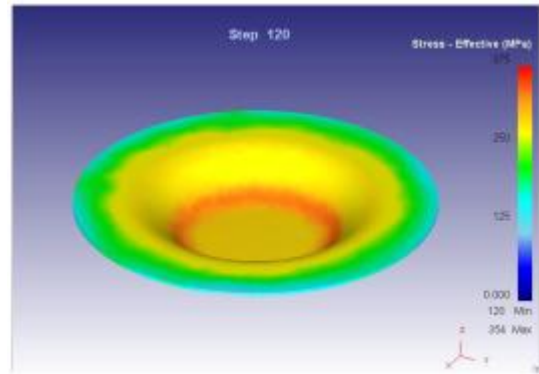


Gambar 19. Kurva pengaruh koefisien gesek lokal terhadap distribusi ketebalan blank pada tekanan 4MPa

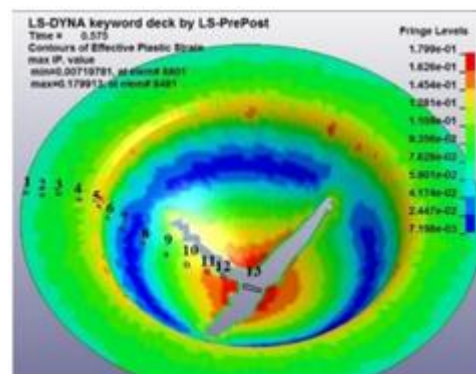
Jika dibandingkan antara proses AHMD dengan penelitian sebelumnya yaitu penelitian mengenai *deep drawing*. Terdapat perbedaan yang mencolok terutama pada letak konsentrasi tegangan dan letak kegagalan awal antara AHMD dengan *deep drawing*. Pada AHMD letak tegangan terbesar berada pada daerah tengah blank (lihat Gambar 20) sedangkan pada *deep drawing* tegangan terbesar terjadi di daerah kontak antara tepi punch dengan blank (lihat Gambar 21). Begitu juga letak regangan dan letak kegagalan awal yang terjadi. Pada AHMD letak regangan terbesar berada pada daerah tengah blank (Gambar 22) sedangkan pada *deep drawing* regangan terbesar terjadi di daerah kontak antara tepi punch dengan blank (Gambar 23). Ukuran radius tepi punch yang terlalu kecil juga akan mempermudah kegagalan terjadi.



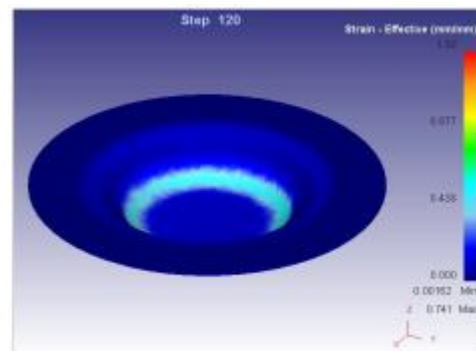
Gambar 20. Distribusi tegangan efektif pada AHMD



Gambar 21. Distribusi tegangan efektif pada *deep drawing* [1]



Gambar 22. Distribusi regangan efektif dan kegagalan pada AHMD



Gambar 23. Distribusi regangan efektif pada *deep drawing* [1]

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan didapat kesimpulan sebagai berikut:

- Rasio radius tepi die terhadap ketebalan blank sehingga tidak menimbulkan *necking* pada daerah tepi die adalah minimal 20 kali dengan koefisien gesek lebih kecil dari 0,1.

- Radius tepi *die* terhadap penetrasi maksimum pada material AlMg₃ memiliki hubungan yang relatif linear.
 - Gradien kenaikan tekanan optimum terhadap proses pembentukan material AlMg₃ adalah 1,33 MPa/detik atau sesuai dengan kurva tekanan 4 MPa.
 - Gaya *blank holder* yang dibutuhkan untuk menahan *blank* sehingga tidak mengalami *wrinkle* selalu berubah terhadap waktu.
 - Salah satu optimasi yang bisa dilakukan terhadap koefisien gesek adalah memperkecil koefisien gesek antara karet dengan *blank*.
 - Letak konsentrasi tegangan dan letak kegagalan awal pada AHMD berada pada daerah tengah *blank* sedangkan letak konsentrasi tegangan dan letak kegagalan awal pada *deep drawing* terletak pada daerah kontak antara tepi *punch* dengan *blank*.
- [8] Stress-Strain Diagrams of AlMg₃, <http://www.totalmateria.com/Demo.aspx?id=StressStrainDEMO&LN=EN&id1=42&id2=40&SessionID=1672052210552015313618513H4HQ15T1L613Y2X>, diakses 19 November 2014.
- [9] G.B. Sinclair, Practical Convergence-Divergence Checks for Stresses from FEA, <http://www.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/confpaper/2006-Int-ANSYS-Conf-28.pdf>, diakses 19 November 2014.
- [10] Z.Q. Sheng, S. Jirathearanat, dan T. Altan, Adaptive FEM Simulation for Prediction of Variable Blank Holder Force in Conical Cup Drawing, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(5):487-494, 2004.

Referensi

- [1] Daniel, Studi Awal Pemodelan Dan Simulasi Proses *Deep Drawing* Pada Material Aluminium Al-5083, Tugas Sarjana, Teknik Mesin FTMD ITB, Bandung, 2014.
- [2] S. Kalpakjian dan S. R. Schmid, *Manufacturing Engineering and Technology*, Edisi 6, Pearson Prentice Hall, London, 2010,
- [3] Jürgen Hirsch, Aluminium in Innovative Light-Weight Car Design, *Materials Transaction*, 52(5):818-824, 2011.
- [4] K. Adam, dkk., *Metal Forming Handbook*, Springer, Berlin, 1998.
- [5] G. E. Dieter dan D. Bacon, *Mechanical Metallurgy*, Edisi 4, McGraw-Hill, New York, 2009.
- [6] Silicon Rubber, <http://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=920>, diakses 8 November 2014.
- [7] AlMg₃ (~5754A), <http://www.matbase.com/material-categories/metals/non-ferrous-metals/wrought-aluminium/material-properties-of-almg3-5754a-wrought-aluminiumgrade.html#properties>, diakses 8 November 2014.