

APLIKASI TEKNOLOGI SINGLE POINT INCREMENTAL FORMING (SPIF) PADA PEMBENTUKAN HALF SPHERICAL-SHAPED PRODUCT

Aida Mahmudah

Tenaga Pengajar (Dosen)
Politeknik Manufaktur Bandung
Dept. Teknik Perancangan Manufaktur
aida@polman-bandung.ac.id

Sidik Permana

Tenaga Pengajar (Dosen)
Politeknik Manufaktur Bandung
Dept. Teknik Perancangan Manufaktur
sidik@polman-bandung.ac.id

Haris Setiawan

Tenaga Pengajar (Dosen)
Politeknik Manufaktur Bandung
Dept. Teknik Manufaktur
haris@polman-bandung.ac.id

M. Fauzan Arif

Politeknik Manufaktur Bandung
Dept. Teknik Perancangan Manufaktur
fauzan@gmail.com

In this study, the single point incremental forming (SPIF) method was applied to the half spherical-shaped vent cap products with 1mm thickness of aluminium. The dimensions of the blank before forming is 1x Ø225mm, and the final dimensions of the product are 69.50 x Ø225mm. Blank material is gripped to the fixture explicitly made according to the final product shape. The SPIF process uses a punch tool with a diameter of 12mm, so the process condition parameters that will be used are 0.5 mm step down, 35 rpm spindle speed, and 1000 mm/min feed. The lubrication used is VG 32 isocut cutting oil. The SPIF process for air cap products is carried out using two forming strategies, namely single-stage and multi-stage. In the single-stage formation strategy, the product experienced a tear at a depth of 18.5mm. Whereas in a multi-stage forming strategy, a product with three forming stages was successfully formed without tears, but experienced changes in dimensions and shape at the end of the final stage. Therefore the testing of SPIF process in a half-spherical shaped still requires development to get the planned shape and dimensions.

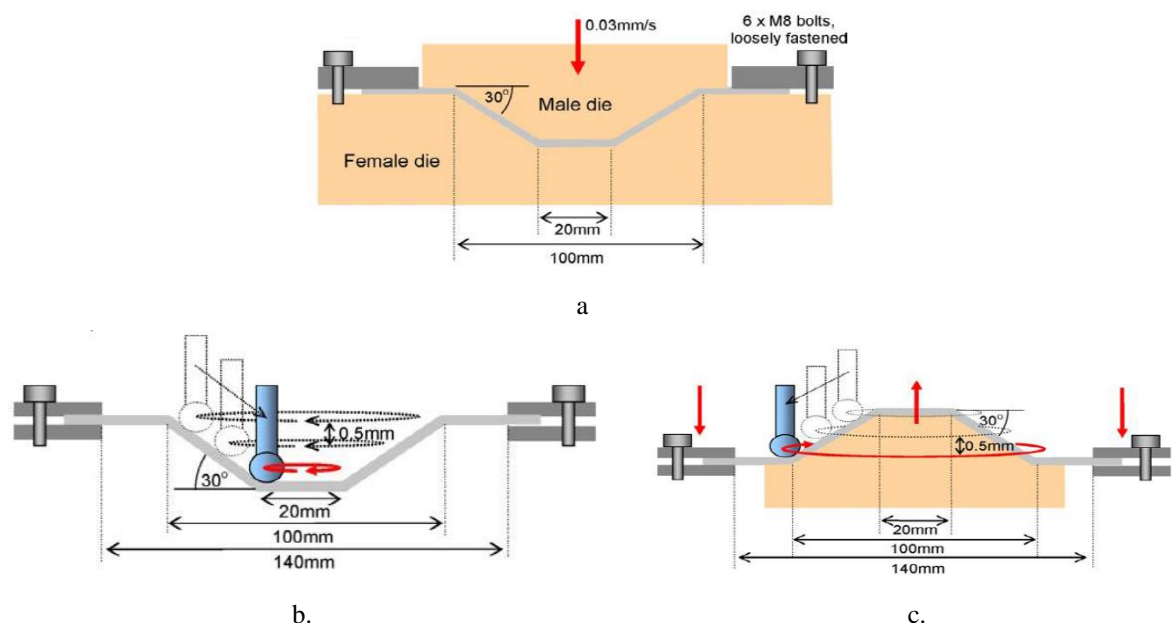
Keywords: Single Point Incremental Forming, Spherical-Shaped, Multi-Stage Strategy.

1. PENDAHULUAN

Industri pembuatan produk dari material logam lembaran dengan cara yang umum, yaitu dengan metode *stamping*, telah banyak dikembangkan dan diaplikasikan terutama pada pembuatan komponen otomotif. Hal ini disebabkan beberapa keuntungan yang ditawarkan oleh teknologi tersebut, yaitu *cycle time* yang cepat, akurasi yang baik, dan bisa diterapkan dengan bentuk yang kompleks [1]. Namun, metoda tersebut memerlukan alat khusus untuk membentuk produk yang diinginkan, alat tersebut dikenal dengan sebutan *press tool* yang komponen utamanya terdiri dari *male* dan *female die* [2] (Gambar 1a). Perancangan *press tool*, proses fabrikasi, dan *tooling set-up* membutuhkan waktu yang cukup lama dan biaya yang tidak murah. Akibatnya, dalam rencana pengadaan komponen tersebut, estimasi waktu dan biaya pembuatan *tool* harus menjadi salah satu hal utama yang dipertimbangkan [3].

Oleh karenanya, teknologi pembentukan material logam lembaran tanpa die (*dieless*) sangat potensial untuk dikembangkan agar dapat mereduksi biaya dan waktu pembuatan *press tool*. Teknologi tersebut diantaranya adalah teknologi pembentukan logam lembaran secara bertahap (*increment*) atau disebut dengan teknologi *incremental sheet metal forming* (ISMF). Alat yang diperlukan pada penerapan teknologi ini adalah *punch* pembentuk, pencekam material logam lembaran (*fixture*), mesin CNC dan program lintasan *punch yang* akan menggerakkan *punch* berdasarkan data CAD produk. Dengan metode ini, proses pembentukan lebih fleksibel, *set-up* untuk pembuatan produk dapat dilakukan dalam waktu yang lebih singkat, dan gaya pembentukan relatif kecil karena proses pembentukan terjadi secara bertahap [4]. Namun, kelemahan dari proses ini adalah pembentukan produk membutuhkan waktu yang lama, sulit untuk membentuk dinding vertikal dalam satu tahapan proses, dan perubahan ketebalan pada dinding produk sulit untuk dikendalikan sehingga distribusi ketebalan dinding menjadi tidak merata [5]. Karena waktu yang diperlukan untuk membuat sebuah produk dengan teknologi ISMF lebih lama dibandingkan dengan menggunakan teknologi *stamping*, maka teknologi ISMF sangat cocok dipakai untuk pembuatan purwarupa atau produksi komponen dengan jumlah terbatas. Selain itu, aplikasi dari teknologi ini dapat diterapkan pada produksi peralatan medis, arsitektur, dan produk yang berukuran besar namun dengan toleransi yang cukup longgar [4].

Proses pembuatan produk material logam lembaran dengan metoda ISMF belum populer diterapkan di industri manufaktur Indonesia karena proses manufaktur dalam volume besar mendominasi kegiatan produksi yang dilakukan. Walaupun, tidak sedikit pula yang melakukan produksi dalam skala kecil tetapi menerapkan teknologi *stamping* dengan konsekuensi harga produk menjadi lebih mahal. Di sisi lain, pengembangan produk dari material logam lembaran masih sangat jarang dilakukan baik oleh peneliti, maupun praktisi industri di Indonesia. Hal ini disebabkan salah satunya adalah sulitnya membuat berbagai model purwarupa dari produk yang akan diuji. Oleh karenanya, teknologi ISMF merupakan solusi yang sesuai untuk mengatasi permasalahan tersebut. Berdasarkan jumlah kontak pada saat pembentukan material, ISMF terbagi menjadi *Single Point Incremental Forming* (SPIF, Gambar 1b) dan *Two Point Incremental Forming* (TPIF, Gambar 1c). Pada SPIF, terdapat satu titik kontak selama proses pembentukan terjadi yaitu antara material dan *punch* pembentuk. Sedangkan pada TPIF terdapat dua titik kontak yaitu antara material dengan *punch* pembentuk dan antara material dengan landasan [2, 5]. Metode SPIF lebih banyak diaplikasikan karena metodenya yang sederhana. Metode SPIF sangat sesuai diterapkan pada produk dengan toleransi yang tidak terlalu ketat. Teknologi SPIF sebelumnya telah dikembangkan pada produk berbentuk piramida dari material aluminium dan SPCC270 dengan tebal 1mm dan menghasilkan data penyimpangan bentuk dari produk hasil proses SPIF [6].



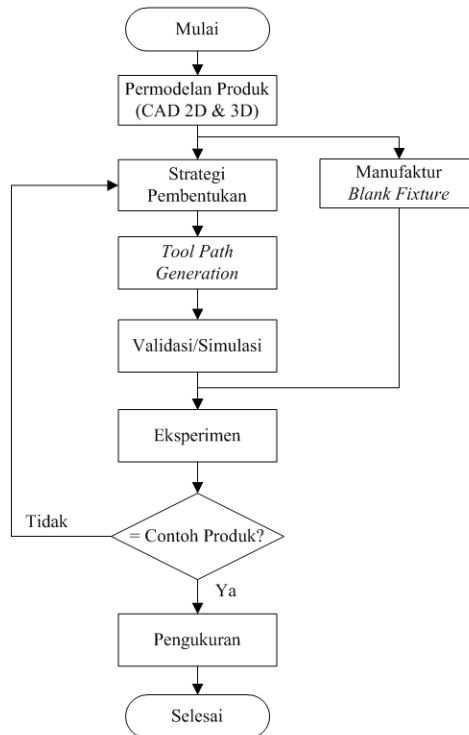
Gambar 1: Pembentukan material logam lembaran dengan metode (a). Stamping, (b). SPIF dan (c). TPIF [2].

Pada penelitian ini, Teknologi SPIF akan digunakan untuk membuat produk berbentuk setengah bola (*half spherical – shaped product*). Bentuk setengah bola ini adalah bentuk yang sangat ideal untuk mengkaji proses SPIF. Rasio antara kedalaman dan diameter bola sebesar 0,5 adalah rasio pertengahan yang cocok untuk pengembangan awal teknologi SPIF. Dinding bola yang berbentuk kurva lengkung akan memberikan gambaran distribusi perubahan ketebalan yang bervariasi. Bentuk setengah bola diperoleh melalui beberapa tahap pembentukan (*multi stage*). Bentuk pada tahap awal berbentuk kerucut yang kemudian dibentuk setengah bola pada tahap akhir. Penerapan metode ini menyebabkan bentuk sisa pada bagian ujung produk yang disebut kerucut residual [3, 7, 8]. Bentuk sisa ini tentunya mengurangi akurasi bentuk produk. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan teknologi SPIF untuk menghilangkan kerucut residual yang terjadi pada produk berbentuk setengah bola. Bentuk dan dimensi produk mengacu pada komponen *ventcap* yang merupakan bagian dari *airvent*.

2. METODE DAN BAHAN

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahap seperti yang ditunjukkan pada diagram alir Gambar 2, yang terdiri dari identifikasi dan permodelan produk, perencanaan strategi pembentukan, pembuatan lintasan pahat, validasi lintasan pahat melalui simulasi proses dengan menggunakan *software vericut – cimco edit*. Kemudian dilakukan eksperimen SPIF pada material yang dicekam pada *blank fixture* di mesin CNC.

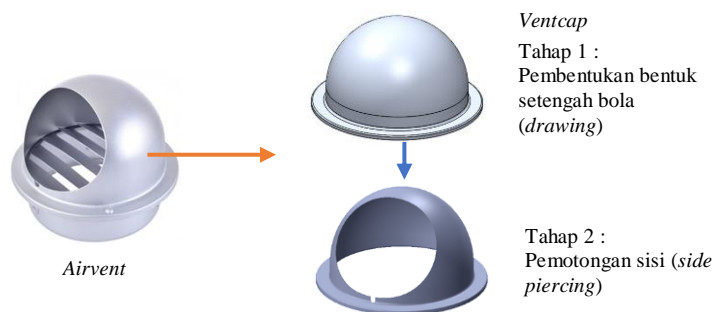
Pengukuran produk dilakukan pada produk yang berhasil dibentuk sesuai dengan contoh produk. Metode pengukuran yang digunakan adalah metode *3D scanning*, yang kemudian data CAD hasil pengukurannya akan dibandingkan dengan data CAD produk.



Gambar 2: Tahapan pengembangan teknologi SPIF.

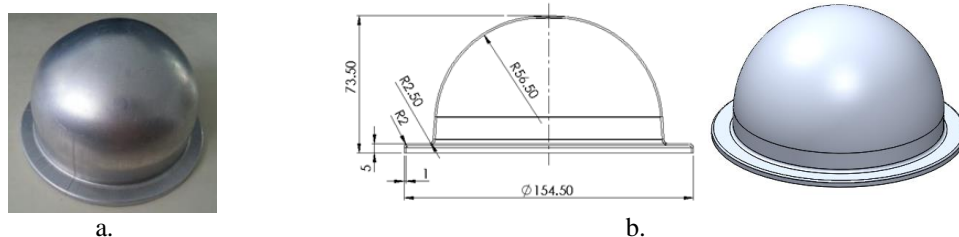
2.1 Identifikasi dan Permodelan Produk

Seperti yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya bahwa bentuk dan dimensi komponen yang akan dibuat mengadopsi bentuk dan dimensi produk *ventcap*. Produk *ventcap* ini adalah komponen bagian dari *airvent*, yaitu penutup *air diffuser* yang berfungsi untuk mengarahkan pembuangan udara, gas, atau uap air agar bergerak ke arah yang diinginkan. *Ventcap* jenis ini biasanya dibuat melalui beberapa tahapan proses yaitu proses *drawing* untuk membentuk bentuk setengah bola dan proses *side piercing* untuk membuat lubang pada salah satu dinding *ventcap*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Bentuk setengah bola pada tahap *drawing* inilah yang akan menjadi bentuk target proses SPIF yang akan dilakukan.



Gambar 3: Produk *airvent*.

Produk hasil proses *drawing* (Gambar 4a) diukur dengan menggunakan *3D scanner* untuk mendapatkan dimensi yang akan menjadi acuan pembuatan produk dengan menggunakan metode SPIF. Hasil pengukuran produk *ventcap* kemudian dimodelkan dalam model 2D dan 3D, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4b. Toleransi penyimpangan dimensi produk mengacu pada ketentuan toleransi umum kelas sedang, yaitu $\pm 0,1\text{mm}$ sampai dengan $\pm 0,3\text{mm}$, disesuaikan dengan dimensi yang terkait.



Gambar 4: Model 2D dan 3D produk *airvent*.

Pada proses pembentukan material logam lembaran, geometri material sebelum dibentuk – disebut dengan geometri *blank* - merupakan hal yang sangat penting karena mempengaruhi geometri akhir produk yang akan dibuat. Oleh karenanya, perencanaan geometri *blank* harus dilakukan sebaik mungkin. Secara umum, geometri *blank* dibedakan menjadi *free blank* dan *fix blank*. Dengan geometri *free blank*, produk yang dihasilkan dari proses pembentukan memerlukan tahapan pengerjaan lanjutan, yaitu pemotongan material, untuk memenuhi geometri luar produk. Proses lanjutan ini disebut proses *trimming*. Biasanya geometri *free blank* mengacu pada bentuk-bentuk geometri primitif seperti bentuk persegi, lingkaran, segi enam dan sebagainya. Sebaliknya, dengan geometri *fix blank*, produk yang dihasilkan dari proses pembentukan tidak memerlukan tahapan pengerjaan lanjutan karena geometri *blank* telah direncanakan dengan sangat teliti melalui perhitungan ataupun dengan bantuan *software engineering* pendukung. Pada penelitian ini, diterapkan geometri *free blank* yang berbentuk lingkaran dengan dimensi *blank* diperoleh dari perhitungan volume bentukan pada produk akhir dan pertimbangan area pencekaman material. Sehingga, diperoleh *blank* dengan dimensi Ø225mm. Proses *trimming* untuk memotong bagian tepi produk tidak menjadi fokus dari penelitian ini karena proses tersebut adalah proses lanjutan yang tidak menerapkan teknologi SPIF. Proses *trimming* ini dapat dengan mudah dilakukan dengan berbagai metode, salah satu contohnya dengan menggunakan teknologi *wire cutting*.

Seperti halnya bentuk dan dimensi produk, jenis material yang digunakan pun mengacu pada jenis material yang digunakan pada komponen *ventcap*. Oleh karena itu, dilakukan pengujian spektro untuk mengetahui jenis material *ventcap* tersebut. Hasil pengujian tersebut ditunjukkan pada Tabel 1 berikut ini. Dari data tersebut dapat diketahui bahwa aluminium yang digunakan pada produk *ventcap* adalah Al1100.

Tabel 1: Hasil Uji Spektro

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
0,14277	0,51823	0,13251	0,00383	0,00199	0,00255	0,01485
Cr	Ni	Pb	Sn	Na	Sb	Al
0,00111	0,00350	0,00095	0,00336	0,00690	0,00690	99,16060

2.2 Perencanaan Strategi Pembentukan dan Lintasan Pahat

Setelah permodelan produk, kemudian dilakukan perencanaan lintasan pahat, dalam penelitian ini di sebut lintasan *punch*, yang dikaitkan dengan strategi tahapan pembentukan dan divalidasi dalam simulasi pergerakan pahat. Data penting yang diperlukan pada pembentukan lintasan *punch* ini adalah data CAD produk, dimensi *punch* dan parameter proses SPIF yang akan diterapkan.

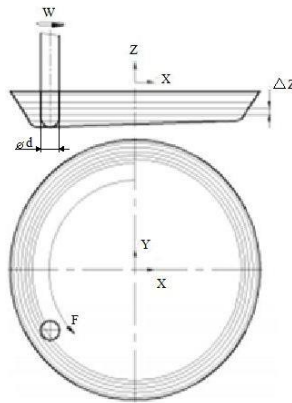
Pada penelitian ini, bentuk *punch* yang digunakan adalah bentuk *hemispherical end*. João [3] melakukan penelitian mengenai pengaruh diameter *punch* terhadap sifat mampu bentuk material pada proses SPIF. Hasil penelitiannya menyatakan bahwa sifat mampu bentuk material yang paling baik ditunjukkan pada proses SPIF yang menggunakan *punch* berdiameter 8 dan 12mm. Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakan *punch* berdiameter 12mm agar mendapatkan sifat mampu bentuk material yang terbaik dan waktu pengerjaan yang cukup cepat. Material yang digunakan untuk *punch* adalah VCN dengan panjang *punch* 140mm. Panjang ini ditentukan dengan mempertimbangkan area pencekaman *punch* pada mesin dan kedalaman produk yang akan dibentuk.

Lintasan *punch* dibuat pada *solidCAM* dengan langkah-langkah sebagai berikut: (1) menentukan area *surface* atau kontur model yang akan dibentuk, (2) menentukan dimensi *punch*, (3) mengisi parameter proses,

(4) memilih metoda pergerakan *tool*, (5) simulasi dan perbaikan lintasan punch jika perlu, (6) membuat G-code dengan *postprocessor* yang sesuai dengan mesin yang akan digunakan. Pada penelitian ini, parameter proses yang digunakan mengacu pada kondisi proses yang ditunjukkan pada Tabel 2 dan Gambar 5, dengan punch $\varnothing 12$ mm, maka *step down* 0,5 mm; *spindle speed* 35 rpm, dan *feed* 1000 mm/min. Metode pergerakan yang digunakan adalah *helical machining* yaitu pergerakan *punch* yang berotasi dan berevolusi kearah sumbu z terus menerus sehingga tidak menyisakan jejak lintasan pada produk [9].

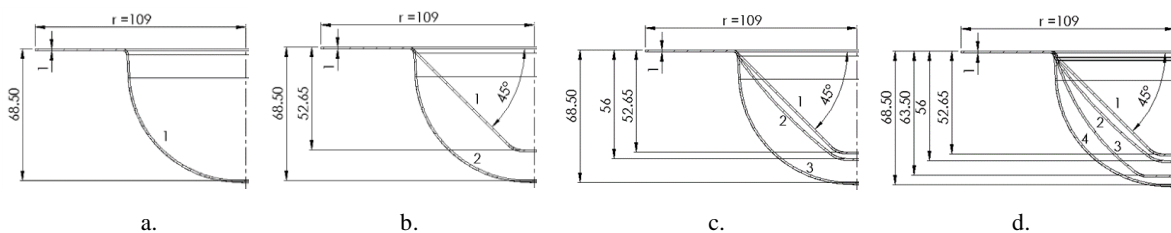
Tabel 2: Kondisi Proses [3]

<i>Tool Diameter</i> – \varnothing (mm)	8	12	20	30	50
<i>Step Down</i> – ΔZ (mm)	0,35	0,5	0,83	1,25	2,1
<i>Spindle Speed</i> – ω (rpm)	53	35	21	14	8
<i>Feed</i> – f (mm/min)	1000	1000	1000	1000	1000



Gambar 5: Deskripsi variable kondisi proses [3].

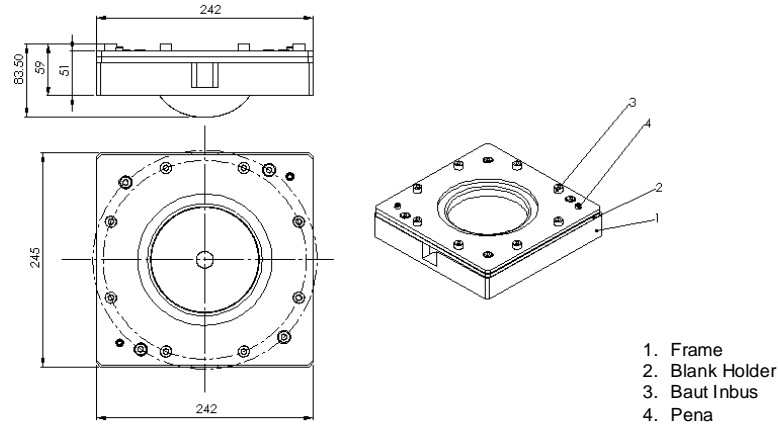
Pengujian proses SPIF produk *ventcap* dilakukan dengan menggunakan beberapa strategi pembentukan, yaitu *single-stage* dan *multi-stage*. Pada strategi *single-stage*, produk dibentuk dalam 1 tahapan pembentukan. Aplikasi strategi pembentukan *single-stage* didasarkan pada estimasi jumlah tahapan proses drawing untuk membentuk produk berbentuk setengah bola adalah satu kali proses, berdasarkan persamaan estimasi jumlah proses ($n = (h/d)/0,97$, dimana d adalah diameter produk dan h adalah tinggi produk = 0,5 diameter produk. Sedangkan pada strategi *multi-stage*, produk dibentuk dalam beberapa tahapan pembentukan [10] karena sifat mampu bentuk material akan berbeda jika pembentukan dilakukan melalui proses SPIF [11]. Pada pengujian strategi *multi stage* ini, dilakukan proses SPIF 2 tahap, 3 tahap dan 4 tahap. Bentuk yang paling mudah dilakukan dengan proses SPIF adalah bentuk dengan dinding miring. Malwad dkk. [12] menyebutkan bahwa distribusi ketebalan material sepanjang dinding produk akan seragam jika sudut pembentukan lebih kecil dari 65° , dan berdasarkan eksperimen yang dilakukan oleh Kopac dkk. [13] bahwa sudut yang paling optimal pada proses pembentukan SPIF adalah 45° . Oleh karena itu, dalam penelitian ini ditentukan sudut kemiringan dinding produk di tahap awal adalah 45° . Seluruh strategi pembentukan tersebut ditunjukkan pada Gambar 6 berikut ini.



Gambar 6: Strategi pembentukan (a). *single stage*, (b). *multi stage* – 2 tahap, (c). *multi stage* – 3 tahap, (d). *multi stage* – 4 tahap.

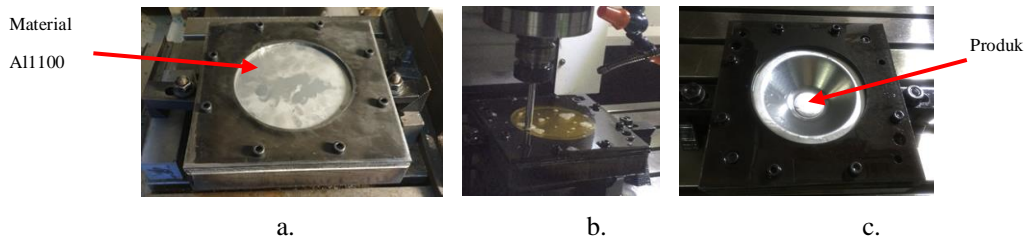
2.3 Pengujian Proses SPIF

Blank material dicekam pada *fixture* yang terpasang pada mesin CNC Vertikal 3-axis HYUNDAI WIA F510M yang memiliki ketelitian 1µm pada keadaan tidak terbebani. *Blank fixture* dibuat khusus sesuai bentuk produk yang direncanakan (Gambar 7). *Fixture* ini terdiri dari beberapa komponen yaitu *frame*, *blank holder*, baut inbus dan pena. Pelumas yang digunakan adalah jenis *cutting oil* tipe isocut VG 32.



Gambar 7: *Blank fixture*.

Tahapan proses pembuatan produk dengan menggunakan SPIF adalah (1) memasang *frame fixture* pada meja mesin CNC, (2) memposisikan *punch* pada titik simetri, (3) memasang material Al1100 pada *fixture*, (4) memilih program yang akan digunakan, (5) melakukan proses SPIF. Gambar 8 berikut ini menunjukkan proses SPIF pada produk berbentuk setengah bola.



Gambar 8: Proses *SPIF* (a). Sebelum proses *SPIF*, (b). Proses *SPIF*, dan (c). Setelah proses *SPIF*.

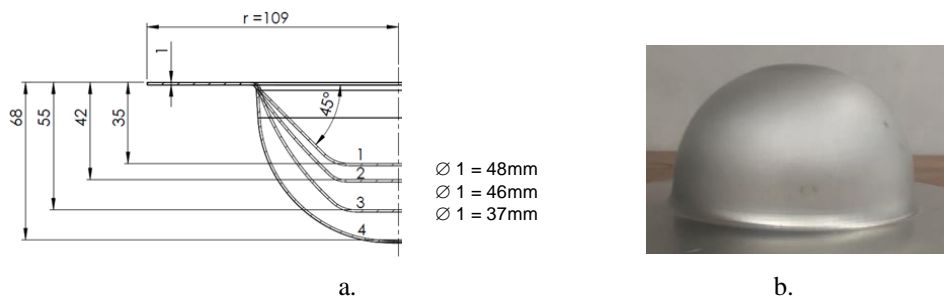
3. HASIL DAN DISKUSI

Produk yang dihasilkan dengan satu kali proses (*single-stage*) mengalami sobekan pada kedalaman langkah 18mm (Gambar 9a). Sedangkan dengan menerapkan strategi pembentukan *multi-stage* dua tahap, terjadi sobekan pada tahap ke dua, yaitu pada kedalaman 34 mm (Gambar 9b). Dengan strategi pembentukan *multi-stage* tiga tahap, bentuk produk sudah terbentuk cukup baik tanpa ada sobekan namun terjadi penipisan yang cukup besar pada dinding produk sehingga muncul lubang-lubang berukuran mikro. Selain itu, terdapat kelebihan bentuk kerucut residual pada ujung produk (Gambar 9c). Perbaikan kualitas terjadi pada produk yang dibuat dengan menerapkan strategi pembentukan *multi-stage* empat tahap, yaitu produk sudah tidak mengalami sobekan dan tidak terdapat lubang berukuran mikro pada dinding produk, namun kelebihan bentuk kerucut residual masih terdapat pada ujung produk (Gambar 9d).



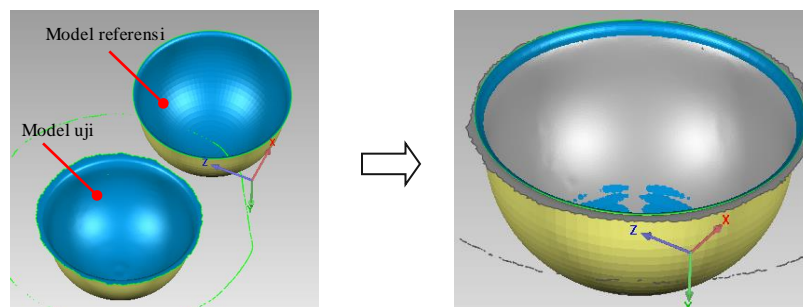
Gambar 9: Produk hasil: (a). *single stage*; (b). *multi-stage* 2 tahap; (c). *multi-stage* 3 tahap; (d). *multi-stage* 4 tahap.

Fenomena kerucut residual ini juga dilaporkan oleh Skjoedt dkk. [14] berdasarkan hasil uji coba proses SPIF *multi-stage* yang dilakukannya. Skjoedt dkk. Menerapkan pola gerakan pahat D-D-D-U (*Down-Down-Down-Up*) untuk meningkatkan sifat mampu bentuk material dan menghilangkan kerucut residual. Namun pada beberapa bentukan strategi tersebut tidak berhasil menghilangkan kerucut residual tersebut. Kerucut residual ini terjadi karena pembentukan material yang terkonsentrasi pada dinding produk di setiap tahapannya menyebabkan bentukan kerucut pada ujung produk semakin terdorong, sehingga menimbulkan bentukan berlebih yang mengurangi akurasi produk. Oleh karena ini, dalam penelitian ini, dilakukan uji coba untuk menghilangkan kerucut residual tersebut dan diperoleh hasil bahwa dimensi bentukan pada setiap tahapannya mempengaruhi hasil akhir bentukan produk. Dalam hal ini, dimensi alas kerucut pada setiap tahapannya harus semakin mengecil. Dalam uji coba sebelumnya, dimensi alas kerucut di tahap 1 = 12mm, tahap 2 = 10mm, dan tahap 3 = 28mm. Akibatnya, kerucut residual mulai terlihat jelas pada produk hasil proses tahap 3. Kemudian, dilakukan perbaikan dimensi produk di setiap tahapan proses, sehingga diperoleh dimensi alas kerucut pada tahap 1 = 48mm, tahap 2 = 46mm, dan tahap 3 = 37mm (Gambar 10a). Pola gerakan pahat yang digunakan adalah D-D-D-U (*Down-Down-Down-Down*). Hasil dari uji coba dengan dimensi alas kerucut yang semakin mengecil pada setiap tahapan proses tersebut menunjukkan kualitas produk yang semakin baik, yaitu kerucut residual tidak lagi terbentuk di ujung produk (Gambar 10b).



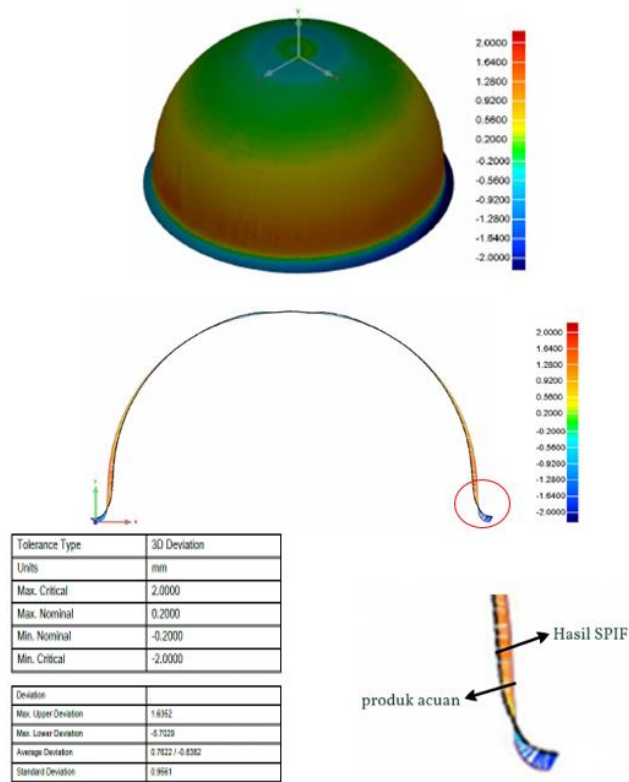
Gambar 10: Strategi pembentukan produk (a) dan produk hasil SPIF tanpa kerucut residual (b).

Tahap selanjutnya adalah pengukuran produk dengan metode 3D *scanning* untuk selanjutnya dilakukan komparasi model 3D hasil *scanning* (model uji) dengan model 3D CAD dari produk yang didisain (model referensi) dengan menggunakan piranti lunak *GeoMagic Qualify*. Komparasi ini dimaksudkan untuk mendapatkan data penyimpangan dimensi model uji terhadap model referensi. Metode komparasi ini juga pernah dilakukan oleh Ham dkk. [15] yang mengukur akurasi bentuk kerucut, kubah dan piramida. Pada tahap komparasi ini, yang pertama dilakukan adalah proses *alignment* yaitu penggabungan model referensi dengan model uji (Gambar 11). Metode yang digunakan adalah metode *best fit alignment*, yaitu menempelkan model uji dan model referensi, dengan nilai toleransi *alignment* sebesar 0,2 mm.

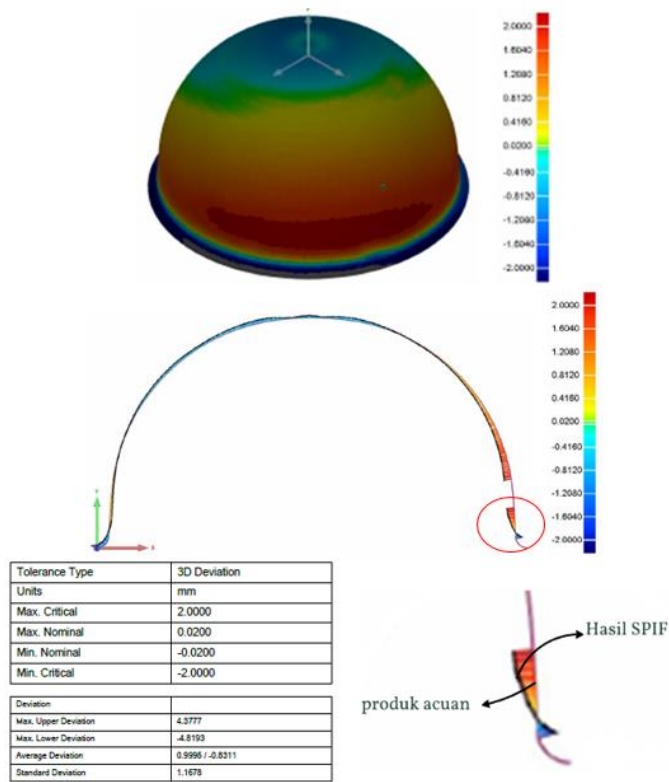


Gambar 11: Proses *alignment* model referensi dan model uji.

Komparasi dilakukan pada dua buah model uji dengan hasil seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11 dan 12. Penyimpangan rata-rata geometri pada model uji pertama adalah sebesar 0,76 mm ke arah luar geometri produk dan -0,83 mm ke arah dalam geometri produk (Gambar 12). Pada model uji kedua, penyimpangan rata-rata geometri sebesar 0,99 mm ke arah luar geometri produk dan -0,83 mm ke arah dalam geometri produk (Gambar 13).

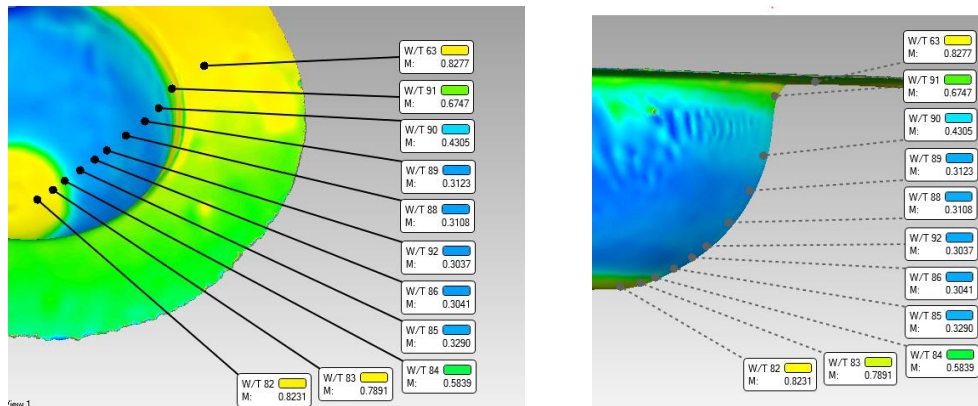


Gambar 12: Hasil uji komparasi model uji 1.

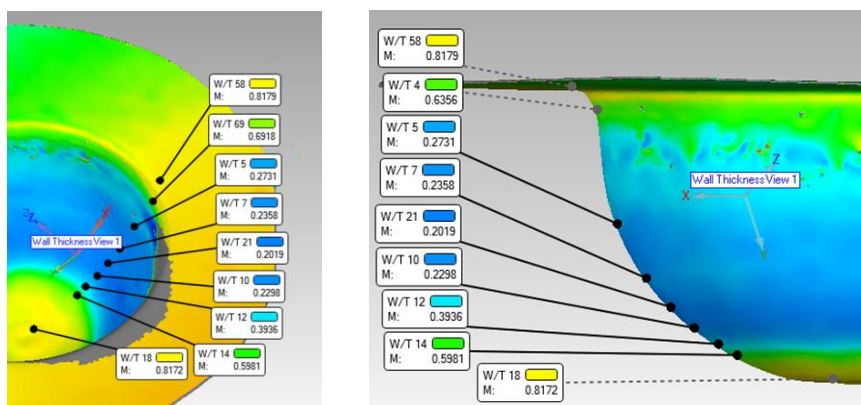


Gambar 13: Hasil uji komparasi model uji 2.

Selain itu, dilakukan pula pengukuran ketebalan pada dinding produk untuk mengetahui perubahan ketebalan material. Hasil pengukuran ketebalan kedua sampel uji ditunjukkan pada Gambar 14 dan 15. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa ketebalan produk semakin menipis menjadi 17% dari ketebalan awal sampai dengan kedalaman tertentu, dan menebal sampai ke arah dasar produk. Fenomena ini terjadi karena adanya efek *bending* dan *shearing* yang berbeda pada dinding produk yang dibentuk [16].



Gambar 14: Distribusi ketebalan dinding produk pada model uji 1.



Gambar 15: Distribusi ketebalan dinding produk pada model uji 2.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini, kesimpulan mengenai pengembangan proses metode SPIF *multistage* pada produk *berbentuk* setengah bola, sebagai berikut :

- Teknologi *Single Point Incremental Forming* (SPIF) dapat di aplikasikan dengan baik pada produk *berbentuk* setengah bola dengan menggunakan strategi *multi-stage* empat tahap. Pola pergerakan *punch* adalah D-D-D-D (*Down-Down-Down-Down*) yaitu pergerakan *punch* dari atas kebawah. Kelebihan bentuk kerucut residual dapat diatasi dengan merencanakan dimensi yang sesuai pada setiap tahapnya.
- Rata-rata deviasi untuk model uji 1 adalah sebesar 0,76 ke arah dalam dan -0,83 ke arah luar permukaan model referensi. Sedangkan rata-rata deviasi untuk model uji 2 adalah sebesar 0,99 ke arah dalam dan -0,83 ke arah luar permukaan model referensi.
- Perubahan ketebalan dari hasil eksperimen menunjukkan bahwa semakin kebawah pengurangan ketebalan dinding produk semakin bertambah, namun mendekati ujung produk pengurangan ketebalan mulai berkurang.
- Metode ini dapat dilakukan untuk purwarupa model produk *berbentuk* setengah bola atau untuk produksi pada kapasitas kecil dengan konsekuensi perubahan ketebalan dinding produk dengan geometri serupa mencapai 17% dari ketebalan awal.

5. PERNYATAAN TERIMAKASIH

Penelitian ini didanani oleh Hibah Program Penelitian Internal Polman Bandung Tahun 2019 Skim Penelitian Terapan Unggulan Kelompok Keahlian (PTUUK).

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] V. BOLJANOVIC, *Sheet Metal Forming Processes and Die Design*. 200 Madison Avenue, New York, New York 10016: Industrial Press Inc., 2004.
- [2] NIMBALKAR, D. H. and NANDEDKAR, V. M., " Review of Incremental Forming of Sheet Metal Components," *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 3, p. 13, Seot-Oct 2013 2013.
- [3] J. CÂMARA, "Single Point Incremental Forming," PhD, Instituto Superior Tecnico, Universidade Tecnica de Lisboa, 2009.
- [4] J. R. DUFLOU, A.-M. HABRAKEN, J. CAO, R. MALHOTRA, M. BAMBACH, D. ADAMS, *et al.*, "Single point incremental forming: state-of-the-art and prospects," *International Journal of Material Forming*, vol. 11, pp. 743-773, November 01 2017.
- [5] C. V. AJAY, C. BOOPATHI, P. KAVIN., "Incremental sheet metal forming (ISMF): A literature review," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2128, p. 030012, 2019.
- [6] U. WIKANDA, "Analisis Penyimpangan Dimensi Produk Hasil metoda Single point Incremental Forming Dengan Material SPCC 270 dan Aluminium Alloy," Diploma IV, Teknik Mesin dan Manufaktur, Politeknik Manufaktur Bandung, Bandung, 2016.
- [7] M. SKJØDT, "Single Point Incremental Forming " PhD Disertation, Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark, DTU Mechanical Engineering, 2008.
- [8] L. R. ZHOU, "Study of Sphere NC Sheet Metal Incremental Forming," *Advanced Materials Research*, vol. 239-242, pp. 1036-1039, 2011.
- [9] M. YANG, Z. YAO, Y. LI, P. LI, C. FENGKUI, and L. BAI, "Study on Thickness Thinning Ratio of the Forming Parts in Single Point Incremental Forming Process," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2018, pp. 1-11, 06/24 2018.
- [10] D. YOUNG and J. JESWIET, "Wall thickness variations in single-point incremental forming," *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part B-journal of Engineering Manufacture - PROC INST MECH ENG B-J ENG MA*, vol. 218, pp. 1453-1459, 11/01 2004.
- [11] B. A., S. SAMARJIT, M. K., R. N. VENKATA, and C. JIAN, "Formability and surface finish studies in single point incremental forming," *International Manufacturing Science and Engineering Conference*, vol. 133, p. 20, 2011.
- [12] D. S. MALWAD and V. M. NANDEDKAR, "Deformation Mechanism Analysis of Single Point Incremental Sheet Metal Forming," *Procedia Materials Science*, vol. 6, pp. 1505-1510, 2014/01/01/ 2014.
- [13] J. KOPAC and Z. KAMPUS, "Incremental sheet metal forming on CNC milling machine-tool," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 162-163, pp. 622-628, 2005/05/15/ 2005.
- [14] M. SKJOEDT, M. B. SILVA, P. A. F. MARTINS, and N. BAY, "Strategies and limits in multi-stage single-point incremental forming," *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 45, pp. 33-44, 2010/01/01 2010.
- [15] HAM, M. and JESWIET, J., "Dimensional Accuracy of Single Point Incremental Forming," *International Journal of Material Forming*, vol. 1, p. 1171, 2007.
- [16] T. CAO, B. LU, D. XU, H. ZHANG, J. CHEN, H. LONG., "An efficient method for thickness prediction in multi-pass incremental sheet forming," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 77, pp. 469-483, 03/01 2014.