

ANALISIS DAN EKSPERIMEN *BLANK HOLDER GAP* MINIMUM PADA PROSES *RECTANGULAR CUP DEEP DRAWING*

Susila Candra¹, I Made Londen Batan², Wajan Berata³, Agus Sigit Pramono⁴

Teknik Manufaktur, Fakultas Teknik, Universitas Surabaya¹⁾, Teknik Mesin,
Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)^{2,3,4)},
Sukolilo, Surabaya, 60111, Jawa Timur

E-mail : susila_c@staff.ubaya.ac.id - susilac@yahoo.com¹, londbatan@me.its.ac.id²,
wayanb@me.its.ac.id³, pramono@me.its.ac.id⁴

ABSTRACT

This paper aims to investigate the magnitude of minimum blank holder gap to prevent wrinkles and cracks defects of the rectangular cup with T4 material Tin Plate CA. Punch-die dimensions are determined based on the standard tool designed. The methods of this research are an analytic, finite element (FE), and experimental approach, respectively. Each method in this study had been mutually compared to other methods. According to the research, minimum blank holder gap is recommended by 120% to 130% of the thickness of the initial material (about 0.24 ÷ 0.26 mm). By using the value of this gap, the height of wrinkles is very small, and the magnitude of the drawing force is still below the critical limit, so the product does not occur wrinkles and cracks.

Keywords : Blank Holder Gap, Rectangular Cup Product, Deep Drawing, Wrinkling, Cracking, Punch-Die Set, Drawing Force.

1. PENDAHULUAN

Pengerutan (*wrinkling*) dan pecah (*cracking*) adalah dua jenis cacat produk yang sering terjadi pada proses *deep drawing*. Salah satu cara pencegahan cacat tersebut dapat dilakukan dengan penetapan gaya *blank holder* secara tepat dimana dapat tergambar dari ketinggian *gap* antara *die* dan *blank holder*.

Penetapan besarnya parameter tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu dimensi produk, jenis material dan tebal material. Pada pembentukan dimensi produk mangkuk (*cup*) yang relatif dangkal memang terkadang tidak diperlukan *blank holder* (Ali Hassan Saleh, Ammer Khalaf Ali, 2015). Akan tetapi untuk produk yang relatif dalam dengan perbandingan *drawing ratio* sekitar 1,7 2, *blank holder* menjadi bagian komponen perkakas yang diperlukan. Ketebalan *blank sheet* juga menjadi faktor penting yang menjadi pertimbangan dalam penetapan *blank holder* (Tahir Altinbalik, Aysun Tonka, 2012).

Peran *blank holder* dalam mengatasi masalah *wrinkling* dapat tergambar dari ketinggian *gap*, sehingga besarnya *gap*

menjadi indikator penting untuk diperhatikan. Beberapa penelitian memberikan informasi bahwa *gap* optimal terjadi pada rentang harga yang sangat lebar. Penelitian yang dilakukan oleh Karem M, Younis et al menyarankan *gap* berkisar 200% dari ketebalan awal material pada proses *silindrical cup deep drawing*. Penelitian yang dilakukan Gavas juga menetapkan *gap* pada rentang antara 150% s.d 200% dari ketebalan material pada proses *square cup deep drawing* (M. Gavas, M. Izciler dan M. Gavas, M. Izciler). Sedangkan untuk proses *rectangular cup deep drawing* dipastikan membutuhkan penetapan nilai *gap* yang tidak sama dibanding terhadap pembentukan *cylindrical* dan *square cup*.

Penelitian yang dilakukan oleh Jirasak Srirat et al menjaga *gap* secara konstan dan berbeda nilainya antara di awal dan akhir posisi *punch stroke*. Perbedaan nilai *gap* di awal dan diakhir *punch stroke* berkisaran rentang 150% s.d 180% dari ketebalan awal material (*blank sheet*). Di awal *punch stoke*, *gap* dijaga secara konstan sebesar 180% dari ketebalan *blank sheet* dan 160 % di akhir *punch stroke*. Disamping itu *blank holder*

force berubah secara fleksibel dengan menggunakan kontrol *adaptive blank holder*.

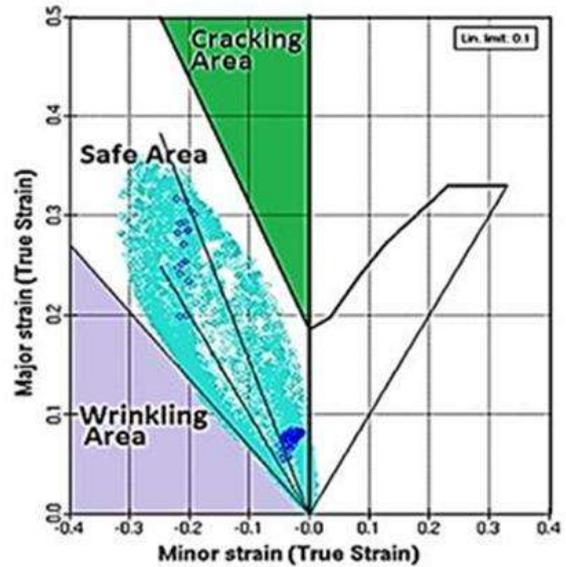
Simulasi *variable blank holder force* (VBHF) secara *adaptive* dilakukan juga oleh Z.Q.Sheng et al., dalam rangka menjaga *gap* agar lebih optimal. Nilai *gap* berkisar di dalam rentang angka 120% sampai dengan 180 % dari ketebalan material. Susila Candra et al juga membuat pemodelan matematis VBHF maksimal - minimal proses *cylindrical cup deep drawing* dengan acuan rentang *gap* minimal dan maksimal.

Berdasarkan beberapa informasi hasil penelitian sebelumnya, kemudian kajian pada *paper* ini akan diarahkan kepada pemodelan analitik sederhana, simulasi FE dan eksperimen tentang *blank holder gap* minimum pada proses *rectangular cup deep drawing*. Penelitian ini difokuskan pada proses pembentukan dengan bentuk *rectangular cup* dengan material kemas *Tin Plate T4 CA*.

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1. Blank Holder Gap

Wrinkling (pengerutan) disebut juga sebuah peristiwa *buckling* yang terjadi pada bagian *flange* produk, akibat dari tegangan tangensial yang terlalu besar jika dibanding dengan tegangan radialnya. Disamping itu peristiwa *wrinkling* dapat juga diindikasikan oleh terlalu besarnya perubahan bentuk material pada *flange* produk ke arah tangensial. Perubahan pembentukan di daerah *flange* dapat direpresentasikan oleh rasio perubahan bentuk atau rasio *major strain* (regangan radial - tarik) dan *minor strain* (regangan tangensial - tekan). Dari pendekatan tersebut kemudian kondisi aman pada proses pembentukan ini, mengikuti kaidah yang ada pada diagram *forming limit diagram* (FLD), seperti ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. *Forming Limit Diagram*.
(Schey, J.A, Lange, K)

Batasan regangan pembentukan (*major and minor strain ratio*) di daerah *flange* tersebut, selanjutnya digunakan sebagai syarat batas *blank holder gap*, tanpa *wrinkling* dan *cracking*. Regangan pembentukan mayor yang dinyatakan sebagai regangan radial ($\epsilon_1 = \epsilon_r$) di daerah *flange* produk dapat digunakan persamaan berikut :

$$\epsilon_1 = \ln(d_0/d_p) \dots \dots \dots (1)$$

Dimana d_0 adalah diameter awal *blank sheet* dan d_p adalah diameter *punch*. Jika produk berbentuk *rectangular cup*, d_0 dan d_p masing-masing adalah sebagai diameter pojok dari *blank sheet* dan *punch*. Jika proses *deep drawing* diasumsikan kondisinya tidak ada perubahan kearah sumbu tegak (sumbu z) maka tegangan tangensial dapat dianggap sama dengan tegangan kearah ketebalan ($\epsilon_2 = \epsilon_3$). Tegangan kearah ketebalan dapat didekati dengan persamaan :

$$\epsilon_2 = \ln(S_1/S_0) = \ln[Gap/S_0] \dots \dots \dots (2)$$

Dengan mengacu pada diagram *forming limit* di atas dan diasumsi rasio regangan mayor dan minor maksimum yaitu sebanding dengan harga *Limiting Drawing Ratio* bahan (LDR_{bahan}), maka penggabungan persamaan (1) dan (2) menjadi.

$$Gap = S_1 = S_0(d_0/d_p)^{LDR_{\text{bahan}}} \dots\dots\dots(3)$$

Pendekatan analitik lain dapat diuraikan berdasarkan teori dari *Levy - Misses*, dimana diperoleh persamaan diferensial pembentukan ke seluruh arah deformasi adalah sebagai berikut (Lange, K) :

$$d\varepsilon_1/\sigma_1' = d\varepsilon_2/\sigma_2' = d\varepsilon_3/\sigma_3' \dots\dots\dots(4)$$

Dari dekomposisi tensor tegangan dan asumsi kondisi *plane stress* maka persamaan 4 menjadi :

$$\sigma_1' - \frac{(2\sigma_1 - \sigma_3)}{3} \quad \sigma_2' - \frac{(-\sigma_1 - \sigma_3)}{3} \quad \text{dan} \quad \sigma_3' - \frac{(-\sigma_1 + 2\sigma_3)}{3} \dots\dots\dots(5)$$

Dengan menggabungkan persamaan (4) dan (5) selanjutnya persamaan menjadi :

$$d\varepsilon_2 = (\sigma_2'/\sigma_3')d\varepsilon_3 \dots\dots\dots(6)$$

Kemudian setelah persamaan (6) diintegrasikan akan menjadi :

$$\varepsilon_2 = ((-\sigma_1 - \sigma_3)/(-\sigma_1 + 2\sigma_3)) \varepsilon_3 \dots\dots\dots(7)$$

Jika ε_2 dibandingkan terhadap perubahan ketebalan atau *gap*, sehingga persamaan (7) akan menjadi :

$$\varepsilon_2 = \ln(s_1/s_0) = ((-\sigma_r - \sigma_t)/(-\sigma_r + 2\sigma_t)) \varepsilon_t \dots\dots\dots(8)$$

Persamaan (8) digunakan untuk memperkirakan ketebalan akhir *sheet metal* (s_1) sebagai representasi dari *gap* dengan persamaan sebagai berikut :

$$Gap = S_1 = S_0 \text{Exp}((-\sigma_r - \sigma_t)/(-\sigma_r + 2\sigma_t)) \varepsilon_t \dots\dots(9)$$

Dengan mengacu pada diagram *forming limit* maka rasio regangan mayor dan minor diasumsikan sebesar 2, sehingga $\varepsilon_r = (LDR_{\text{bahan}} = 1$, dimana LDR_{bahan} digunakan nilai secara umum untuk baja yaitu 2. Kemudian persamaan (9) dapat diubah menjadi :

$$Gap = S_0 \text{Exp} \left(\frac{(-2\sigma_r - 1,15\sigma_{\text{max.bahan}})}{(-\sigma_r + 2,3\sigma_{\text{max.bahan}})} \right) \dots\dots(10)$$

Dimana $\sigma_{\text{max.bahan}}$ adalah tegangan pembentukan maksimum yang disesuaikan dengan harga dari *Ultimate Tensile Strenght Material* (UTS) (Susila Candra). Sedangkan σ_r adalah tegangan radial yang dapat didekati dengan persamaan :

$$\sigma_r = UTS ((d_0/d_p)^{-0,7}) \dots\dots\dots(11)$$

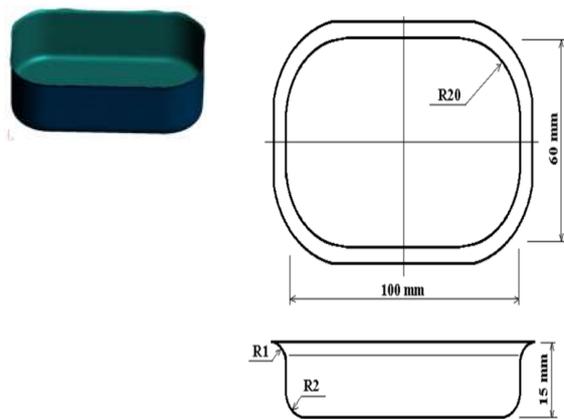
Persamaan (3) dan (10) selanjutnya dipergunakan sebagai acuan pendekatan analitik, simulasi FE dan eksperimen dalam penetapan *gap* minimum pada proses *deep drawing* produk berbentuk *cylindrical* dan *rectangular cup*.

3. METODE PENELITIAN

3.1. Set up Percobaan dan Simulasi *Finite Element*

3.1.1. Set Up Percobaan

Untuk menginvestigasi dan mengkonfirmasi *blank holder gap* minimum pembentukan produk *rectangular cup deep drawing* maka bentuk dan dimensi produk uji dapat ditetapkan seperti pada gambar 2. Sedangkan bentuk *punch-die* dan sifat mekanik material yang digunakan dalam percobaan ini dapat dilihat pada tabel 1 dan tabel 2.



Gambar 2. Rectangular Cup Deep Drawing.

Tabel 1. Dimensi Punch Die Set dan Blank Sheet

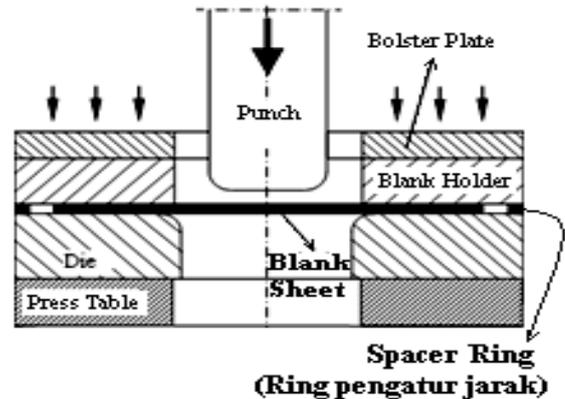
No	Dimensi	Nilai
1	d_p (diameter pojok dari blank sheet)	64 mm
2	Lebar dan panjang die	60 mm dan 100 mm
3	d_D (dia. Die) \rightarrow pojok die	40 mm
4	d_P (dia. Punch)	39,58 mm
5	2 x clearance	0,58 mm
6	s_0 (ketebalan awal blank sheet)	0,2 mm
7	r_d atau R_1 (edge die radius)	1 mm
8	r_p atau R_2 (edge punch radius)	2 mm
9	h (kedalaman rectangle cup)	16 mm

Tabel 2. Sifat Mekanik Material Tin Plate T4 CA-B

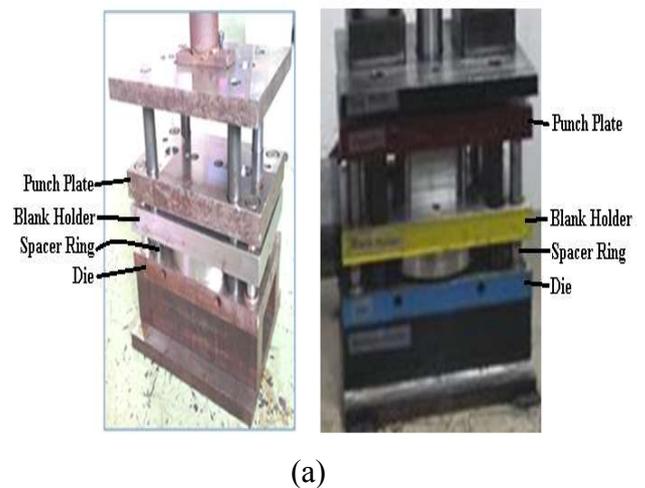
Mech. Properties		
No	Material Tin Plate T4 CA-B	Nilai
1	K	559 N/mm ²
2	Strain haedening (n)	0,176
3	UTS	355 N/mm ²
4	Yield Stress	232 N/mm ²
5	LDR _{bahan}	1,78 \approx 1,8

Skema punch-die set dan peletakan spacer ring sebagai ring pengatur jarak (gap) dapat diilustrasikan seperti gambar 3. Spacer ring dapat diganti sesuai keperluan gap yang akan diuji yaitu pada rentang 100% s.d 180

% dari ketebalan blank sheet. Sedangkan susunan lengkap punch-die set beserta spacer ring dan yang telah tersusun di atas mesin press ditunjukkan pada gambar 4.



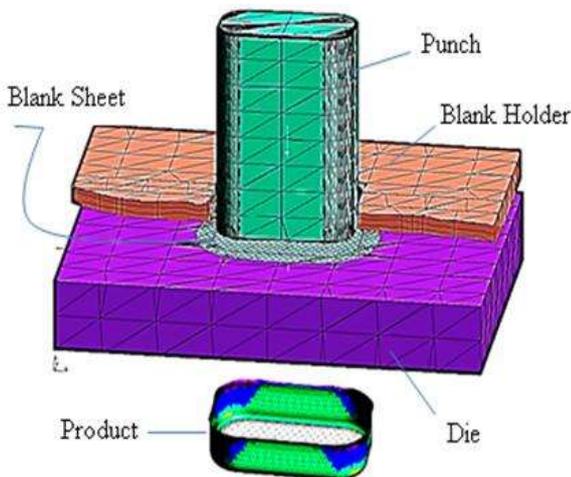
Gambar 3. Skema Punch – Die Set dan Posisi Spacer Ring.



Gambar 4. a. Punch-Die Set. b. Punch-Die Set di Letakkan Pada Mesin Press.

3.2. Set Up Simulasi Finite Element (FE)

Model FE pembentukan *rectangular cup product* yang akan disimulasikan dapat ditunjukkan pada gambar 5. Software simulasi FE menggunakan *Autoform. Ver3.1* dengan prinsip deformasi pembentukan *elastic - plastic* dan mengabaikan faktor *spring back*. Kurva *flow stress* pada model FE menggunakan formula *Swift* yang didalamnya mempertimbangkan *flow yield stress* dan *plastic stress*. Simulasi FE digunakan untuk prediksi kondisi deformasi produk dengan mengacu pada diagram *forming limit curve* (FLC) berdasarkan *gap* konstan pada rentang 100%-180% ketebalan *blank sheet*.



Gambar 5. Model FE.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Analitik, Simulasi FE dan Eksperimen pembuatan *Rectangular Cup Deep Drawing*

4.1.1. Pendekatan Analitik tentang *Blank Holder Gap - Rectangular Cup Deep Drawing*

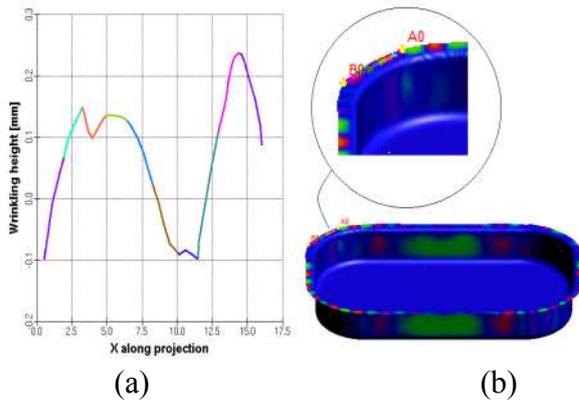
Dengan menggunakan persamaan (3) dan (10), nilai ketinggian *blank holder gap* minimum untuk proses *rectangular deep drawing* dengan material *Tin Plate T4 CA-B* diperoleh nilai masing-masing berkisar 0,24 mm dan 0,26 mm. Nilai *gap* tersebut setara dengan angka ketinggian *gap* yang berkisar antara 120% dan 130% dari ketebalan *blank sheet*.

Ketinggian *blank holder gap* minimum tersebut diperkirakan dapat menghindarkan terjadinya *wrinkling* dan penipisan yang berlebih. Rentang harga *blank holder gap* tersebut diharapkan produk terhindar dari peristiwa *wrinkling* dan *cracking*. Nilai ketinggian *gap* tersebut selanjutnya akan diuji dan diverifikasi melalui simulasi FE dan eksperimen. Simulasi FE dan eksperimen dilakukan pada ketinggian *gap* 180%, 160%, 130 %, 120% dan 100% dari ketebalan *blank sheet* (s_0) atau setara masing-masing dengan 0,38 mm, 0,34 mm, 0,26 mm, 0,24 mm dan 0,20 mm.

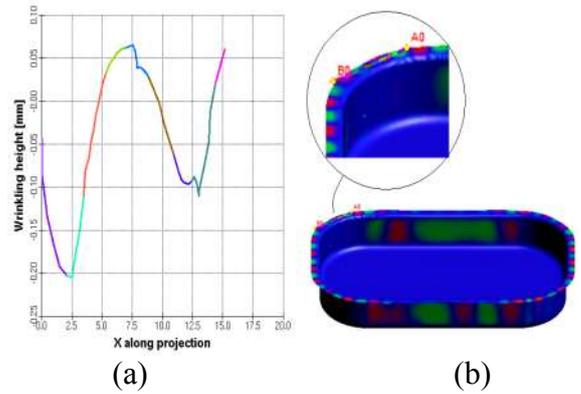
4.1.2. Simulasi FE - *Rectangular Cup Deep Drawing*

Simulasi dimulai dengan menetapkan *gap* minimum sebesar 160% dari ketebalan *blank sheet* atau setara dengan 0.34 mm. Hasil simulasi FE dapat ditunjukkan seperti gambar 6. Dengan penetapan *gap* tersebut akan dihasilkan ketinggian gelombang *wrinkle* sebesar 0,335 mm. Dari gambar *virtual* tersebut menunjukkan ketinggian gelombang *wrinkling* sedikit muncul di setiap sisi pojok dari produk *rectangular cup*. Hal ini diperkirakan karena tegangan dan regangan tangensial masih sedikit mendominasi serta belum bisa dieliminasi dengan ketinggian *gap* tersebut. Meskipun demikian ketinggian gelombang *wrinkling* yang dihasilkan tidak mengganggu pergerakan aliran material untuk masuk ke dalam *die* dan tidak berdampak terhadap terjadinya *cracking*.

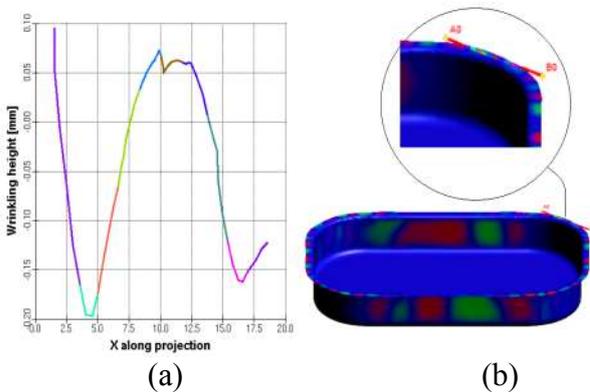
Pada gambar 7, simulasi FE dilanjutkan dengan menetapkan *gap* konstan sebesar 130 % dari ketebalan *blank sheet* atau sekitar 0,264 mm. Hasil gambar *virtual* pada *cross section* di sisi pojok dari *rectangular cup* menunjukkan ketinggian gelombang *wrinkle* sekitar 0,259 mm. Dari simulasi FE tersebut terlihat *wrinkling* dapat dihindari demikian juga dengan *cracking*.



Gambar 6.a. Ketinggian Gelombang *Wrinkle* Pada Penampang *Cross Section* Dengan Aplikasi *Gap* Sekitar 140 % s.d 180 % (rata-rata 160%) Ketebalan *Blank Sheet*.
 Gambar 6.b. Posisi *Cross Section* Di Bagian Pojok Produk.



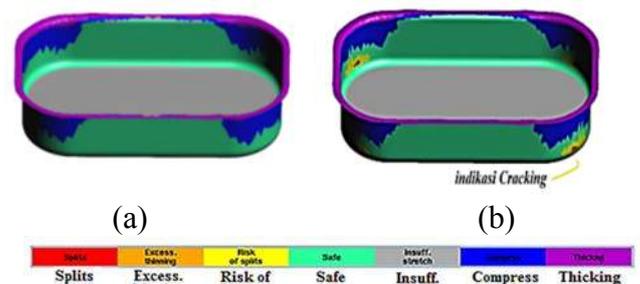
Gambar 8.a. Ketinggian Gelombang *Wrinkle* Pada Penampang *Cross Section* Dengan Aplikasi *Gap* Sekitar 120% Dari Ketebalan *Blank Sheet* (0.24 mm).
 Gambar 8.b. Posisi *cross section* dibagian pojok produk.



Gambar 7.a. Ketinggian Gelombang *Wrinkle* Pada Penampang *Cross Section* Dengan Aplikasi *Gap* Sekitar 130% Ketebalan *Blank Sheet* (0.264 mm).
 Gambar 7.b. Posisi *Cross Section* Di Bagian Pojok Produk.

Sedangkan gambar 8 merupakan hasil simulasi FE dengan penetapan *gap* sebesar 120 % dari ketebalan *blank sheet* atau sekitar 0,24 mm. Dengan pengaturan *gap* secara konstan dengan nilai tersebut akan dihasilkan gelombang *wrinkle* sebesar 0,252 mm dimana *wrinkling* cenderung tidak tampak dan *cracking* tidak terjadi.

Jika *gap* ditetapkan lebih kecil dari 120 % dihasilkan produk *cracking*. Hal ini diperkirakan karena tegangan dan regangan radial telah mencapai harga kritisnya. Kondisi mulainya terjadi *cracking* dengan menggunakan *gap* 100% dapat ditunjukkan pada gambar 9.b.



Gambar 9.a. Gambar *Virtual* dengan *gap* 120% dari ketebalan *blank sheet* – belum *cracking*.
 Gambar 9.b. Gambar *Virtual* dengan *gap* 100% dari ketebalan *blank sheet* – mulai *cracking*.

Dari simulasi di atas memberikan informasi bahwa kondisi ideal dalam penetapan *gap* adalah pada rentang 120% sampai dengan 130 % dari ketebalan *blank sheet*. Pada rentang *gap* ini diperkirakan akan menahan peningkatan harga tegangan dan regangan tangensial. Demikian juga karena masih ada celah *gap* yang cukup sehingga aliran material ke arah radial masih dapat berlangsung dengan normal dan tegangan radial masih di bawah tegangan maksimal bahan yang diijinkan. Oleh karenanya secara fisik terjadi kondisi kesetimbangan nilai regangan radial (regangan mayor) dan regangan tangensial (regangan minor).

4.2. Hasil Eksperimen dan Diskusi

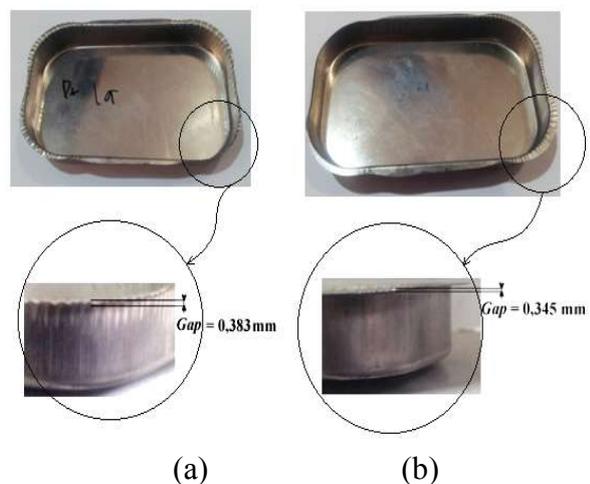
Hasil perhitungan analitis dan simulasi FE selanjutnya seluruh penetapan *gap* tersebut diverifikasi melalui percobaan dengan peralatan yang telah disetting seperti uraian di sub bab *set up* peralatan uji. Dari hasil percobaan menunjukkan bahwa peran penetapan *blank holder gap* memiliki peran yang sangat penting.

Gambar 10 menunjukkan hasil percobaan dengan penetapan *blank holder gap* sebesar 180% dan 160 % dari ketebalan *blank sheet* atau masing-masing setara dengan 0,38 mm dan 0,34 mm. Hasil percobaan pada penetapan *gap* tersebut menghasilkan produk dengan sedikit *wrinkling* ditunjukkan ketinggian gelombang *wrinkle* pada *flange* masing - masing sekitar 0,383 mm dan 0,345 mm. Kondisi gelombang *wrinkle* pada rentang penetapan *gap* ini tidak mengakibatkan produk *cracking*.

Jika proses diteruskan dan diselesaikan sampai akhir *punch stroke* kondisi yang terjadi aliran material masuk ke dalam *die* tidak terhambat. Kondisi *wrinkle* ini tidak mengganggu pergerakan aliran material ke dalam *die* dan produk tidak mengalami *cracking*, meskipun badan *cup product* terlihat ada sedikit bekas *wrinkle* berupa goresan sedikit di badan *cup*. Secara kualitas memang hal ini tidak membuat cacat *wrinkling* atau *cracking* tetapi kondisi proses khususnya dalam penetapan *gap* masih dapat dioptimalkan kembali. Hasil percobaan ini sesuai dengan hasil analitik dan simulasi FE yang telah diuraikan di sub bab sebelumnya.

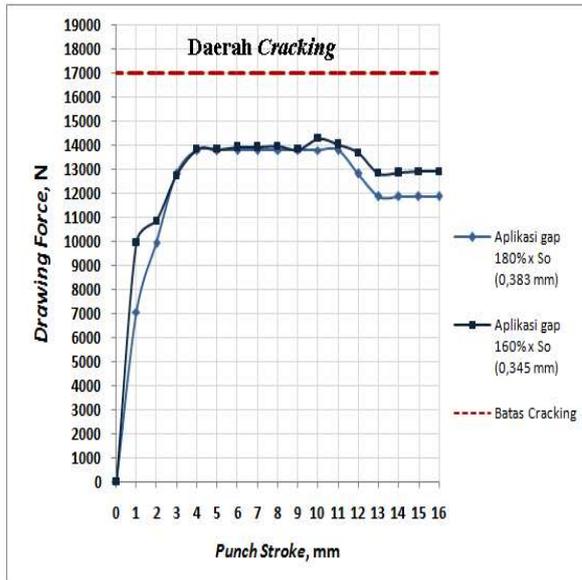
Aplikasi *gap* sebesar 0,38 mm akan menghasilkan *drawing force* (gaya *deep drawing*) cenderung meningkat jika *gap* dikecilkan menjadi 0,34 mm. Gambar 11 menunjukkan bahwa dengan hasil *drawing force* tersebut masih dibawah *drawing force* kritisnya yaitu sekitar 17000 N. Hal inilah yang dapat membuktikan secara kuantitatif bahwa produk tidak mengalami *cracking* atau aman dari terjadinya cacat *cracking*.

Dengan terdapatnya bekas goresan *wrinkling* di badan *rectangular cup*, maka penetapan *gap* pada rentang 140% sampai dengan 180% dari ketebalan *blank sheet* ini tidak disarankan menjadi referensi proses pembentukan *deep drawing*.



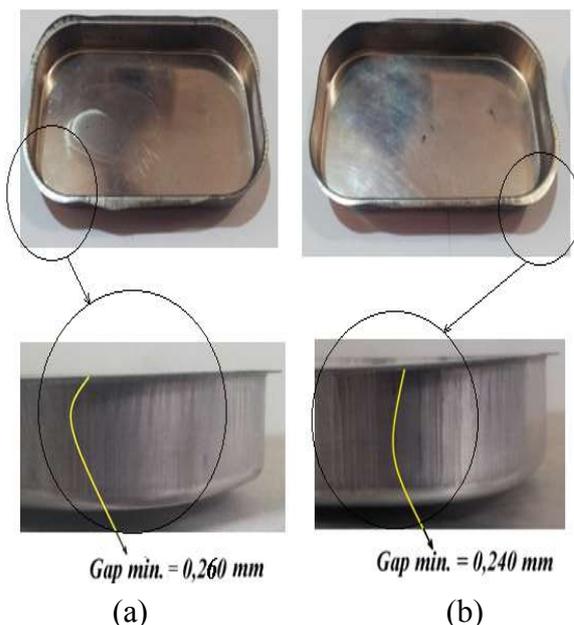
Gambar 10.a. Hasil Penetapan *Gap* 180% dari Ketebalan *Blank Sheet* 0,38 mm.

Gambar 8.b. Hasil penetapan *gap* 160% dari ketebalan *blank sheet* 0,34 mm.



Gambar 11. *Drawing Force* Tiap Posisi *Punch Stroke* Pada Penetapan *Gap* 180% dan 160% dari Ketebalan *Blank Sheet* (0,383 dan 0,345 Mm), Produk Sedikit atau Cenderung *Wrinkle*.

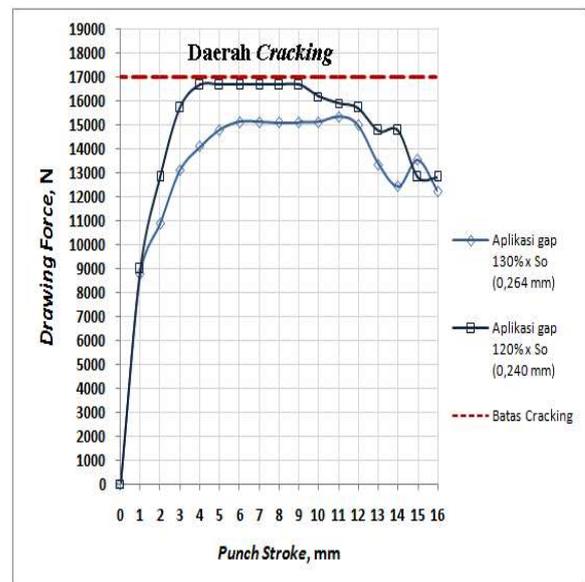
Percobaan berikutnya adalah mengurangi ketinggian *blank holder gap* dan ditetapkan sebesar 130 % dan 120 % dari ketebalan *blank sheet* atau setara dengan masing-masing sebesar 0,26 mm dan 0,24 mm. Hasil percobaan seperti ditunjukkan pada gambar 12.



Gambar 12.a. Hasil Penetapan *Gap* 130% dari Ketebalan *Blank Sheet* 0,26 mm.
 Gambar 12.b. Hasil Penetapan *Gap* 120% dari Ketebalan *Blank Sheet* 0,24 mm.

Hasil produk yang diperoleh dengan penetapan *blank holder gap* tersebut sesuai gambar 12 dipastikan tidak mengalami *wrinkling* dan *cracking*. Hasil percobaan lainnya seperti ditunjukkan gambar 13, dimana di setiap posisi *punch stroke* produk tidak mengalami *cracking*. Hal ini karena *drawing force* di setiap posisi *punch stroke* tidak melebihi harga kritisnya yaitu tidak melebihi 17000 N. Terjaganya *drawing force* ini menunjukkan dominasi tegangan radial atau tegangan tangensial dapat dihindari, dan secara fisik deformasi keseluruhan arah mengalami kesetimbangan atau rasio *major strain* dan *minor strain* tidak terlalu besar yaitu berkisar di harga 1.

Hasil penetapan *gap* ini membuktikan kesesuaiannya dengan hasil analitik dan simulasi FE serta dapat dipergunakan sebagai referensi proses untuk *rectangular cup deep drawing*.

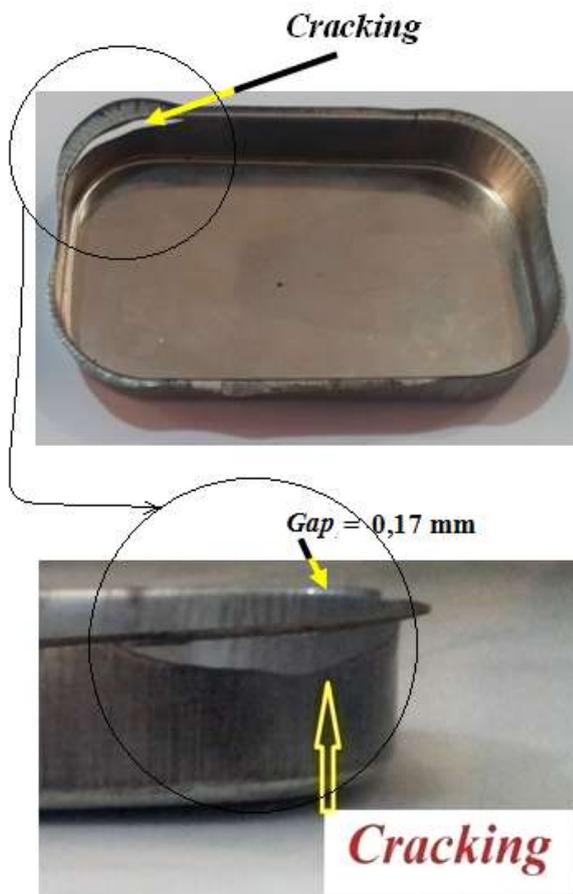


Gambar 13. *Drawing Force* Tiap Posisi *Punch Stroke* Pada Penetapan *Gap* 130% dan 120% dari Ketebalan *Blank Sheet* (0,26 mm dan 0,24 mm), Produk Tidak *Wrinkle* dan Tidak *Cracking*.

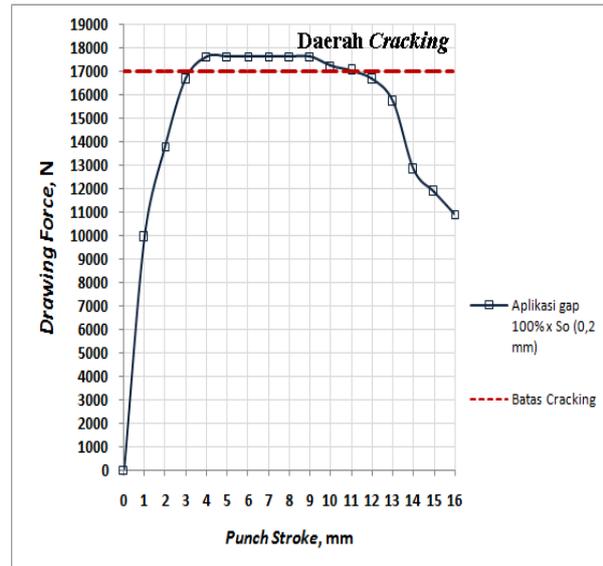
Percobaan dilanjutkan dengan penggunaan ketinggian *blank holder gap* sebesar 100% dari ketebalan *blank sheet* atau setara dengan 0,2 mm (sama dengan ketebalan *blank sheet*). Hasil percobaan dengan *gap* sebesar 0,2 mm dapat

ditunjukkan gambar 14, dimana produk mengalami *cracking* seperti ditunjukkan pada gambar 14. Pada gambar 15 memberikan informasi besarnya *drawing force* di atas nilai kritisnya bahan yaitu 17.000 N. Dari percobaan ini dipastikan bahwa produk mengalami *cracking* dengan penggunaan *gap* sebesar 0,2 mm. Hasil ini sejalan dan sesuai dengan hasil analitik dan simulasi FE.

Dengan penetapan *blank holder gap* yang sangat sempit membuat tegangan radial dan rasio regangan mayor - minor akan sangat besar. Hal ini material di daerah *flange* mengalami regangan radial atau mayor lebih dominan di banding regangan minor yang akhirnya membuat penipisan berlebihan dan *cracking* tidak bisa dihindari.



Gambar 14. Hasil Penetapan *Gap* 100% dari Ketebalan *Blank Sheet* 0,2 mm.



Gambar 15. *Drawing Force* Tiap Posisi *Punch Stroke* Pada Penetapan *Gap* 100% dari Ketebalan *Blank Sheet* 0,2 mm, Produk *Cracking*.

5. KESIMPULAN

Di dalam *paper* ini telah dihasilkan sebuah kajian analitik dan eksperimen terkait penetapan ketinggian *blank holder gap* minimum dengan tanpa cacat produk *wrinkling* dan *cracking*. Kesimpulan dari kajian ini adalah :

1. Kondisi paling kritis terjadi pada daerah pojok dari produk *rectangular cup*, karena di daerah tersebut terdapat dua kombinasi tegangan radial dan tegangan tangensial yang harus dijaga secara seimbang.
2. Penetapan *blank holder gap* akan mempengaruhi kondisi pembentukan, khususnya harga tegangan dan regangan pembentukan pada seluruh permukaan *rectangular cup*.
3. Kondisi mulai terjadinya gejala *cracking* dan *wrinkling*, secara fisik dapat dilihat dari perubahan *gap* sebagai indikasi dari perubahan tinggi gelombang *wrinkling*, dan harga *drawing force* sebagai indikasi dari besarnya penarikan material. Demikian juga, perubahan *gap* dapat dipergunakan untuk memastikan terjadinya tegangan tangensial yang berlebihan dan aliran material yang terlalu cepat pada arah alir tertentu.

4. Ketinggian *blank holder gap* antara 140 % sampai dengan 180 % akan menghasilkan produk sedikit *wrinkle*. Tetapi jika *blank holder* terlalu sempit yaitu sama dengan ketebalan *blank sheet* (100% dari ketebalan *blank sheet*), kecenderungan produk *rectangular cup* mengalami *cracking*.
5. Ketinggian *blank holder gap* yang disarankan untuk kondisi proses ini adalah berkisar antara 120 % sampai dengan 130% dari ketebalan *blank sheet* (sekitar 0,24 mm sampai dengan 0,26 mm).
6. Jika ketinggian *blank holder gap* konstan menjadi pilihan maka perlu kajian lanjutan dalam perancangan *punch die set* agar penggunaannya lebih efektif dan efisien.

Ucapan Terima Kasih

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknik Universitas Indonesia, khususnya kepada Prof Dr. Ir. Dedi Priadi, DEA., atas di perkenalkannya menggunakan *software AUTOFORM V1.3* untuk keperluan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali Hassan Saleh, Ammer Khalaf Ali, "Development technique for deep drawing without blank holder to produce circular cup of brass alloy", International Journal of Engineering & Technology, vol. 4 (1) pp.187-195, 2015.
- Jirasak Srirat, Koetsu Yamazaki and Satoshi Kitayama, "Optimization of Segmented Blank Holder Shape and Its Variable Blank Holder Gap in Deep-Drawing Process", Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 6, No. 4, pp. 420-431, 2012.
- Karem M, Younis, "Effect of Blank Holder Type on Deep Drawing Cups", The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering, Vol.13, No.1, pp. 106-119, 2013.
- Lange, K. Handbook of Metal Forming. USA: Mc-Graw Hill, USA. p. 20.1-20.66, 1985.
- M. Gavas, M. Izciler, "Effect of blank holder gap on deep drawing of square cups", Materials and Design Vol. 28 pp. 1641-1646, 2007.
- M. Gavas, M. Izciler, "Design and application of blank holder system with spiral spring in deep drawing of square cups", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 171, pp. 274-282, 2006.
- Schey, J.A. Introduction to manufacturing processes. Third Ed. Singapore: Mc-Graw Hill; 2000. p. 408-419.
- Susila Candra, I Made Londen Batan, Wajan Berata, Agus Sigit Pramono, "Modeling of Critical Blank Holder Force Based on a Gap Limit and Unbending Strain Energy in Deep Drawing Process", International Journal of Engineering and Technology, Vol 7 No 2 Apr-May, pp. 461-474, 2015.
- Susila Candra, I Made Londen Batan, Wajan Berata, Agus Sigit Pramono, "Analytical study and FEM simulation of the maximum varying blank holder force to prevent cracking on cylindrical cup deep drawing", Procedia CIRP Vol. 26, pp. 548 - 553, 2015.
- Tahir Altinbalik, Aysun Tonka, "Numerical and Experimental Study of Sheet Thickness Variation in Deep Drawing Processes", International Journal of Modern Manufacturing Technologies, ISSN 2067-3604, Vol. IV, No. 2 / 2012, pp. 9-10.

- Tommerup, S., Endelt, B., “Experimental Verification of a Deep Drawing Tool System for Adaptive Blank Holder Pressure Distribution”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212 pp. 2529-2540, 2012.
- Z.Q Seng, S. Jirathearanat, T. Altan, (2004), “Adaptive FEM simulation for prediction of variable blank holder force in conical cup drawing”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, pp. 487–494, 2004.
- Z.Q.Sheng, S.Jirathearanat,T. Altan, Adaptive FEM simulation for prediction of variable blank holder force in conical cup drawing, *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, Elsevier Ltd; 44: 487-494, 2004.