

ANALISIS VARIASI *CORNER RADIUS* CETAKAN *BIPOLAR PLATE SERPENTINE* DAN BESAR TEKANAN PADA PROSES PEMBENTUKAN SUPERPLASTIS DENGAN METODE SIMULASI KOMPUTER

Andi Wahyu Setiawan^[1], Priyagung Hartono^[1], Ismi Choerotin^[1]

^[1]Jurusan Teknik Mesin Universitas Islam Malang

Jl. MT. Haryono 193 Malang 65144, Indonesia

Andiwahyusetiawan251998@gmail.com

ABSTRAK

Permasalahan kelangkaan energi merupakan permasalahan bersama yang harus di cari solusinya. Banyak peneliti di dunia memfokuskan risetnya pada sumber energi terbarukan. *Fuel cell* adalah salah satu teknologi yang dapat digunakan untuk mendapatkan energi terbarukan dengan cara mengonversi hidrogen dan oksigen menjadi energi listrik. *Bipolar plate* adalah komponen penting dari *fuel cell*, dimana *bipolar plate* menyumbang sekitar 80 % dan 45 % dari berat dan biaya pembuatan *fuel cell*. Pada proses fabrikasi *bipolar plate* sering terjadi ke tidak sesuaian pada dimensi, baik ukuran kedalaman saluran maupun cacat pada area *corner* hasil fabrikasi. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan desain cetakan *bipolar plate serpentine* dengan kedalaman saluran alir yang tinggi, dengan menggunakan metode simulasi komputer. Pada penelitian ini proses pembentukan superplastis akan di simulasikan dengan memvariasikan *corner radius* cetakan (0; 0,3; 0,5 dan 0,7 mm) dan besar tekanan (0,75; 1; 1,25 dan 1,5 MPa). Hasil simulasi menunjukkan bahwa semakin besar tekanan dan *corner radius* pada cetakan *bipolar plate serpentine*, maka kedalaman saluran alir *bipolar plate* akan semakin besar. Kedalaman saluran alir maksimum diperoleh pada hasil simulasi dengan *corner radius* cetakan 0,7 mm dan tekanan 1,5 MPa.

Kata Kunci: *fuel cell*; *bipolar plate serpentine*; saluran alir; *corner radius*.

PENDAHULUAN

Kelangkaan energi sudah menjadi permasalahan yang mengglobal. Hal ini dikarenakan pengeksploitasi energi utamanya bahan bakar fosil, tidak berbanding lurus dengan jumlah bahan bakar yang tersedia di alam. Semakin banyak pengeksploitasi maka akan semakin berkurang bahan bakar yang ada, dan perlu disadari bahwa terbentuknya kembali bahan bakar fosil memerlukan waktu yang sangat lama, oleh karena itu banyak peneliti di dunia yang menginvestigasi sumber-sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan, efisien, dan ekonomis.

Hal ini dapat diperoleh jika terdapat teknologi yang mendukung. Salah satu teknologi yang dapat digunakan adalah *fuel cell*, dimana *fuel cell* ini banyak dikembangkan karena nilai efisiensinya yang tinggi, tidak mengeluarkan polusi dan tidak berisik (Chang & Wu, 2015). *Bipolar plate* adalah salah satu komponen penting *fuel cell*, karena menjalankan berbagai fungsi penting yang menunjang sistem untuk beroperasi dengan benar (Hermann et al., 2005).

Bipolar plate memiliki fungsi, menghubungkan setiap sel secara elektrik, memasok gas reaktan ke anoda dan katoda, dan sebagai tempat dimana terjadi reaksi

kimia (Karimi et al., 2012). Proses pembuatan *bipolar plate* memerlukan biaya yang mahal dibandingkan dengan komponen lain pada *fuel cell* (Li & Sabir, 2005). Dalam segi biaya *bipolar plate* memerlukan sekitar 45% biaya dari pembuatan *fuel cell* (Hermann et al., 2005; Li & Sabir, 2005). Pada proses fabrikasi *bipolar plate*, sering terjadi ke tidak sesuaian pada dimensi akhir, baik kedalaman saluran maupun cacat yang terjadi pada daerah *corner bipolar plate* (Choirotin & Choiron, 2018; Liu et al., 2011). Permasalahan ini dapat diatasi dengan pemilihan desain cetakan dan proses fabrikasi yang tepat. *Bipolar plate* yang terbuat dari logam lebih banyak digunakan karena sifat mampu bentuk yang baik di bidang manufaktur, dan daya tahan terhadap guncangan dan getaran lebih baik dari pada material lain (Tawfik et al., 2007).

Proses pembentukan superplastis adalah salah satu metode yang digunakan untuk memproduksi logam *bipolar plate*. Proses pembentukan superplastis dilakukan dengan memberikan gas bertekanan pada satu sisi lembaran logam, proses ini memaksa lembaran logam untuk memenuhi bentuk internal dari cetakan yang dipanaskan (Jarrar et al., 2014). Penggunaan metode ini, memiliki keunggulan seperti, menghilangkan efek *springback*, tekanan yang digunakan rendah dan dapat digunakan untuk membuat benda kerja yang rumit (Chandra et al., 1999).

Salah satu aspek penting yang harus dimiliki *bipolar plate* untuk mendapatkan kinerja yang baik adalah parameter aspek rasio saluran alir. Penelitian yang dilakukan Hung et al., (2011) dan Manso et al., (2011) menyimpulkan bahwa performa dari *fuel cell* akan meningkat jika perbandingan aspek rasio (rasio dari kedalaman saluran dengan

lebar saluran) saluran alir pada *bipolar plate* bernilai tinggi. Hasil dari semua penelitian sebelumnya, aspek rasio dengan nilai tinggi telah diperoleh, namun untuk mendapatkan hasil aspek rasio dengan nilai tinggi, tampaknya diperlukan tekanan tinggi.

Penelitian terdahulu telah melakukan simulasi dan eksperimen pada pembentukan *bipolar plate* secara superplastis. Akan tetapi penelitian tersebut melakukan penelitiannya pada cetakan sederhana dan pola aliran *stright parallel bipolar plate*. *Bipolar plate* memiliki beberapa pola aliran dasar salah satunya tipe *serpentine*. Pada penelitian ini akan menyimulasikan fabrikasi *bipolar plate* pola aliran *serpentine* menggunakan *software* ANSYS LS-DYNA 18.1.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Benda kerja dan cetakan

Metode yang akan digunakan pada penelitian kali ini adalah simulasi, dengan bantuan *software* dari ANSYS LS-DYNA 18.1. Benda kerja adalah AA 5052 dengan dimensi panjang 124 mm, lebar 100 mm dan tebal 0,5 mm. Komposisi kimia dan *mechanical properties* dari material AA 5052 dapat dilihat pada tabel 1 dan 2.

Tabel 1. Komposisi Kimia AA 5052

Komponen	komposisi
Cu	<0,1
Cr	0,15-0,35
Mg	2,2-2,8
Mn	<0,1
Fe	<0,4
<i>Other</i>	<0,15
Zn	0,1
Si	<0,025
Al	RE

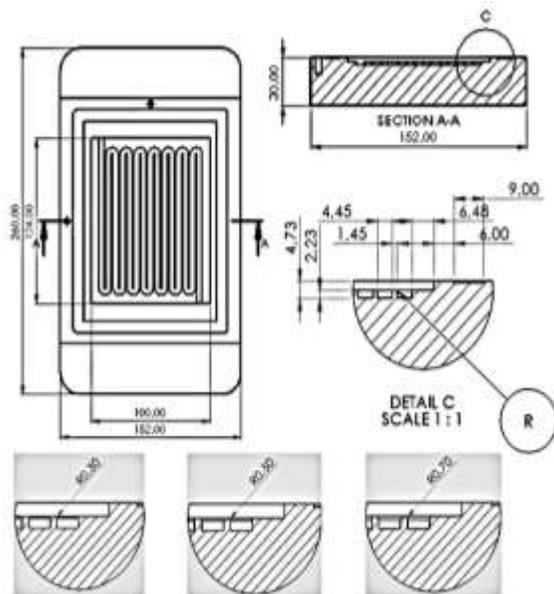
Sumber: A.S.M.I.H. Committee, ASM International, 1993

Tabel 2. *Mechanical Properties* AA 5052

Kekuatan Tarik (N/mm ²)	Kekuatan Luluh (N/mm ²)	Perpanjangan (%)	Kekuatan Lelah (N/mm ²)
260	215	10	125

Sumber: A.S.M.I.H. Committee, ASM International, 1993

Cetakan *bipolar plate* diasumsikan menggunakan material baja AISI-H13, dengan desain cetakan yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini.

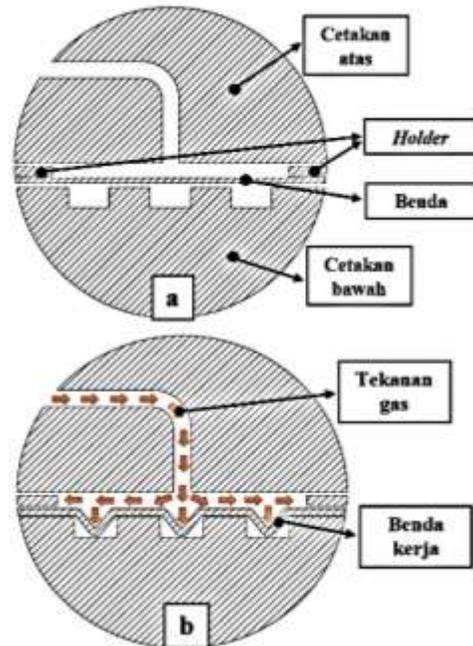


Gambar 1. Desain Cetakan *Bipolar plate serpentine*.

2.2 Pembentukan superplastis

pembentukan superplastis merupakan salah satu proses *sheet metal forming* yang memanfaatkan temperatur dari material untuk mempercepat terjadinya deformasi. Benda kerja yang telah di naikan temperturnya menjadi 450°C di tahan oleh *holder* pada cetakan bawah, kemudian di berikan tekanan dengan variasi (0,75 MPa; 1 MPa; 1,25 MPa dan 1,5 MPa), melalui lubang yang terdapat pada cetakan atas,

sehingga benda kerja memenuhi kontur cetakan bawah.



gambar 2. Skema Proses Pembentukan Superplastis. (a) Kondisi Awal Proses, (b) Kondisi Setelah Pembebanan.

2.3 Setting parameter simulasi

Benda kerja dan cetakan di *setting* sebagai tipe elemen *SHELL163*. Material properti dari benda kerja di asumsikan sebagai *sensitive rate power law* dengan mengikuti persamaan *power law* ketika mencapai suhu tinggi, persamaan tersebut adalah sebagai berikut (Altan *et al*,1983):

$$\sigma = k\varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \quad (1)$$

Dimana:

- σ = Tegangan alir
- ε = Regangan efektif
- $\dot{\varepsilon}$ = *Effective strain rate*
- k = *Material constant*
- n = *Strain-hardening exponent*
- m = *Strain rate sensitivity exponent*

Cetakan diasumsikan sebagai *rigid body*, dengan parameter *input* simulasi benda kerja dan cetakan di tunjukkan pada tabel 3.

Tabel 3. Parameter *Input* Simulasi

Cetakan	Densitas [kg/m ³]	7860
	Modulus elastisitas [GPa]	207
	Poisson Ratio	0,3
Benda kerja	Densitas [kg/m ³]	2599,52
	Modulus elastisitas [GPa]	16,87
	Konstanta material [MPa]	44,33
	Strain rate sensitivity exponent	0,28

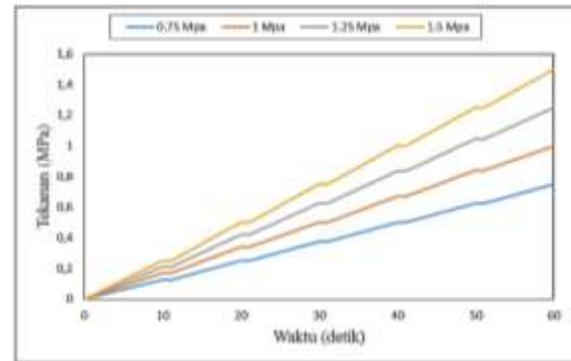
HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses pengambilan data dilakukan dengan melakukan simulasi pada ANSYS LS-DYNA 18.1. Variasi yang digunakan adalah variasi tekanan dan variasi *corner radius* cetakan, untuk mendapatkan kedalaman maksimum dari saluran alir *bipolar plate serpentine*. Jumlah saluran yang terdapat pada *bipolar plate serpentine* ada 15 saluran, sehingga diambil nilai maksimum, nilai minimum dan rata-rata dari jumlah saluran tersebut. Nilai ini disajikan pada tabel 4.

Tabel 4. Hasil Simulasi Kedalaman Saluran Alir pada Variasi Tekanan dan Variasi *Corner Radius* Cetakan

Tekanan (Mpa)		Jari-jari (mm)			
		0	0,3	0,5	0,7
0,75	Maksimal (mm)	0,758	0,974	1,043	1,105
	Minimal (mm)	0,712	0,933	0,958	1,026
	Rata-rata (mm)	0,729	0,954	0,999	1,076
1	Maksimal (mm)	0,924	1,172	1,223	1,357
	Minimal (mm)	0,869	1,088	1,112	1,214
	Rata-rata (mm)	0,888	1,14	1,169	1,283
1,25	Maksimal (mm)	1,09	1,407	1,461	1,507
	Minimal (mm)	1,003	1,269	1,262	1,412
	Rata-rata (mm)	1,045	1,339	1,341	1,439
1,5	Maksimal (mm)	1,253	1,642	1,572	1,693
	Minimal (mm)	1,138	1,449	1,406	1,567
	Rata-rata (mm)	1,183	1,545	1,496	1,604

Parameter *input* simulasi tekanan terhadap waktu pembentukan pada tekanan (0,75 MPa; 1 MPa; 1,25 MPa dan 1,5 MPa) dideskripsikan pada gambar 3.



Gambar 3. Parameter *Input* Simulasi Tekanan dan Waktu dari Pembentukan Superplastis pada Tekanan 0,75 MPa; 1 MPa; 1,25 MPa dan 1,5 MPa Hasil Simulasi ANSYS LS-DYNA 18.1.

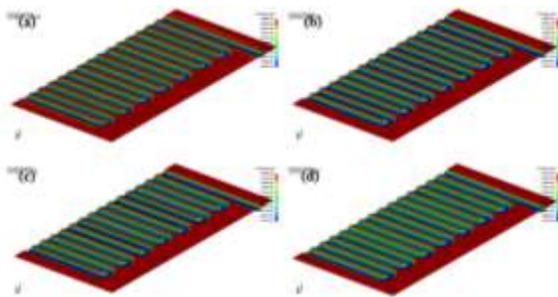
Tekanan dibagi menjadi enam step dimana tekanan maksimum yang divariasikan diperoleh setelah 60 detik. Gambar 4 menunjukkan hasil *meshing* dari software ANSYS LS-DYNA 18.1 dari benda kerja, pada bagian (a) menunjukkan sebelum diberikan tekanan dan bagian (b) menunjukkan deformasi yang terjadi.



Gambar 4. Hasil *Meshing* Software ANSYS LS-DYNA 18.1 (a) Kondisi Sebelum Pembebanan, (b) Setelah Pembebanan

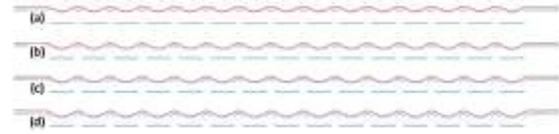
Gambar 5 menunjukkan hasil simulasi pada tekanan konstan 0,75 MPa. *Bipolar plate* dipotong pada area tengah dan dilakukan pengukuran kedalaman saluran alir di sepanjang area penampang. Hasil simulasi tanpa adanya *corner radius* ($R=0$ mm) ditunjukkan pada bagian gambar (a), dengan kedalaman maksimum 0,758 mm dan 0,729 mm kedalaman saluran alir rata-rata *bipolar plate*. Gambar bagian (b) menunjukkan hasil simulasi pada *corner radius* 0,3 mm, dengan 0,974 mm sebagai kedalaman maksimum dan 0,954 mm sebagai rata-rata kedalamannya.

Corner radius 0,5 mm ditampilkan pada bagian gambar (c) dengan kedalaman maksimum mencapai 1,043 mm dan kedalaman saluran rata-rata 0,999 mm. Gambar bagian (d) mendeskripsikan hasil simulasi dengan *corner radius* 0,7 mm, dengan kedalaman maksimum 1,105 mm dan 1,076 mm sebagai kedalaman rata-ratanya.



Gambar 5. Hasil Simulasi *Bipolar plate* (*Y-axis displacement plot*) pada Tekanan Konstan 0,75 MPa (a) Tanpa *Corner Radius* Cetakan ($R = 0$ mm), (b) *Corner Radius* 0,3 mm, (c) *Corner Radius* 0,5 mm dan (d) *Corner Radius* 0,7 mm

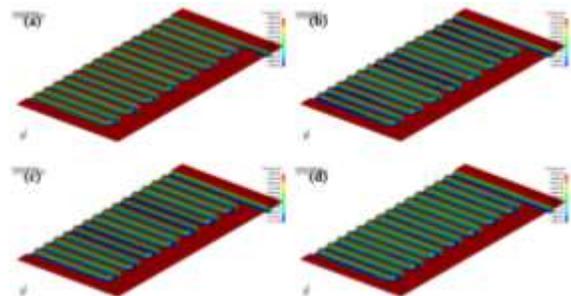
Keseluruhan hasil percobaan (kedalaman saluran) simulasi pada tekanan konstan 0,75 MPa dan beberapa perbedaan *corner radius* cetakan ditunjukkan pada gambar 6.



Gambar 6. Hasil Perbedaan Tampilan Penampang Kedalaman Saluran Alir pada Tekanan Konstan 0.75 MPa (a) $R = 0$ mm, (b) $R = 0.3$ mm, (c) $R = 0.5$ mm dan (d) $R = 0.7$ mm

Bagian gambar (a) merupakan hasil simulasi tanpa adanya *corner radius* cetakan ($R=0$ mm). Hasil simulasi pada bagian gambar (b) menunjukkan keseluruhan penampang dengan *corner radius* cetakan 0,3 mm. Gambar bagian (c) menunjukkan hasil simulasi pada *corner radius* cetakan 0,5 mm dan *corner radius* cetakan 0,7 mm ditunjukkan pada gambar bagian (d).

Hasil simulasi pada tekanan konstan (1 MPa) dengan variasi *corner radius* cetakan (0 mm; 0,3 mm; 0,5 mm dan 0,7 mm) ditunjukkan pada gambar 7. Keseluruhan hasil simulasi (kedalaman saluran) pada tekanan konstan 1 MPa dan beberapa perbedaan *corner radius* cetakan ditunjukkan pada gambar 8.

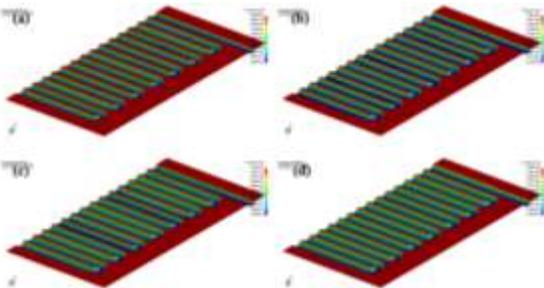


Gambar 7. Hasil Simulasi *Bipolar plate* (*Y-axis displacement plot*) pada Tekanan Konstan 1 Mpa (a) Tanpa *Corner Radius* Cetakan ($R = 0$ mm), (b) *Corner Radius* 0,3 mm, (c) *Corner Radius* 0,5 mm dan (d) *Corner Radius* 0,7 mm



Gambar 8. Hasil Perbedaan Tampilan Penampang Kedalaman Saluran Alir pada Tekanan Konstan 1 MPa (a) $R = 0$ mm, (b) $R = 0.3$ mm, (c) $R = 0.5$ mm dan (d) $R = 0.7$ mm

Variasi *corner radius* cetakan pada tekanan konstan (1,25 MPa) dideskripsikan pada gambar 9. Gambar 10 mendeskripsikan keseluruhan hasil percobaan (kedalaman saluran) simulasi pada tekanan konstan 1,25 MPa dan beberapa perbedaan *corner radius* cetakan.

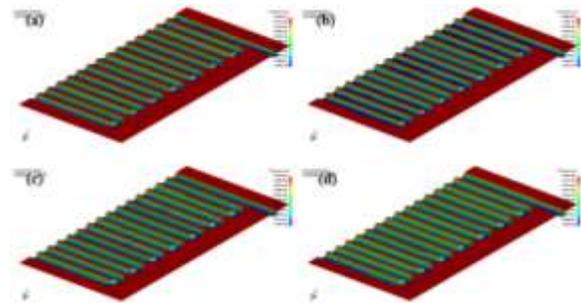


Gambar 9. Hasil Simulasi *Bipolar plate* (*Y-axis displacement plot*) pada Tekanan Konstan 1,25 MPa (a) Tanpa *Corner Radius* Cetakan ($R = 0$ mm), (b) *Corner Radius* 0,3 mm, (c) *Corner Radius* 0,5 mm dan (d) *Corner Radius* 0,7 mm



Gambar 10. Hasil Perbedaan Tampilan Penampang Kedalaman Saluran Alir pada Tekanan Konstan 1.25 MPa (a) $R = 0$ mm, (b) $R = 0.3$ mm, (c) $R = 0.5$ mm dan (d) $R = 0.7$ mm.

Hasil simulasi pada tekanan konstan (1,5 MPa) dengan variasi *corner radius* cetakan ditunjukkan pada gambar 11, pada gambar 12 mendeskripsikan hasil simulasi (kedalaman saluran) keseluruhan pada tekanan konstan 1,5 MPa dan beberapa perbedaan *corner radius* cetakan.

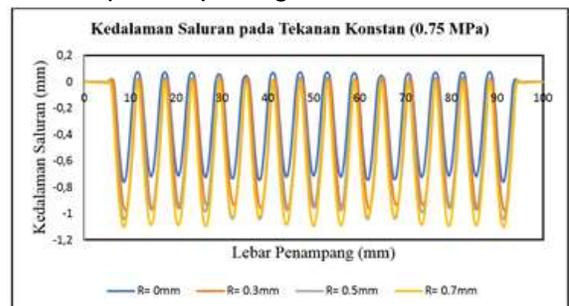


Gambar 11. Hasil Simulasi *Bipolar plate* (*Y-axis displacement plot*) pada Tekanan Konstan 1,5 MPa (a) Tanpa *Corner Radius* Cetakan ($R = 0$ mm), (b) *Corner Radius* 0,3 mm, (c) *Corner Radius* 0,5 mm dan (d) *Corner Radius* 0,7 mm



Gambar 12. Hasil Perbedaan Tampilan Penampang Kedalaman Saluran Alir pada Tekanan Konstan 1.5 MPa (a) $R = 0$ mm, (b) $R = 0.3$ mm, (c) $R = 0.5$ mm dan (d) $R = 0.7$ mm.

Hasil simulasi dengan variasi *corner radius* cetakan (0 mm; 0,3 mm; 0,5 mm dan 0,7 mm) pada tekanan konstan (0,75 MPa) di plot pada satu grafik untuk dibandingkan, dan dideskripsikan pada gambar 13.

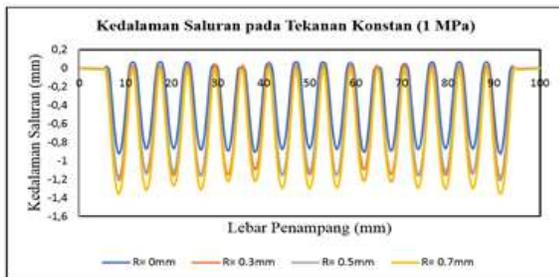


Gambar 13. Grafik Hasil Simulasi Kedalaman Saluran pada Tekanan Pembentukan Konstan 0,75 MPa.

Gambar tersebut menjelaskan kisaran kedalaman saluran, hasil rata-rata dari proses simulasi komputer dan perbandingan kedalaman saluran alir *bipolar plate*. Gambar ini menjelaskan bahwa kedalaman saluran akan meningkat dengan kenaikan

radius corner cetakan, meskipun kenaikannya tidak signifikan, tetapi kenaikan tersebut dengan jelas ditunjukkan pada nomor saluran # 2, # 3, # 4, # 7, # 8, # 9, # 12, # 13 dan # 14. Hasil kedalaman saluran tertinggi juga terjadi pada *radius corner* cetakan 0,7 mm.

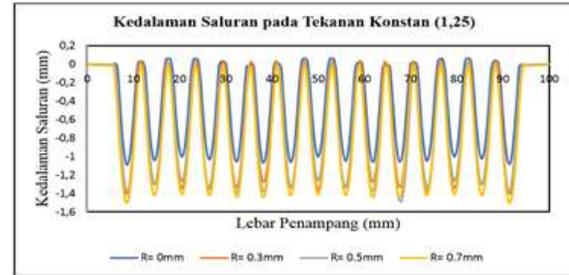
Hasil simulasi *bipolar plate* pada tekanan konstan (1 MPa) dengan variasi *corner radius* cetakan di plot pada satu grafik yang ditunjukkan pada gambar 14.



Gambar 14. Grafik Hasil Simulasi Kedalaman Saluran pada Tekanan Pembentukan Konstan 1 MPa.

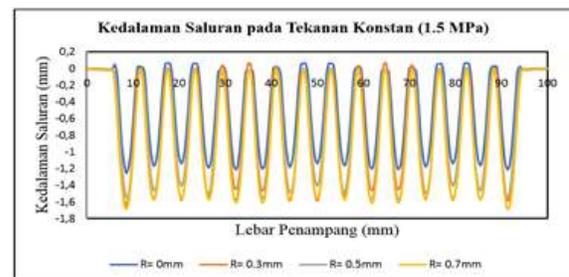
Didapatkan dengan *corner radius* cetakan sebesar 0.7 mm merupakan *radius* yang menghasilkan kedalaman saluran alir paling dalam jika dibandingkan dengan variasi *corner* cetakan yang lainnya. Perbedaan grafik dapat dilihat pada nomor saluran #1, #2, #4, #7, #8, #9, #12, #13, #14, dan #15, walaupun tidak berbeda jauh.

Gambar 15 merupakan grafik dari hasil simulasi variasi *corner radius* cetakan yang telah di plot pada tekanan pembentukan 1,25 MPa. Gambar tersebut menunjukkan bahwa *radius corner* cetakan 0,7 mm adalah kedalaman maksimal dari sekian variasi *corner radius* cetakan. Nomor saluran #1, #2, #14 dan #15 merupakan saluran yang dapat menunjukkan perbedaan kedalaman dengan jelas, walaupun tidak terlalu besar.



Gambar 15. Grafik Hasil Simulasi Kedalaman Saluran pada Tekanan Pembentukan Konstan 1,25 MPa.

Variasi *corner radius* cetakan pada tekanan pembentukan konstan (1.5 MPa) ditunjukkan pada grafik yang terdapat pada gambar 16. Hasil rata-rata dan perbedaan kedalaman hasil simulasi dari variasi *corner radius* cetakan dapat dilihat pada gambar tersebut. Gambar tersebut menjelaskan bahwa kedalaman saluran akan meningkat dengan kenaikan *corner radius* cetakan, meskipun kenaikannya tidak signifikan, tetapi kenaikan tersebut dengan jelas ditunjukkan pada nomor saluran # 2, # 14 dan # 15.

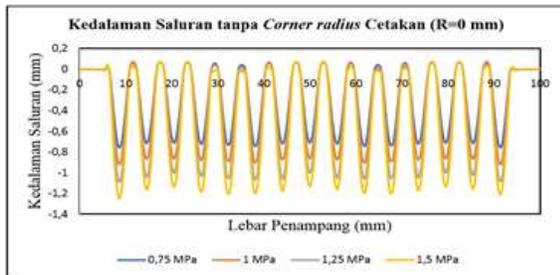


Gambar 16. Grafik Hasil Simulasi Kedalaman Saluran pada Tekanan Pembentukan Konstan 1,5 MPa.

Dari keseluruhan hasil simulasi pada tekanan konstan dan variasi *corner radius* cetakan didapatkan bahwa, semakin besar *corner radius* cetakan, maka kedalaman saluran alir *bipolar plate* semakin meningkat. Hal ini dikarenakan semakin besar *corner radius* maka kemampuan alir material ke dalam cetakan akan semakin meningkat,

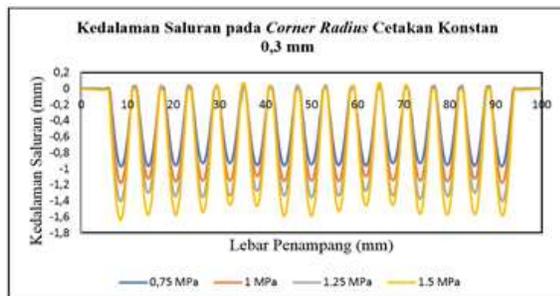
sehingga hasil akhir kedalaman saluran *bipolar plate* juga meningkat

Untuk variasi tekanan pembentukan (0,75 MPa; 1 MPa; 1,25 MPa dan 1,5 MPa) tanpa *corner radius* cetakan ($R=0$ mm) ditunjukkan pada grafik yang terdapat pada gambar 17.



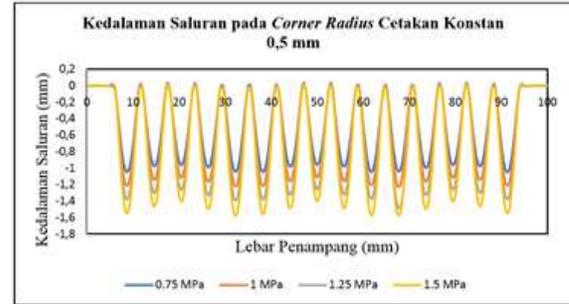
Gambar 17. Grafik Hasil Simulasi Kedalaman Saluran Tanpa *Corner Radius* Cetakan ($R=0$ mm)

Hasil simulasi dengan *corner radius* cetakan konstan 0,3 mm dan variasi tekanan pembentukan di plot pada satu grafik yang terdapat pada gambar 18.



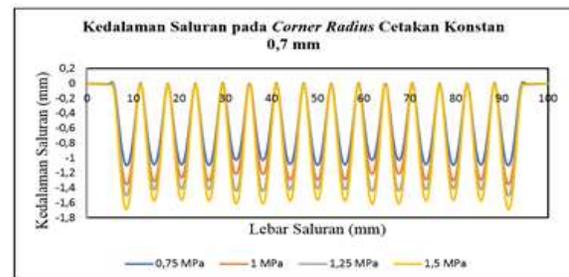
Gambar 18. Grafik Hasil Simulasi Kedalaman Saluran pada *Corner Radius* Cetakan 0,3 mm

Gambar 19 merupakan grafik dari kedalaman saluran *bipolar plate* dengan *corner radius* cetakan 0,5 mm dengan variasi tekanan.



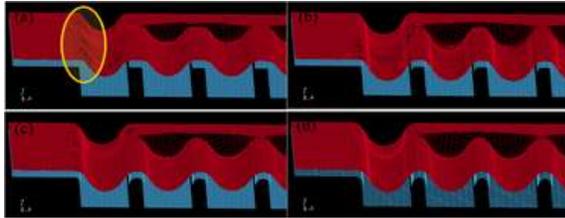
Gambar 19. Grafik Hasil Simulasi Kedalaman Saluran pada *Corner Radius* Cetakan 0,5 mm

Gambar 20 berisikan grafik dari hasil simulasi yang telah di plot, pada *corner radius* cetakan 0,7 MPa dengan variasi tekanan.



Gambar 20. Grafik Hasil Simulasi Kedalaman Saluran pada *Corner Radius* Cetakan 0,7 mm

Dari keseluruhan hasil simulasi *corner radius* cetakan konstan dan variasi tekanan, diketahui bahwa semakin besar tekanan yang diberikan, kepada *bipolar plate*, maka akan semakin dalam saluran *bipolar plate* yang terbentuk. Hal ini dapat dilihat pada keseluruhan nomor saluran, walaupun tidak berbeda jauh nilainya. Kedalaman maksimum dari keseluruhan hasil simulasi terdapat pada *corner radius* cetakan 0,7 mm dengan tekanan pembentukan 1,5 MPa, dan pada *radius corner* cetakan 0 mm hasil akhir menunjukkan adanya cacat berupa *wrinkle* (kerut). Hal ini dapat dilihat pada gambar 21.



Gambar 21. Hasil *Meshing* Tekanan Konstan 1,5 MPa, (a) Tanpa *Corner Radius* ($R = 0$ mm), (b) $R = 0,3$ mm, (c) $R = 0,5$ mm dan (d) $R = 0,7$ mm

Sesuai dengan penelitian terdahulu, yang mana pada proses superplastis, kemampuan alir material berbanding lurus dengan nilai *strain rate*. Ketika tidak terdapat *corner radius* pada cetakan maka, akan menghambat laju aliran material, sehingga tegangan pada benda menjadi besar dan menyebabkan cacat (Choirotin & Basjir, 2019).

KESIMPULAN

1. Kedalaman saluran alir akan meningkat dengan bertambahnya nilai *radius corner* cetakan dan tekanan pembentukan dalam proses pembentukan superplastis.
2. Kedalaman maksimum hasil simulasi terjadi pada tekanan pembentukan 1,5 MPa dan *corner radius* cetakan 0,7mm dengan kedalaman mencapai 1,693 mm dari paduan AA 5052 dengan ketebalan 0,5 mm.
3. Pembentukan logam dengan metode superplastis dapat digunakan sebagai metode pembentukan alternatif untuk menghasilkan saluran alir *bipolar plate* dengan tekanan gas relatif rendah.
4. Analisis elemen hingga oleh ANSYS LS-DYNA 18.1. dapat digunakan sebagai alat prediksi untuk proses pembentukan logam superplastis.

DAFTAR PUSTAKA

Chandra, N., Rama, S. C., & Chen, Z. (1999). Critical Issues in the Industrial Application of SPF-Process Modeling

and Design Practices. *Materials Transactions, JIM*, 40(8), 723–736. <https://doi.org/10.2320/matertrans1989.40.723>

Chang, D. H., & Wu, S. Y. (2015). The effects of channel depth on the performance of miniature proton exchange membrane fuel cells with *serpentine*-type flow fields.

International Journal of Hydrogen Energy, 40(35), 11659–11667. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.153>

Choirotin, I., & Basjir, M. (2019). *Analisis Desain Cetakan Sederhana Bipolar plate Pada Proses Pembentukan Superplastis*. V(1).

Choirotin, I., & Choiron, M. A. (2018). Defect Prediction at The Superplastic Forming Process of The *Bipolar plate* by Simulation. *Journal of Energy, Mechanical, Material and Manufacturing Engineering*, 3(1), 49. <https://doi.org/10.22219/jemmm.v3i1.5884>

Hermann, A., Chaudhuri, T., & Spagnol, P. (2005). *Bipolar plates* for PEM fuel cells: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(12), 1297–1302. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.04.016>

Hung, J. C., Yang, T. C., & Li, K. C. (2011). Studies on the fabrication of metallic *bipolar plates* - Using micro electrical discharge machining milling. *Journal of Power Sources*, 196(4), 2070–2074. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.10.001>

Jarrar, F. S., Liewald, M., Schmid, P., & Fortanier, A. (2014). Superplastic forming of triangular channels with sharp radii. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(4), 1313–1320. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0878-y>

- Karimi, S., Fraser, N., Roberts, B., & Foulkes, F. R. (2012). A review of metallic *bipolar plates* for proton exchange membrane fuel cells: Materials and fabrication methods. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/828070>
- Li, X., & Sabir, I. (2005). Review of *bipolar plates* in PEM fuel cells: Flow-field designs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(4), 359–371. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.09.019>
- Liu, J., Tan, M. J., Aue-U-Lan, Y., Jarfors, A. E. W., Fong, K. S., & Castagne, S. (2011). Superplastic-like forming of non-superplastic AA5083 combined with mechanical pre-forming. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 52(1–4), 123–129. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2729-9>
- Manso, A. P., Marzo, F. F., Mujika, M. G., Barranco, J., & Lorenzo, A. (2011). Numerical analysis of the influence of the channel cross-section aspect ratio on the performance of a PEM fuel cell with *serpentine* flow field design. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(11), 6795–6808. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.02.099>
- Tawfik, H., Hung, Y., & Mahajan, D. (2007). Metal *bipolar plates* for PEM fuel cell-A review. *Journal of Power Sources*, 163(2), 755–767. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.09.088>
- A.S.M.I.H. Committee, ASM International, 1993
- T. Altan, S.I. Oh, H.L. Gegel, Metal forming: fundamentals and applications, American Society for Metals, 1983