

Analisis Desain Cetakan *Straight Parallel Bipolar Plate* pada Proses Pembentukan Superplastis dengan Metode Simulasi Numerik

Ismi Choirotin^{a,*}, Unung Lesmanah^a, Moch. Agus Choiron^b

^aDepartemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Islam Malang
Jl. Mayjen Haryono 193 Malang, Jawa Timur 65144

^bDepartemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya
Jl. Veteran, Malang, Jawa Timur 65145

*E-mail: ismichoirtin@gmail.com

Abstract

As the most important component of fuel cell, bipolar plate has developed by many researcher to get it best performance. Some considerations have been made including the type of material, the forming process and the geometric design to obtain bipolar plates which produce efficient renewable energy. The objective of this study was to obtain the best bipolar plate geometry in straight parallel microchannel types by varying the corner radius value. The superplastic forming process was analyzed by numerical simulation method using ANSYS software. The investigation exhibit that the microflow channel of bipolar plate with maximum depth of 6.64 mm was produced by 2.0 mm corner radius. An increased corner radius will rise the thickness reduction percentage, however an even thickness distribution was resulted.

Keywords: bipolar plate; superplastic; corner radius; straight parallel; numerical simulation

Abstrak

Memegang peranan penting sebagai bagian dari *fuel cell*, penelitian tentang *bipolar plate* banyak dikembangkan untuk mendapatkan performa terbaik. Banyak pertimbangan dalam pembuatan *bipolar plate* yang menentukan performa *fuel cell* dalam menghasilkan energi, diantaranya jenis material, proses pembentukan dan desain geometrinya. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan geometri *bipolar plate* terbaik pada tipe saluran *straight parallel* dengan memvariasikan nilai *corner radius*. Metode yang digunakan ada penelitian ini adalah simulasi numerik pada proses pembentukan superplastis dengan menggunakan *software* ANSYS. Dari hasil analisis yang telah dilakukan, didapatkan saluran *bipolar plate* dengan kedalaman maksimal sebesar 6,64 mm pada variasi *corner radius* cetakan terbesar yaitu 2,0 mm. Peningkatan harga *corner radius* akan meningkatkan persentase pengurangan ketebalan material akan tetapi ketebalan yang dihasilkan juga lebih merata jika dibandingkan harga *corner radius* yang lebih rendah.

Kata kunci: bipolar plate; superplastis; corner radius; straight parallel; simulasi numerik

1. Pendahuluan

Saat ini pengembangan energi terbarukan sebagai pengganti bahan bakar fosil menjadi menarik objek penelitian yang menarik bagi para ilmuwan. Salah satu jenis energi terbarukan yang dikembangkan adalah *fuel cell*. *Fuel cell* ini banyak dikembangkan memiliki beberapa keunggulan seperti efisiensi yang tinggi, berpotensi dalam konservasi energi, keamanan dan ramah lingkungan [1]. *Fuel cell* ini menjadi kandidat kuat dalam menggantikan mesin pembakaran dalam (*internal combustion engine*) untuk diaplikasikan pada sarana transportasi [2-3]. Teknologi *fuel cell* ini memiliki keunggulan jika dibandingkan dengan mesin pembakaran dalam, teknologi ini lebih ramah lingkungan terutama dari segi emisi gas buang.

Bipolar plate adalah *part* penting dari *fuel cell*, karena memiliki fungsi utama yaitu sebagai rangka dan tempat dihasilkannya energi listrik. Selain peranannya yang sangat penting, biaya pembuatan *bipolar plate* adalah 50% dari total biaya produksi *fuel cell*, sehingga banyak penelitian dilakukan untuk mendapatkan performa terbaik dari *bipolar plate* ini. *Bipolar plate* dianggap memiliki performa baik jika efisiensi yang dihasilkan tinggi, memiliki resistivitas listrik yang baik, konduktivitas termal tinggi, resistensi terhadap korosi tinggi dan densitas yang rendah [4].

Penelitian yang dikembangkan saat ini fokus untuk mendapatkan *bipolar plate* terbaik dengan memvariasikan jenis material, proses fabrikasi dan geometri *bipolar plate*. Saat ini ada tiga jenis material *bipolar plate* yang umum digunakan, yaitu: (1) Grafit, (2) Komposit polimer-karbon, dan (3) logam. *Bipolar plate* dengan material komposit memiliki ketahanan korosi dan resistivitas listrik yang baik, akan tetapi biaya produksi dari *bipolar plate* komposit tergolong tinggi, karena proses produksinya masih menggunakan permesinan konvensional seperti bubut. Selain itu *bipolar plate* komposit memiliki sifat mudah pecah karena karakteristik materialnya yang rapuh. *Bipolar plate* dengan material komposit polimer-karbon memiliki masalah sendiri dengan kerumitan proses fabrikasinya. Dari keseluruhan jenis material *bipolar*

plate, bahan logam mendapatkan perhatian khusus dari para ilmuwan karena memiliki karakteristik mekanik, kelistrikan dan termal yang unggul [4].

Bipolar plate logam dari *stainless steel* memiliki kemampuan bentuk yang sangat baik, biaya material yang rendah, tahan terhadap korosi dan memiliki resistivitas elektrik yang baik. Akan tetapi dalam kondisi pengoperasian, apabila logam ini telah terlapisi oksida, akan sangat berpengaruh pada sifat ketahanan korosi dan resistivitas elektriknya. Dengan pertimbangan tersebut maka saat ini logam aluminium lah yang menjadi material *bipolar plate* yang unggul, karena memiliki stabilitas ketahanan korosi dan resistivitas elektrik. Selain sifat tersebut, aluminium juga memiliki keunggulan densitas yang lebih rendah jika dibandingkan dengan dengan logam *stainless steel*.

Proses manufaktur dari *bipolar plate* juga banyak diinvestigasi oleh para peneliti untuk menentukan proses mana yang paling efisien, dalam artian proses yang dapat memproduksi *bipolar plate* secara presisi dan biaya produksinya terjangkau. Beberapa proses pembentukan seperti *hydroforming* [5], *stamping* [6] dan *rubber pad forming* [7-8] telah dianalisa secara eksperimental dan numerik oleh para ahli. Proses *hydroforming* dapat menghasilkan *bipolar plate stainless steel* dengan *aspect ratio* (rasio perbandingan kedalaman dan lebar saluran) sebesar 0,31 yang membutuhkan tekanan sebesar 85 MPa. *Bipolar plate* paduan aluminium dengan *aspect ratio* sebesar 0,164 dihasilkan oleh proses *rubber pad forming* dan membutuhkan tekanan sebesar 42 MPa. Hasil proses pembentukan tersebut memperlihatkan bahwa dibutuhkan tekanan yang besar untuk mendapatkan *bipolar plate* dengan kedalaman saluran alir mikro (*micro flow channel*) yang diinginkan.

Proses pembentukan superplastis adalah salah satu proses pembentukan lembaran logam dengan memanfaatkan perilaku alir material pada temperatur dan tekanan tertentu. Beberapa keuntungan dari proses pembentukan superplastis ini adalah tidak adanya tegangan sisa dan efek *springback* diakhir proses, tekanan yang dibutuhkan relatif kecil, mampu menghasilkan benda kerja dengan bentuk yang rumit. Pada proses pembentukan superplastis, didapatkan *bipolar plate* aluminium paduan dengan *aspect ratio* sebesar 0,591 dan hanya memerlukan tekanan yang relatif rendah yaitu 1 MPa [9].

Selain dari segi material dan proses pembentukannya, performa *bipolar plate* juga ditentukan oleh parameter desainnya. Kegagalan atau cacat proses pembentukan *bipolar plate* sering kali terjadi karena desain cetakan yang tidak optimal. Kerusakan *bipolar plate* yang sering kali terjadi adalah kerut, sobek atau retak di area ujung atau sudutnya. Hasil investigasi menyatakan bahwa dibutuhkan desain geometri radius pada area sudut cetakan, sehingga tidak terjadi cacat pada hasil akhir benda kerja [10]. Analisa pada desain cetakan sederhana proses pembentukan *bipolar plate* dengan metode pembentukan superplastis dilakukan untuk mengetahui pengaruh besar radius pada sudut cetakan. Dari hasil simulasi numerik didapatkan bahwa cetakan tanpa *corner radius* mengakibatkan cacat berupa kerut dan sobek pada benda kerja [11].

Dengan latar belakang tersebut maka pada penelitian ini akan dilakukan analisa desain *corner radius* pada pola aliran *straight parallel bipolar plate* dengan proses pembentukan superplastis. Pola aliran *straight parallel bipolar plate* ini menunjukkan desain aktual dari saluran mikro pada *bipolar plate* jika dibanding dengan desain yang disederhanakan. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode simulasi numerik, dengan menggunakan *software* ANSYS 18.1. Penggunaan metode simulasi numerik pada proses optimasi desain diharapkan dapat menjadi solusi desain yang efisien dalam segi waktu dan biaya.

2. Material dan metode penelitian

2.1. Material

Dalam penelitian ini, spesifikasi material benda kerja dan cetakan (*dies*) adalah,

Benda Kerja : Aluminium Alloy A5052
Cetakan : Baja AISI H-13

Komposisi kimia dan sifat mekanik dari benda kerja (Aluminium A5052) seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 1 dan Tabel 2

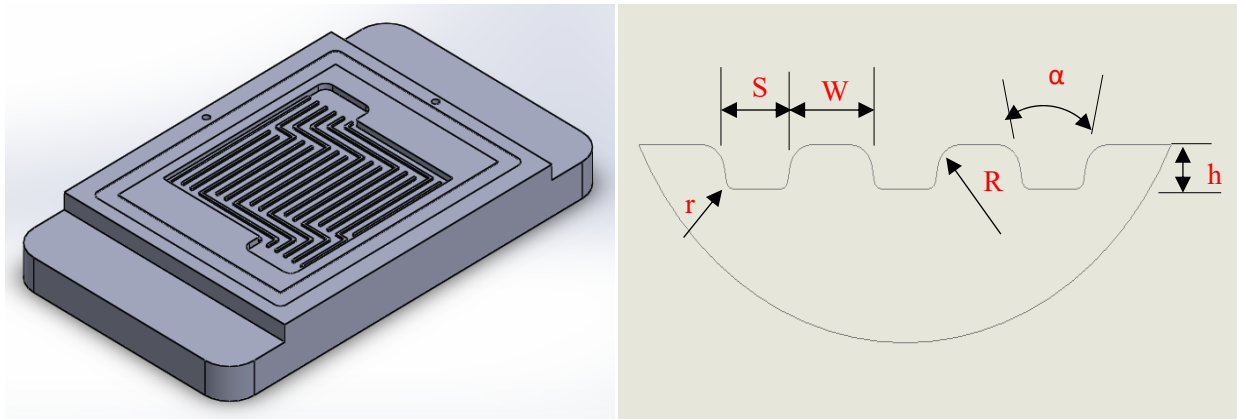
Tabel 1. Komposisi kimia Aluminium A5052

Fe	Mg	Si	Cr	Zn	Mn	Cu	Other	Al
< 0,4	2,2 – 2,8	< 0,25	0,15 – 0,35	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,15	RE

Tabel 2. Sifat mekanik Aluminium A5052

Kekuatan tarik (N/mm ²)	Kekuatan yield (N/mm ²)	Elongation (%)	Kekuatan Fatik (N/mm ²)
260	215	10	125

Benda kerja dimodelkan seperempat model dari bentuk aktual, dengan asumsi hasil akhir sudah mencakup kondisi minimum dan maksimum pemodelan. Dimensi benda kerja adalah 80 x 100 x 0,5 mm (panjang x lebar x tebal). Sedangkan bentuk dan dimensi cetakan adalah seperti ditunjukkan Gambar 1 dan Tabel 3.



Gambar 1. Bentuk geometri cetakan

Tabel 3. Dimensi cetakan

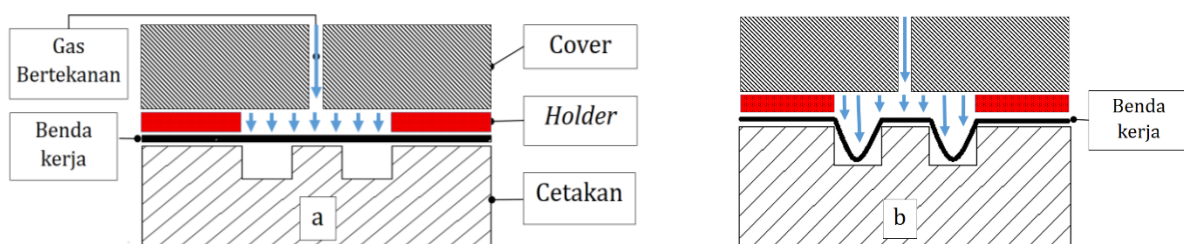
Keterangan	Simbol	Dimensi
Lebar Saluran	S	8 mm
	W	12 mm
Kedalaman saluran	h	7 mm
Corner Radius	R	0,5°; 1,0°; 2,0°
Radius Dalam	r	1°
Draft Angel	α	20°

2.2. Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode simulasi numerik, dimana *software* yang digunakan adalah ANSYS 18.1, sedangkan analisa hasil simulasi menggunakan *software* LS-PrePost. Proses verifikasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan hasil eksperimental penelitian terdahulu. Proses verifikasi ini diperlukan untuk mengetahui kebenaran hasil simulasi. Parameter *setting* dalam simulasi seperti diperlihatkan Tabel. 4.

Tabel.4 Parameter simulasi

Keterangan	Benda Kerja	Cetakan (<i>dies</i>)
<i>Material Properties (setting)</i>		
- Tipe Material	<i>Sensitif rate power law</i>	<i>Rigid</i>
- Tipe Elemen	<i>SHELL 163</i>	<i>SHELL 163</i>
- Densitas [kg/m ³]	2599,52	7860
- Modulus Elastisitas [GPa]	16,87	207
- Poisson Ratio	0,3	
- Konstanta material [Mpa]	44,33	
- <i>Strain rate sensitivity exponent</i>	0,28	
<i>Meshing size [m]</i>	0,0002	0,0005
Temperatur [°C]	450	450
Tekanan [Mpa]	1,0	



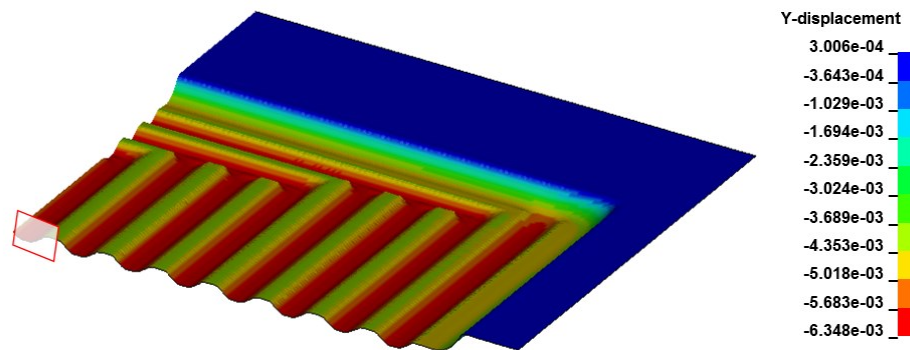
Gambar 2. Sketsa proses pembentukan superplastis

Sketsa proses pembentukan superplastis adalah seperti yang ditampilkan pada Gambar 2. Pada gambar tersebut terlihat bahwa benda kerja yang berupa lembaran logam diletakkan diatas cetakan dan ditahan oleh *holder / blank holder* (Gambar 2 (a)). Benda kerja yang telah dipanaskan terlebih dahulu pada temperatur 450 °C, diberi tekanan sebesar 1 MPa. Dengan adanya tekanan lembaran logam akan terdorong dan mengisi profil cetakan (Gambar 2 (b)).

3. Hasil dan pembahasan

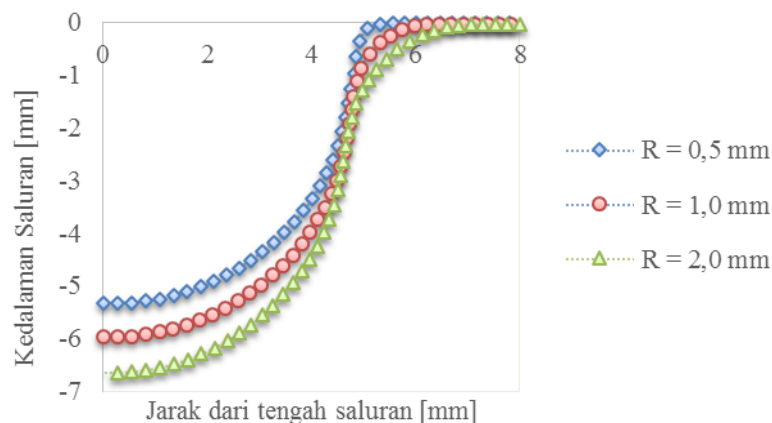
Verifikasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi proses pembentukan superplastis dengan hasil eksperimental. Kedalaman saluran *bipolar plate* dari proses simulasi dengan desain cetakan awal (tanpa *corner radius*) dibandingkan dengan hasil eksperimental. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa kedalaman saluran hasil simulasi memiliki tren yang sama dengan hasil eksperimental dengan tingkat kesalahan sebesar 2,3%. Dari keseluruhan hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa tidak ada perbedaan hasil yang signifikan, sehingga parameter simulasi ini dapat digunakan lebih lanjut dalam penelitian.

Gambar 3. Menunjukkan *bipolar plate* hasil simulasi komputer dengan harga *corner radius* (R) sebesar 0,5 mm. Data yang dianalisa berupa kedalaman saluran dan pengurangan ketebalan dari benda kerja. Dari hasil simulasi, untuk menentukan perbandingan kedalaman saluran, maka diambil data kedalaman dari saluran di bagian tengah benda kerja. Pengambilan data di saluran bagian tengah (Gambar. 3) benda kerja dikarenakan pada posisi tersebut kedalaman saluran bernilai maksimum. Perbandingan kedalaman saluran antara benda kerja dengan desain cetakan divariasikan nilai *corner radius*-nya (R) dapat dilihat pada Gambar 4. Gambar separuh dari saluran *micro flow channel* dianggap sudah mewakili karena benda kerja dianggap simetris.



Gambar 3. Kontur permukaan *bipolar plate*, hasil simulasi komputer dan area pengambilan data kedalaman saluran maksimum (R = 2,0 mm).

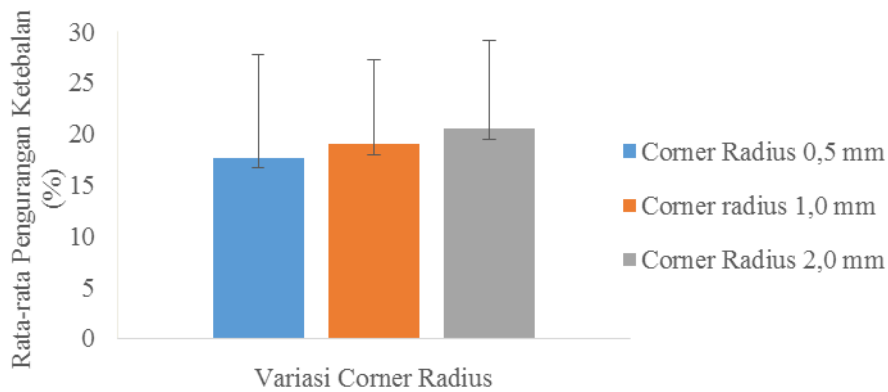
Perbedaan hasil kedalaman saluran antara cetakan dengan *corner radius* 0,5; 1,0 dan 2,0, ditunjukkan oleh Gambar 4. Dari Gambar tersebut dapat dilihat bahwa semakin besar *radius corner* (R), maka kedalaman saluran pada cetakan akan semakin meningkat. Hal ini terjadi karena semakin besar nilai *corner radius*, maka volume material yang masuk ke celah saluran akan semakin besar, sehingga saat diberi tekanan pada proses pembentukan arah aliran material akan semakin besar masuk kecelah dan kedalaman saluran meningkat. Pada cetakan dengan variasi *corner radius* sebesar 0,5 mm dan 1,0 mm, didapatkan kedalaman celah saluran *bipolar plate* sebesar 5,33 mm dan 5,97 mm. Sedangkan kedalaman saluran maksimum diperoleh cetakan dengan *corner radius* 2,0 mm, yaitu sebesar 6,64 mm.



Gambar 4. Grafik kedalaman saluran pada *bipolar plate* dengan variasi besar *corner radius* pada cetakan.

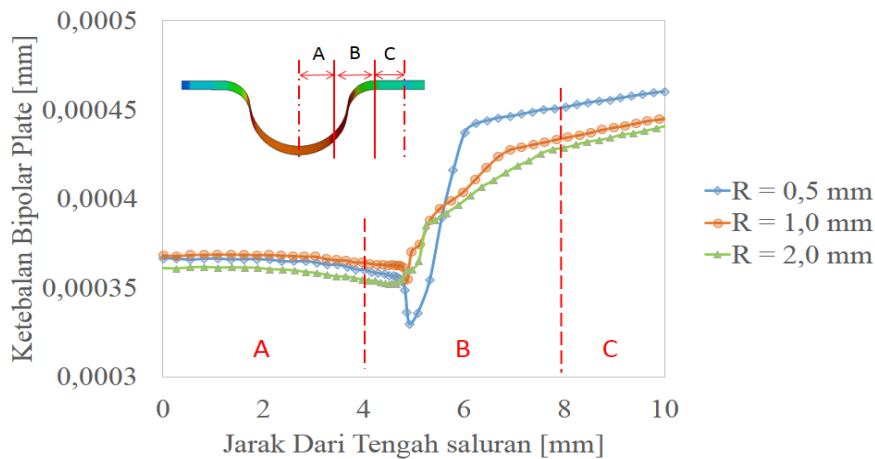
Selain kedalaman saluran pada *bipolar plate*, hasil keseragaman tebal benda kerja juga sangat menentukan performa dari *bipolar plate*. Semakin seragam ketebalan *bipolar plate*, maka beban yang nantinya akan ditanggung oleh *bipolar plate* yang berfungsi sebagai rangka *fuel cell* akan semakin merata dan meminimalisir pemusatan tegangan. Dari Gambar 5, dapat dilihat bahwa prosentase rata-rata pengurangan ketebalan akan semakin meningkat dengan meningkatnya harga

corner radius. Pada variasi *corner radius* 0,5 mm, harga pengurangan ketebalan rata-rata sebesar 17,7% dari ketebalan awal. Sedangkan pada variasi *corner radius* 2,0 mm didapatkan rata-rata pengurangan ketebalan sebesar 20,5% dari ketebalan awal. Akan tetapi jika dilihat dari *range* pengurangan ketebalan maksimum dan minimum, variasi *corner radius* 0,5 mm menghasilkan pengurangan ketebalan lebih tidak merata yaitu sebesar 10% jika dibandingkan dengan variasi *corner radius* 2,0 mm yang hanya sebesar 8,6% (Gambar 5). Pengurangan ketebalan optimum terjadi pada desain dengan *corner radius* 1,0 mm dimana *range* ketebalan minimum dan maksimum hanya sebesar 8,2%.



Gambar 5. Grafik pengurangan ketebalan benda kerja dengan variasi *corner radius* pada cetakan

Masalah yang sering ditemui pada proses pembentukan superplastis adalah ketebalan benda kerja yang tidak merata. Distribusi ketebalan sepanjang arah melintang dari saluran *bipolar plate* dapat diprediksikan dengan proses simulasi numerik seperti yang ditunjukkan oleh gambar 6. Untuk mendefinisikan karakteristik distribusi ketebalan, area saluran alir dapat dibagi menjadi tiga area yaitu: area dalam dari saluran (A), area *corner radius* (B) dan area luar dari saluran (C). Dari grafik dapat dilihat bahwa dengan memvariasikan besar *corner radius* akan memberikan perubahan kecenderungan distribusi ketebalan. Pada desain cetakan dengan *corner radius* 0,5 mm perbedaan distribusi ketebalan lebih besar jika dibanding desain cetakan dengan *corner radius* lebih tinggi, hal ini disebabkan pada *corner radius* rendah jumlah material yang masuk kedalam cetakan lebih rendah sehingga akan terjadi perbedaan regangan plastis yang tinggi.



Gambar 6. Distribusi ketebalan pada saluran *bipolar plate*.

Hasil prediksi simulasi numerik pada Gambar 6 menunjukkan bahwa distribusi ketebalan terbaik yang didapat dengan memvariasikan *corner radius*, terjadi pada desain cetakan dengan harga $R = 1,0$ mm. Hal ini juga ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 5, dimana meskipun harga pengurangan ketebalan rata-rata pada desain cetakan dengan $R=1,0$ mm lebih tinggi dari desain cetakan dengan $R=0,5$ mm, akan tetapi *range* atau perbedan ketebalan maksimum dan minimum pada desain cetakan dengan $R=1,0$ mm adalah yang paling rendah diantara ketiga desain cetakan.

4. Kesimpulan

Dari keseluruhan penelitian dapat disimpulkan bahwa besar nilai *corner radius* akan berpengaruh pada besar kedalaman saluran *bipolar plate*. Semakin besar harga *corner radius*, maka kedalaman saluran *bipolar plate* yang dihasilkan juga akan semakin meningkat. Kedalaman saluran *bipolar plate* maksimum didapatkan sebesar 6,64 mm yaitu pada variasi *corner radius* 2,0 mm. Akan tetapi perlu diingat bahwa investigasi ini hanya dalam batasan dimensi benda kerja yang dihasilkan, tanpa mempertimbangkan pengaruh *corner radius* terhadap performa pola aliran dalam *fuel cell*. Dengan meningkatkan harga *corner radius*, ketebalan benda kerja akan lebih merata jika dibanding pada variasi *corner radius* kecil, ketebalan dengan distribusi optimum terjadi pada desain cetakan dengan *corner radius* sebesar 1,0 mm.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini dapat terlaksana dengan pendanaan Hibah Institusi Universitas Islam Malang (HI-ma).

Daftar Pustaka

- [1] M. Belali-Owsia, M. Bakhshi-Jooybari., S. J. Hosseinipour., A. H. Gorji., 2015, "A new process of forming metallic bipolar plates for PEM fuel cell with pin-type pattern," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 77, no. 5–8, pp. 1281–1293, doi: 10.1007/s00170-014-6563-3.
- [2] H. Tawfik, Y. Hung., D. Mahajan., 2007, "Metal bipolar plates for PEM fuel cell-A review," *J. Power Sources*, vol. 163, no. 2, pp. 755–767, doi: 10.1016/j.jpowsour.2006.09.088.
- [3] Y. Liu., L. Hua., 2010, "Fabrication of metallic bipolar plate for proton exchange membrane fuel cells by rubber pad forming," *J. Power Sources*, vol. 195, no. 11, pp. 3529–3535, doi: 10.1016/j.jpowsour.2009.12.046.
- [4] H. J. Kwon, Y. P. Jeon., C. G. Kang., 2012, "Die design of aluminum bipolar plate fabrication by stamping process and its investigation," *Adv. Mater. Res.*, vol. 445, pp. 108–113, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.445.108.
- [5] M. Koc., 2007, "Feasibility investigations on a novel micro-manufacturing process for fabrication of fuel cell bipolar plates : Internal pressure-assisted embossing of micro-channels with in-die mechanical bonding," vol. 172, pp. 725–733, doi: 10.1016/j.jpowsour.2007.05.089.
- [6] Q. Hu., D. Zhang., H. Fu., K. Huang., 2014, "ScienceDirect Investigation of stamping process of metallic bipolar plates in PEM fuel cell d Numerical simulation and experiments," *Int. J. Hydrogen Energy*, pp. 1–7, doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.01.201.
- [7] W. Hongyu., W. Zhen., T. Fei., Z. Pengchao., S. Juncai., J. Shijun., 2019, "Numerical simulation and experiment research on forming of two-step channel based on rubber pad pressing," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 101, no. 5–8, pp. 2175–2189, doi: 10.1007/s00170-018-3091-6.
- [8] M. Elyasi., H. T. Ghadikolaee., M. Hosseinzadeh., 2017, "Fabrication of metallic bipolar plates in PEM fuel cell using semi-stamp rubber forming process," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 92, no. 1–4, pp. 765–776, doi: 10.1007/s00170-017-0206-4.
- [9] I. Choirotin., 2018, "Defect Prediction at the Superplastic Forming Process of the Bipolar Plate by Simulation," *J. Energy, Mech. Mater. Manuf. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 49–54, [Online]. Available: <http://ejournal.umm.ac.id/index.php/JEMMME/article/view/5884/0>.
- [10] T. Chen., 2011, "Bipolar Plates Channel," pp. 597–602.
- [11] I. Choirotin., M. Basjir., 2019, "Analisis Desain Cetakan Sederhana Bipolar Plate Pada Proses Pembentukan Superplastis," *Flywheel J. Tek. Mesin Untirta*, vol. V, no. 1, [Online]. Available: <http://jurnal.untirta.ac.id/index.php/jwl/article/view/4444>.