

Optimalisasi Performa Proses Deep Drawing Material SPCD Steel dengan Metode Finite Element dan Eksperimental

Herno Prawito¹, Susanto Sudiro¹

¹Program Studi Magister Teknik Mesin, Universitas Pancasila, Jakarta

Email: hernop@gmail.com, susantosudiro@yahoo.co.id

ABSTRAK

Deep drawing adalah salah satu proses manufaktur yang sangat penting khususnya pada proses pembentukan dengan bahan dasar *metal coil*. Proses *deep drawing* dalam pembuatan *cup* kebanyakan digunakan pada industri pengalengan, elektronik, mobil, kedirgantaraan. Proses *deep drawing* mampu menghasilkan produk dengan bentuk sangat kompleks dan tingkat kepresisian dengan kapasitas yang tinggi. Parameter proses yang mempengaruhi tingkat kualitas produk antara lain gaya *blank holder*, bentuk dan ukuran *blank*, *radius punch*, *radius die*, sifat material, koefisien gesekan dan beberapa parameter lainnya. Penguasaan teknologi proses *deep drawing* adalah merupakan persyaratan utama untuk dapat menghasilkan produk dengan cacat minimum sekaligus mengoptimalkan untuk menurunkan biaya produksinya. Untuk mendapatkan parameter proses yang paling dominan mempengaruhi keberhasilan proses *deep drawing* dilakukan analisis proses pembentukan dengan melakukan simulasi menggunakan metode elemen hingga, dan hasil analisis tersebut diverifikasi menggunakan eksperimen proses pembentukan *cup* menggunakan proses sebenarnya. Dari hasil simulasi *finite element* dan eksperimen yang dilakukan didapatkan hasil gaya *blank holder/blank holder force* (BHF), *radius punch*, *radius die* dan aplikasi pelumasan sangat berpengaruh terhadap hasil produk.

Kata kunci: *deep drawing*, *blank holder force* (BHF), *blank*, *radius punch*, *radius die*.

ABSTRACT

Deep drawing is one of the manufacturing processes that is very important, especially in the formation process with *metal coil* material. The *deep drawing* process in *cup* making is mostly used in the canning, electronic, automotive, aerospace industries. *Deep drawing* process is able to produce products with very complex shapes and high levels of precision with high capacity. Process parameters that affect the level of product quality include the *blank holder force*, *blank* shape and size, *punch radius*, *die radius*, material properties, friction coefficient and several other parameters. Mastery of *deep drawing* process technology is the main requirement to be able to produce products with minimum defects while optimizing to reduce production costs. To get the most dominant process parameters affecting the success of the *deep drawing* process, an analysis of the formation process was carried out by conducting a simulation using the *finite element* method and the results of the analysis were verified using experimental *cup* forming processes using the actual process. From the results of the simulation of *finite elements* and experiments conducted, *blank holder force* (BHF), *radius punch*, *radius die* and lubrication application results greatly influence the product yield.

Keywords: *deep drawing*, *blank holder force* (BHF), *blank*, *radius punch*, *radius die*.

PENDAHULUAN

Deep drawing adalah proses pembentukan logam signifikan digunakan dalam operasi pembentukan logam lembaran. Dalam operasi pengerjaan lembaran logam ini *blank* ditarik ke dalam cetakan/*die* menggunakan *punch* untuk menghasilkan produk berbentuk *cylinder cup*. Serupa dengan proses pembentukan lembaran logam lainnya, regangan dominan dalam proses ini biasanya tarik. Oleh karena itu, pertimbangan mendalam diperlukan untuk mencegah kegagalan pada bagian yang ditarik dalam. Prosedur ini tergantung pada gaya *blank holder*, *radius punch* and *die*, *clearance* dan kondisi antarmuka antara *blank*, *die* dan *blank holder*. Peran *blank holder*

sangat besar dalam mengatur pola aliran material ini. Jika jumlah aliran material dapat dipilih dan sesuai, maka cacat-cacat tersebut dapat dihindari. Oleh karenanya gaya yang diberikan dari *blank holder* pada material dapat ditransfer dan disesuaikan dengan kekuatan penahan *blank holder*. Beberapa fenomena cacat yang dapat ditimbulkan diantaranya cacat pecah/*crack*, kerut/*wrinkle*, dan penipisan pelat akibat kontak dan tarik antara *punch* dan *die*. Fenomena ini harus dicegah untuk menekan biaya produksi seminimal mungkin.

Ajay Kumar Choubey dkk [1], mengembangkan model *Finite Element* (FE) *elasto-plastis* 3-dimensi untuk bahan *Mild Steel* IS

2062 sebagai *blank* untuk mempelajari perilaku *wrinkle*/kerut pada *flange* dan regangan plastis. R. Venkat Reddy dkk [2] menyatakan bahwa penyimpangan dimensi, bentuk dan posisi cacat pada lembaran logam yang telah mengalami proses deformasi plastik dingin pada proses *deep drawing* merupakan masalah kritis untuk industri terutama pada produksi masal seperti industri manufaktur. Beberapa faktor utama yang mempengaruhinya *wrinkle*/kerut diantaranya BHF (*Blank Holder Force*), *radius punch*, *radius die* dan koefisien gesekan. Inisiasi dan pertumbuhan *wrinkle*/kerut dipengaruhi oleh banyak faktor seperti rasio tegangan, sifat mekanik bahan lembaran, geometri benda kerja, dan kondisi kontak. Sniekers, R. J. J. M. [3] telah menyelidiki efek gesekan pada proses *deep drawing*. Penelitian dilakukan terhadap besaran tekanan kontak dan efek yang ditimbulkan terhadap efek gesekan yang terjadi pada proses *deep drawing*. Zhi-chao Zhang [4], menganalisa variasi ketebalan pada *reverse deep drawing* pada *cup* paduan aluminium 5A06 yang dibentuk di bawah suhu yang berbeda. Hasil analisa diperoleh bahwa penipisan di sudut *punch* dapat dikurangi dengan peningkatan suhu. T. S. Yang dkk [5], menerangkan bahwa untuk mendapatkan produk terbaik dalam proses *deep drawing*, ukuran *blank* adalah faktor yang sangat penting. Dengan modifikasi bentuk *blank* ketinggian *drawn cup* lebih seragam dan beban *punch*, tegangan dan regangan dapat diperkecil. Najmeddin Arab dkk [6], menjelaskan ada dua metode analisis *deep drawing* yaitu analitik/numerik dan eksperimental. Pemodelan analitik/numerik dapat digunakan untuk memodelkan dan menganalisis proses melalui semua tahap deformasi. Pendekatan ini tidak memakan waktu dan lebih ekonomis. Analisis eksperimental dapat digunakan dalam menganalisis proses untuk menentukan parameter proses untuk menghasilkan produk bebas cacat. Dengan melakukan eksperimen menggunakan material baja karbon sesuai dengan Standar Jerman DIN-EN10130-FePO4- (Stl 4) dilakukan analisa korelasi ketebalan dinding.

METODE PENELITIAN

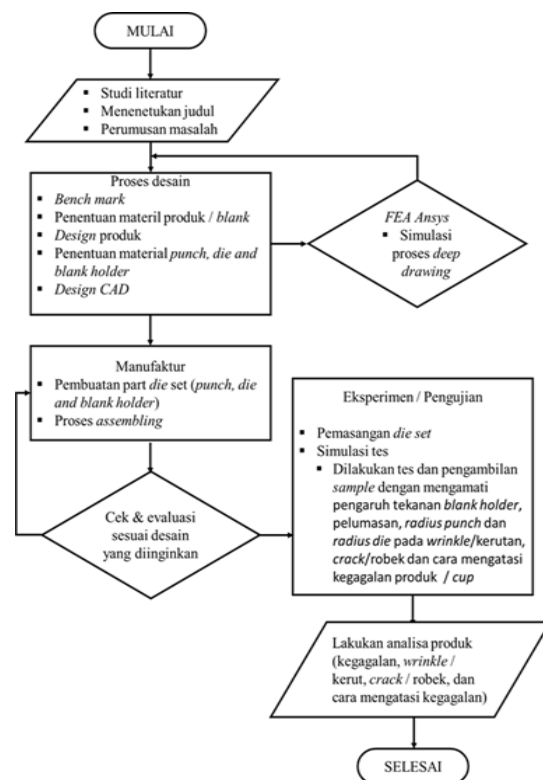
1. Tujuan penelitian

Tujuan utama dalam penelitian ini adalah untuk menghilangkan berbagai cacat seperti kerut, penipisan dan robekan pada proses *deep drawing* produk *cylindrical cup* dengan bentuk dan ukuran yang dibutuhkan. Oleh karenanya diperlukan parameter untuk menghilangkan cacat tersebut karena kompleksitas perilaku deformasi dan terdapat beberapa parameter proses seperti efek

pengaruh tekanan *blank holder*, pelumasan, *radius punch* dan *radius die*.

2. Alur proses penelitian

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian melalui Analisa FEA sebagai langkah awal sehingga lebih cepat dan ekonomis yang kemudian dibuktikan melalui metode eksperimental. Langkah-langkah proses diterangkan pada Gambar-1 sesuai dengan alur diagram di bawah ini:



Gambar 1. Diagram alir proses penelitian

3. Material

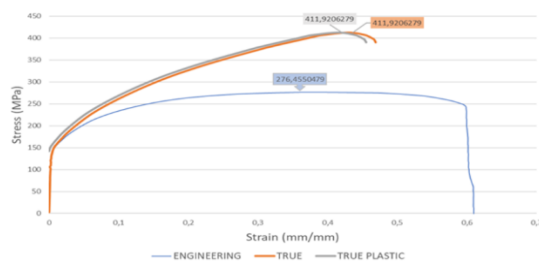
Plate SPCD adalah lembaran baja yang dihasilkan lewat proses canai dingin/*steel plate cold rolled coiled* dengan *drawing quality*.

Spesifik material Plate SPCD tertuang pada Table1. Dari hasil tes uji tarik diagram tegangan regangan *Engineering*, *True* dan *True Plastic* dapat ditunjukkan pada Gambar 2.

Tabel 1. Spesifik material Plate SPCD

SPCD Material				Tensile Test		
				GL = L2= 50 mm		
Tebal	Lebar	Panjang	Masa jenis	σ_y	σ_{UTS}	Elongation
mm	mm		Kg/m ³	MPa		%
0,3	19	Coil	7848	148,2	276,6	48,9

GL : Gauge length L2 : 50 mm



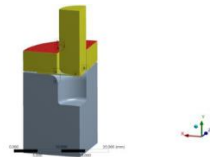
Gambar 2. Graph Stress -Strain (Engineering, True, True Plastic)

HASIL DAN PEMBAHASAN

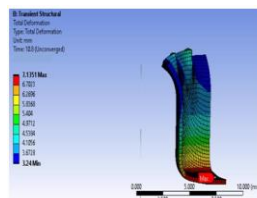
4.1 Finite element modelling

Metode *Finite element* telah diterapkan untuk mensimulasikan aliran plastik material selama proses pembentukan.

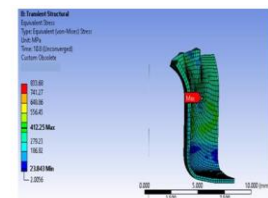
Output solution (Total Deformation, Equivalent (von Mises) Stress, Principal Stress, Stress Intensity) dilakukan pada BHP 1 MPa, radius punch 1,0376 mm, koefisien gesek 0,15 dapat ditunjukkan seperti data pada tabel dan Gambar 3 berikut.



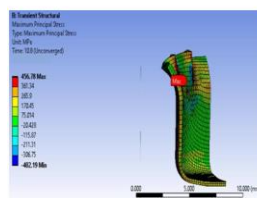
Gambar 3. Model geometry punch, die, blank holder and blank



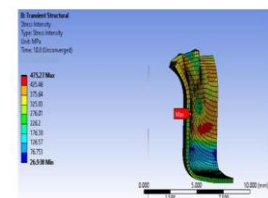
Gambar 4. Total Deformation



Gambar 5. Equivalent (von-Mises) Stress



Gambar 6. Principal Stress



Gambar 7. Stress Intensity

Tabel 2. Perbandingan Stress Output Solution Ansys True stress dan True Plastic Stress

Total deformation (mm)	Output solution Ansys			True Plastic (MPa)
	Equivalent (von Mises) Stress --> MPa	Principal Stress (MPa)	Stress Intensity (MPa)	
5,40	412,37	636,15	476,15	412,36

Dari hasil simulasi *Output solution* tabel diatas *Output Solution Ansys* lebih tinggi dari *True stress* dan *True Plastic Stress*, sehingga peluang *crack* muncul dalam simulasi ini.

4.2 Analisa teori

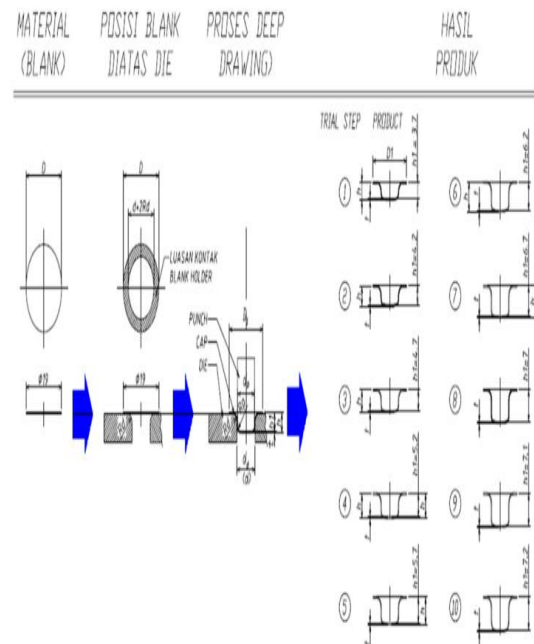
Analisa teori dasar yang digunakan dalam penyelesaian masalah *deep-drawing cylindrical cup* didasarkan pada perhitungan spesifikasi material, simulasi desain produk.

Detail spesifikasi produk dan perhitungan teoritis dapat dijelaskan berikut ini:

Tabel 3. Dimensi material, diameter dalam area kontak dan luas kontak BHF

Diameter blank (D)	Tebal material (t)	Diameter punch (d _p)	Radius die (R _d)	Diameter die (d _d)	Diameter dalam area luas kontak (d _d +2R _d)	Luas kontak BHF
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm ²
19	0,3	9	2	9,63	13,63	137,6

Langkah awal dalam tinjauan ini, pertama ditentukan dimensi *blank* dan luasan area tekan, *radius punch*, *radius die*, diameter *punch* and *diameter die* dan *output* produk dengan target kedalaman *deep drawing* dalam 10 tahapan ($h=3,7$ mm sampai $h=7.2$ mm) seperti Gambar 4.



Gambar 4. Tahapan proses deep drawing

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan strategi optimasi untuk menentukan skema BHF yang optimal untuk model *cup/cangkir* tertentu tanpa menyebabkan bahan *cup/cangkir* *wrinkle/sobek*. Langkah-

langkahnya dilakukan sesuai dengan perhitungan rumus yang terdapat pada tabel berikut:

Tabel 4. *Limiting Drawing Ratio, radius die, radius punch dan clearance per side punch dan die*

Parameter yang dicari	Rumusan	Satuan	Hasil	Keterangan
Jumlah tahapan deep drawing	Persamaan-1 $n = \frac{h}{d}$		0,36 ~ 0,59	$h=3,5 \sim 5,7 \rightarrow h/d < 0,6$ (Jumlah tahapan deep drawing =1)
			0,7 ~ 0,75	$h=6,2 \sim 7,2 \rightarrow 0,6 < h/d < 1,4$ (Jumlah tahapan deep drawing =2)
LDR	Persamaan-2 $LDR = \frac{D}{d}$		2	Efisiensi drawing $\mu = 70\%$ $\rightarrow LDR = 2$
Reduction ratio (RR)	Persamaan-3 $RR = \frac{D - d_z}{D}$		0,5	Rekomendasi $\rightarrow RR \leq 2$
Thickness to diameter ratio (TDR)			t/D	Rekomendasi $\rightarrow t/D > 1\%$
Radius die	Persamaan-4 $R_d = 0,8 \sqrt{(D - d_p)t}$	mm	1,39	First drawing $\rightarrow$ aktual radius die (R_d) = 2
Radius die	Persamaan-5 $R_d = (6 \text{ to } 10)t$	mm	1,8 ~ 3,0	
Radius punch	Persamaan-6 $R_p = (3 \text{ to } 4)t$	mm	0,9 ~ 3,0	Rekomendasi $d = 6,3 \sim 100 \text{ mm} \rightarrow$ aktual $R_p = 1,03 ; 1,36 ; 1,606$
Clearance per side punch and die	Persamaan-7 $CL = 1,1 \text{ t sampai } 1,2 \text{ t}$	mm	0,3 ~ 0,4	Aktual clearance per side punch and die = $(d_d - d_p)/2 = 0,32$
	Persamaan-8 $C_L = t + k\sqrt{10t}$	mm	0,4	

Tabel 5. *Tonage drawing/Gaya drawing dan total drawing force/total gaya drawing*

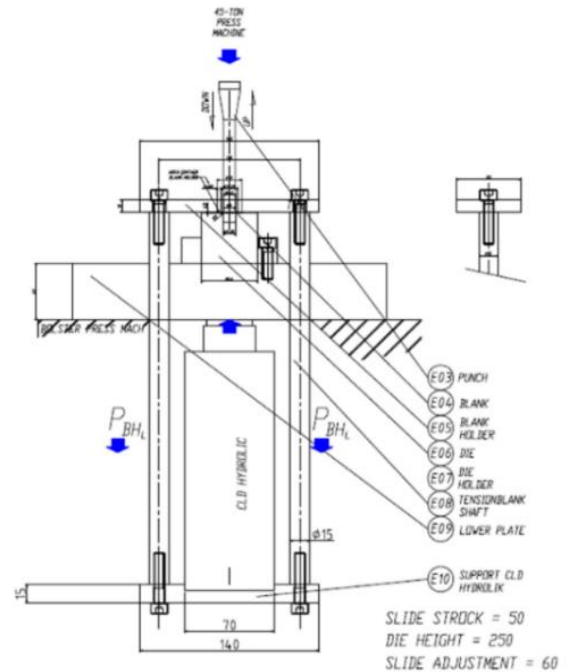
Parameter yang dicari	Rumusan	Satuan	Hasil	Keterangan
Cupping strain factor	Persamaan-9 $\eta_c = \frac{\frac{D}{d_p} + 1}{2}$		1,56	Pemilihan 45 Ton Press Machine dan speed 48 SPM
Drawing pressure / gaya drawing	Persamaan-10 $P_{DR} = A \sigma_y \eta_c \ln E$	N	1355	
	Persamaan-11 $P_{DR} = A \sigma_y \left(\frac{D}{d} - C \right)$	N	1774	
Total drawing force	Persamaan-12 $P_{T-DR} = P_{DR} + P_{BHF}$	N	1625 ~ 2365	Hubungan persamaan 10;11,14;15

Tabel 6. *Korelasi tekanan blank holder terhadap anti wrinkle Blank Holder Pressure (BHP)*

Parameter yang dicari	Rumusan	Satuan	Hasil	Keterangan
Anti wrinkle Blank holder presure (BHP) tekanan blank holder	Persamaan-13 $\rightarrow \sigma_{BHP} = 0,20 \sim 0,31 \text{ kgf/mm}^2$	MPa	2,0 ~ 3,04	Tahapan percobaan Tahapan percobaan BHP dilakukan pada $\rightarrow 0,17; 0,5; 0,8; 1,0; 1,3; 1,5; 1,7; 2,0; 2,18; 2,23 \text{ MPa}$
Blank holder force (BHF) gaya blank holder	Persamaan-14 $P_{BHF} = \sigma_{BHP} A$	N	270 ~ 418	Tahapan percobaan dilakukan pada $P_{BHF} (N) \rightarrow 23; 71; 105; 139; 172; 206; 240; 274; 301; 307$
Blank holder force (BHF) gaya blank holder	Persamaan-15 $P_{BHF} = \frac{P_{DR}}{3}$	N	452 ~ 591	

4.3 Analisa hasil percobaan

Dari desain *Die set deep drawing*, beberapa komponen yang mempengaruhi beban BHP (*Blank Holder Pressure*) dituangkan pada Gambar 5.



Gambar 5. *Distribusi BHP (Blank Holder Pressure)*

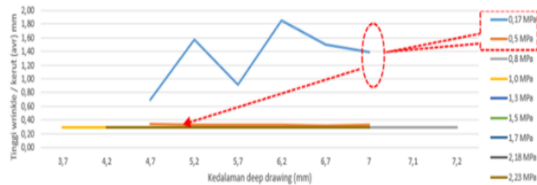
Dengan mengacu bagian yang mempengaruhi pembebanan pada proses *deep drawing* pada Gambar 5, dilakukan simulasi penambahan *pressure/tekanan* pada *hydraulic*. Dalam percobaan ini dilakukan sampai 10 tahapan dengan variasi BHP (*Blank Holder Pressure*) yang berbeda. Tahapan dilakukan untuk mengetahui kondisi *appearance* produk (*Good* atau *Crack*). Besaran simulasi BHP dilakukan pada $\sigma_{BHP} = 0,17 \text{ MPa}$ sampai $2,23 \text{ MPa}$ sehingga masuk dalam cakupan standar Anti wrinkle, dan ditetapkan sesuai Tabel 7 berikut:

Tabel 7. *Variasi BHP (Blank Holder Pressure) dan BHF (Blank Holder Force)*

Tahapan percobaan	Nama part	Berat (kg)	Anti wrinkle			
			σ_{BHP} = blank holder pressure / tekanan blank holder			P_{BHP} = blank holder force / gaya blank holder
			luas kontak $\rightarrow$ 137,6 mm2			
			MPa			
			Blank holder set + hydraulic	Penambahan pressure / tekanan	Total	N
1	Blank holder set	2,39			0,17	23
2	Blank holder set + hydraulic	7,26	0,5	0	0,5	7
3	Blank holder set + hydraulic + Increase pressure		0,5	0,2	0,8	10
4			0,5	0,5	1,0	14
5			0,5	0,7	1,3	17
6			0,5	1,0	1,5	20
7			0,5	1,2	1,7	24
8			0,5	1,5	2,0	27
9			0,5	1,7	2,18	29
10				0,5	1,7	2,23

Untuk hasil *cup/cangkir* yang dioptimalkan, beberapa hubungan disimpulkan untuk *deep drawing* dan tinggi *wrinkle/kerut* dari *blank holder force*.

4.3.1 Tren tinggi *wrinkle/kerut* dapat dijelaskan pada grafik dan tabel berikut



Gambar 6. Korelasi kedalaman *deep drawing*, radius punch = 1,0376, radius die = 2 mm, BHP dan tanpa pelumasan terhadap tinggi *wrinkle / kerut (avr)*

Beberapa percobaan dilakukan dan dirangkum dalam tabel berikut:

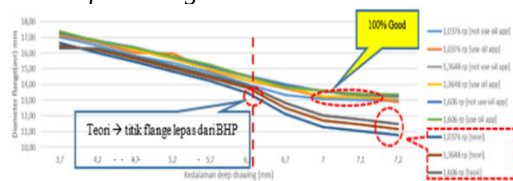
Tabel 8 Rata-rata tinggi *wrinkle/kerut*, deviasi standar dan batas atas dan bawah

Tinggi *wrinkle / kerut (avr)* dalam mm (meningkatkan tinggi berbanding lurus dengan meningkatnya *wrinkle*)

Aplikasi pelumasan	Radius punch	BHP	Kedalaman <i>deep drawing</i> (mm)										Rata-rata (X Double Bar)	Deviasi Standar	Batas Atas & Bawah		
			3,7	4,2	4,7	5,2	5,7	6,2	6,7	7	7,1	7,2			CL _{3-bar}		
			0,17 MPa	0,5 MPa	0,17 MPa	0,5 MPa	0,17 MPa	0,5 MPa	0,17 MPa	0,5 MPa	0,17 MPa	0,5 MPa			CL _{3-bar}	UCL _{3-bar}	LCL _{3-bar}
Tanpa Pelumas	1,0376	0,17 MPa			0,69	1,50	0,92	1,06	1,50	1,29			1,32	0,44	1,320	1,745	0,895
		0,5 MPa			0,35	0,34	0,33	0,33	0,32	0,33			0,33	0,01	0,330	0,339	0,321
Tanpa Pelumas	1,606	0,17 MPa	0,36	0,51	0,97	0,65	0,85	0,63	0,79	0,88	0,66	0,85	0,71	0,19	0,713	0,897	0,529
		0,5 MPa	0,36	0,36	0,52	0,32	0,37	0,82	0,43	0,35	0,50	0,48	0,45	0,15	0,450	0,593	0,306
Pelumas	1,606	0,17 MPa	0,36	0,48	1,78	0,62	1,71	1,00	0,92	0,70	0,59	0,80	0,89	0,49	0,895	1,370	0,419
		0,5 MPa	0,30	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,00	0,291	0,292	0,289

Dari Tabel 8 ditunjukkan bahwa *wrinkle/kerut* terjadi pada BHP 0,17 MPa dan 0,5 MPa pada radius punch 1,0376 mm dan radius punch 1,606 mm tidak menggunakan aplikasi pelumasan. Sedangkan untuk menggunakan aplikasi pelumas fenomena *wrinkle/kerut* terjadi pada radius punch 1,606 mm pada BHP 0,17 MPa. Hal ini terjadi karena *flange product / cap* lepas dari *blank holder* karena licin / koefisien gesek kecil akibat pelumasan.

4.3.2 Fenomena perubahan diameter *flange* berdasarkan BHP, radius punch, kedalaman *deep drawing*.



Gambar 7. Korelasi kedalaman *deep drawing*, radius punch, radius die = 2, BHP = 0,8 MPa dan aplikasi pelumasan terhadap diameter *flange (avr)*

Untuk optimalisasi diameter *flange*, hubungan *deep drawing* dan *flange diameter* dari *blank holder force blank holder* dapat diterangkan seperti tabel berikut:

Tabel 9. Fenomena perubahan diameter *flange*

BHP (MPa)	R _p (mm)	Kedalaman <i>deep drawing</i> (mm)	Keterangan
0,8 dan 1	1,0376 1,3648 1,606	3,7-5,7	Fenomena penurunan diameter <i>flange</i> berbanding lurus dengan jika dibandingkan perhitungan secara teori Deviasi diameter <i>flange</i> aktual lebih besar karena adanya pengaruh meningkatnya BHP pada area <i>flange</i> .
		6,2-7,2	kecenderungan diameter <i>flange</i> e makin besar karena pada aktual adanya pengaruh BHP, sementara pada perhitungan teori diameter <i>flange</i> sudah lepas dari pengaruh BHP.
		3,7-7,2	Membersarinya deviasi diameter <i>flange</i> pada aktual jika dibandingkan dengan perhitungan secara teori disebabkan karena meningkatnya pengaruh crack pada produk / cap berakibat aliran material saat proses <i>deep drawing</i> terhenti (gaya <i>drawing</i> tidak memanfaatkan untuk menarik material akibat crack).
1,3 1,5 1,7 2,0 2,23			

4.3.3 Korelasi kedalaman *deep drawing*, radius punch, radius die = 2, BHP (Blank Holder Pressure) dan aplikasi pelumasan terhadap kondisi *appearance* produk (*good or crack*)

Tabel 10. Kondisi *appearance* produk diurutkan berdasarkan BHP

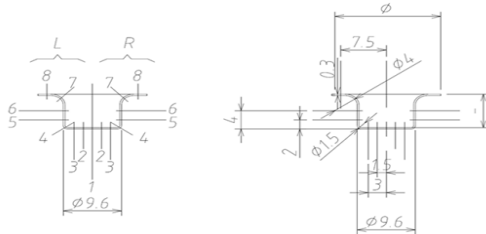
BHP	Radius punch dan aplikasi pelumas	Appearance (Good or Crack)									
		3,7	4,2	4,7	5,2	5,7	6,2	6,7	7	7,1	7,2
0,17 MPa	Kedalaman <i>deep drawing</i> (mm)										
	1,0376 rp (not use oil app)										
	1,0376 rp (use oil app)										
	1,3648 rp (not use oil app)										
	1,3648 rp (use oil app)										
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
0,5 MPa	Kedalaman <i>deep drawing</i> (mm)										
	1,0376 rp (not use oil app)										
	1,0376 rp (use oil app)										
	1,3648 rp (not use oil app)										
	1,3648 rp (use oil app)										
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
0,8 MPa	Kedalaman <i>deep drawing</i> (mm)										
	1,0376 rp (not use oil app)										
	1,0376 rp (use oil app)										
	1,3648 rp (not use oil app)										
	1,3648 rp (use oil app)										
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
1,0 MPa	Kedalaman <i>deep drawing</i> (mm)										
	1,0376 rp (not use oil app)										
	1,0376 rp (use oil app)										
	1,3648 rp (not use oil app)										
	1,3648 rp (use oil app)										
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
1,3 MPa	Kedalaman <i>deep drawing</i> (mm)										
	1,0376 rp (not use oil app)										
	1,0376 rp (use oil app)										
	1,3648 rp (not use oil app)										
	1,3648 rp (use oil app)										
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
1,5 MPa	Kedalaman <i>deep drawing</i> (mm)										
	1,0376 rp (not use oil app)										
	1,0376 rp (use oil app)										
	1,3648 rp (not use oil app)										
	1,3648 rp (use oil app)										
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
1,7 MPa	Kedalaman <i>deep drawing</i> (mm)										
	1,0376 rp (not use oil app)										
	1,0376 rp (use oil app)										
	1,3648 rp (not use oil app)										
	1,3648 rp (use oil app)										
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
2,0 MPa	Kedalaman <i>deep drawing</i> (mm)										
	1,0376 rp (not use oil app)										
	1,0376 rp (use oil app)										
	1,3648 rp (not use oil app)										
	1,3648 rp (use oil app)										
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
2,18 MPa	Kedalaman <i>deep drawing</i> (mm)										
	1,0376 rp (not use oil app)										
	1,0376 rp (use oil app)										
	1,3648 rp (not use oil app)										
	1,3648 rp (use oil app)										
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
2,23 MPa	Kedalaman <i>deep drawing</i> (mm)										
	1,0376 rp (not use oil app)										
	1,0376 rp (use oil app)										
	1,3648 rp (not use oil app)										
	1,3648 rp (use oil app)										
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
	1,606 rp (not use oil app)	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good

Dari Tabel 10 pada BHP 0,17 MPa; 0,5 MPa dan 0,8 MPa dengan variasi *radius punch* 1,0376 mm; 1,3648 mm dan 1,606 mm, baik menggunakan dan tidak menggunakan aplikasi pelumasan dan kedalaman *deep drawing* kondisi *appearance* produk/*cap* tidak muncul *crack* atau produk/*cap* dalam kondisi *good*. Kecenderungan *crack* muncul dan dapat dikelompokkan seperti Tabel 11.

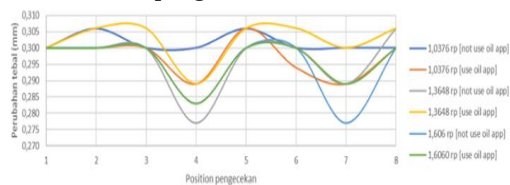
Tabel 11. Peluang *crack*/pecah berdasarkan korelasi *radius punch*, aplikasi pelumasan dan BHP

R _p (mm)	Tidak menggunakan pelumas	Meneggunakan pelumas
	BHP (MPa)	
1,0376	≥ 1	≥ 1,5
1,3648	≥ 1,3	≥ 1,7
1,6060	≥ 1,5	≥ 2

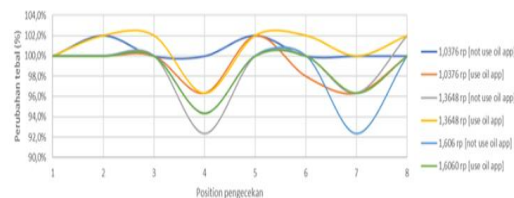
4.3.4 Korelasi kedalaman *deep drawing* (h=6,2 mm), *radius punch*, *radius die* = 2 mm, BHP dan aplikasi pelumasan terhadap ketebalan



Gambar 8. Posisi pengecekan ketebalan material



Gambar 9. Korelasi kedalaman *deep drawing* (h=6,2 mm), *radius punch*, *radius die* = 2 mm, BHP = 0,8 MPa dan aplikasi pelumasan terhadap ketebalan material (mm)



Gambar 10. Korelasi kedalaman *deep drawing* (h=6,2 mm), *radius punch*, *radius die* = 2 mm, BHP = 1,0 MPa dan aplikasi pelumasan terhadap ketebalan material (mm)

Penipisan ketebalan material pada posisi 4 dan 7 seperti pada Gambar 9 dan Gambar 10, dapat dituangkan pada Tabel 12 berikut.

Tabel 12. Penurunan ketebalan material di posisi 4 dan 7 pada kedalaman *deep drawing* (h=6,2 mm), *radius punch*, *radius die* = 2 mm, dan aplikasi pelumasan

BHP	Raadius punch	Penipisan ketebalan material (Posisi cek)	
		4	7
0,8 MPa Tanpa Pelumas	1,0376	0	0
	1,3648	0,023	0,011
	1,606	0,017	0,023
0,8 MPa Dengan Pelumas	1,0376	0,011	0,011
	1,3648	0,011	0
	1,606	0,017	0,011
1,0 MPa Tanpa Pelumas	1,0376	0,011	-0,006
	1,3648	0,017	0
	1,606	0,011	0
1,0 MPa Dengan Pelumas	1,0376	0,017	0,006
	1,3648	0,011	0
	1,606	0,017	0

Ketebalan material = 0,3 mm

Dari Tabel 12 didapat fenomena Penipisan ketebalan terjadi pada area *radius punch* dan dituangkan dalam Tabel 13 berikut.

Tabel 13. Penipisan ketebalan terjadi pada area *radius punch*

Area	BHP (MPa)	Tidak menggunakan pelumas	Menggunakan pelumas	Radius Punch [R _p] (mm)
Radius punch	0,8	ya	[X]	1,3648
				1,6060
	0,8	[X]	ya	1,0376
				1,3648
1	1	ya	ya	1,6060
				1,6060

Kecenderungan lainnya terjadi pada perubahan ketebalan lebih pada area *radius punch* jika dibandingkan pada area *radius die*.

KESIMPULAN

Untuk mencapai optimalisasi performa proses *deep drawing* terkait dengan efek pengaruh tekanan *blank holder*, pelumasan, *radius punch* dan *radius die* pada proses *cold working* yaitu pada suhu ruang dan korelasi hasil percobaan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Simulasi *Output solution* pada BHP 1 MPa *radius punch* 1,0376 mm, *speed punch* 1,33 mm/detik menunjukkan bahwa hasil *Output Solution Ansys (Equivalent (von Mises) Stress. Principal Stress, Stress Intensity)* lebih tinggi jika dibandingkan *Thru Stress* dan *True Plastic Stress*, sehingga peluang *crack* muncul dalam simulasi ini.
2. Faktor signifikan mengakibatkan *wrinkle*/kerut pada produk cup seperti ditunjukkan pada Tabel 8 terjadi pada:
 - BHP 0,17 MPa dan 0,5 MPa pada *radius punch* 1,0376 mm dan 1,606 mm tidak menggunakan aplikasi pelumas
 - BHP 0,17 MPa pada *radius punch* 1,606 mm menggunakan aplikasi pelumas.

3. Fenomena perubahan *diameter flange* kesimpulan terangkum dalam Tabel 9.
 4. Faktor signifikan mengakibatkan *crack*/pecah produk *cup* terjadi dengan meningkatnya BHP dimulai dari 1 MPa; 1,3MPa; 1,5 MPa; 1,7 MPa; 2,0 MPa; 2,18 MPa; 2,23; MPa, *radius punch* 1,0376 mm, 1,3648 mm, 1,606 mm, aplikasi tanpa pelumasan dan kedalaman *deep drawing* dari 3,7 sampai dengan 7,2 seperti ditunjukkan pada Tabel 10.
 5. Caranya mengatasi kegagalan produk *cup wrinkle*/kerut dan *crack* pada proses *deep drawing* yaitu:
Blank holder harus bekerja pada BHP 0,8 MPa dengan *radius punch* 1,0376 mm, 1,348 mm dan 1,606 baik menggunakan dan tidak menggunakan aplikasi pelumasan, seperti ditunjukkan pada Tabel 10.
 6. Dengan meningkatnya BHP dan kedalaman *deep drawing* kegagalan produk *cup* dapat dihindari dengan melakukan kombinasi variasi *radius punch* dan aplikasi pelumasan. Makin besar *radius punch* dan aplikasi pelumasan fenomena *crack* akan makin berkurang.
 7. Fenomena perubahan ketebalan proses *deep drawing* mengacu Gambar 13, Gambar 14 dan Tabel 12 dapat disimpulkan dimana:
 - Penipisan ketebalan terjadi pada area *radius punch* (posisi cek no.4) pada BHP 0,8 MPa tanpa aplikasi pelumasan dan *radius punch* 1,3648 mm dan 1,606 mm
 - Penipisan ketebalan terjadi pada area *radius punch* (posisi cek no.4) pada BHP 0,8 MPa dengan aplikasi pelumasan dan 1,0 MPa dengan aplikasi pelumas dan tanpa pelumas pada *radius punch* 1,0376 mm, 1,3648 mm dan 1,606 mm
 - Ketebalan pada area *radius die* (posisi cek no.7) sama dengan ketebalan *raw material* pada 1,0 MPa dengan aplikasi pelumas dan tanpa pelumas pada *radius punch* 1,3648 mm dan 1,606 mm.
- Drawing. 1996. doi: 10.6100/IR458460.
- [4] Z. chao Zhang, Y. chao Xu, and S. jian Yuan, "Analysis of thickness variation of reverse deep drawing of preformed 5A06 aluminum alloy cup under different temperatures," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 86, no. 1–4, pp. 521–529, 2016, doi: 10.1007/s00170-015-8179-7.
 - [5] T. S. Yang and R. F. Shyu, "The design of blank's initial shape in the near net-shape deep drawing of square cup," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 21, no. 10, pp. 1585–1592, 2007, doi: 10.1007/BF03177379.
 - [6] N. Arab and A. Javadimanesh, "Theoretical and Experimental Analysis of Deep Drawing Cylindrical Cup," *J. Miner. Mater. Charact. Eng.*, vol. 01, no. 06, pp. 336–342, 2013, doi: 10.4236/jmmce.2013.16051.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. K. Choubey, G. Agnihotri, and C. Sasikumar, "Numerical Validation of Experimental Result in Deep-Drawing," *Mater. Today Proc.*, vol. 2, no. 4–5, pp. 1951–1958, 2015, doi: 10.1016/j.matpr.2015.07.160.
- [2] G. C. M. Venkat, R., Janardhan, T.A. and Reddy, "Effect of Various Parameters on the Wrinkling In Deep Drawing Cylindrical Cups," *Int. J. Eng. Trends Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 53–58, 2012.
- [3] R. J. J. M. Sniekers, *Friction in Deep*