

ISSN 2685-8029 (Online)

ISSN 2716-1293 (Print)

Journal of Mechanical Design and Testing

Jointly Published by:

Department of Mechanical and Industrial Engineering, Faculty of Engineering
Universitas Gadjah Mada

Centre for Innovation of Medical Equipment and Devices (CIMEDs), Faculty of
Engineering, Universitas Gadjah Mada

Volume 2, No. 1, June 2020

JOURNAL OF MECHANICAL DESIGN AND TESTING

Volume 2, No. 1, June 2020

Daftar Isi

Analisa Ketelitian Gerak Sumbu X <i>Ekstruder</i> Mesin <i>Fused Deposition Modeling</i> dan Kualitas Hasil 3D <i>Printing</i> Menggunakan Bahan <i>Polylactic Acid (PLA)</i>.....	
A. T. Rohman, H.S.B. Rochardjo, Herianto	1-10
Pengembangan Aplikasi Untuk Desain Perhitungan Sistem Proteksi Katodik Arus Paksa Anjungan Lepas Pantai.....	
A. Wiryawan dan P. T. Iswanto	11-20
<i>The Effect of The Solar Heat Flux to The Optimized Solar Chimney Power Plant: An Experimental Study</i>.....	
H.M.I. Paska, A. Widyaparaga, Fauzun, A. Ridwan, R. Abdurrahman	21-35
Studi Eksperimental <i>Micro Deep Drawing</i> Sistem Pneumatik dan Analisis Cacat Pada Material Brass 70/30	
R. Diwihagso dan M. Mahardika	37-45
Simulasi Numerik Prediksi Erosi Aliran Fasa Cair-Gas Berpasir Pada Belokan Pipa Sumur Minyak Mentah Menggunakan Model Finnie, McLaury dan Oka	
H. J. Atmaja, S. Kamal, Sugiyono	47-65
Pengaruh Kecepatan <i>Punch</i> Terhadap Kedalaman Penetrasi dan Cacat Hasil <i>Micro Deep Drawing</i> dengan Sistem Pneumatik pada Material Aluminium AA1100	
M. Habibi dan M. Mahardika	67-75

EDITORIAL

Teknologi additive manufacturing, atau yang lebih umum disebut dengan nama 3D-printing, saat ini menjadi topik penelitian yang sedang hangat di kalangan ilmuwan dunia. Teknologi manufaktur yang dilakukan dengan cara menyusun lapis demi lapis material ini diprediksi akan menjadi solusi untuk pembuatan komponen atau material dengan geometri kompleks serta desain yang unik. Meski demikian, teknologi 3D-printing masih membutuhkan banyak penyempurnaan, termasuk dalam hal ketelitiannya yang selama ini menjadi persoalan dalam proses manufaktur dengan presisi tinggi. Merespon animo masyarakat ilmiah dunia mengenai teknologi additive manufacturing ini, maka tim editor Journal of Mechanical Design and Testing (JMDT) pada edisi kali ini mengangkat satu judul berkaitan dengan ketelitian mesin fused deposition modelling (FDM) yang merupakan salah satu 3D-printer yang umum dipakai dewasa ini. Masih berkaitan dengan teknologi manufaktur dengan presisi tinggi, dua artikel lain dalam JMDT edisi ini mengangkat topik mengenai teknologi deep drawing, terutama untuk aplikasinya dalam pemrosesan material brass dan aluminium. Teknologi yang berpijak pada prinsip metal forming ini dapat dijadikan pilihan dalam proses manufaktur komponen berukuran kecil dengan detil yang berskala mikro. Di bidang teknologi terapan dan industri, JMDT edisi ini mengangkat tiga buah judul yang berkaitan dengan isu proteksi katodik arus paksa pada anjungan lepas pantai, erosi pada dinding belokan pipa yang mengalirkan cairan-gas, serta optimasi desain cerobong pada pembangkit tenaga listrik. Akhir kata, kami dari tim editor mengucapkan terima kasih kepada seluruh penulis serta reviewer atau mitra bestari atas segala kontribusinya hingga diterbitkannya JMDT Vol. 2 No. 1 pada Juni 2020 ini.

Dr. Suyitno
Editor-in-chief

Tim Editor dan Reviewer

Editor-in-chief:

Suyitno, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Section editor:

Budi Arifvianto, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Reviewer/Mitra bestari:

1. Muslim Mahardika, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia
2. Gunawan Setia Prihandana, Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Airlangga, Indonesia
3. I Gusti Bagus Budhi Dharma, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia
4. Agung Purniawan, Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia
5. Urip Agus Salim, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia
6. Teguh Dwi Widodo, Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Indonesia
7. Muhammad Akhsin Muflikhun, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia
8. Yani Kurniawan, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia
9. Juan Pratama, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Tata letak dan sampul:

Fitri Untari

Dikelola dan Diterbitkan Oleh:

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada dan Centre for Innovation of Medical Equipment and Devices (CIMEDs), Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

Website: <https://jurnal.ugm.ac.id/jmdt>

email: jmdt@ugm.ac.id

Analisa Ketelitian Gerak Sumbu X *Ekstruder* Mesin *Fused Deposition Modeling* dan Kualitas Hasil 3D *Printing* Menggunakan Bahan *Polylactic Acid* (PLA)

A. T. Rohman, H.S.B. Rochardjo*, Herianto

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
Jl. Grafika No. 2, Kompleks UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia
E-mail: *heru-sbr@ugm.ac.id

Abstrak

Fused Deposition Modeling (FDM) merupakan teknologi *additive layer manufacturing* (ALM) yang bekerja dengan cara ekstrusi material. Material yang digunakan adalah *polylactid acid* (PLA). Tantangan penggunaan teknologi FDM antara lain kualitas dimensi benda hasil uji *printing*. Oleh karena itu dilakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui besar akurasi gerak ekstruder mesin FDM dan ketelitian dimensi benda hasil uji *printing* pada mesin FDM. Pengaruh optimasi kontrol pada mesin FDM akan dilihat pengaruhnya terhadap akurasi gerak mesin FDM dan ketelitian benda uji.

Penelitian dilakukan pada sumbu gerak ekstruder mesin FDM. Metode penelitian dengan cara pengukuran akurasi *under no load* pada mesin FDM dan divalidasi menggunakan pengukuran ketelitian dimensi hasil uji *printing*. Pengukuran *under no load* menggunakan laser interferometer sedangkan pengukuran dimensi benda uji *printing* menggunakan mesin CMM. Parameter kecepatan dan proses *printing* ditetapkan pada nilai tertentu. Optimasi kontrol dilakukan dengan penambahan *step/unit* motor 80,1 dan 80,2.

Perbedaan hasil pengukuran *under no load* dan pengukuran ketelitian dimensi pada hasil *printing* banyak dipengaruhi oleh faktor *shrinkage* material. Kompensasi kontrol dapat meningkatkan ketelitian dimensi sebesar 0,145 mm. Mesin FDM yang diteliti dapat menghasilkan ketelitian dimensi produk sebesar 0,157 mm dengan nilai ketidakpastian dibawah ± 0.050 mm.

Kata kunci : *ketidakpastian pengukuran, FDM, shrinkage, kompensasi kontrol, step/unit, under no load*

Abstract

Fused Deposition Modeling (FDM) is an additive layer manufacturing (ALM) technology that works by material extrusion. The material used is polylactid acid (PLA). FDM technology has challenges in the quality and accuracy of product dimensions. Therefore, this research is conducted to determine the accuracy and repeatability of FDM machine and the benefit caused by FDM machine compensations.

The research is carried out on the FDM extruder axis. The study is conducted by accuracy and repeatability measurement under no load condition on the FDM machine by laser interferometer and then validated by dimensional accuracy measurements of the printing test dimensions using CMM. Velocity and process parameters are set at a certain value. Machine control compensation is conducted by adding 80.1 and 80.2 step/unit motor.

The differences between under no load measurement and the products dimensional accuracy of the printing results is largely influenced by the material shrinkage. Control compensation increase dimensional accuracy by 0.145 mm. The FDM machine could produce an accuracy of product dimensions of 0.157 mm with uncertainty values under + 0.050 mm.

Keywords : uncertainty, fdm, shrinkage, control compensation, step/unit, under no load

1. PENDAHULUAN

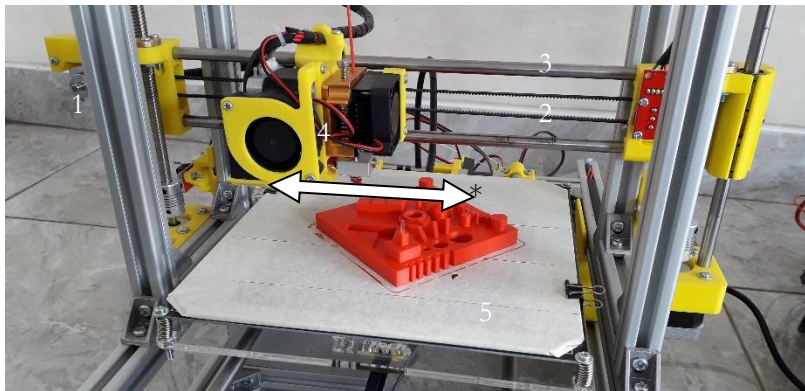
Additive manufacturing (AM) merupakan teknologi pembentukan material yang berbeda dengan teknologi *subtractive manufacturing* yang menghilangkan material mentah menjadi komponen jadi. Dalam teknologi AM, material dibentuk berdasarkan lapis demi lapis atau disebut *layer manufacturing* (LM) menjadi bentuk 3D model atau diistilahkan sebagai *Additive Layer Manufacturing* (ALM).

Beberapa penelitian mengkaji dan memperoleh wawasan bahwa teknologi AM memiliki kemanfaatan potensi yang tinggi (Berman, 2012). Potensi keuntungannya antara lain berkurangnya biaya *tooling*, mengurangi *scrap* permesinan dan mengurangi dampak kerusakan lingkungan dengan asumsi bahwa penerapan AM tidak hanya untuk pembuatan *prototype* namun juga untuk produk konsumsi masyarakat (Schniederjans dan Yalcin, 2018). Keuntungan dalam penggunaan teknologi AM lainnya adalah peningkatan keragaman produk dan jumlah produksi yang rendah dengan kecepatan produksi yang tinggi dan pelayanan konsumen yang tinggi. Aplikasi dari AM sudah diterapkan dalam berbagai bidang antara lain pendidikan, mekanik, otomotif, *aerospace*, *robotic*, kelautan, arsitek, medis dan industri farmasi. Dalam industri farmasi sudah dimulai pembuatan obat oral menggunakan 3d *printing* dengan variasi geometrik, dimensi dan warna. Airbus memproduksi lebih dari 1.000 komponen menggunakan mesin *fused deposition modelling* (FDM) dengan material resin ULTEM™ 9085 untuk dipasang pada pesawat A 350 XWB karena memiliki keunggulan dalam akurasi/ketelitian dimensi dan kestabilan material. Produk medis *intra-uterine device* (IUD) juga diproduksi menggunakan mesin 3d *printing* FDM. (Sadia dkk, 2017). Kelebihan pada AM ternyata tidak selaras dengan ketelitian produk AM (Dimitrov dkk, 2006). Selain itu faktor lain yang masih menjadi kendala pada produk ALM adalah kualitas dimensi seperti ketelitian geometrik, mampu ulang dan kehalusan permukaan.

Sebagian besar penelitian kualitas produk AM adalah dengan cara pengukuran benda uji hasil proses AM melalui perhitungan nilai penyimpangan dimensi, geometrik dan kualitas kondisi permukaan. Namun, penelitian yang sudah ada lebih kepada optimasi pada parameter proses AM. Salah satu penelitian parameter utama adalah dimensi komponen, temperatur ekstruder, orientasi *printing* dan *layer thickness* yang berpengaruh terhadap akurasi dimensi produk AM (Lim dkk, 2016). Cajal (2016) melakukan penelitian *volumetric error* pada mesin *polyjet* Objet350V 3D *printer* dengan cara pengukuran benda uji hasil *printing* menggunakan mesin CMM dan menganalisa *systematic error* yang terjadi pada mesin tersebut. Penelitian kualitas hasil AM berdasarkan kondisi mesin masih belum banyak dilakukan. Oleh karena itu pada penelitian ini akan dilakukan pengukuran akurasi mesin FDM kemudian dilakukan validasi menggunakan pengukuran pada benda uji hasil *printing* AM pada mesin tersebut. Peningkatan kualitas hasil AM akan dilakukan dengan cara kompensasi kontrol pada mesin FDM.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian diawali dengan penentuan jenis pengukuran akurasi mesin FDM, penentuan parameter pengukuran yang digunakan pada pengukuran *under no load* penentuan parameter proses *printing*, pelaksanaan pengukuran mesin FDM, pembuatan benda uji *printing*, pengukuran ketelitian dimensi mesin, evaluasi ketelitian dimensi mesin dan optimasi *step/unit* motor. Obyek penelitian adalah sumbu gerak X (ekstruder) mesin FDM dengan spesifikasi sebagai berikut: *motor stepper* NEMA 17, penggerak *timing belt* GT2, pulley GT2 dan guide rod 8 mm. Diameter *nozzle* ekstruder adalah 0.4 mm. Material yang digunakan adalah *polylactide* (PLA) dengan diameter penampang sebesar 1,75 mm. Material PLA memiliki suhu kerja 180-200°C, titik leleh 120-170 °C dan titik *softening* 45-120 °C (Valerga dkk, 2018). Konfigurasi ekstruder sumbu X dapat dilihat pada Gambar 1.



Keterangan gambar :

1. *Motor stepper.*
2. *Timing belt.*
3. *Guide rod.*
4. *Ekstruder.*
5. *Bed FDM.*

* Arah gerak ekstruder (sumbu X)

Gambar 1. Skema ekstruder sumbu X mesin FDM

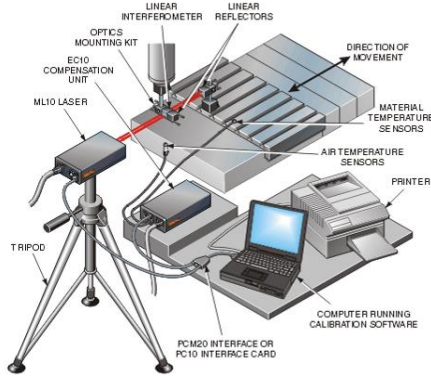
Peralatan yang digunakan

1. *Laser Interferometer Renishaw ML 10*

Laser interferometer merupakan alat ukur berbasis *laser* dan optik yang memiliki resolusi dan akurasi yang sangat tinggi. Evaluasi yang dilakukan untuk mesin FDM adalah pengukuran akurasi posisi, *backlash* dan mampu ulang mesin FDM. Konfigurasi perangkat uji laser interferometer dapat dilihat pada Gambar 2. Spesifikasi *laser interferometer* dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi *laser interferometer* Renishaw ML10 (Begović dkk, 2014)

No	Spesifikasi	Keterangan
1	Spesifikasi laser	<i>Helium Neon (HeNe) laser tube</i>
2	Akurasi sistem	0,5 ppm
3	Akurasi frekuensi laser	$\pm 0,05$ ppm
4	Resolusi	0,001 mikron
5	Kecepatan maksimum	4,0 m/detik
6	Frekuensi	50 kHz
7	<i>Range</i>	0 – 40 meter
8	Suhu operasi	0 – 40° C
9	Kelembapan operasi	0 – 95% (tanpa kondensasi)



Gambar 2. Konfigurasi pengukuran *laser interferometer* (Begović dkk, 2014)

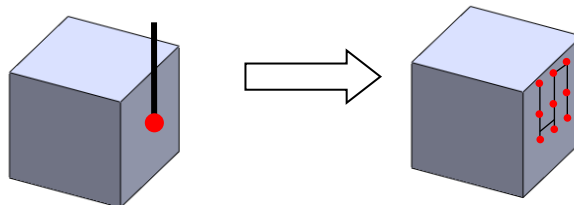
2. Coordinate Measuring Machine (CMM)

Mesin CMM dipilih dan digunakan untuk mengukur kualitas dimensi benda uji hasil *printing*. Pertimbangan dalam pemilihan CMM sebagai alat ukur adalah nilai *error* maksimum yang diijinkan (*Maximum Permissible Error*/ MPE_{CMM}) yang rendah. Berdasarkan ISO 10360, MPE_{CMM} didefinisikan sebagai berikut

$$MPE_{CMM} : \pm (X+L/K) \quad (1)$$

dengan X adalah tingkat akurasi mesin CMM dengan satuan μm , K adalah konstanta dan L adalah panjang *stroke* sumbu mesin CMM dengan satuan mm. Mesin CMM yang digunakan adalah CMM Brown Sharpe dengan $MEP_{CMM} \text{ BS} : \pm 2,5 + L/333 \mu\text{m}$.

Sampel benda uji pada Gambar 3 menunjukkan cara pengambilan 9 titik data pada tiap posisi. Pengambilan data dilakukan secara *point to point probe* dan tidak dilakukan secara *scanning*. *Point to point probing* adalah pengambilan data pada permukaan satu demi satu. Sedangkan, *scanning probe* merupakan cara pengambilan data dengan cara mengikuti suatu permukaan atau selalu menempel sambil mengumpulkan titik koordinat permukaan tersebut. *Point to point probe* mempunyai nilai ketidakpastian hasil pengukuran yang lebih kecil dibanding dengan metode *scanning probe*.



Gambar 3. *Sampling* pengambilan data per posisi.

Pengukuran benda uji hasil *printing* menggunakan CMM menghasilkan data posisi X,Y dan Z tiap titik pengukuran. Data tersebut diolah menghasilkan sembilan sebaran data hasil pengukuran pada tiap posisi. Keseluruhan data dari sepanjang 120 mm menghasilkan total

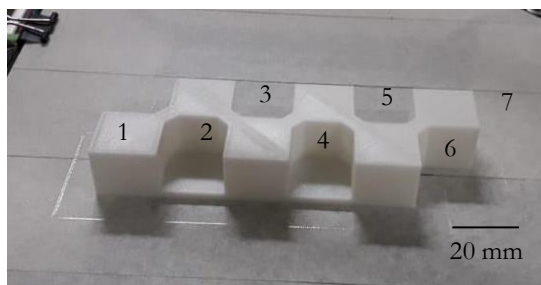
error/penyimpangan ketelitian dimensi. Namun dalam pengukuran benda uji ada nilai *uncertainty*/ketidakpastian pengukuran.

Langkah Pengujian

1. Pengukuran pemosisian atau *under no load* ekstruder sumbu X. Parameter gerak sumbu X ditentukan dengan kecepatan 50 mm/s, percepatan 1000 mm/s² dan jerk 7,5 m/s³. Pengukuran *under no load* akurasi mesin FDM mengacu pada ISO 230-2 2006. Sumbu X ekstruder diukur sepanjang 120 mm. Pada jarak tersebut dibagi menjadi 7 step pengukuran posisi setiap 20 mm. Pengukuran dilakukan dua arah dari titik nol menuju 120 mm kemudian kembali lagi diukur dari titik 120 mm menuju titik 0 untuk mendapatkan nilai *repeatability* pada dua arah yang berbeda dan didapatkan nilai *backlash*. Pengukuran dilakukan dengan lima kali perulangan.

Kompensasi kontrol berupa pengaturan *step/unit motor stepper* sebesar 80,0, 80,1 dan 80,2 dijadikan variabel masukan untuk dilihat variabel keluarannya. Variabel keluaran dari pengukuran *under no load* adalah

1. M = *Error* posisi rata-rata
 2. E = *Error* posisi sistematis
 3. R+ = Mampu ulang arah gerak sumbu X+
 4. R- = Mampu ulang arah gerak sumbu X-
 5. B = *Backlash* maksimal pengukuran
 6. A+ = Akurasi arah gerak sumbu X+
 7. A- = Akurasi arah gerak sumbu X-
 8. A = Akurasi total dari pengukuran
2. Pengukuran benda uji hasil AM menggunakan mesin CMM. Benda uji dibuat dengan parameter proses *printing* yang mengacu pada penelitian Sanchez dkk (2014) dan dapat dilihat pada Tabel 2. Menurut Sanchez dkk (2014), parameter tersebut merupakan parameter optimal dalam pembuatan benda uji. Benda uji hasil *printing* dapat dilihat pada Gambar 4. Pengukuran ketelitian dimensi dilakukan sepanjang 120 mm pada benda uji *printing*. Benda uji diukur dimensinya setiap panjang 20 mm dengan 9 kali pengambilan data pada tiap sisi. Pengukuran dimensi dilakukan secara *incremental* dimulai dari sisi ukur 1 sampai dengan 7.



Gambar 4. Benda uji hasil *printing*

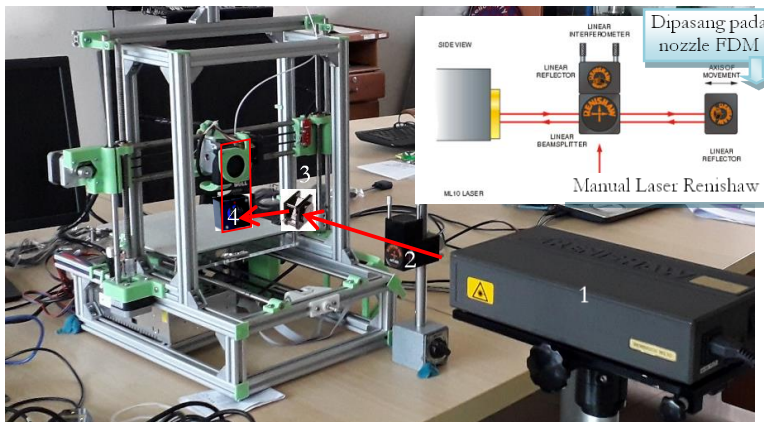
Tabel 2. Parameter proses printing benda uji(Sanchez dkk, 2014)

Parameter	Nilai	Satuan
<i>Layer thickness</i>	0,20	mm
<i>Raster width</i>	0,71	mm
<i>Suhu Bed</i>	60	°C
<i>Suhu Nozzle</i>	200	°C
<i># of perimeters</i>	3	
<i>Top solid layers</i>	3	
<i>Bottom solid layers</i>	3	
<i>Fill density</i>	30	%
<i>Material</i>	PLA	
<i># of repetitions</i>	2	
<i>Travel speed</i>	200	mm/s
<i>Nozzle diameter</i>	0,4	mm
<i>Filament Diameter</i>	1,75	mm
<i>Support</i>	No	
<i>Slicer</i>	Repetier-Host V2.05	

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Konfigurasi pengukuran akurasi mesin FDM menggunakan *laser interferometer* dapat dilihat pada Gambar 5. Hasil pengukuran *under no load* menghasilkan data *error* posisi, mampu ulang, *backlash* dan akurasi sumbu X (ekstruder) mesin FDM dapat dilihat pada Tabel 3. Karakteristik penyimpangan sumbu x bernilai positif sebesar 137 μm maka saat diberikan penambahan nilai *step/unit* motor sebesar 80,1 maka nilai penyimpangan naik sebesar 59 μm . Pada *step/unit* 80,2 maka terjadi peningkatan penyimpangan yang signifikan sebesar 214 μm . Terjadinya kenaikan hanya pada R+ sebesar 13 μm pada *step/unit* 80,1.

Backlash tidak berpengaruh terhadap perubahan nilai *step/unit*. *Error* posisi rata-rata (M) mengalami kenaikan yang signifikan. Grafik penyimpangan pada sumbu X, Gambar 6, menunjukkan pola penambahan penyimpangan akurasi pada arah positif. Hal ini terjadi karena penambahan nilai *step/unit* motor secara aktual berpengaruh terhadap penambahan jarak pergerakan translasi sumbu X.

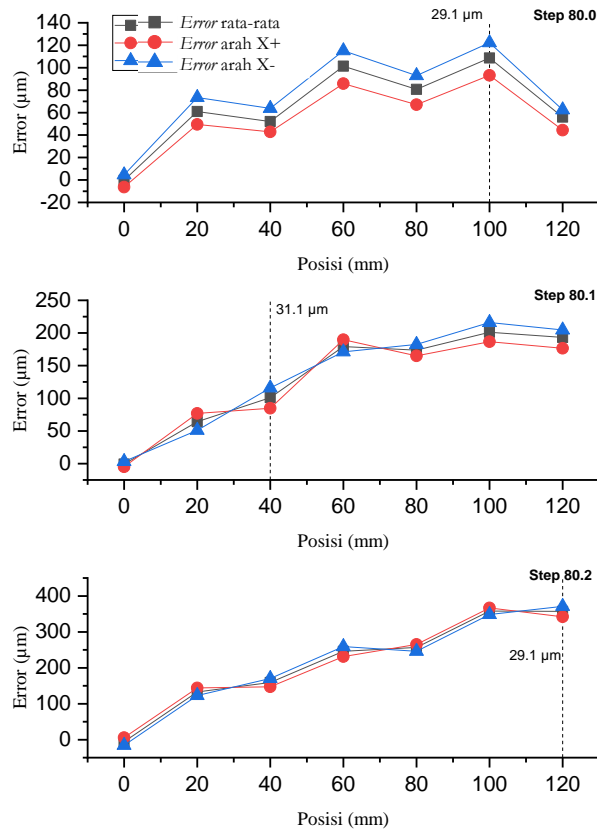


Keterangan gambar :

1. *Laser Interferometer*
2. *Linear beamsplitter* dan *linear reflector*
3. *Mirror reflector*
4. *Linear reflector*

→ Arah laser

Gambar 5. Pengukuran akurasi mesin FDM



Gambar 6. Grafik akurasi *under no load* sumbu x (ekstruder)

Tabel 3. Data akurasi sumbu X (ekstruder) dengan variasi *step/unit* motor

No	Sb	Step/Unit	M µm	E µm	R+ µm	R- µm	B µm	A+ µm	A- µm	A µm
1	X	80,0	109	123	15	13	21	115	123	137
2	X	80,1	176	186	28	10	20	184	192	196
3	X	80,2	329	344	12	9	21	331	343	351

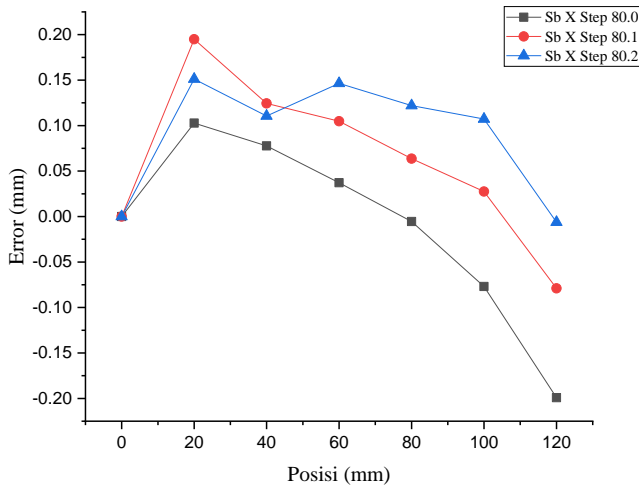
Hasil pengukuran ketelitian benda uji hasil *printing* dapat dilihat pada Tabel 4. *Error* posisi pada tiap sisi ukur ditunjukkan pada masing-masing nilai *step/unit motor*. Ketelitian dimensi ditunjukkan dari besar total *error* akurasi produk. *Error* total atau ketelitian dimensi merupakan selisih nilai *error* terbawah terhadap *error* tertinggi. Total penyimpangan ketelitian dimensi benda uji pada *step/unit* 80,0 yaitu sebesar 0,302 mm. Ketidakpastian pengukuran sebesar $\pm 0,051$ mm dengan interval kepercayaan 68% atau *coverage factor* satu. Total penyimpangan ketelitian dimensi benda uji pada *step/unit* 80,1 120 mm turun menjadi 0,274 mm. Ketidakpastian pengukuran meningkat hanya sebesar $\pm 0,006$ mm yang berarti tidak terlalu signifikan. Ketidakpastian

ketelitian dimensi benda uji pada *step/unit* 80,2 bernilai $\pm 0,030$ mm yang menunjukkan bahwa peningkatan *step/unit* dapat mengurangi ketidakpastian pengukuran. Total penyimpangan ketelitian dimensi menunjukkan nilai yang baik yaitu 0,157 mm. Benda kerja dengan posisi 60 mm sampai dengan 120 mm mewakili titik tengah *bed* sampai dengan titik akhir *bed* mesin FDM. Maka area tersebut bisa menjadi rekomendasi posisi penempatan benda untuk proses *printing* dikarenakan nilai *Maximum Percent Error* (MEP) memiliki nilai yang relatif rendah pada area tersebut. Grafik penyimpangan ketelitian dimensi benda uji dengan variasi *step/unit* motor dapat dilihat pada Gambar 7.

Tabel 4. Data akurasi produk arah X dengan variasi *step/unit* motor

No	Keterangan	Step/Unit	Posisi							Total Error
			0	20 mm	40 mm	60 mm	80 mm	100 mm	120 mm	
1	Error posisi	80.0	0	0.103	0.078	0.037	-0.005	-0.077	-0.199	
2	Stdev	80.0	0	0.03	0.039	0.051	0.014	0.041	0.025	0.302+0.051 mm*
3	MEP	80.0	0	0.51%	0.20%	0.06%	-0.01%	-0.08%	-0.17%	
4	Error posisi	80.1	0	0.195	0.124	0.105	0.064	0.028	-0.079	
5	Stdev	80.1	0	0.056	0.030	0.052	0.021	0.051	0.030	0.274 +0.056 mm*
6	MEP	80.1	0	0.96%	0.31%	0.17%	0.08%	0.03%	0.07%	
7	Error posisi	80.2	0	0.151	0.111	0.146	0.122	0.107	-0.006	
8	Stdev	80.2	0	0.010	0.016	0.025	0.027	0.022	0.030	0.157 + 0.030 mm*
9	MEP	80.2	0	0.75%	0.28%	0.24%	0.15%	0.11%	-0.01%	

*interval kepercayaan 68% dengan coverage factor :1



Gambar 7. Grafik penyimpangan ketelitian benda uji hasil printing sumbu x dengan variasi *step/unit* motor

Penyimpangan ketelitian dimensi benda hasil uji *printing* diawali adanya penyimpangan geometri yang bisa dievaluasi menggunakan pengukuran gerak *under no load* sumbu X ekstruder (Huang dkk, 2018).

Terjadi adanya perbedaan nilai penyimpangan ketelitian dengan dua metode antara pengukuran gerak *under no load* dan pengukuran CMM benda uji hasil *printing* diakibatkan karena beberapa faktor. Pada pengukuran gerak *under no load* hanya dipengaruhi oleh faktor *error* yang diakibatkan oleh kendala mekanik seperti elastisitas *timing belt*, keausan *guide rod* dan keausan *bushing* sumbu X yang berakibat pada penyimpangan posisi (Qin dkk, 2019).

Pada pengukuran ketelitian benda uji *printing* menggunakan CMM dipengaruhi oleh faktor lain seperti *shrinkage* atau penyusutan material PLA akibat dari proses pendinginan. Benda uji hasil *printing* memiliki panjang 120 mm. *Shrinkage* benda uji dengan nilai parameter 80,0 *step/unit motor* terjadi pada area 80 mm sampai dengan 120 mm dengan nilai 0,078 mm – 0,194 mm. Benda uji sepanjang titik awal 0 – 60 mm tidak terjadi *shrinkage*. *Shrinkage* material berpengaruh terhadap pengurangan dimensi benda pada bidang *printing* arah sumbu X dan Y. *Shrinkage* dapat diperbaiki dengan metode SCF (*Shrinkage Coefficient Factor*). Namun efek perbaikan dengan SCF ini menyebabkan ketelitian dimensi menjadi besar yaitu sekitar 0,552/60 mm untuk material PLA (Abdi dkk, 2018).

Metode optimasi kontrol *step/unit motor* dapat meningkatkan ketelitian dimensi benda uji *printing* tanpa harus modifikasi *G-Codes* maupun modifikasi 3D model CAD seperti yang dilakukan oleh penelitian yang sudah ada (Cajal dkk., 2016).

4. KESIMPULAN

Penelitian dengan membandingkan pengukuran *under no load* pada mesin FDM terhadap pengukuran pada benda hasil uji *printing* memiliki perbedaan hasil. Pengukuran *under no load* adalah pengukuran akurasi gerak sumbu X. Hal ini dikarenakan adanya faktor *shrinkage* pada material PLA, faktor . Akurasi pada hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa:

1. Naiknya *repeatability* pada pergerakan ekstruder akan berpengaruh terhadap peningkatan nilai ketidakpastian hasil pengukuran benda uji *printing* namun dengan nilai yang sangat kecil yaitu 6 μm . Sedangkan turunnya *repeatability* berpengaruh terhadap turunnya nilai ketidakpastian dimensi hasil *printing*.
2. Penambahan nilai *step/unit* dari 80,0 sampai dengan 80,2 menyebabkan sistematik *error gerak under no load* meningkat sebesar 0,214 mm.
3. Penambahan nilai *step/unit* dari 80,0 sampai dengan 80,2 menyebabkan total *error* atau ketelitian dimensi benda uji meningkat sebesar 0,145 mm.
4. Nilai *shrinkage* diukur dari selisih akurasi ketelitian dimensi terhadap akurasi gerak ekstruder *under no load*. Berbeda dengan perhitungan *shrinkage* secara umum yang menghitung *shrinkage* sebagai perbedaan nilai ketelitian dimensi benda uji terhadap dimensi nominal desain CAD.
5. Akurasi gerak ekstruder berbanding terbalik dengan akurasi ketelitian dimensi benda uji. Hal ini dipengaruhi oleh mesin faktor penyusutan material PLA.
6. Kecepatan *feeding* dan diameter *nozzle* ditetapkan pada nilai tertentu sehingga bukan menjadi variabel yang dicari pengaruhnya terhadap ketelitian gerak mesin dan produk benda uji.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Abdi, Z., Alyasseri, A., Khader, A. T., Al-Betar, M. A., Papa, J. P., Alomari, O. A. and Makhadmeh, S. N. 2018. Analysis of Shrinkage Compensation Factor (SCF) of FDM uPrint SE for Accuracy Enhancement. *International Journal of Integrated Engineering*, 10(7), pp. 102–116.
- Begović, E., Plančić, I., Ekinović, S. and Ekinović, E. 2014. Laser Interferometry – Measurement and Calibration Method for Machine Tools. *3rd Conference “MAINTENANCE 2014”*, (September 2015), pp. 19–28.
- Berman, B. 2012. 3-D printing: The new industrial revolution, *Business Horizons*. Kelley School of Business, Indiana University. 55(2), pp. 155–162.
- Cajal, C., Santolaria, J., Samper, D. and Velazquez, J. 2016. Efficient volumetric error compensation technique for additive manufacturing machines. *Rapid Prototyping Journal*, 22(1), pp. 2–19.
- Cruz Sanchez, F. A., Boudaoud, H., Muller, L. and Camargo, M. 2014. Towards a standard experimental protocol for open source additive manufacturing: This paper proposes a benchmarking model for evaluating accuracy performance of 3D printers. *Virtual and Physical Prototyping*, 9(3), pp. 151–167.
- Huang, Z., Dantan, J. Y., Etienne, A., Rivette, M. and Bonnet, N. 2018. Geometrical deviation identification and prediction method for additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 24(9), pp. 1524–1538.
- Qin, Q., Huang, J. and Yao, J. 2019. A real-time adaptive look-ahead speed control algorithm for FDM-based additive manufacturing technology with Hbot kinematic system. *Rapid Prototyping Journal*, 25(6), pp. 1095–1107. doi: 10.1108/RPJ-11-2018-0291.
- Sadia, M., Alhnan, M. A., Ahmed, W. and Jackson, M. J. 2017. 3D printing of pharmaceuticals. *Micro and Nanomanufacturing*, 2, pp. 467–498. doi: 10.1007/978-3-319-67132-1_16.
- Schniederjans, D. G. and Yalcin, M. G. 2018. Perception of 3D-printing: analysis of manufacturing use and adoption. *Rapid Prototyping Journal*, 24(3), pp. 510–520. doi: 10.1108/RPJ-04-2017-0056.
- Valerga, A. P., Batista, M., Salguero, J. and Giroto, F. 2018. Influence of PLA filament conditions on characteristics of FDM parts. *Materials*, 11(8), pp. 2018–2022.

Pengembangan Aplikasi Untuk Desain Perhitungan Sistem Proteksi Katodik Arus Paksa Anjungan Lepas Pantai

A. Wiryawan* dan P. T. Iswanto

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
Jl. Grafika No. 2, Kompleks UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia
E-mail: *andi.mail2015@gmail.com

Abstrak

Beberapa aplikasi desain telah dibuat oleh peneliti sebelumnya untuk mendesain sistem proteksi katodik arus paksa pada pipe penyalur dan tangki, serta sistem proteksi katodik anoda korban pada pipa dan anjungan lepas pantai. Namun sepengetahuan penulis belum ada penelitian mengenai pembuatan aplikasi desain sistem proteksi katodik arus paksa anjungan lepas pantai. Penelitian ini bertujuan untuk membuat aplikasi desain sistem proteksi katodik arus paksa pada anjungan lepas pantai.

Aplikasi dibuat dengan mengaplikasikan beberapa perhitungan dari beberapa literatur dengan pendekatan empiris. Dari hasil output aplikasi tersebut kemudian dibandingkan dengan nilai atenuasinya untuk mengkonfirmasi kecukupan arus. Kemudian analisa keekonomisan dapat dilakukan dengan memvariasikan parameter umur layan, tipe cat yang digunakan, serta luas permukaan dicat. Desain struktur dan kondisi parameter lingkungan anjungan lepas pantai "V" di PT. XYZ digunakan sebagai objek penelitian.

Output yang dihasilkan dari aplikasi hasil penelitian ini antara lain kebutuhan arus DC, jumlah anoda, tegangan & arus DC, dan kapasitas daya *transformer/rectifier*. Didapatkan bahwa pada umur layan 15 tahun membutuhkan 2 buah anoda, sedangkan dari atenuasi didapat bahwa jumlah anoda mencukupi untuk menjangkau seluruh bagian struktur. Aplikasi desain berhasil dibuat dengan merujuk pada beberapa literatur dari peneliti-peneliti sebelumnya. Selain dari sisi teknis, simulasi keekonomisan juga dapat dilakukan menggunakan aplikasi tersebut.

Kata kunci: *anjungan lepas pantai, proteksi katodik, arus paksa, atenuasi.*

Abstract

Several applications design have been made by previous researchers to design impressed current cathodic protection (ICCP) systems on pipelines and tanks, and sacrificial anodes cathodic protection systems for pipelines and offshore platforms. However, to the knowledge of the author, there are no study on the design application for ICCP system for offshore platforms. This study aims to create a design application for ICCP system for offshore platforms.

Application is made by applying formula from various literature with empirical approach. The output of the application is then compared with the attenuation value to confirm current is sufficient. Economic analysis can be done by varying the parameters of service life, type of paint, and painted surface area. Structural design and environmental parameters of the "V" offshore platform at PT. XYZ is use as research object.

Output from this application includes DC current requirements, number of anodes, DC voltages & currents, and transformer/rectifier power capacity. It was found that with service

life of 15 years requires 2 pieces of anodes, while from the attenuation it was found to be sufficient to protect all submerged parts of the structure. The design application has been successfully made by referring to some literature from previous researchers. Apart from the technical side, economic simulations also can be carried out using the application.

Keywords: *offshore platform, cathodic protection, impressed current, attenuation.*

1. PENDAHULUAN

Proteksi katodik adalah salah satu metode penanggulangan korosi yang umum digunakan untuk melindungi struktur baja yang terendam di lingkungan laut. Metode ini dilakukan dengan cara menghubungkan struktur baja yang akan dilindungi dengan metal lain yang memiliki keelektronegatifan lebih rendah atau dengan mengalirkan arus listrik melalui anoda eksternal. Dengan begitu nilai potensial struktur tersebut akan turun dibawah nilai potensial kriteria proteksi yaitu sebesar -800 mV vs Ag/AgCl (Bardal, 2004). Umumnya desain proteksi katodik di jaman modern dibuat berdasarkan *recommended practice* atau standar internasional, pendekatan empiris, dan panduan dari beberapa pengalaman praktis sebelumnya (Veronelli, 2012). Parameter lain seperti jumlah anoda dan penempatan anoda yang memiliki banyak parameter yang berpengaruh masih bergantung kepada pengetahuan dan pengalaman tenaga ahli pembuat desain sistem proteksi katodik tersebut (Lan et al., 2011).

Studi ini bertujuan untuk membuat sebuah aplikasi baku yang dapat digunakan untuk memudahkan dalam membuat desain perhitungan sistem proteksi katodik arus paksa untuk struktur anjungan lepas pantai dan melakukan simulasi keekonomisan berdasarkan parameter pemakaian kombinasi sistem proteksi katodik dan cat pelindung. Desain struktur dan kondisi parameter lingkungan pada anjungan lepas pantai "V" di PT. XYZ akan digunakan sebagai objek penelitian. Dengan adanya aplikasi yang baku, diharapkan proses desain dapat berjalan lebih efisien dan dapat mengetahui desain yang paling ekonomis.

Beberapa peneliti seperti Dewald dkk dan Veronelli melakukan penelitian mengenai pembuatan aplikasi desain proteksi atodik. Dewald dkk membuat sebuah aplikasi (*framework*) perhitungan sistem proteksi katodik arus paksa yang kemudian diaplikasikan untuk objek tangki dan pipa penyalur yang terkubur dalam tanah. Dalam aplikasinya ada beberapa metode khusus yang diaplikasikan, antara lain untuk kapasitas keluaran arus anoda mengacu kepada rekomendasi manufaktur sesuai dengan umur layannya, untuk tahanan sirkuit beliau mengacu kepada formula Dwight. Veronelli membuat aplikasi berbasis *Visual Basic for Application (VBA)* menggunakan excel untuk membuat aplikasi desain proteksi katodik anoda korban. Beliau membuat beberapa modul untuk membuat desain proteksi katodik pada antara lain pipa penyalur bawah tanah dan anjungan lepas pantai. Aplikasi tersebut memakai formula Dwight untuk menentukan tahanan anoda, serta memperhitungkan nilai kebutuhan maksimum anoda pada fase initial sampai final. Dari aplikasi tersebut kemudian dilakukan optimasi untuk keekonomisan dimensi dan jumlah anoda korban. Hal penting yang harus diperhatikan dalam penempatan anoda yaitu untuk zona percikan anoda diletakkan di batas bawah dari pasang surut air laut, sedangkan untuk zona terkubur anoda diletakkan didekat dengan permukaan tanah bawah laut tersebut untuk menjamin sebaran arus menjangkau keseluruhan bagian struktur.

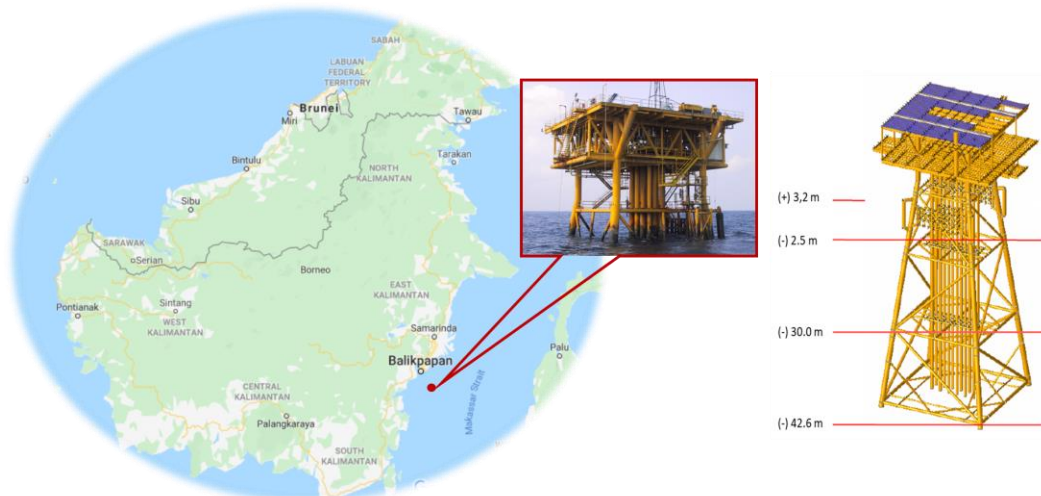
Pada penelitian ini output dari aplikasi akan berupa nilai kebutuhan arus, tegangan, serta kapasitas *transformer/rectifier* yang dibutuhkan pada sistem proteksi katodik arus paksa tersebut. Nilai atenuasi atau sebaran arus juga dihitung untuk mengetahui distribusi sebaran arus dan mengkonfirmasi kecukupan jumlah anoda. Analisa keekonomisan desain kemudian dilakukan

dengan menggunakan aplikasi tersebut dengan memvariasikan parameter umur layan, tipe cat yang digunakan, serta luas permukaan dicat.

2. METODE PENELITIAN

Aplikasi perhitungan sistem proteksi katodik arus paksa untuk anjungan lepas pantai dibuat menggunakan piranti lunak Microsoft Excel dan Matlab yang umum digunakan, sehingga mahasiswa atau industri kecil juga dapat menggunakannya.

Penelitian dimulai dengan mengumpulkan informasi mengenai beberapa parameter penting yang akan dijadikan input variabel dalam perhitungan, seperti data lingkungan, dimensi struktur dan anoda, tahanan kabel, data peralatan listrik, dan lainnya. Dari data parameter tersebut kemudian perlu ditentukan kriteria proteksi dari sistem proteksi katodik tersebut. Pada penelitian ini, salah satu anjungan lepas pantai di Kalimantan Timur digunakan sebagai obyek penelitian. Ilustrasi bentuk anjungan dan posisi geografis ditunjukkan di Gambar 1.



Gambar 1. Ilustrasi Bentuk dan Letak Geografis Anjungan “V” PT. XYZ

Pada Tabel 1 berikut ini merupakan data parameter yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 1. Parameter Desain

Parameter Desain		Parameter Anoda	
Umur Layan	10, 20, 30, 40 tahun	Dimensi Anoda	
Parameter Lingkungan		Diameter Anoda	15.875 mm
Kedalaman Air Laut	42.67 meter dibawah MSL	Panjang Anoda	1,219 mm
Temperatur Air Laut	20 °C	Jarak Antar Anoda (anoda>1)	1000 mm
Tahanan Air Laut	0.19 Ω.m	Rapat Arus Anoda (max)	600 mA/m ²
Parameter Struktur		Parameter Peralatan Listrik	
Material Struktur	ASTMA-36	Tahanan Kabel #1	0.001075 ohm/m
Luas Area Struktur	6050.48 m ²	Tahanan Kabel #2	0.00033456 ohm/m
Zona Percikan	746.79 m ²	Sumber Listrik AC	415 Volt/ 3Phase/ 50Hz,
Zona Terendam	3452.8 m ²	Transformer/Rectifier	DC output 150 Volt - 200 Ampere
Zona Terkubur	1850.89 m ²		
Tahanan Struktur	0.00000018 Ω.m		

Dari data yang didapatkan, kriteria proteksi yang digunakan adalah -800 mV terhadap elektroda acuan Ag/AgCl. Nilai proteksi tersebut sesuai dengan nilai yang disarankan di beberapa literatur (Bardal, 2004; Veronelli, 2012; Diedericks et al., 2019) dan standar internasional. Pada perhitungan selanjutnya, rumus yang dipakai banyak mengacu kepada standar internasional dan beberapa literatur. Standar internasional yang dipakai pada penelitian ini mengacu pada DNV, yang telah banyak diacu juga oleh peneliti lain dan divalidasi menggunakan eksperimen maupun pemodelan seperti yang dilakukan oleh Baete dkk, Stutzmann dan Meillier. Perhitungan desain spesifikasi sistem proteksi katodik arus paksa akan dibandingkan dengan perhitungan sebaran arus anoda atau atenuasi untuk mengkonfirmasi jumlah anoda yang diperlukan dengan kapasitas sebaran arusnya. Setelah hasil yang didapat sesuai, maka dapat dilanjutkan dengan melakukan perhitungan estimasi biaya. Perhitungan biaya dilakukan dengan memakai tiga variabel, yaitu umur layan, tipe cat yang digunakan, serta luas permukaan dicat. Dari hasil simulasi tersebut kemudian akan dibandingkan untuk menentukan kombinasi variabel yang paling optimum.

2.1. Desain Perhitungan Sistem Proteksi Katodik Arus Paksa

Desain empiris dari sistem Proteksi Katodik Arus Paksa akan dipaparkan pada bab ini. Formula perhitungan yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari panduan standar internasional maupun literatur lainnya. Setelah data-data yang dibutuhkan terkumpul, langkah selanjutnya adalah menentukan kriteria proteksi seperti kebutuhan rapat arus dan faktor kerusakan cat. Pada penelitian ini data tersebut mengacu pada DNV, kebutuhan arus bergantung pada iklim, temperatur, dan kedalaman laut. Sedangkan faktor kerusakan cat bergantung pada umur layan, tipe cat, dan kedalaman laut pada struktur yang dicat. Nilai kebutuhan arus dirumuskan dengan persamaan (1) sebagai berikut:

$$I_t = \left[\left(A \cdot \frac{i_c \cdot f_c}{1000} \right) \times (1 + S_f) \right] \quad (1)$$

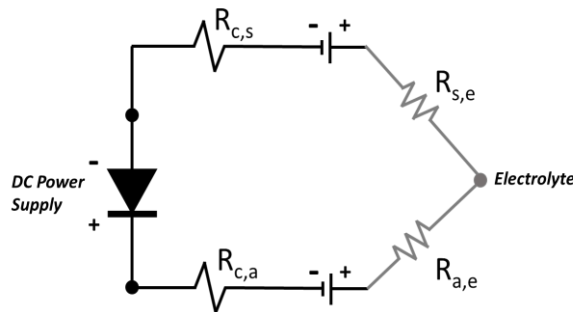
Dimana, I_t = kebutuhan arus (A), A =luas permukaan struktur (m²), i_c =rapat arus mengacu ke DNV (mA/m²), f_c = faktor kerusakan cat mengacu DNV (%), S_f = faktor

keselamatan (%). Selanjutnya dapat dihitung jumlah anoda yang dibutuhkan. Karena anoda yang digunakan adalah anoda Ti-MMO, nilai arus output maksimum yang dihasilkan dari anoda tersebut dipengaruhi oleh umur layannya (Shreir et al., 1993). Kemudian baru dapat dihitung kapasitas keluaran arus masing-masing anoda dengan menggunakan persamaan berikut:

$$I_{an} = I_d \times A_{an} \quad (2)$$

Dimana I_{an} = kapasitas keluaran arus individual anoda (A), I_d = kapasitas arus individual anoda (A/m²), dan A_{an} = luas permukaan anoda (m²). Kemudian jumlah kebutuhan anoda dapat dihitung dari kebutuhan arus total dan kapasitas keluaran individu anoda.

Langkah selanjutnya adalah mencari kebutuhan arus dan tegangan DC untuk menentukan kapasitas *transformer/rectifier* yang dibutuhkan. Pertama-tama perlu diketahui tahanan sirkuit dari sistem proteksi katodik tersebut. Tahanan pada sirkuit tersebut dapat diilustrasikan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Ilustrasi tahanan sirkuit sistem proteksi katodik arus paksa pada struktur anjungan lepas pantai

Tahanan total pada sirkuit dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$R_{Total} = R_{c,a} + R_{c,s} + R_{a,e} \quad (3)$$

Dimana, R_{total} = tahanan sirkuit total, $R_{c,a}$ = tahanan kabel pada bagian anoda, $R_{c,s}$ = tahanan kabel pada bagian struktur, $R_{a,e}$ = tahanan anoda terhadap elektrolit, dan $R_{s,e}$ = tahanan struktur terhadap elektrolit. Nilai $R_{s,e}$ dapat diabaikan karena nilainya yang sangat kecil dibandingkan dengan tahanan lainnya (Bahadori, 2014).

Setelah tahanan sirkuit didapatkan, maka jumlah arus dan tegangan DC yang dibutuhkan dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut:
Tegangan DC:

$$E_T = \{I_t \times R_T \times (1 + S_f)\} + B_{emf} \quad (4)$$

Arus DC:

$$I_{AC} = \frac{E_T \cdot I_t}{E_{AC} \cdot \eta \sqrt{3} \cdot \cos \phi} \quad (5)$$

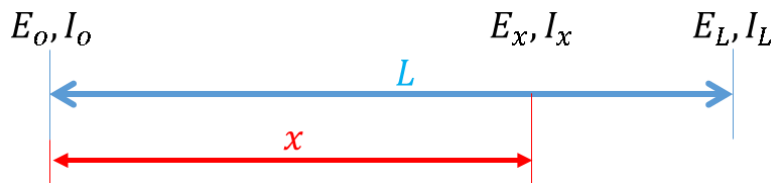
Daya transformer/rectifier:

$$P_{AC} = \sqrt{3} \times I_{AC} \times E_{AC} \quad (6)$$

Dimana E_{AC} = input tegangan AC (415 Volt), E_T = output tegangan DC yang dibutuhkan (Volt), B_{emf} = *Back Electromotive Force* (2 Volt), η = *Transformer Rectifier Efficiency* (70 %), $\cos \phi$ = Sudut fase listrik AC (0,85), I_{AC} = Input Arus AC (A).

2.2. Perhitungan Jangkauan Atenuasi/Distribusi Arus Proteksi Katodik

Ketika arus pelindung mengalir ke struktur, nilai potensial dan jumlah arus listrik akan berkurang seiring dengan bertambahnya jarak dari sumber arus atau anoda, seperti ilustrasi pada Gambar 3. Fenomena ini disebut dengan atenuasi, nilai laju penurunan arus dan potensial bergantung pada tahanan struktur, konduktivitas coating, polarisasi, jarak, dan adanya insulasi pada area sekitar sistem tersebut (Smith, 1992).



Gambar 3. Ilustrasi Hubungan Antara Jarak Dengan Nilai Arus Dan Potensial
Jangkauan atenuasi pada sistem proteksi katodik dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$E_x = E_a e^{-\alpha x} \quad (7)$$

Atau

$$X = \frac{\text{arc cosh}(\frac{E_a}{E_x})}{\alpha} \quad (8)$$

Dimana X = jangkauan arus atenuasi (m), E_a = potensial struktur dekat anoda (-550mV s/d -1200mV), E_x = potensial struktur pada jarak x (-550mV s/d -850mV). Nilai konstanta atenuasi (α) sangat berpengaruh dalam memprediksi besaran penyusutan yang terjadi sepanjang jarak terhadap anoda. Semakin kecil resistansi pada struktur termasuk cat pelindung, semakin besar nilai konstanta atenuasinya. Nilai konstanta atenuasi (α) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\alpha = \sqrt{r \cdot g} \quad (9)$$

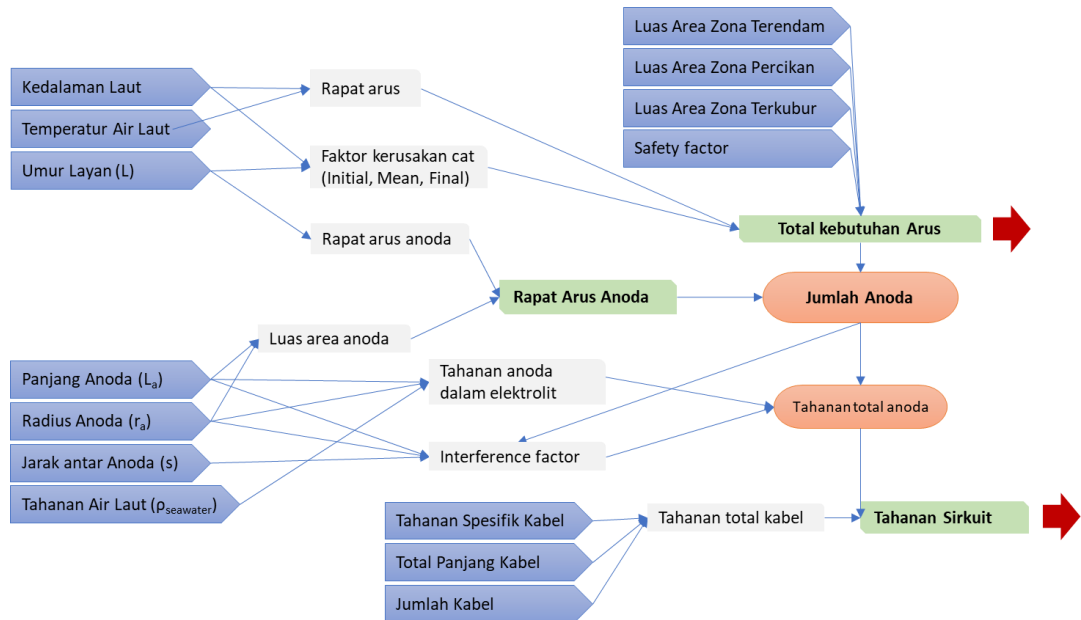
Dimana: r = tahanan struktur (ohm/m), g = konduktivitas cat (S/m).

2.3. Optimasi Desain

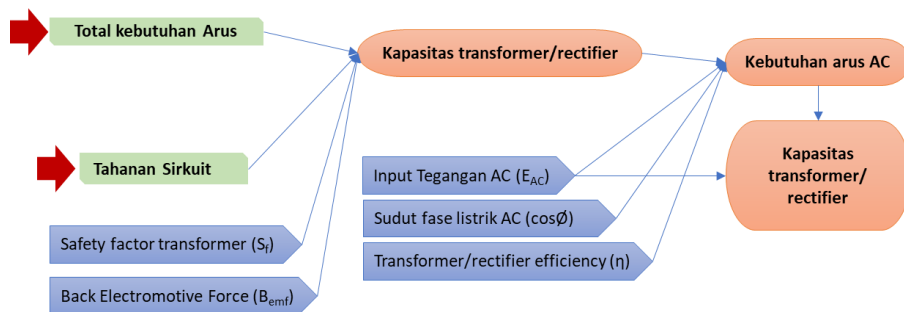
Menggunakan aplikasi perhitungan tersebut, langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi desain yang paling optimal pada anjungan lepas pantai “V” milik PT. XYZ yang menjadi objek dalam penelitian. Variabel yang akan dipakai untuk mencari nilai optimum keekonomisan dari desain proteksi katodik ini yaitu: Jenis cat, berdasarkan DNV^[5] ada 3 jenis tipe kategori yaitu Type-1: satu lapis cat epoxy, total min. DFT 20 μm , Type-2: satu atau lebih lapis cat *marine* (berbasis epoxy, polyurethane, atau vynil), total min. DFT 250 μm , Type-3: dua atau lebih lapis cat *marine* (berbasis epoxy, polyurethane, atau vynil), total min. DFT 350 μm . Luas permukaan penggunaan cat, dibagi menjadi 3 jenis yaitu *Full-coat*: yaitu seluruh permukaan struktur dicat, *Splash zone*: yaitu hanya area di zona percikan yang dicat, *Uncoated*: yaitu tidak menggunakan cat. Umur layan, dibagi menjadi 3 jenis yaitu 5 tahun, 10 tahun, dan 15 tahun.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Aplikasi untuk perhitungan telah dibuat menggunakan Microsoft Excel dan Matlab sehingga dapat dijalankan menggunakan komputer yang umum. Gambar 4a dan Gambar 4b menunjukkan skema perhitungan tersebut. Total ada 19 variabel parameter input yang dibutuhkan.



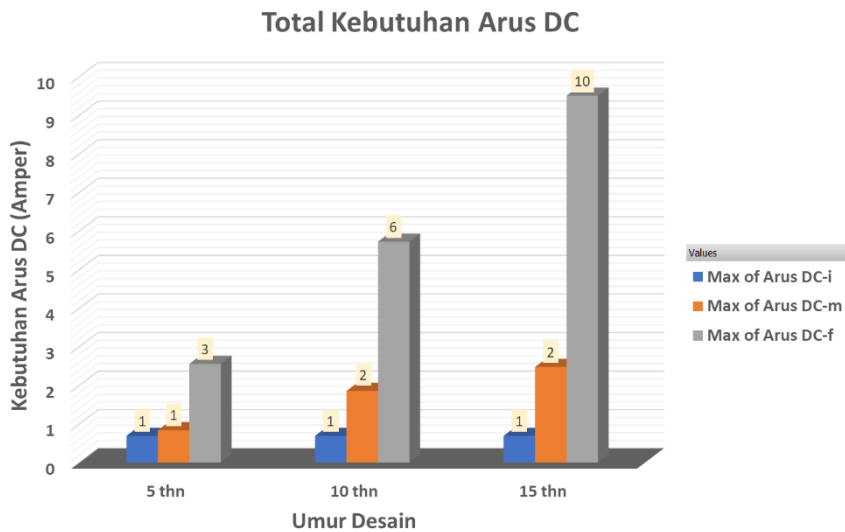
Gambar 4a.. Skema Perhitungan Aplikasi Desain Sistem Proteksi Katodik Arus Paksa Struktur Anjungan Lepas Pantai (1 dari 2)



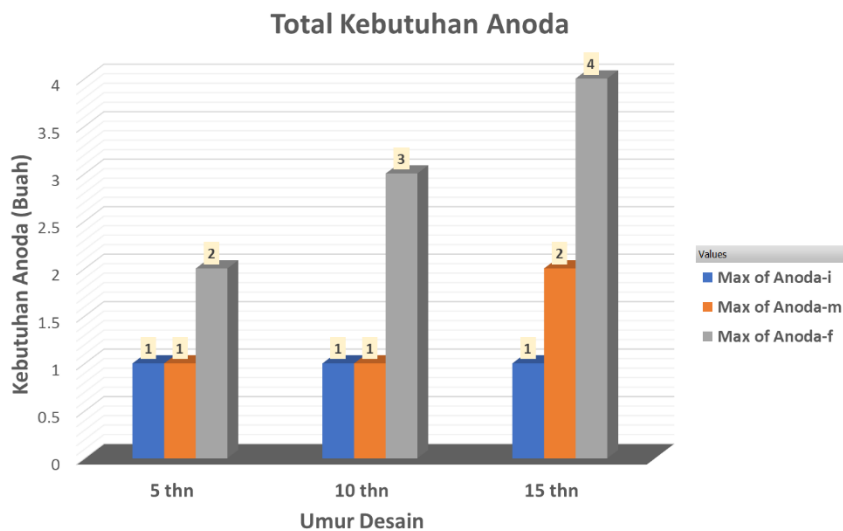
Gambar 4b. Skema Perhitungan Aplikasi Desain Sistem Proteksi Katodik Arus Paksa Struktur Anjungan Lepas Pantai (2 dari 2)

Hasil perhitungan untuk data kebutuhan arus dan jumlah anoda dapat dilihat dari Gambar 5 dan Gambar 6, hasil perhitungan tersebut untuk anjungan “V” dengan menggunakan cat tipe-2 pada keseluruhan struktur. Apabila dilihat dari kebutuhan arus pada periode *initial*, *mean*, dan *final* dari Gambar 5 dapat dilihat bahwa kebutuhan arus mengalami perubahan di setiap periode. Nilai *initial*, *mean*, dan *final* dibuat untuk mengasumsikan perubahan kebutuhan arus yang berubah seiring waktu, karena adanya fenomena penumpukan deposit kalsium, biota laut,

maupun proses polarisasi Pada struktur tanpa cat pelindung, kebutuhan arus pada masa awal lebih besar dibandingkan dengan masa pertengahan, dikarenakan oleh adanya *scale deposit* yang akan terbentuk selama masa proteksi berlangsung. Sedangkan pada periode *final* kebutuhan arus lebih tinggi dikarenakan pada masa tersebut diprediksi *scale deposit* dan *marine growth* telah rusak dan perlu dipolarisasi kembali untuk mengembalikan lapisan tersebut. Pada Gambar 5 dan Gambar 6 dapat dilihat bahwa nilai kebutuhan arus dan jumlah anode meningkat seiring bertambahnya umur layan. Hal ini disebabkan oleh faktor kerusakan cat, yang dipengaruhi oleh fungsi waktu yang menggambarkan bahwa cat akan rusak seiring bertambahnya umur struktur tersebut.



Gambar 5. Grafik Hasil Perhitungan Kebutuhan Arus DC Dengan Beberapa Variasi Umur Desain



Gambar 6. Grafik Hasil Perhitungan Kebutuhan Anoda Dengan Beberapa Variasi Umur Desain

Nilai atenuasi dipengaruhi oleh nilai tahanan struktur dan tahanan cat pelindung, sehingga dalam penelitian ini hanya dipengaruhi oleh tipe cat. Hasil perhitungan nilai atenuasi menunjukkan bahwa pada struktur tanpa cat, jangkauan arus adalah 74 meter yang berarti dapat menjangkau keseluruhan struktur anjungan “V” tersebut.

Setelah aplikasi dibuat, dilakukan optimasi sesuai dengan variabel yang telah dijelaskan pada bagian 2.3 sebelumnya. Hasil dari simulasi keekonomisan tersebut dapat dilihat pada grafik Gambar 7 berikut:



Gambar 7. Grafik Hasil Simulasi Perkiraan Biaya

Pada Gambar 7 sebagai contoh simulasi perkiraan biaya pada desain dengan variasi area permukaan yang dicat dan tipe cat yang digunakan pada umur layan 10 tahun. Dari hasil simulasi biaya, didapat bahwa untuk umur layan 10 tahun lebih ekonomis untuk tanpa menggunakan cat. Sedangkan pada umur layan diatas 30 tahun tahun, desain system proteksi katodik lebih ekonomis apabila menggunakan cat tipe II pada zona percikan (*splash zone*). Sedangkan cat pada keseluruhan struktur tidak ekonomis untuk dikombinasikan dengan system proteksi katodik, karena biaya aplikasi cat yang jauh lebih tinggi. Dilihat dari trend kebutuhan anoda, semakin panjang umur layan maka didapat semakin besar jumlah anoda yang dibutuhkan.

4. KESIMPULAN

Aplikasi sistem proteksi katodik telah dibuat dengan mengeluarkan output kebutuhan arus DC, jumlah anoda, tegangan & arus DC, dan kapasitas daya transformer/rectifier. Aplikasi dapat melakukan simulasi perhitungan biaya dengan variabel umur layan, tipe cat yang digunakan, serta luas permukaan sehingga dapat menentukan desain yang paling optimum. Optimasi desain dapat dikembangkan lebih lanjut menggunakan aplikasi ini dengan melakukan variasi variabel lainnya, seperti jenis anoda, jenis rectifier/transformer, dan cat pelindung jenis yang lain.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Bardal, E., 2004, *Corrosion and Protection*, Springer, Trondheim.
- Veronelli, L. A., 2012, Empirical and Computer Aided Design of Cathodic Protection Systems, *Paper presented at the Politecnico Di Milano*.
- Lan, Z., Wang, X., Hou, B., Wang, Z., Song, J., Chen, S., 2011, Simulation of sacrificial anode protection for steel platform using boundary element method, *Analysis with Boundary element*, hal 903-906.
- Diedericks, D. E., Schoor, G. V., Ranft, E. O., 2019, Cathodic Protection System Design Framework, *SAUPEC/RobMech/PRASA Conference Bloemfontein*, South Africa, January 28-30.
- DNVGL-RP-B401, 2017, *Cathodic Protection Design*, Edition June 2017.
- Shreir, L. L., Jarman, R. A., Burstein, G. T., 1993, *Corrosion – Metal/Environment Reactions vol.1 3rd Edition*, Butterworth-Heinemann, Woburn.
- Bahadori, A., 2014, *Cathodic Corrosion Protection System 1st Edition*. Gulf Professional Publishing, NSW, Australia.
- Dwight H. B., 1936, Calculation of Resistances To Ground. *Electrical Engineering*, December 1936, Page 1319-1329.
- NACE, 2008, *CP3 Cathodic Protection Technologist Course Manual*, NACE Standards, Houston.
- Smith, S.N., 1992, Analysis of Cathodic Protection on an Underprotected Offshore Pipeline, *NACE Annual Conference and Corrosion Show, Paper No.429*, NACE, Texas.
- Funahashi, M., Wu, H., 2013, What you need to know about MMO coated metal anodes, *NACE Corrosion 2013*, Paper no. 2107.
- Shreir, L. L., Jarman, R. A., Burstein, G. T., 2000, *Corrosion – Corrosion Control*, Vol.2, Ed. 3, Woburn, Butterworth-Heinemann.
- Baete, C., Purcar, M., Bortles, B., Van Den Bossche, B., Dewilde, J-M. (2012) CP System Validation of Offshore Structure Through Modelling, *NACE International CORROSION 2012*, Paper 0001657 Utah USA 11-15 March 2012.
- Stutzmann, J., 2017, Cathodic Corrosion Protection in the Context of Lifetime Extension of Monopile-based Offshore Wind Turbines. *Thesis*, Department of Materials and Manufacturing Technology, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- Meillier, A., Court, H., Park, S., 2003, A Review of Galvanic Anode Cathodic Protection Design Procedure, Corrosion Control Services Limited, Stafford Park, Telford, UK.
- Shreir, L. L. (1990). *Design and Operational Guidance on Cathodic Protection of Offshore Structures, Subsea Installations and Pipelines*, London: MTD Ltd Publication.

The Effect of The Solar Heat Flux to The Optimized Solar Chimney Power Plant: An Experimental Study

H.M.I. Paska^{1*}, A. Widyaparaga¹, Fauzun¹, A. Ridwan², R. Abdurrahman²

¹Department of Mechanical and Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Gadjah Mada
Grafika Street No. 2, Yogyakarta 55281 Phone. +62-274-521673

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Muhammadiyah Riau
Tuanku Tambusai Street, Pekanbaru, Riau 28294 Phone. +62-761-839577
E-mail: *¹herymadapaska@gmail.com

Abstract

The Solar Chimney Power Plant (SCPP) is an energy conversion system that would absorb solar thermal energy and convert heat air into electrical energy using a collector. The main disadvantage of the SCPP is that low efficiency because less solar heat flux can be converted to the electrical power affected by the design of the SCPP. This study was designed the SCPP by theoretical calculation for producing electrical power and experimented by designing the SCPP use a chimney with divergent shape, a collector with convergent shape, a turbine generator with 3 blades, and coating some materials at the collector's ground to increasing the electrical power. The purpose of this work was to study about the impact of the solar heat flux (I) to the temperature of air, to the velocity of air, to the power electricity and compare between power generated from theoretical calculations design and the experiments result. The result showed that the SCPP with the optimized design affect the performance of the SCPP's output power. The power generated in this experiment is 0.1 Watt. That value is greater than output power from theoretical calculations about 42.8% for the same input solar heat flux (I) 1118 W/m² both for theoretical and experimental.

Keywords: *Solar Chimney Power Plant, Blades, Collector's Ground, Turbine Generator.*

Abstrak

Solar Chimney Power Plant (SCPP) adalah sistem konservasi energi yang menyerap energi panas matahari dan menkonversi panas menjadi energi listrik menggunakan kolektor. Kelemahan utama dari SCPP adalah memiliki efisiensi yang rendah karena sedikitnya intensitas matahari yang dapat dikonversi menjadi daya listrik. Hal tersebut salah satunya disebabkan oleh desain SCPP yang belum optimal. Penelitian ini mendesain SCPP menggunakan perhitungan secara teori untuk menghasilkan energi listrik dan menguji secara eksperimen dengan menggunakan desain SCPP dengan cerobong berbentuk divergen, kolektor berbentuk konvergen, generator turbin dengan 3 sudu, dan memberi lapisan pada dasar kolektor dengan bahan yang dapat meningkatkan keluaran daya listrik. Tujuan penelitian ini adalah untuk mempelajari pengaruh intensitas matahari (I) terhadap suhu udara, kecepatan udara, daya listrik dan membandingkan hasil perhitungan secara teori dengan eksperimen. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini

menunjukkan bahwa SCPP dengan optimasi desain berpengaruh pada performa keluaran SCPP. Daya yang dihasilkan dari eksperimen sebesar 0.1 *Watt*. Nilai tersebut lebih besar 42.8 % daripada daya keluaran yang dihasilkan pada perhitungan secara teoritis untuk nilai input intensitas matahari (I) yang sama yaitu 1118 W/m^2 .

Keywords: *Solar Chimney Power Plant, Sudu, Dasar Kolektor, Generator Turbin.*

1. INTRODUCTION

The limitation of fossil fuels as the supplier energy was caused by the amount of energy usage in the world. The new concept was needed to control the use of fossil fuel by used renewable energy. Renewable energy sources are recognized as a substitute for fossil fuels that are suitable for fulfill current energy needed. One of the system that utilize the solar energy to produce power is the solar chimney power plant (SCPP). The SCPP have three main part, there were solar collector, the chimney, and the turbine as the conversion unit. The SCPP system is interesting to be developed because it has several advantages including the needed of very low cost of maintenance and very low operational sound (Zuo et al., 2019).

Several studies were investigated about SCPP. Dehghani, et al (2012) investigated SCPP in Iran, the system received radiation of 400-750 W/m^2 , with 270-315 K, ambient temperature and the diameter of collector of 1000 meters, the tower height of 350 meters. The result of their experiment was generated 1-2 MW electric energy (Dehghani and Mohammadi, 2014).

A. Ridwan, et al (2018) investigated the SCPP with height tower chimney of 193 cm and the inner diameter of 0,83 meters. The dimension of SCPP and experimental data were tested. The SCPP was made with the dimension of 1.3225 m^2 in collector as a cover area and the thickness was 5 mm. The material of collector ground in that study was made from aluminum foil, carpet and styrofoam. The targeted output power in their theoretic calculation was 0.03 *Watt* while the actual experiment values ranged between 0.0133 - 0.0317 *Watt*. The targeted inlet air velocity from theoretical calculation was 2.15 m/s while the actual experiment value varied from 1.4 m/s to around 2.2 m/s. The result obtained from their experiment were showed that in Riau Province, the potential of SCPP system able to be assess.

Auryubi, et al (2018) was investigated SCPP with the chimney dimension 6.5 meters of height, and 0.15 meters of inner diameter. The collector was made of acrylic, and it was a circle shape with a diameter of 6 meters. In Auryubi's experiment, they add thermal enhancing channel to collector of the SCPP. Those additional channel increase air temperature inside collector. The wall temperature of thermal enhancing channels is 100°C as the result of solar heat flux (I) 1000 W/m^2 . The value of power generation with enhancing channel is 23.1% greater than power generation without enhancing channels. Also for air temperature inside the collector, the value is increase about 5.88% greater than SCPP without enhancing channels.

Several experiments were explained that the SCPP performance can be improved by choosing the right dimension for the chimney like the height and the inclination of the chimney, the area inclination of the collector, the amount of solar heat flux, the number of blade turbines, and others. The purpose of this study was to know about the effect of the solar heat flux (I) to the air temperature (ambient temperature (T_{amb}), chimney neck temperature ($T_{air,o}$), and collector temperature (T_c)), to the air velocity (ambient wind velocity (u_w) and chimney neck air velocity ($v_{o,coll}$)), to the electrical power and compare the power generated from theoretical calculations design to the experiments result. In this experiment, the SCPP design was optimized

to improve its performance by designing the divergent chimney (Hu et al., 2016), the convergent collector, using 3 blades of the turbine, and coating the top side of the collector ground with asphalt that used concrete and gravel for the materials (Ghulamchi et al., 2016).

2. EXPERIMENTAL APPARATUS AND PROCEDURES

In this experiment, the data variables were collected to design the SCPP and testing the system. The dimensions of design were obtained from mathematical equation that shown at Equation 2 until Equation 10. That dimension then used as the basis for built a SCPP design.

Nomenclature	
I	Solar heat flux (W/m ²)
T_{amb} $T_{air,i}$	ambient temperature (K)
$T_{air,o}$ T_c T_g	chimney neck temperature (temperature at the turbine), cover temperature, and ground temperature, respectively (K)
u_w	ambient air velocity (m/s)
$v_{o, coll}$	velocity of air in the neck chimney (at the turbine) (m/s)
A_{ch} A_c A_g	neck chimney's surface area, collector cover's surface area, and collector ground's surface area, respectively (m ²)
H_{ch}	chimney's height (m)
P_{ele}	electrical power (Watt)
$P_{TUR,MAX}$	turbine power (Watt)
$P_{KINETIC WIND}$	wind kinetic power (Watt)
ΔP_{out}	Differentiation in SCPP output power between output power targeted and output power from experiment (Watt)
P_{ex}	The output power generated in the experiment (Watt)
P_{th}	The output power generated in the theoretical design calculation (Watt)
$\eta_{turbine}$	efficiency of turbine (%)
$\eta_{generator}$	efficiency of generator (%)
θ	collector's inclination (°)
L_{g-c}	average distance between collector cover and collector ground (m)
ρ_{air}	air density (kg/m ³)
\dot{m}	mass flow rate of air (kg/s)
$h_{con,c-air}$	convective heat transfer coefficient from cover to air inside collector (W/m ² K)
$h_{con,g-air}$	convective heat transfer coefficient from ground to air inside collector (W/m ² K)
$h_{r,g-c}$	radiation heat transfer coefficient from ground to cover (W/m ² K)
L_u	coefficient of heat loss from the outer cover's surface to the ambient (W/m ² K)
L_d	Thermal Conductivity (W/m ² K)
D_{coll}	diameter of Collector (m)
α_c α_g	absorptivity of the collector cover and ground, respectively
ϵ_c ϵ_g	emmissivity of the collector cover and ground, respectively
τ_c	transmissivity of the collector
μ	dynamic viscosity (kg/m s)
C_p	specific Heat (J/kg K)
K_{air}	thermal Conductivity (W/ m K)
ν	kinematic viscosity (m ² /s)

In this experiment the SCPP was designed on Production Process Laboratory. Several data would be taken after SCPP was built to compare with variable result in theoretic

calculation. The construction design of the SCPP was made with high precision to minimize losses and data error. The material used was based on physical property, economic value and availability on the market. The material used for the cover and ground were followed to the assumption the design such as the value of absorptivity, transmissivity and emissivity.

The chimney shape in this experiment was designed using divergent shape to optimize the airflow. Aluminium used as the material of the chimney. From the mathematical calculation and iteration process, the height (H_{ch}) and the area (A_{ch}) of the chimney was obtained. The collector shape in this experiment designed with convergent form. This shape was made to increasing air velocity in the collector. The collector has three part, those are collector cover, collector ground, and collector cover stand. The collector cover used an acrylic material as a heat collector from solar heat flux. The space between cover collector and ground collector as the air inlet, designed liked a nozzle. Those was used to increased the air entered the system. The collector's ground was used asphalt layer at the top and then followed by concrete and gravel at below. The asphalt and the concrete was selected as a material because it could be absorb and keep the heat as well and it would be optimum to produce a power. The proposed model in this study is shown in Figure 1 as a schematic diagram.

The previous research by Aurybi et al (2018) showed that the main parts of the SCPP consist of two parts; the chimney and the collector. In this study, the mathematical model was made to established and to enhance the collector and the chimney performance. The continuity, momentum, and energy equation were solved using mathematical model. Aurybi also using performance equations of the system to calculate efficiency and power output from the system. The mathematical model calculation and performance equation in this study were adopted from Aurybi's study.

2.1. Mathematical Calculation

From Figure. 1 we can show that the solar heat flux heated the air inside the collector. The increasing of air temperature inside (T_{air}) makes airflow through the center of the collector and then the air exits through the chimney due to temperature differences or natural convection. The mathematical model was used to estimate the temperature distribution at the collector cover (T_c), at the ground collector (T_g) and the air inside the collector (T_{air}). The generator was a converter of mechanical power (input) into electrical power (output), in the real situation all of input power cannot be converted to the electrical power due to mechanical losses. The efficiency (η) was the ratio between output power and input power, and always less than 100%. This study was assumed that solar chimney would be generated power of 0.07 Watts. Aurybi et al (2018) explained that an electrical power was affected by turbine efficiency (80%) and generator efficiency (95%) of maximum turbine power. Therefore it was important to identify the losses power that causes of efficiency decreased.

$$P_{ele} = \eta_{turbine} \cdot \eta_{generator} \cdot P_{TUR,MAX} \quad (1)$$

Equation 1 showed that the electrical power equal to the multiplication of the turbine efficiency ($\eta_{turbine}$), the generator efficiency ($\eta_{generator}$) and maximum turbin power $P_{TUR,MAX}$. Maximum turbine power was the maximum power that obtained from the air that passes trough to the turbine. In this case represented as a constanta (C) with an ideal value of $\frac{2}{3}$. The constanta (C) was represented as the ratio between the pressure drop of turbine and the overall pressure

potential[8]. This coefficient has a different value between 0 and 1. The maximum turbine power can be calculated using the equation below:

$$P_{TUR,MAX} = \frac{2}{3} \cdot P_{KINETIC WIND} \quad (2)$$

The air that was entered into the collector of SCPP has potential energy. The potential energy of the air was depend on the air flow rate (\dot{m}), gravitation (g), height of chimney (H_{ch}), and temperature differences (Zhou et al., 2007). In this experiment, the turbine was in the chimney neck. When the air drived the turbine the potential energy was turned into kinetic energy. Therefore the potential energy was equal to the kinetic energy (Zhou et al., 2007). The power generated from kinetic energy of air can obtained from the equation below:

$$P_{KINETIC WIND} = \frac{1}{3} \rho_{air} \cdot A \cdot v_{o, coll}^3 \quad (3)$$

Where $P_{KINETIC WIND}$ is the power generated by kinetic energy of the air (Watt). ρ_{air} is density of air (kg/m^3). A is a collector surface area (m^2). $v_{o, coll}$ is velocity of air in the chimney neck (Koonsrisuk and Chitsomboon, 2013).

All of variables were known from collecting data with measuring devices as a basis for the initial calculation of the design in the SCPP. These variables include I , α_c , T_{amb} , τ_c , α_g , L_d , $T_{air,i} = T_{amb}$, σ , ϵ_g , ϵ_c , and u_w . All values of variables shown in Table 1.

The parameter of variable were determined by assumed the theoretical calculations of the SCPP design process. In this study variable parameters that assumed were $A_g = A_c$, A_{ch} , T_{air} , T_g , T_c , $\theta = 3^\circ$, $L_{g-c} = 0.275 m$. All values of variable parameters also shown in Table 1.

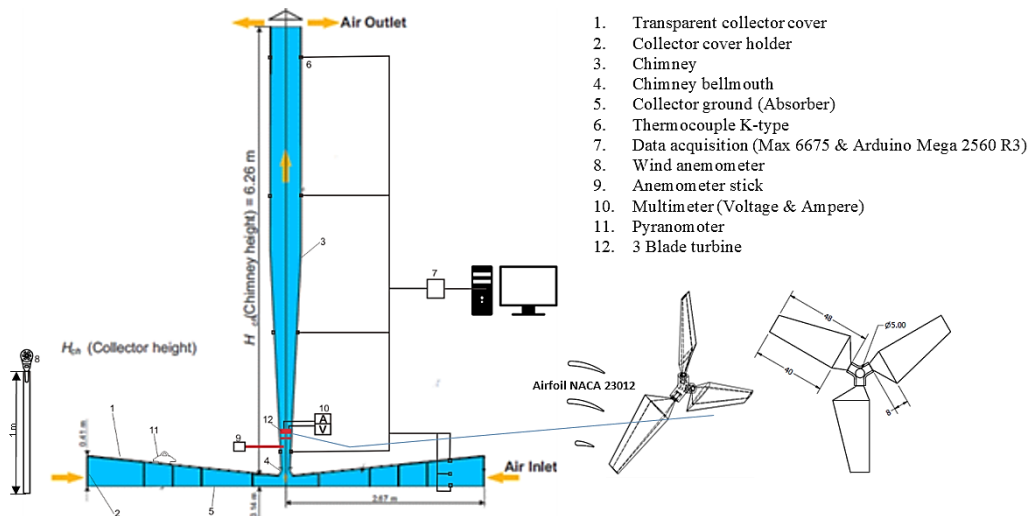


Figure 1. The schematic diagram of the experimental apparatus.

By assuming the chimney surface area (A_{ch}), the value of air velocity in chimney neck ($v_{o, coll}$) was obtained. The velocity of the chimney neck is the air velocity in the blade of turbine.

The air velocity on chimney neck ($v_{o,coll}$) was influenced by the gravitation, the height of chimney and the ratio of temperature difference to the ambient temperature. From assuming $v_{o,coll}$ dan T_{air} the high of chimney will be obtained H_{ch} .

We can use equation bellow to find H_{ch} :

$$v_{o,coll} = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{ch} \cdot \frac{(T_{air} - T_{ambient})}{T_{ambient}}} \quad (4)$$

Design of air flow rate depend on the velocity of air in the chimney neck ($v_{o,coll}$), chimney cross section area (A_{ch}) and the air density in chimney (ρ_{air}). From assuming T_{air} , we will get ρ_{air} . The additional variables A_{ch} and $v_{o,coll}$ will be obtained air flow rate (\dot{m}):

$$\dot{m} = \rho_{air} \cdot A_{ch} \cdot v_{o,coll} \quad (5)$$

By the assumption T_{air} , we would get μ, C_p, K_{air}, ν .

2.2. Energy Balance of SSCP Collector

The source of the energy was direct from the solar heat flux and the reflection of solar heat flux from ground to the cover. Those energy equal to the energy discharged by the collector's cover (convective heat transfer from the cover to the air flow inside the collector and heat losses from the cover into ambient atmospheric). The energy balance equation for the cover shown bellow:

$$(I \cdot \alpha_c \cdot A_c + h_{r,g-c} \cdot A_g \cdot (T_g - T_c)) = (h_{con,c-air} \cdot A_c \cdot (T_c - T_{air}) + L_u \cdot A_c \cdot (T_c - T_{amb})) \quad (6)$$

Transmissivity of solar heat flux equal to the energy discharged by the collector's ground, the convective heat transfer from the ground to the air flow in the collector, also the reflection of solar heat flux from the ground to the cover and the heat conduction on the ground. The energy balance equation for the collector's ground shown bellow:

$$(I \cdot \tau_c \cdot \alpha_g \cdot A_g) = ([h_{con,g-air} \cdot A_g \cdot (T_g - T_{air})] + [h_{r,g-c} \cdot A_g \cdot (T_g - T_c)] + [L_d \cdot A_g \cdot (T_g - T_{amb})]) \quad (7)$$

The heat energy balance in the air inside of collector was the energy received by the air in the collector which equal to the energy released from the air inside of collector. There were convective heat transfer from cover to air and convective heat transfer from ground to air. The energy balance equation for the air inside collector shown bellow:

$$(\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{air,o} - T_{air,i})) = ([h_{con,c-air} \cdot A_c \cdot (T_c - T_{air})] + [h_{con,g-air} \cdot A_g \cdot (T_g - T_{air})]) \quad (8)$$

Generally there were three equations of collector energy balance : the cover energy balance, the ground energy balance and the air inside collector energy balance. Those equations can be solved by iteration method with Microsoft Excel Solver with energy balance validation <5%. We can got T_{air}, T_g, T_c with assumption $A_g = A_c$. All variables are entered into the energy balance equation to got the area of A_{ch}, A_g and A_c and high chimney H_{ch} .

$$A = \frac{(\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{air,o} - T_{air,i}))}{([h_{con,c-air} \cdot (T_c - T_{air})] + [h_{con,g-air} \cdot (T_g - T_{air})])} \quad (9)$$

The results of iteration using Microsoft Excel Solver with validation of cross-sectional area and energy balance <5%, then got the area of A_{ch} , A_g and A_c and high chimney H_{ch} . The initial design variables that has known also has assumed. The calculation did multiple times until get the collector cross-sectional area both on the collector's cover (A_c) and on the collector's ground (A_g) which has convergent result. Cross sectional area was circles so the length of the collector's diameter could be calculated as follow:

$$D_{coll} = \sqrt{\frac{A_{coll} \pi}{4}} \quad (10)$$

3. RESULT AND DISCUSSION

The variables was needed to determine the dimensions of SCPP design such as the solar radiation (1118 W/m²), the absorptivity of acrylic cover collector (0.04), the ambient temperature T_{amb} based on BMKG data (28.8°C or 301.8 K), the transmissivity of acrylic cover collector (0.92), the absorptivity of ground gravel collector with non-metallic dark color (0.16), conductivity of ground gravel ($0.7 \frac{W}{m^2 K}$), the constan of Stefan Boltzman ($5.6697 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$), the ground gravel emissivity with dark black (0.94), the acrylic cover collector emissivity (0.94) and the ambient wind speed (5.27 m/s).

The data variables were obtained from the literature study and will be used to design the SCPP dimensions such as the cross-sectional area of the ground collector and cover collector with equal value, $A_g = A_c$ of 24.09 m². The cross-sectional area of the chimney neck is $A_{ch} = 0.011304$ m², the average temperature of the working fluid is 321.52 K, the average temperature of the ground collector is 345.81 K, the average temperature of collector's acrylic cover is 308.20 K, the inclination angle of collector's acrylic cover is 3° and the space between collector's ground and collector's acrylic cover is 0.275 m. The height of chimney is 6.26 m, it obtained from the calculation of velocity design which is affected by the gravitation.

Table 2 is the result from theoretical calculation, that value obtained by data variables from design of SCPP. It shows the data are used in the theoretical calculation design to know the power generated from the 3 blades turbine generator. The solar heat flux used is 1118 W/m² which produces the output power 0.07 Watts. Those power value used as a reference in this study to compare with experimental output power in the same of the solar heat flux variable.

Table 1. Assumption and Environment Conditions

Variable	
Solar radiation (I)	1118 W/m ²
Accrylic collector cover absorptivity (α_c)	0.04
Ambient temperature (T_{amb})	301.8 K
Accrylic collector cover transmissivity (τ_c)	0.92
Gravel ground collector absorptivity (α_g)	0.16

Gravel ground collector conductivity (L_d)	$0.7 \frac{W}{m^2 K}$
Stefan-Boltzman constant (σ)	$5.6697 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$
Gravel ground collector emissivity (ϵ_g)	0.94
Accrylic collector cover emissivity (ϵ_c)	0.94
Ambient wind speed (u_w)	5.27 m/s
Average temperature of working fluid (T_{air})	321.52 K
Average temperature of ground collector (T_g)	345.81 K
Average temperature of accrylic collector cover (T_c)	308.20 K
Slope angle of accrylic collector cover (θ)	3°
Average distance between ground collector and accrylic collector cover (L_{g-c})	0.275 m

3.1. The Effect of Solar Intensity to The Air Tempereare

Figure 2 shows a correlation between solar heat flux (I) and the temperature (ambient temperature (T_{amb}), air temperature in the neck chimney ($T_{air,o}$), temperature on the cover (T_c) and temperature on ground (T_g)). That figure shows that the increasing of solar intensity will causes increasing all of the temperature, those are an ambient temperature (T_{amb}), air temperature on the chimney neck ($T_{air,o}$), temperature on the cover (T_c) and temperature on ground (T_g). The increasing of temperature occurred because the more the solar heat flux (I) received, the more heat was received. As we know that the heat proportional to the temperature.

3.2. The Effect of Solar Intensity to The Air Velocity

Figure 3 shows a correlation between solar heat flux (I) and air velocity both ambient air velocity (u_w) and air velocity on the chimney neck ($v_{o,coll}$). That figure shows the increasing of solar heat flux (I) will cause the ambient air temperature (T_{amb}) and chimney neck temperature ($T_{air,o}$) increase. The increasing of temperatures caused by increasing of the air volume and the density of the air decreased. The change of air density on the collector and chimney neck will be effect a high pressure. Then the high presure will be effect a buoyancy force on the chimney neck, the buoyancy force will moved upward to low pressure area. The air mass flow rate caused the increasing of air velocity ((ambient air velocity (u_w) and air velocity on the chimney neck ($v_{o,coll}$)). The air mass flow rate caused the increasing of air velocity ((ambient air velocity (u_w) and air velocity on the chimney neck ($v_{o,coll}$)).

Table 2. Theoretical Calculation

Solar radiation (W/m ²)	Ambient temperature (K)	Ambient wind speed (m/s)	Air temperature on the chimney neck	Temperature of cover (K)	Temperature of ground (K)	Air velocity on the chimney neck (m/s)	Power generated from a 3 blade turbine generator (W)
1118	301.8	5.27	341.24	308.20	345.81	2.83	0.07

3.3. The Effect of Solar Intensity to The Electrical Power

Figure 4 shows a correlation between solar heat flux (I) and electrical power generated from a 3 blade turbine generator (P_{ele}). This figure shows the increasing of the solar heat flux (I) will cause velocity of air increased in the chimney neck ($v_{o,coll}$). The increasing of air velocity at the chimney neck ($v_{o,coll}$) causes the air moved to the turbine faster and the kinetic power of the wind increased. The turbine's rotation causes the rpm rotation increase and decreased the torque so the turbine energy will be higher. The energy of turbine after adjusting to the efficiency of generator can be converted to electrical energy (P_{ele}).

3.4. The Correlation of Velocity and Electrical Power

Figure 5 shows a correlation between air velocity (both ambient air velocity (u_w) and air velocity on the chimney neck ($v_{o,coll}$)) and electrical power generated from a 3 blade turbine generator (P_{ele}). As mentioned before that the increasing of air velocity at the chimney's neck ($v_{o,coll}$) causes the air move to the turbine faster and it makes the wind's kinetic power is higher. The turbine's rotation causes the rpm rotation increase and decreased the torque so the turbine energy will be higher. The energy of turbine after adjusting to the efficiency of generator can be converted to the electrical energy (P_{ele}).

Figure 6 shows a comparison between the solar heat flux (I) with the power generated from the experiment. The figure shows the value of the solar heat flux (I) starting from 8:25 a.m. has increased until at 12:25 a.m. and then the solar heat flux (I) has decreased. Figure 6 also shows the value of the power generated at 8:25 a.m until 5:25 p.m. The result data are fluctuating. The highest power generated at 11:25 a.m with a power percentage of 0.10 Watts and the solar heat flux is 1118 W/m². In the experiment, the high solar heat flux does not directly have a constant effect on the amount of power, so the power produced fluctuates but overall still has a positive correlation. The high electrical power is influenced by the amount of kinetic power. The kinetic power is influenced by the density of air, area and air velocity at the chimney's neck. The constant temperature difference between ambient temperature and ground temperature as well as between ambient temperature and the temperature at the chimney's neck results in uniform air velocity to the flow of air entering through the inlet collector to the collector and from the collector to the chimney. Air velocity and density at the chimney neck affect the amount of wattage produced. However, as the temperature and temperature changes in the chimney neck in the rainy season also influence the air velocity and density so that the wattage generated even though the solar heat flux is high. In the first step, the effect of the heat flux cannot be absorbed evenly throughout the ground, this causes a non-uniform temperature difference, unconcentrated airflow and finally reducing the kinetic energy possessed by the air.

From Figure 6 we can see that the output power resulting from the eksperimen have higher value than the output power from target. The experiment resulting electrical power 0.1 Watt while the electrical power which has determined before is 0.07 Watt. From that result we can conclude that with the same intensity used, the electrical power resulting from experiment is higher than the theoretical design calculation.

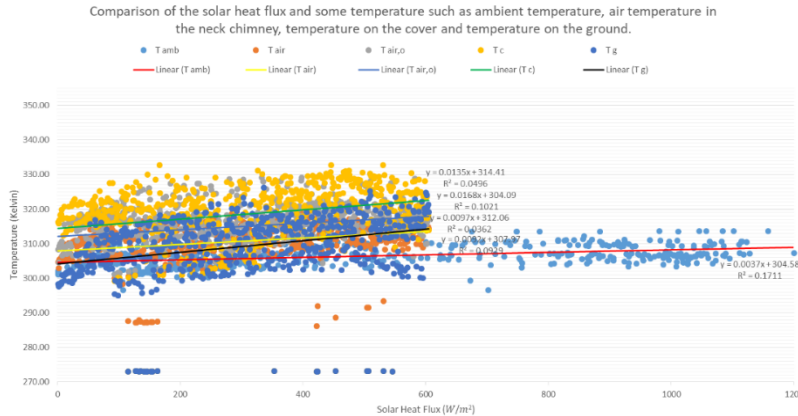


Figure 2. Comparison of the solar heat flux and some temperature such as ambient temperature, air temperature in the chimney neck, temperature on the cover and temperature on the ground.

Table 3. Experiment results

Solar radiation (W/m ²)	Ambient temperature (K)	Ambient wind speed (m/s)	Air temperature on the chimney neck (K)	Temperature of cover (K)	Temperature of ground (K)	Air velocity on the chimney neck (m/s)	Power generated from a 3 blade turbine generator (W)
1118	304.6	5.3	331.98	310.77	325.74	2.47	0.10

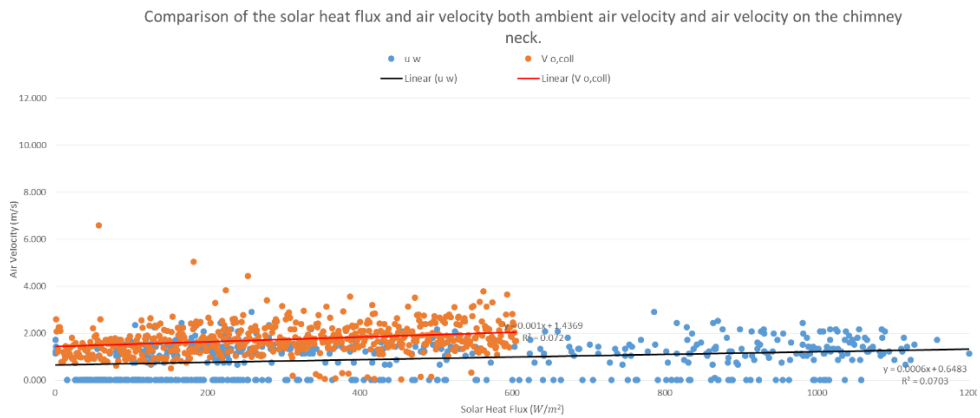


Figure 3. Comparison of the solar heat flux and air velocity both ambient air velocity and air velocity on the chimney neck

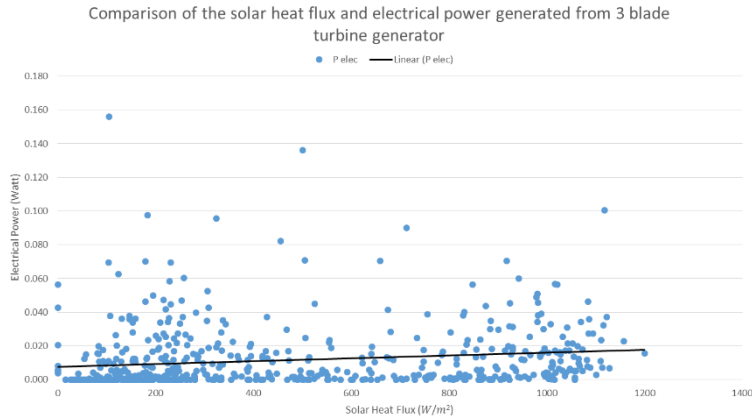


Figure 4. Comparison of the solar heat flux and electrical power generated from 3 blade turbine generator

Table 4. Comparison of theoretical calculation designs with experiment results

Descripti on	Solar radiati on (W/m ²)	Ambient temperat ure (K)	Ambie nt wind speed (m/s)	Air temperat ure on the chimney neck (K)	Temperat ure of cover (K)	Temperat ure of ground (K)	Air velocit y on the chimney neck (m/s)	Power generat ed from a 3 blade turbine generat or (W)
Theoritic al Calculati on	1118	301.8	5.27	341.24	308.20	345.81	2.83	0.07
Experim ent results	1118	304.6	5.3	331.98	310.77	325.74	2.47	0.10

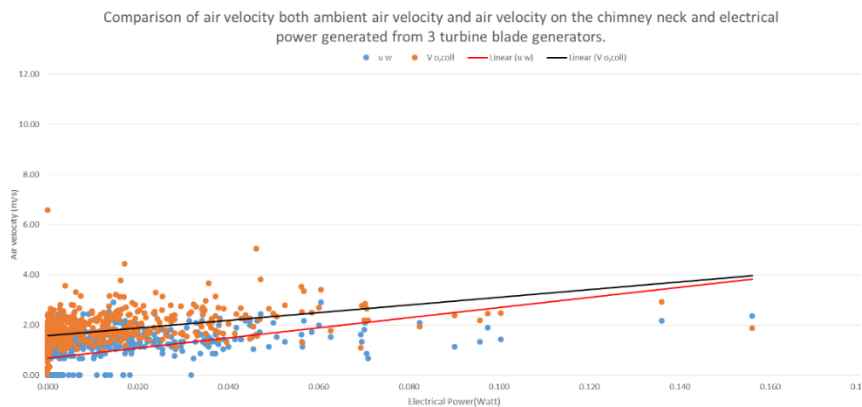


Figure 5. Comparison of both air velocity and air velocity on the chimney neck and electrical power generated from 3 turbine blade generation

Figure 7 shows the value of the power generated from the experimental results very high at 11:25 a.m, this happens at 11:25 a.m using the solar heat flux (I) value of 1118 W/m² has the same solar heat flux (I) value used in the design. It can be concluded the power generated in the experimental results is greater than the target of the electrical power obtained theoretically because in the design of theoretical calculations, it is assumed that the straight chimney is not divergent and the divergent collector but in the experiment the chimney is divergent, the divergent collector and the collector ground are used asphalt layers at the top and then concrete also gravel. Those material is good to absorb and store heat. The other data below of targeted electrical power because the values of solar heat flux (I) are used different between experiment and theoretical.

From Figure 7 we can see that the desired target has not been reached. Things that cause the target has not been reached the target has not been reached because of many losses in this solar chimney system. One of the losses that occur is due to the flow of air that is not uniform and not concentrated toward the chimney. This causes the airflow to collide with each other inside the collector which causes a reduction in the air's kinetic energy. Therefore, a solution offered to achieve the target are:

1. Creating an air-channel that connects the ambient airflow from the inlet collector to the collector and from the collector to the chimney. This making the airflow produced air velocity that rotates the turbine with 3 blades to produce optimal power.
2. Maintaining a constant temperature difference between ambient temperature and ground temperature and between ambient temperature and the temperature at the chimney neck produces an air velocity equivalent to the flow of air entering through the inlet collector to the collector and from the collector to the chimney.

Both air velocity and density can make the electric power produced constant and reach the maximum target. This can only be done in a laboratory, but it is difficult to do in an open environment that requires natural phenomena.

In Table 3 we can also shows the value of air temperature at the chimney neck, temperature at ground and velocity of air at the chimney neck. The theoretical calculation design is higher than the experimental results, it happened because the lower chimney neck air temperature, ground temperature and velocity of air at the chimney neck then the value of the power generated from the 3 blade turbine generator at the solar chimney power plant is getting higher.

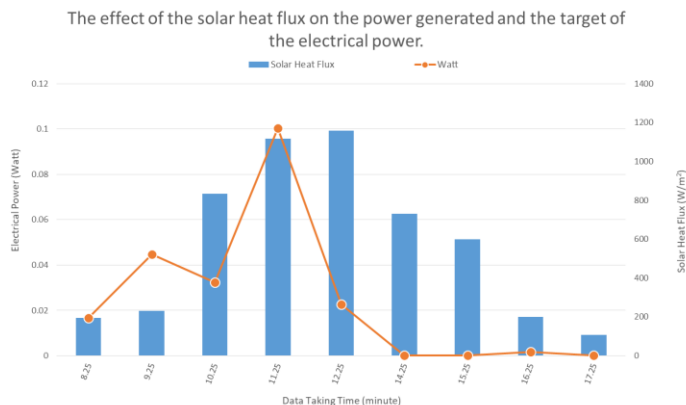


Figure 6. The effect of the solar heat flux on the power generated

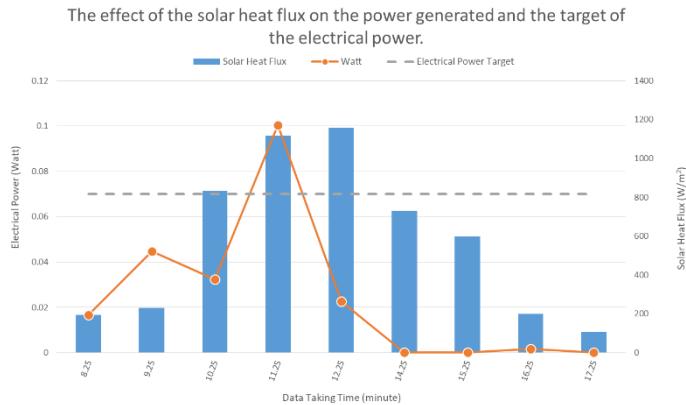


Figure 7. The effect of the solar heat flux on the power generated and the target of the electrical power

In Table 4 shows a comparison between the design of theoretical calculations with experimental results. By using the same value of sunlight intensity will be obtained ambient temperature, ambient wind velocity, temperature on the cover, velocity of air at the chimney neck and the power generated. From the table shows the result from experimental is higher than theoretical calculation design. This shows that the increasing of ambient temperature, ambient wind velocity, temperature on the cover and velocity of air at the chimney neck, the power generated from the 3 blade turbine generator at the SCPP is also increased.

From the results of the output power, the increase in output power generated due to the optimization of the shape of the convergent collector, divergent chimney shaped and 3 blades turbine by:

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{out} &= \left(\frac{P_{ex} - P_{th}}{P_{th}} \right) \times 100\% \\
 &= \left(\frac{0.10 - 0.07}{0.07} \right) \times 100\% \quad (11) \\
 &= 42.8\%
 \end{aligned}$$

where ΔP_{out} is an increase in SCPP output power. P_{ex} is the output power generated in the experiment. P_{th} is the output power generated in the theoretical calculation design.

4. CONCLUSION

The results obtained from this study are as follows:

1. The results of energy balance calculation on the cover, on the working fluid (air) and on the ground produce the basic dimensions of the SCPP design using iteration solving method. The dimension result from that method were $A_g = A_c = 24.09 \text{ m}^2$, $A_{ch} = 0.011304 \text{ m}^2$ dan $H_{ch} = 6.26 \text{ m}$. Those basic design used to build SCPP system with output power target 0.07 W. With that output power target, the other dimension like the diameter of collector's cover is 5.538 m, the diameter of chimney is 0.200 m, the diameter of the chimney neck is 0.120 m, and the average distance between collector's cover and the collector's background is 0.275 m.
2. The optimized design that created to improve SCPP system performance by making a chimney with divergent shape, a collector with convergent shape, a turbine with 3 blade, and the collector's ground that coated at the top side with asphalt using concrete and gravel for the materials.
3. The increasing of the solar heat flux (I) proportional with increasing of the ambient temperature (T_{amb}), the collector cover temperature (T_c), the collector ground temperature (T_g) impact on increasing the air inside collector temperature (T_{air}) flowing through the collector and flow up to the chimney increasing the chimney's neck temperature ($T_{air,o}$).
4. The increasing of the solar heat flux (I) proportional with increasing of the ambient velocity (u_w) and the air velocity in the chimney neck ($v_{o, coll}$).
5. The increasing of ground temperature (T_g) and temperature at the chimney neck ($T_{air,o}$) impact on increasing of air velocity at the chimney neck, thus also impact to increasingly the power generated from the 3 blade turbine generator at the solar chimney power plant.
6. The material for layer on collector ground is effect to generated a power. The asphalt material used in the ground collector is better as an absorber material so that it can take a long time to store heat to heat the flow of ambient air entering the collector. The better the absorption of solar radiation by asphalt material, the greater the heat transfer that can be delivered by ground to air in the collector. In addition, a uniform application of asphalt in the collector will cause a constant temperature in the soil causing a difference between the ambient temperature and the ground temperature and between the ambient temperature and the temperature at the neck of the chimney to produce an even velocity of air to the flow of air entering through the inlet collector to the collector and from the collector to the chimney. It also can maintain the temperature in the chimney neck constant so that it can produce a large density in the chimney neck. Both the constant air velocity and density can affect the electric power generated.
7. In the experimental results the highest power generated at 11:25 a.m., which is equal to 0.10 Watts with the solar intensity was 1118 W/m^2 .

5. REFERENCES

- A. Koonsrisuk and T. Chitsomboon, 2013, "Mathematical modeling of solar chimney power plants," *Energy*, vol. 51, pp. 314–322.
- A. Ridwan, H. Hafizh, and M. R. Fauzi, 2018, "Design and experimental test for solar chimney power plant: Case study in Riau Province, Indonesia," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 403, no. 1, pp. 0–8.
- L. Zuo et al., 2019, "Performance analysis of a wind supercharging solar chimney power plant combined with thermal plant for power and freshwater generation," *Energy Convers. Manag.*, no. August, p. 11228.
- M. A. Aurybi, S. I. Gilani, H. H. Al-Kayiem, and A. A. Ismaeel, 2018, "Mathematical evaluation of solar chimney power plant collector, integrated with external heat source for non-interrupted power generation," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 30, no. December 2016, pp. 59–67.
- M. A. dos S. Bernardes and T. W. von Backström, 2010, "Evaluation of operational control strategies applicable to solar chimney power plants," *Sol. Energy*, vol. 84, no. 2, pp. 277–288.
- M. Ghalamchi, A. Kasaeian, M. Ghalamchi, and A. H. Mirzahosseini, 2016, "An experimental study on the thermal performance of a solar chimney with different dimensional parameters," *Renew. Energy*, vol. 91, pp. 477–483.
- S. Dehghani and A. H. Mohammadi, 2014, "Optimum dimension of geometric parameters of solar chimney power plants - A multi-objective optimization approach," *Sol. Energy*, vol. 105, pp. 603–612.
- S. Hu, D. Y. C. Leung, and M. Z. Q. Chen, 2017, "Effect of Divergent Chimneys on the Performance of a Solar Chimney Power Plant," *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 7–13.
- T. U. of the S. P. Patel, Sandeep Kumar, 2013, (School of Engineering and Physics, Faculty of Science, Technology, and Environment, "Computational and Experimental Studies on a Solar Chimney Power Plant," *The University of the South Pacific*.
- X. Zhou, J. Yang, B. Xiao, and G. Hou, 2007, "Experimental study of temperature field in a solar chimney power setup," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 27, no. 11–12, pp. 2044–2050.

Studi Eksperimental *Micro Deep Drawing* Sistem Pneumatik dan Analisis Cacat Pada Material *Brass 70/30*

R. Diwihagso* dan M. Mahardika

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

Jalan Grafika No. 2 Yogyakarta 55281 Telp. +62-274-521673

E-mail: *montevinar@gmail.com

Abstrak

Microforming adalah merupakan salah satu teknologi kunci untuk tren miniaturisasi produk di bidang industri. Teknologi *Micro deep drawing* memiliki banyak keunggulan seperti kemampuan untuk mengolah logam dengan potensi produksi masal, kualitas produk yang tinggi dan fabrikasi produk logam 3D yang lebih rumit. Penelitian ini bertujuan untuk membuat *cup* dari material *brass* untuk dianalisis kedalaman *cup* dan cacat akibat di pengaruh besarnya tekanan dan kecepatan *punch* dalam proses *micro deep drawing*. Studi eksperimental ini meliputi tahap persiapan material *brass* C26000 yang berupa lembaran dipotong menjadi strip untuk dibuat *blank*, pembuatan *specimen* untuk *tensile test* dan mikrostruktur, membuat desain *punch* dan *die* untuk di manufaktur, eksperimen proses *micro deep drawing* dari *blank* menjadi bentuk *cup* dan analisis cacat, data kedalaman *cup*, prosentase penipisan dinding *cup* dari hasil eksperimental. Dalam studi ini telah dilakukan eksperimen dengan variasi tekanan kompresor angin sebesar 2, 4, 6 Bar dan kecepatan *drawing* sebesar 20 mm/s, 40 mm/s, 60 mm/s. Kesimpulan studi eksperimental ini adalah proses *micro deep drawing* telah dilakukan telah menghasilkan *cup* dengan kedalaman optimum pada tekanan 2 bar dengan kecepatan 40 mm/s didapatkan $H_l = 2,595$ mm dan $H_s = 2,265$ mm. Hasil tersebut merupakan hasil terbaik karena tidak terdapat cacat pada sisi dinding maupun bawah *cup*.

Kata kunci: *micro deep drawing, punch dan die, tekanan dan kecepatan.*

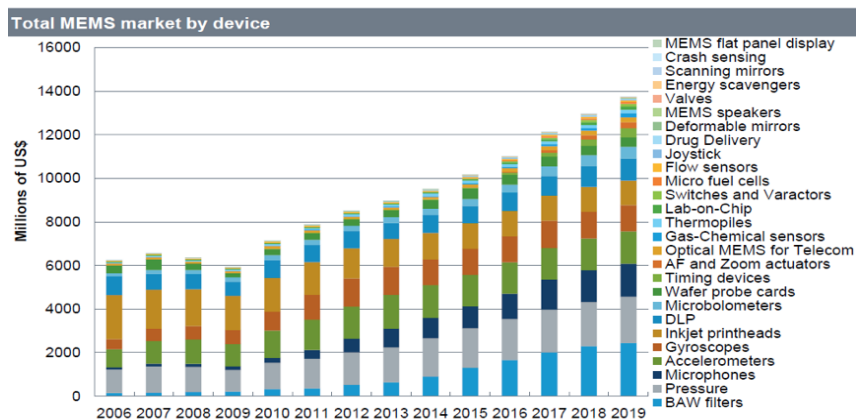
Abstract

Microforming is one of the key technologies for product miniaturization trends in the industrial field. *Micro deep drawing* technology has many advantages such as the ability to process metals with mass production potential, high product quality and fabrication of more complicated 3D metal products. This study aims to make a *cup* from *brass* material to be analyzed for *cup* depth and defects due to the influence of the amount of pressure and *punch* velocity in drawn blanks. This experimental study includes the preparation phase of C26000 *brass* material in the form of sheets cut into strips to be made *blank*, making specimens for tensile tests and microstructures, making *punch* and *die* designs for manufacturing, experimenting with *micro deep drawing* processes from blanks to *cup* shapes and defect analysis, *cup* depth data, percentage of *cup* wall depletion from experimental results. In this study, an experimental variation of *brass* compressor pressure of 2, 4, 6 Bar and *drawing* velocity of 20 mm/s, 40 mm/s, 60 mm/s has been carried out. The conclusion of this experimental study is that the process of *micro deep drawing* has been carried out to produce a *cup* with optimum depth at 2 bar pressure with a velocity of 40 mm / s obtained $H_l = 2.595$ mm and $H_s = 2.265$ mm. These results are the best results because there are no defects on the sides of the wall or under the *cup*.

Keywords: *micro deep drawing, punch dan die, pressure dan velocity.*

1. PENDAHULUAN

Pasar global untuk sistem mikro-elektromekanis, yang mencakup produk-produk seperti *airbag system, display system* dan kartrid inkjet berjumlah \$ 62 juta pada tahun 2006 menurut *Global MEMS / Microsystems Markets and Opportunities*, sebuah laporan penelitian dari SEMI dan diperkirakan akan mencapai \$ 138 juta pada 2019. Dalam beberapa tahun terakhir permintaan akan komponen mikrometalik terus menerus meningkat bersamaan dengan pesatnya perkembangan mikroelektronika, teknologi mikrosistem, energi baru, dan biomedis.



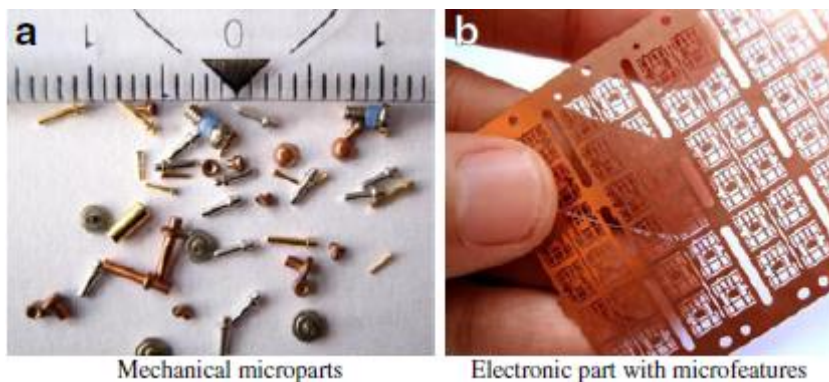
Gambar 1. Perkiraan pasar produk tertentu dengan komponen mikro
(sumber : <https://semiengineering.com/health-growth-ahead-in-mems>, 17 juni 2019)

Menurut Fu dan Chan (2013) perkembangan cepat miniaturisasi produk telah mendorong penelitian signifikan di bidang *microforming*, terutama dalam produksi komponen mikro untuk mengurangi berat dan volumenya. Berbeda dari proses pembentukan dalam skala makro, perilaku deformasi material dalam proses pembuatan mikro tidak dapat hanya dipahami dengan pengetahuan tradisional karena efek skala mikro. Karena itu, untuk memberikan pemahaman yang mendalam tentang perilaku material dalam deformasi plastis dalam skala mikro banyak upaya telah dilakukan dalam proses *microforming* khas seperti *micro deep drawing, blanking, bulging, stamping, forging*.

Menurut Sridhar dkk (2015) faktor penting dalam proses pembentukan mikro adalah *Blank holder force (BHF)* dan *optimisation BHF, Punch force dan Punch velocity, Friction, Blankshape, Forming Limits, Stress dan Strain Distribution, Thickness variation, Defects*. Kekuatan *blank holder* yang optimal sangat penting dalam pembentukan produk *micro deep drawing* dengan kualitas tinggi. Kerutan dan fraktur akan terjadi ketika gaya *blank holder* yang diberikan terlalu kecil atau terlalu tinggi untuk kecepatan *drawing* yang diberikan. Batas atas awal tekanan yang diijinkan *blank holder* meningkat dengan meningkatnya kecepatan *punch*. Koefisien gesekan dalam *micro deep drawing* menurun dengan meningkatnya kecepatan *punch* seperti yang diketahui pada *deep drawing* makro sehingga pengaruh koefisien gesekan tergantung kecepatan *punch* (Vollertsen dkk, 2004). Misalnya, dalam pembentukan tembaga, tepi *cup* akan berkerut ketika BHF kurang dari 4,2 N dan ketika BHF lebih tinggi dari 5,6 N bagian bawah *cup* akan retak. Dalam penelitian Irthiea dkk (2014) pengaruh kondisi gesekan dipelajari melalui simulasi numerik dengan menggunakan

model gesekan Coulomb dengan nilai yang berbeda secara terpisah untuk setiap koefisien gesekan pada bagian antarmuka *blank/holder*, *blank/rubber* dan *blank/contact punch*. Mengenai efek koefisien gesekan (μ_{BH}) pada antarmuka *blank/holder*, nilai-nilai 0 dan 0,25 didefinisikan untuk koefisien gesekan pada bagian *blank/rubber* dan antarmuka *blank/punch*. Pada penelitian Saotome dkk (2001) tentang *drawability* dilakukan menggunakan baja lembaran sangat tipis dengan ketebalan 0,05, 0,1, 0,2 dan 1,0 mm. Diameter *punch* D_p berkisar 0,5 hingga 40 mm. Diameter *punch* relatif terhadap ketebalan D_p/t dipilih sebagai parameter eksperimental penting dan dipilih dari 10 hingga 100. *Drawability* dievaluasi, dan hukum kesamaan dalam *deep drawing* adalah telah diperiksa. Dan hasilnya adalah sebagai berikut: (1) dalam rentang dari $D_p/t = 10$ hingga 100, LDR $\beta = D_s/D_p$ berkurang dengan meningkatnya D_p/t , (2) hukum persamaan dari *deep drawing* logam tipis adalah diadaptasi dalam kisaran di atas $D_p/t = 40$. Mekanisme *drawing* di bawah $D_p/t = 20$ harus berbeda dari D_p/t di atas 40., (3) Untuk $D_p/t = 10$ dan $R_d/t = 5,0$, yang dominan adalah bending mekanisme pembentukan karena efek tekanan *blank holder* pada *drawability* ditemukan minimal dan tekanan tidak berpengaruh pada kerja materi selama paruh kedua proses *drawing*.

Untuk menghasilkan komponen mikro dengan fitur yang lebih kompleks dan standar kualitas dan fungsionalitas yang tinggi di perlukan penelitian dan pengembangan proses *micro forming* yang terbaru dan inovatif sehingga dapat memenuhi permintaan pasar.



Gambar 2. Micropart industri

Teknologi *micro deep drawing* memiliki banyak keuntungan seperti kemampuan untuk mengolah logam metal dengan potensi produksi masal, kualitas produk yang tinggi dan fabrikasi produk logam 3D yang lebih kompleks.

Metode pembentukan logam mikro dengan material lembar tipis dengan sistem pneumatik belum banyak dilakukan. Proses *micro deep drawing* dari logam tipis dapat diekstrusi pada suhu ruangan tanpa mengurangi kualitas permukaan *cup* dengan proses *micro deep drawing* pneumatik. Selama proses *micro deep drawing* pneumatik dengan kondisi tekanan dan kecepatan *drawing* sangat berpengaruh terhadap perilaku deformasi *brass*. Penelitian ini bertujuan untuk membuat *cup* dari material *brass* untuk dianalisis kedalaman *cup* dan cacat akibat di pengaruh besarnya tekanan dan kecepatan *punch* dalam proses *micro deep drawing*.

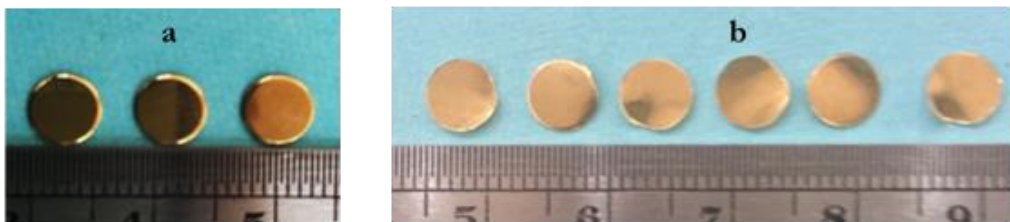
2. METODE PENELITIAN

Tahapan studi ini adalah persiapan dan pemilihan material *brass* yang digunakan, kemudian dilanjutkan dengan proses pembuatan *blank*, proses pembuatan spesimen untuk di uji tarik, dan proses pembuatan *cup* dengan mesin *micro deep drawing pneumatik*. Material *brass* yang digunakan adalah berupa lembaran *brass 70/30 (Yellow brass sheet)* dari Nilaco Corp) dengan ketebalan 300 μm sesuai dengan ASTM B 36/B 36M – 06.

Tabel 1. Komposisi material *brass* ASTM B 36/B 36M – 06

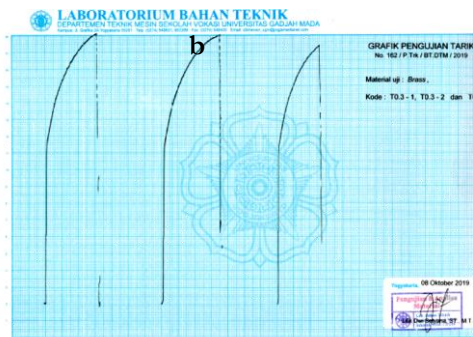
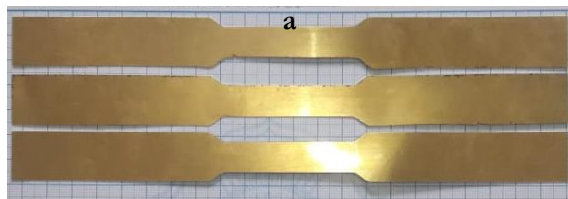
UNS No.	Copper	Lead	Iron	Zinc
C26000	68,5-71,5	0,07 max	0,05 max	remainder

Lembaran *brass* dipilih yang baik dengan tidak tertekuk dan tergores. *Brass* kemudian di potong menjadi strip-strip dilanjutkan dengan proses pembuatan *blank* dengan diameter 6 mm. Pembuatan *blank* dilakukan dengan mesin *micro punching* pneumatik. Kemudian dilakukan penyotiran kembali guna memilih *blank* yang tidak terdapat kerusakan maupun cacat tekukan maupun berbentuk oval yang disebabkan karena proses *blanking*.



Gambar 3. (a) *blank* baik, (b) *blank* rusak

Selain membuat *blank* juga dilakukan pembuatan spesimen untuk pengujian tarik. Uji tarik material *Brass 70/30* dilakukan untuk untuk mendapatkan *mechanical properties*, antara lain nilai *UTS (Ultimate Tensile Strength)* material yang akan dilakukan proses *drawing*. Nilai pengujian tarik ini akan digunakan untuk perhitungan menentukan tegangan maksimum yang dibutuhkan pada proses *drawing*. Selain itu untuk mendapatkan nilai regangan yang terjadi akibat uji tarik untuk menentukan kedalaman *drawing* maksimum.



Gambar 4. (a) specimen uji tarik, (b) diagram hasil uji tarik

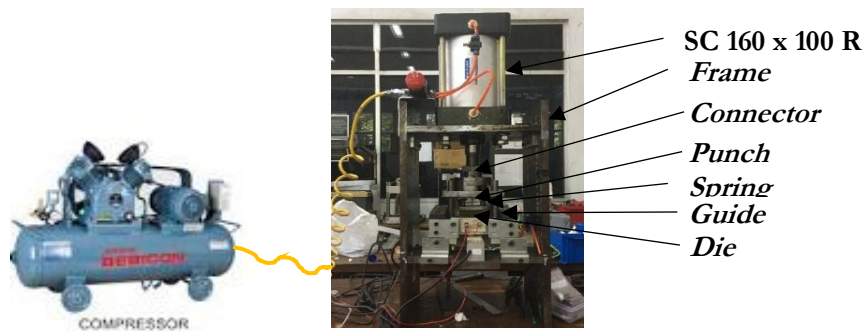
Dari pengujian diagram uji tarik didapatkan hasil seperti pada Tabel 2. berikut :

Tabel 2. Hasil uji tarik material *brass* dengan ketebalan 300 μm

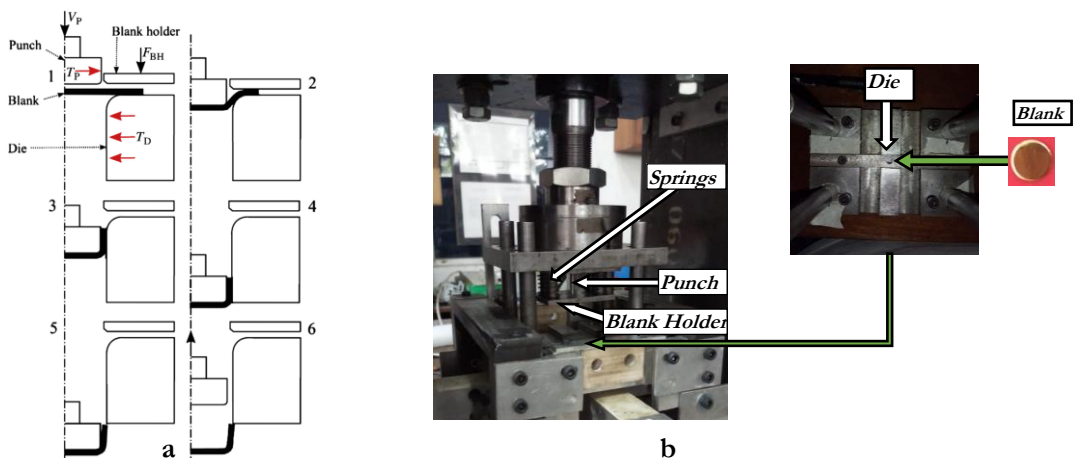
No	Kode	Teg. Luluh σ_y (MPa)	Teg. Max σ_u (MPa)	Regangan ϵ (%)
1.	T0.3-1	224,90	408,11	34,52
2.	T0.3-2	230,42	409,64	38,28
3.	T0.3-3	226,36	391,96	29,12
Rerata		227,22	403,23	33,97

* T0.3-1 adalah kode uji tarik sampel ke-1 dengan tebal 0,3 mm

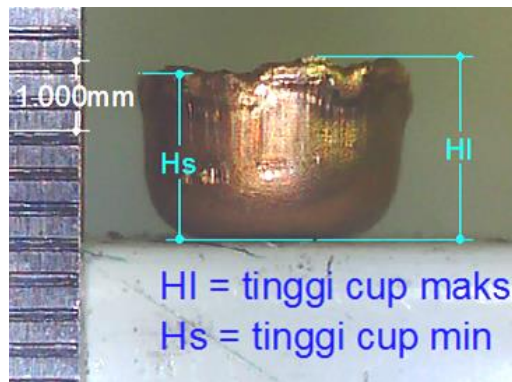
Proses *micro deep drawing* diawali dengan meletakkan *blank* pada *die*. Dengan tekanan dan kecepatan tertentu *punch* turun kebawah mendekati *blank* dan kemudian *blank holder* menekan *blank* dan *punch* mendorong tengah bagian *blank* sehingga membentuk sebuah *cup*. Setelah *cup* terbentuk *punch* ditarik keatas oleh gaya tarik dari pneumatik. Kemudian *cup* dianalisis dengan mengukur tinggi *cup* maksimum dan minimum serta cacat yang terjadi akibat proses *drawing* dengan menggunakan kamera dinolite. Proses ini dapat di ilustrasikan dengan 6 tahapan skematis seperti Gambar 6 berikut ini :



Gambar 5. Mesin *micro deep drawing* pneumatik



Gambar 6. (a) Skema *micro deep drawing* (Jiang, 2016) (b) Peletakan *blank* pada *die*

Gambar 7. *Cup* hasil proses *micro deep drawing* pneumatik

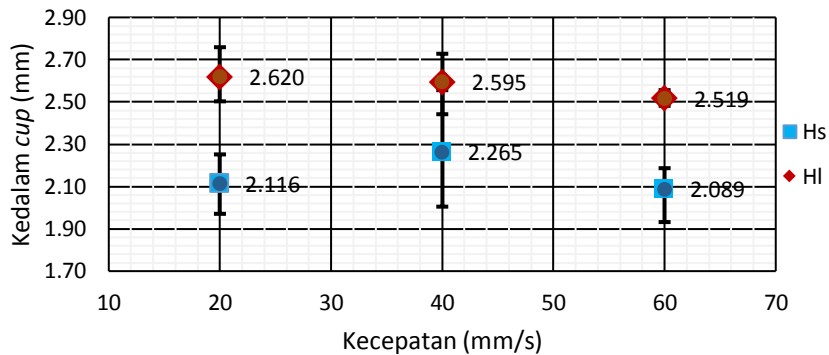
Pada eksperimen ini tidak memakai *chussion/pad* dan menggunakan kombinasi tekanan dengan kecepatan *punch* dalam mendorong *blank* untuk menghasilkan *cup*. Kombinasi variabel tekanan 2 bar dengan kecepatan 20 mm/s, 40 mm/s, 60 mm/s, tekanan 4 bar dengan kecepatan 20 mm/s, 40 mm/s, 60 mm/s dan tekanan 4 bar dengan kecepatan 20 mm/s, 40 mm/s, 60 mm/s.

Tabel 3. Kondisi ukuran saat penelitian

Kondisi Material	Brass 70/30			Satuan
Tebal <i>blank</i>	300			μm
Diameter <i>Punch</i>	3,15			mm
Diameter <i>Die</i>	3,94			mm
Diameter <i>Blank</i>	6,00			mm
<i>Drawing Ratio</i>	1,90			
Gaya <i>blank holder</i>	67,88			N
Suhu <i>die</i> and <i>blank holder</i>	Suhu ruangan			$^{\circ}\text{C}$
Tekanan	2	4	6	Bar
Kecepatan <i>punch</i>	20	40	60	mm/s

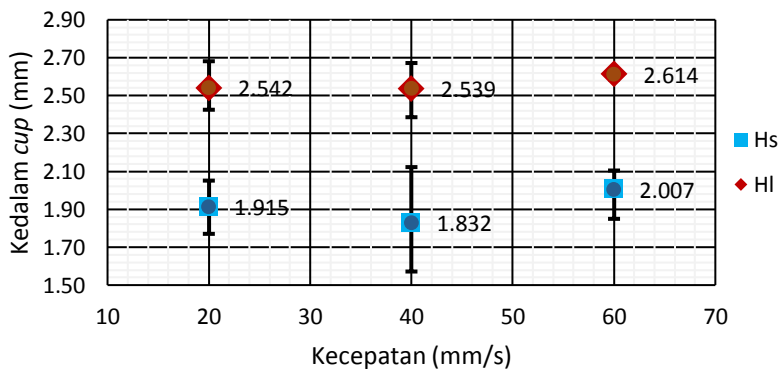
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tinggi *cup* dalam proses *micro drawing* dapat disebabkan oleh adanya kecepatan dan tekanan *punch*. Tumbukan yang terjadi antara *punch* dengan *blank*. Untuk menghentikan laju *punch* yang bergerak maka *blank* timbul gaya yang cukup untuk untuk menghilangkan energi kinetiknya, sehingga memperpanjang ketinggian *cup* yang didorong *punch* selama tumbukan sehingga mengurangi gaya tumbukan rata-rata. Bentuk *cup* yang terjadi adalah bentuk redaman dari energi kinetik yang terjadi. Bertambahnya kecepatan akan menghasilkan energi kinetik yang lebih besar dan semakin besar gaya yang dibutuhkan untuk menghentikannya, sehingga akibat yang ditimbulkannya semakin dalam *cup*. Hasil dari penelitian ini dapat dilihat pada grafik Gambar 8, 9, dan 10.



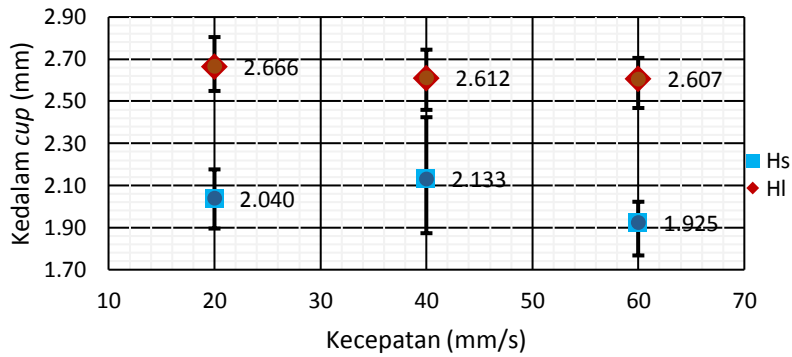
Gambar 8. Grafik kecepatan terhadap kedalaman pada tekanan 2 bar

Kondisi final pada pengujian *micro deep drawing* memenuhi kriteria apabila kedalaman *cup* lebih dari setengah dari diameter *cup*. Pada Gambar 8 saat tekanan 2 bar kecepatan *drawing* 20 mm/s didapatkan HI = 2,620 mm dan Hs = 2,116 mm, kecepatan 40 mm/s didapatkan HI = 2,595 mm dan Hs = 2,265 mm dan kecepatan 60 mm/s didapatkan HI = 2,519 mm dan Hs = 2,089 mm. Berdasarkan hasil Gambar 8 pada tekanan 2 bar maka kecepatan optimum untuk menghasilkan *cup* yang baik adalah kecepatan 40 mm/s.



Gambar 9. Grafik kecepatan terhadap kedalaman pada tekanan 4 bar

Pada Gambar 9 saat tekanan 4 bar kecepatan *drawing* 20 mm/s didapatkan HI = 2,542 mm dan Hs = 1,915 mm, kecepatan 40 mm/s didapatkan HI = 2,539 mm dan Hs = 1,832 mm dan kecepatan 60 mm/s didapatkan HI = 2,614 mm dan tinggi *cup* Hs = 2,007 mm. Hasil Gambar 9 menunjukkan bahwa untuk tekanan 4 bar kecepatan optimum untuk menghasilkan *cup* yang baik adalah kecepatan 60 mm/s



Gambar 10. Grafik kecepatan terhadap kedalaman pada tekanan 6 bar

Pada Gambar 10 saat tekanan 6 bar kecepatan *drawing* 20 mm/s didapatkan HI = 2,666 mm dan Hs = 2,040 mm, kecepatan 40 mm/s didapatkan HI = 2,607 mm dan Hs = 2,133 mm dan kecepatan 60 mm/s didapatkan HI = 1,925 mm dan Hs = 2,007 mm. Berdasarkan hasil Gambar 10 bahwa untuk tekanan 6 bar kecepatan optimum untuk menghasilkan *cup* yang baik adalah kecepatan 20 mm/s.

Dari hasil pengamatan dapat dibuat tabulasi cacat yang di sebabkan oleh proses *micro deep drawing*. Dari semua benda uji tidak terdapat *wrinkling* dan *tearing* hal ini disebabkan karena tebal *blank* adalah 300 μ m.

Tabel 4. Kondisi *cup* setelah proses *micro deep drawing*

Tekanan (Bar)	Kecepatan (mm/s)	Defect		
		<i>Wrinkling</i>	<i>Earing</i>	<i>Tearing</i>
2 bar	20	×	×	×
	40	×	×	×
	60	×	×	×
4 bar	20	×	×	×
	40	×	o	×
	60	×	o	×
6 bar	20	×	o	×
	40	×	o	×
	60	×	o	×

× = tidak terjadi

o = terjadi

4. KESIMPULAN

Dari hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa kecepatan dan tekanan sangat berpengaruh terhadap kedalaman *cup*. Perpaduan tekanan dan kecepatan dapat menghasilkan bentuk *cup* yang baik pada kondisi tekanan 2 bar dengan kecepatan 40 mm/s dengan kedalaman maksimum 2,595 mm dan kedalaman minimum 2,265 mm sehingga selisihnya 0,33 mm sehingga relatif lebih rata. *Cup* yang baik adalah tidak terdapat kerusakan pada dinding dan bagian bawah *cup*. Radius *punch* sangat berpengaruh sekali terhadap kerusakan yang akan terjadi pada *radii cup*. Kerusakan akibat dari proses *drawing* terjadi akibat *blank holder force* terlalu rendah sehingga *blank* yang dibentuk menjadi *cup* menjadi *earing*. Kondisi paling kritis terjadi pada daerah *radii* dari *cup*, karena di daerah tersebut terdapat dua kombinasi tegangan radial dan tegangan tangensial yang harus dijaga secara seimbang.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Fu, M. W., Chan. W. L., 2013 A review on the state-of-the-art microforming technologies, *Int J Adv Manuf Technol* 67:2411–2437.
- <https://semiengineering.com/health-growth-ahead-in-mems/>, 17 juni 2019
- Irthia, Ihsan Khalaf (2014) Process analysis and design in micro deep drawing utilizing a flexible die. *PhD thesis*.
- Luo, L., Jiang, Z., Wei, D., Manabe, K. I., Sato, H., He, X., Li, P., 2015, An experimental and numerical study of micro deep drawing of SUS304 circular cups.
- Saotome, Y., Yasuda, K., Kaga, H., 2001, Microdeep drawability of very thin sheet steels, *Journal of Materials Processing Technology* 113, page 641-647.
- Sridhar R., Inbarasan S., Ramkumar R., Shankar S., Review on micro deep drawing process for thin foil materials, *International Journal of Innovations in Engineering and Technology (IJJET)*.
- Vollertsen, F., Hu, Z., Niehoff, H., Schulze, H., Theiler, C., vol. 151, pp. 70-79, 2004, State of the art in micro forming and investigations into micro deep drawing, *Journal of Materials Processing Technology*.

Simulasi Numerik Prediksi Erosi Aliran Fasa Cair-Gas Berpasir Pada Belokan Pipa Sumur Minyak Mentah Menggunakan Model Finnie, McLaury dan Oka

H. J. Atmaja*, S. Kamal, Sugiyono

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jalan Grafika No. 2, Yogyakarta 55281 Indonesia
E-mail: *jaya_77a@yahoo.com

Abstrak

Keberadaan pasir dalam fluida produksi di industri perminyakan merupakan hal yang tak dapat dihindari. Pada kecepatan fluida tertentu, pasir berpotensi menimbulkan erosi pada dinding perpipaan yang apabila proses tersebut terjadi secara terus menerus maka dapat menyebabkan penipisan dinding pipa, mengurangi tekanan kerja maksimum fluida yang diijinkan, kegagalan pipa dan akhirnya fluida hidrokarbon keluar dari sistem tertutup pipa. Kondisi ini berpotensi menimbulkan kerugian dalam hal keselamatan kerja, kehilangan finansial dan isu lingkungan. Kompleksitas mekanisme erosi akibat fluida berpasir didalam perpipaan memerlukan bantuan perangkat lunak untuk menghitung besaran dan profil erosi didalam pipa. Makalah ini memprediksi laju erosi aliran multifasa cair-gas-padat pada belokan pipa yang didominasi fasa cair dengan CFD menggunakan ANSYS Fluent 18.2 dengan validasi berdasarkan eksperimen yang dilakukan peneliti lain yang sudah dipublikasi. Dari hasil simulasi, laju erosi dengan model Oka lebih mendekati hasil eksperimen dibandingkan model Finnie dan McLaury. Hal ini dimungkinkan karena kondisi eksperimen lebih sesuai dengan model erosi yang dibangun oleh Oka. Hasil simulasi lanjutan menunjukkan bahwa laju erosi pada pipa meningkat dengan kenaikan laju alir dari minyak mentah dan gas, ukuran partikel dan laju alir partikel. Laju erosi menurun dengan meningkatnya diameter pipa.

Kata kunci: *Komputasi dinamika fluida, laju erosi maksimum, laju alir minyak mentah, laju alir gas, laju alir partikel, ukuran partikel, diameter pipa.*

Abstract

The sand presence in production fluid in oil and gas industry is unavoidable. At a certain fluid velocity, sand potentially causing erosion in the piping wall. If the process occurs continuously it can reduce pipe wall thickness, reducing the maximum allowable working pressure of the fluid, piping failure and hydrocarbon loss of containment. This condition will result in losses in terms of worker safety, financial and environmental issues. The complexity of the erosion mechanism due to sandy fluid in the piping system requires software to calculate the magnitude and pattern of erosion in the pipe. This study predicted the erosion rate of liquid dominated multiphase flow at pipe elbow by using CFD ANSYS Fluent 18.2 and validated based on published experimental studies conducted by other researcher. The simulation results show that

erosion rate of Oka model has the lowest relative difference with experimental result compared with Finnie and McLaury model. This may be caused by experimental condition that was more suitable with erosion model developed by Oka. Further simulation revealed that erosion rate at the pipe wall increased with increasing crude oil and gas flowrate, particle size and particle flowrate. Erosion rate decreased by increasing pipe diameter.

Keywords: *Computational Fluid Dynamics (CFD), maximum erosion rate, crude oil flowrate, particle mass flowrate, particle size, pipe diameter.*

1. PENDAHULUAN

Pengangkatan (*lifting*) minyak mentah dari *reservoir* ke permukaan, baik dengan aliran alami (*natural flow*) atau aliran dengan bantuan pompa atau gas yang diinjeksikan (*artificial lift*) memungkinkan material padatan selain minyak mentah (misalnya pasir) ikut terbawa. Material pasir atau padatan lain yang berasal dari *reservoir* ketika terbawa ke permukaan akan menimbulkan masalah pada proses pengolahan fluida dan peralatan penunjang produksi. Pasir dapat menimbulkan erosi, kebuntuan pipa dan korosi dibawah endapan pasir.

Pencegahan pasir untuk naik ke permukaan sebenarnya dapat dilakukan dengan menggunakan peralatan pekerjaan sumur (*workover*) atau perawatan sumur (*well service*) seperti pemasangan saringan pasir (*sand screen*) dan *gravel pack* didalam *tubing annulus*. Saringan pasir tidak mampu untuk menyaring partikel kurang dari 50 μm untuk tidak terbawa aliran fluida ke permukaan. Begitu pula *gravel pack* lebih efektif untuk mencegah material padat yang kasar atau berukuran tertentu saja, sedangkan material yang lebih kecil atau halus masih bisa melewati peralatan tersebut (Parsi et al, 2014).

Selain itu, pencegahan material padatan dari *reservoir* ke permukaan berpotensi menimbulkan masalah lain yang lebih besar yaitu terkumpulnya material padat tersebut di *reservoir* atau *tubing* produksi yang justru akan menghambat aliran fluida itu sendiri. Untuk itu penanganan pasir pada fluida produksi bergeser dari upaya untuk pencegahan (*prevention*) menjadi pengelolaan (*management*). Artinya pasir dengan ukuran tertentu diperkenankan untuk naik ke permukaan bersama fluida produksi, tetapi dikelola dengan cara-cara tertentu di permukaan.

Keberadaan pasir dalam fluida produksi sudah menjadi hal yang umum ditemukan pada proses produksi minyak mentah. Properti pasir pada kecepatan aliran fluida yang rendah sangat rentan terhadap pengendapan (sedimentasi) yang dapat menyebabkan hambatan pada aliran fluida, meningkatkan jatuh tekanan (*pressure drop*) dan mempercepat proses terjadinya korosi pada dinding dalam pipa terutama pada bagian yang tertutupi oleh pasir tersebut. Sementara pada kecepatan fluida yang tinggi, adanya pasir berpotensi menimbulkan erosi yang apabila proses tersebut terjadi secara terus menerus maka dapat menyebabkan penipisan dinding pipa, mengurangi tekanan kerja maksimum fluida yang diijinkan, kegagalan pipa dan akhirnya fluida hidrokarbon keluar dari sistem tertutup pipa. Kondisi ini akan berpotensi menimbulkan kerugian dalam hal keselamatan pekerja, kehilangan finansial dan isu lingkungan.

Studi erosi pada sistem perpipaan sudah intensif dilakukan para peneliti sejak lebih dari lima dekade tetapi kebanyakan penelitian berfokus pada aliran multifasa gas-cair-padat dengan fasa dominan adalah gas (Edwards et al, 2001; Humphrey, 1990; Salama, 2000), sementara masih sangat sedikit yang melakukan penelitian baik berbasis eksperimen maupun komputasi dinamika fluida (CFD) pada aliran slurry yang didominasi oleh fasa cair.

Dalam studi ini dianalisa pengaruh beberapa parameter aliran gas-cair-padat (*slurry*) yang didominasi fasa cair terhadap potensi terjadinya erosi pada sistem perpipaan sumur migas khususnya pada belokan pipa. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* komputasi dinamika fluida ANSYS Fluent 18.2 untuk memprediksi erosi dan memahami secara lebih mendalam parameter-parameter yang mempengaruhi laju erosi.

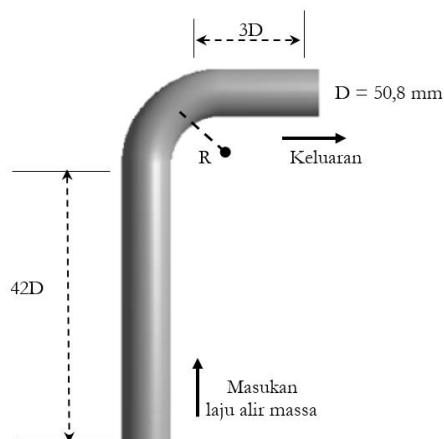
2. SIMULASI NUMERIK

Simulasi pada studi ini menggunakan *software* ANSYS Fluent 18.2. Pada bagian ini akan dibahas secara lebih rinci geometri komputasi yang digunakan, mesh dan model multifasa yang dipilih.

2.1. Domain Komputasi

Simulasi numerik pada studi ini dilakukan untuk mensimulasikan laju erosi akibat pasir pada aliran multifasa cair-gas dengan geometri seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Geometri adalah pipa vertikal dengan belokan keluaran arah horizontal. Diameter pipa adalah 50,8 mm dengan radius curvature 1,5 kali diameter. Panjang pipa sebelum dan setelah belokan masing masing adalah 42 dan 3 kali diameter.

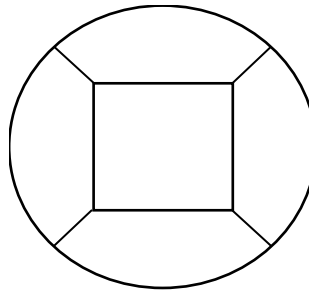
Untuk mendapatkan mesh terstruktur maka prosedur diterapkan dengan membagi geometri menjadi beberapa bagian seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Penampang pipa dibagi menjadi lima luasan, dibentuk dari persegi dengan pusat yang sama dengan lingkaran dan garis terdekat yang menghubungkan sudut persegi dengan lingkaran (Fluent 6.0 User's Guide, 2001). Panjang persegi adalah X dan panjang garis hubung adalah Y. Rasio X dan Y adalah 2. Tabel 1 menunjukkan studi kualitas mesh dengan memvariasikan X dan Y. Sesuai dengan tujuan simulasi maka mesh divalidasi dengan melihat pengaruh kerapatan mesh terhadap perubahan laju erosi. Tabel 2 menunjukkan parameter yang digunakan untuk validasi mesh.



Gambar 1. *Domain* komputasi

Tabel 1. Pengaturan grid penampang pipa

Section	Mesh 1	Mesh 2	Mesh 3	Mesh 4
X	8	12	14	16
Y	4	6	7	8



Gambar 2. Metode meshing penampang pipa

Tabel 2. Parameter validasi mesh

Parameter	
Fluida	Air
Kecepatan (m/s)	6,3
Laju alir massa cairan (kg/s)	12,7
Laju alir massa partikel (kg/s)	0,1285
Konsentrasi volume partikel (%)	0,37

2.2. Kondisi Simulasi Aliran Multifasa Cair-Gas-Partikel

Studi prediksi erosi aliran cair-gas-padat dalam belokan pipa ini menggunakan kerangka *eulerian-lagrangian*. Model eulerian digunakan untuk memecahkan persamaan aliran multifasa cair-gas dan kerangka *lagrangian* dengan model fasa diskrit (*Discrete Phase Model/DPM*) digunakan untuk menentukan lintasan partikel abrasif dalam aliran dan tumbukannya dengan dinding pipa yang digunakan dalam perhitungan laju erosi.

Model yang digunakan untuk mensimulasikan aliran multifasa adalah *eulerian mixture 2* fasa dengan cairan sebagai fasa primer dan gas sebagai fasa sekunder. Interaksi antar fasa dinyatakan dalam tegangan permukaan. Pasir sebagai fasa diskrit diasumsikan tidak mempengaruhi profil aliran fluida karena pembebanan partikel yang rendah (*ANSYS Workbench Help*).

Simulasi ini menggunakan model *steady state* dengan pertimbangan bahwa lintasan partikel didalam aliran dari masukan hingga keluaran sudah mencukupi untuk menghasilkan informasi parameter yang digunakan dalam perhitungan erosi. *Slip velocity* digunakan untuk mengakomodasi perbedaan kecepatan antara fasa kontinu dan fasa terdispersi. *Implicit body formulation* diterapkan untuk memperbaiki konvergensi solusi dengan memperhitungkan kesetimbangan gradien tekanan dan *body force* (gravitasi dan tegangan permukaan) dalam persamaan momentum. Model *viscous k-ε realizable* dengan *enhanced wall treatment* digunakan untuk memperhitungkan faktor turbulensi didalam aliran dan mengangani viskositas didaerah dekat dinding (*near-wall region*).

Metode solusi yang diterapkan dalam simulasi menggunakan scheme SIMPLE, *gradient* menggunakan *Least Square Cell Based*, tekanan menggunakan PRESTO!, momentum dan *volume fraction* menggunakan QUICK, *turbulence kinetic energy* dan *dissipation rate* keduanya menggunakan *Second Order Upwind* untuk memperkecil galat perhitungan (ANSYS *Workbench Help*).

Untuk menentukan besaran dan profil erosi pada material target, ANSYS Fluent 18.2 menyediakan beberapa model erosi yang bisa digunakan, yaitu model *Generic*, Finnie, McLaury dan Oka. Fitur ini dapat ditemukan dengan mengaktifkan *Erosion/Accretion* didalam *tab Physical Models* setelah *Discrete Phase Model* diaktifkan pada tahap *setup* model. Pada studi ini, model erosi yang digunakan adalah Finnie, McLaury dan Oka. Parameter fluida, partikel dan material target yang dimasukkan ke dalam *Fluent* untuk keperluan validasi diperoleh berdasarkan informasi yang ditunjukkan pada Tabel 3. Adapun pada simulasi lanjutan untuk melihat pengaruh perubahan parameter fluida, partikel dan ukuran pipa terhadap laju dan profil erosi menggunakan data yang ditunjukkan pada Tabel 2 dan 3.

2.3. Pemodelan Aliran Fluida

Persamaan kontinuitas untuk campuran adalah:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = \dot{m} \tag{1}$$

Dimana \vec{v}_m adalah rata-rata kecepatan massa.

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k v'_k}{\rho_m} \tag{2}$$

Dengan ρ_m adalah kerapatan campuran.

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \tag{3}$$

α_k adalah fraksi volume fasa k dan \dot{m} menggambarkan perpindahan massa.

Persamaan momentum untuk campuran diperoleh dengan menjumlahkan persamaan momentum tiap fasa.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) \\ &= -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right) \end{aligned} \tag{4}$$

Dengan n adalah banyaknya fasa, \vec{F} adalah body force, μ_m adalah viskositas campuran dengan formula:

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \tag{5}$$

$\vec{v}_{dr,k}$ adalah kecepatan *drift* untuk fasa sekunder k dengan formula:

$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \tag{6}$$

Persamaan perpindahan untuk k dan ε pada model k - ε adalah:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \tag{7}$$

dan

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \tag{8}$$

dimana:

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \tag{9}$$

dan

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon} \tag{10}$$

dengan:

- G_k = energi kinetik turbulen karena gradien kecepatan rata-rata.
- G_b = energi kinetik turbulen karena *buoyancy*.
- Y_M = energi akibat fluktuasi dilatasi dalam turbulen *compressible* pada keseluruhan laju disipasi.
- $C_2, C_{1\varepsilon}$ = konstanta.
- $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ = bilangan Prandtl turbulen untuk k dan ε .
- S_k, S_ε = parameter yang bisa didefinisikan pengguna (*user-defined*).

2.4. Pemodelan Gerak Partikel

Prediksi lintasan partikel fasa diskrit yang digunakan oleh ANSYS Fluent diperoleh dengan mengintegrasikan gaya kesetimbangan (*force balance*) partikel yang dituliskan dalam kerangka *lagrangian*. Persamaan gaya kestimbangan yang menunjukkan inersia partikel akibat gaya yang bekerja pada partikel yang jika dituliskan pada koordinat-x adalah:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \tag{11}$$

dimana $F_D(u - u_p)$ adalah gaya drag per unit massa partikel.

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} \frac{1}{24} \tag{12}$$

dengan u adalah kecepatan fasa fluida, u_p adalah kecepatan partikel, μ adalah viskositas molekular fluida, ρ adalah kerapatan fluida, ρ_p adalah kerapatan partikel dan d_p adalah diameter partikel. Re adalah bilangan Reynolds relatif yang didefinisikan sebagai:

$$Re \equiv \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \tag{13}$$

Haider dan Levenspiel [6] mengajukan persamaan koefisien drag yang memperhitungkan faktor bentuk partikel (ϕ), melalui persamaan:

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + b_1 Re^{b_2}) + \frac{b_3 Re}{b_4 + Re} \tag{14}$$

dimana:

- $b_1 = \exp(2,3288 - 6,4581\phi + 2,4486\phi^2)$
- $b_2 = 0,0964 + 0,5565\phi$
- $b_3 = \exp(4,905 - 13,8944\phi + 18,4222\phi^2 - 10,2599\phi^3)$
- $b_4 = \exp(1,4681 + 12,2584\phi - 20,7322\phi^2 + 15,8855\phi^3)$

Faktor bentuk (ϕ) didefinisikan sebagai:

$$\phi = \frac{s}{S} \tag{15}$$

dimana s adalah luas permukaan bulatan yang memiliki volume yang sama dengan partikel, dan S adalah luas permukaan partikel yang sebenarnya.

Persamaan lintasan dan persamaan tambahan yang menggambarkan perpindahan massa atau panas dari dan ke partikel dipecahkan mengintegalkan secara bertahap terhadap waktu diskrit. Jika persamaan (11) diintegalkan terhadap waktu menghasilkan kecepatan partikel ditiap titik sepanjang lintasan dengan lintasan sendiri yang diprediksi sebagai:

$$\frac{dx}{dt} = u_p \tag{16}$$

Jika diasumsikan gaya yang bekerja pada partikel adalah konstan, maka persamaan lintasan dapat dituliskan dalam bentuk yang lebih sederhana:

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{1}{\tau_p} (u - u_p) \tag{17}$$

dimana τ_p adalah waktu relaksasi partikel.

Fluent menggunakan trapezoidal scheme untuk mengintegalkan persamaan (17):

$$\frac{u_p^{n+1} - u_p^n}{\Delta t} = \frac{1}{\tau} (u^* - u_p^{n+1}) + \dots \tag{18}$$

dimana n menunjukkan banyaknya iterasi, dan

$$u^* = \frac{1}{2} (u^n + u^{n+1}) \tag{19}$$

$$u^{n+1} = u^n + \Delta t u_p^n \cdot \nabla u^n \tag{20}$$

Persamaan (16) dan (17) dipecahkan secara simultan untuk menentukan kecepatan dan posisi partikel terhadap waktu.

2.5. Model Erosi

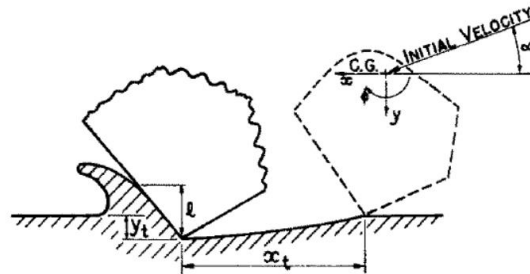
2.5.1. Model Erosi Finnie

Berdasarkan beberapa asumsi, Finnie mengajukan dua persamaan untuk memperkirakan volume material yang hilang oleh butiran abrasif tunggal untuk sudut tumbukan rendah dan tinggi sebagai berikut:

$$\varepsilon_{VP} = \frac{m_p V_p^2}{\rho \psi \kappa} \left(\sin(2\alpha) - \frac{6}{\kappa} \sin^2(\alpha) \right) \text{ untuk } \tan \alpha \leq \frac{\kappa}{6} \tag{21}$$

$$\varepsilon_{VP} = \frac{m_p V_p^2}{\rho \psi \kappa} \left(\frac{\kappa \cos^2 \alpha}{6} \right) \text{ untuk } \tan \alpha \geq \frac{\kappa}{6} \tag{22}$$

Dimana ε_{VP} adalah volume material permukaan yang dipindahkan, m_p adalah massa partikel, V_p adalah kecepatan partikel, ρ adalah konstanta tegangan aliran plastis, α adalah sudut tumbukan partikel, κ adalah rasio komponen gaya vertikal pada permukaan partikel terhadap komponen gaya horizontal. ψ adalah rasio kedalaman kontak l terhadap y_l (sesuai Gambar 3) memiliki nilai konstan, Finnie menggunakan nilai 2 untuk parameter ini. Persamaan pertama berlaku untuk sudut tumbukan rendah yang berkaitan dengan keadaan dimana partikel meninggalkan permukaan sambil memotong. Persamaan kedua berlaku untuk sudut tumbukan tinggi pada keadaan dimana gerak horizontal ujung partikel terhenti saat memotong.



Gambar 3. Abrasif yang menumbuk permukaan dan memotong material. Vektor kecepatan awal membentuk sudut α terhadap pusat gravitasi partikel (Finnie, 1960).

2.5.2. Model Erosi McLaury

McLaury mengajukan model prediksi laju erosi partikel dengan fluida pembawa air. Model ini dikembangkan untuk mensimulasikan laju erosi pada aliran cair-padat (*slurry*). Model McLaury dituliskan sebagai berikut (Oka et al, 2005).

$$E = A V^n f(\gamma) \quad (23)$$

$$A = F B h^k \quad (24)$$

Dimana:

F = konstanta empiris

V = kecepatan tumbukan partikel

Bb = angka kekerasan Brinell material dinding

k = -0,59 untuk carbon steel (nilai k berbeda untuk material lain)

dengan:

$$f(\gamma) = b\gamma^2 + c\gamma \quad \text{untuk } \gamma \leq \gamma_{lim} \quad (25)$$

$$f(\gamma) = x \cos^2 \gamma \sin(w\gamma) + y \sin^2(\gamma) + z \quad \text{untuk } \gamma > \gamma_{lim} \quad (26)$$

Nilai konstanta b , c , w , x dan y pada model diatas ditentukan berdasarkan eksperimen. Nilai z ditentukan sedemikian sehingga kedua persamaan fungsi sudut diatas berdekatan pada $\gamma = \gamma_{lim}$, dengan γ_{lim} adalah sudut transisi.

2.5.3. Model Erosi Oka

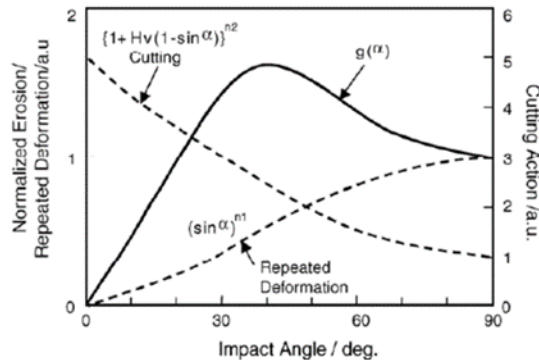
Model erosi Oka dikembangkan berdasarkan pengujian yang dilakukan pada beberapa jenis material target seperti besi murni, aluminum, baja karbon dan baja stainless. Laju erosi akibat tumbukan partikel dengan material target pada sudut tumbukan α dinyatakan sebagai (Oka et al, 2005; Sedrez et al, 2019):

$$E(\alpha) = g(\alpha) E_{90} \quad (27)$$

E_{90} adalah laju erosi pada sudut tumbukan 90° dan $g(\alpha)$ adalah fungsi sudut tumbukan yang dinormalkan, dinyatakan oleh dua fungsi trigonometri dan angka kekerasan awal material Hv (dalam GPa), sesuai persamaan berikut:

$$g(\alpha) = (\sin \alpha)^{n1} (1 + Hv(1 - \sin \alpha))^{n2} \quad (28)$$

$n1$ dan $n2$ adalah eksponen yang ditentukan oleh kekerasan material dan kondisi tumbukan lainnya seperti properti partikel termasuk bentuk partikel. $g(\alpha)$ ditentukan berdasarkan (Oka et al, 2005) Representasi grafis $g(\alpha)$ ditunjukkan seperti Gambar 4.



Gambar 4. Konsep erosi akibat deformasi plastis berulang dan pemotongan [9].

Suku pertama dari persamaan (28) menggambarkan deformasi plastis berulang atau karakteristik getas dan dengan komponen vertikal dari energi tumbukan partikel jika $n1 = 2$. Suku kedua menunjukkan fenomena pemotongan, dimana erosi relatif dan lebih efektif terjadi pada sudut tumbukan yang lebih rendah. E_{90} dinyatakan sebagai:

$$E_{90} = K (Hv)^{k1} (v)^{k2} (D)^{k3} \quad (29)$$

dimana $k1$, $k2$ dan $k3$ adalah faktor eksponen yang dipengaruhi oleh parameter lain. K adalah sembarang unit yang menunjukkan properti partikel seperti bentuk dan tingkat kekerasan, yang nilainya berbeda-beda untuk jenis partikel berbeda. ANSYS Fluent sudah memasukkan nilai konstanta-konstanta empiris tersebut ke dalam masing-masing model erosi, sehingga pengguna hanya memasukkan parameter fluida, partikel dan material target.

2.6. Prosedur Simulasi

Secara garis besar langkah-langkah simulasi dalam studi ini secara adalah:

- Membuat geometri sebagai *domain* komputasi.
- Melakukan studi kualitas mesh.
- Pemodelan aliran multifasa dan model fasa diskrit sesuai dengan kondisi eksperimen.
- Validasi simulasi berdasarkan hasil eksperimen.
- Variasi parameter aliran fluida dan partikel.

Geometri komputasi yang digunakan untuk validasi simulasi ini berdasarkan eksperimen yang dilakukan oleh Sedrez seperti ditunjukkan pada Gambar 1, dengan kondisi eksperimen sesuai data yang ditunjukkan pada Tabel 3. Eksperimen yang dilakukan Sedrez menghasilkan laju erosi 0,12, 0,18, 0,26 dan 0,40 mm/day untuk masing-masing kasus 1, 2, 3 dan 4.

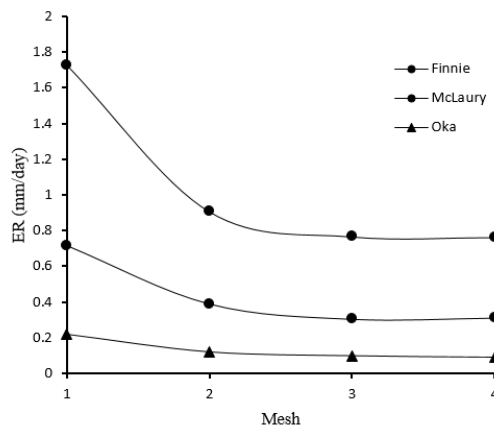
Tabel 3. Kondisi eksperimen Sedrez (Sedrez, 2019)

Diatemer partikel (μm)	300			
Kerapatan partikel (kg/m^3)	2650			
Kerapatan material pipa (kg/m^3)	7800			
Parameter	Kasus 1	Kasus 2	Kasus 3	Kasus 4
Fluida	air	air dan udara	air dan udara	air dan udara
Kecepatan (m/s)	6,3	6 dan 2,4	5,5 dan 3,76	6,31 dan 5,46
Laju alir massa cairan dan gas (kg/s)	12,7	12,1 dan 0,00505	11,2 dan 0,00933	12,8 dan 0,01356
Laju alir massa partikel (kg/s)	0,1285	0,1150	0,0914	0,1131
Konsentrasi volume partikel (%)	0,37	0,36	0,31	0,33

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Validasi Mesh dan Validasi Simulasi

Dengan menggunakan prosedur pengaturan mesh sesuai Tabel 1 dan parameter sesuai Tabel 2 diperoleh hasil seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Dari Gambar 5 terlihat bahwa deviasi laju erosi maksimum (ER) antara mesh 4 dan 3 sudah sangat kecil, yaitu 2,2%, 0,4% dan 8,3% masing-masing untuk model Finnie, McLaury dan Oka. Deviasi antara mesh 4 dan 2 untuk model Finnie, McLaury dan Oka masing-masing adalah 20%, 15,9% dan 24,9%. Mesh 2 dapat digunakan untuk simulasi berikutnya dengan pertimbangan bahwa perbedaan 20% bisa diterima untuk simulasi prediksi erosi (Fluent 6.0 User's Guide, 2001).

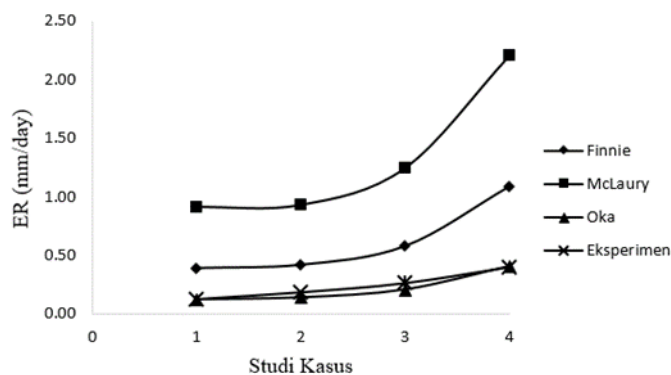
Gambar 5. Grafik uji *mesh independency*

Hasil validasi simulasi ditunjukkan pada Tabel 4 dengan representasi grafis ditunjukkan pada Gambar 5. Terlihat bahwa bahwa model erosi Oka lebih mendekati hasil eksperimen dengan perbedaan relatif 0,3% pada kasus 1 dan 0,8% pada kasus 4. Perbedaan relatif terbesar 24% pada kasus 2, diikuti perbedaan relatif 21,6% pada kasus 3. Model Finnie dan McLaury memberikan perbedaan relatif yang cukup besar pada semua kasus yaitu lebih dari 100% seperti ditunjukkan pada Tabel 4. Namun demikian terlihat bahwa pada dasarnya ketiga model erosi tersebut menunjukkan kecenderungan hasil yang hampir sama. Kecenderungan yang sama pada

model Finnie, McLaury dan Oka menunjukkan bahwa ketiga model memiliki pendekatan yang sama dalam menentukan parameter yang mempengaruhi erosi. Ketiganya menggunakan kecepatan partikel, fungsi sudut dan konstanta yang tergantung dari tingkat kekerasan material baja karbon dalam dasar pemodelannya.

Tabel 4. Perbandingan simulasi model erosi dengan hasil eksperimen

Kasus	ER (mm/day)			
	Finnie	McLaury	Oka	Eksperimen
Kasus 1	0,3910	0,9072	0,1196	0,12
Kasus 2	0,4187	0,9249	0,1362	0,18
Kasus 3	0,5782	1,2406	0,2038	0,26
Kasus 4	1,0889	2,2043	0,4032	0,40



Gambar 3.2. Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen

Setelah simulasi sudah divalidasi maka variasi dilakukan untuk melihat pengaruh perubahan parameter fluida dan partikel terhadap laju erosi maksimum dan profil erosi yang terjadi. Simulasi menggunakan fluida minyak mentah, gas alam dan partikel pasir dengan parameter sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 5. Skenario variasi yang dilakukan pada studi ini ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 5. Parameter fluida dan partikel dalam simulasi

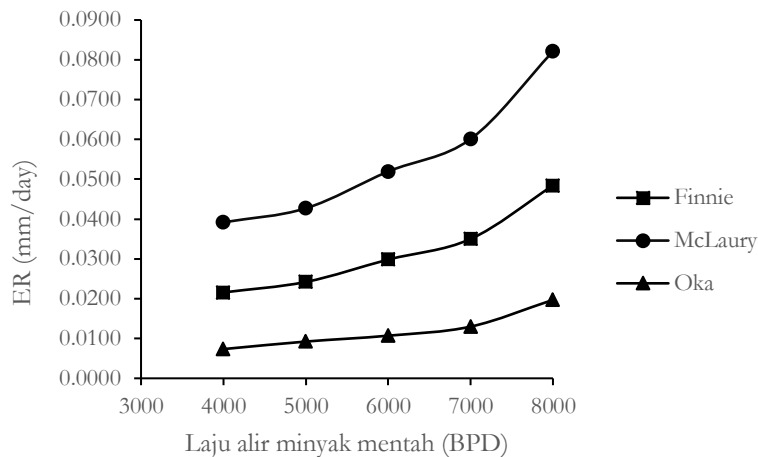
Fluida	Kerapatan (kg/m ³)	Viskositas (kg/m-s)	Tegangan Permukaan (N/m)
Minyak hidrokarbon	879,6	3,839 x 10 ⁻³	-
Air	998,2	1,003 x 10 ⁻³	-
Gas Alam	0,762	1,300 x 10 ⁻⁵	
Minyak mentah water cut 90%	986,34	1,287 x 10 ⁻³	0.072
Partikel			
Diameter	30 – 300 μm		
Kerapatan	2.224 kg/m ³		

Tabel 6. Skenario variasi parameter dalam simulasi

Parameter	Data Masukan	Setara
Diameter pipa (mm)	50,8; 76,2; 101,16	(2, 3 dan 4 inch)
Laju alir minyak mentah (kg/s)	7,260 - 14,520	(4000 – 8000 bbls/day)
Laju alir gas (kg/s)	0,0025 – 0,075	(0,1 – 1 MMSCFD)
Laju alir partikel (kg/s)	0,000926 – 0,001852	2.60. – 100 kg/day)

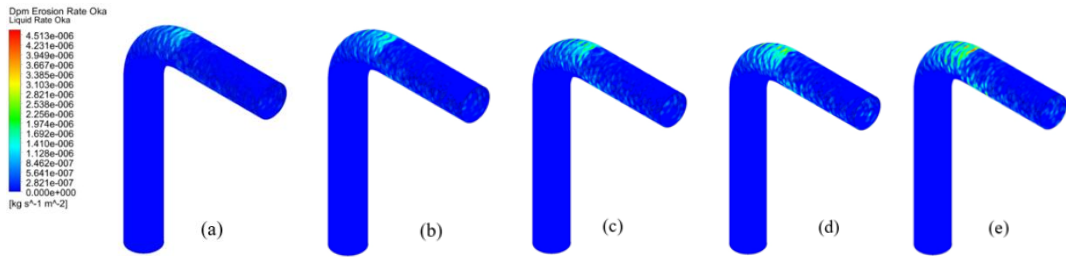
3.2. Pengaruh Laju Alir Massa Minyak Mentah Terhadap Laju Erosi

Pada diameter pipa tetap dengan laju alir gas dan diameter partikel tetap, laju erosi maksimum meningkat dengan kenaikan laju alir minyak mentah seperti ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Pengaruh laju alir minyak mentah terhadap laju erosi

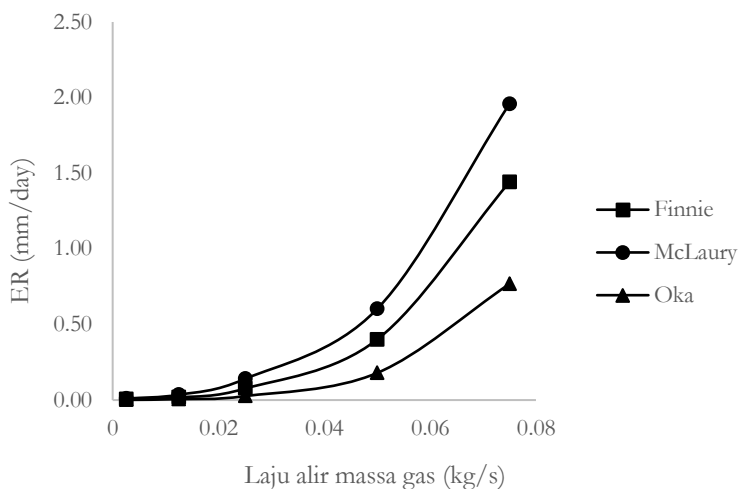
Dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa laju erosi maksimum meningkat dengan kenaikan laju alir minyak mentah. Keempat model menunjukkan kecenderungan yang sama. Sebagaimana hasil yang diperoleh pada tahap validasi, model erosi Oka memberikan hasil yang paling kecil dibandingkan dua model lainnya, sementara model McLaury memberikan hasil laju erosi yang paling besar. Hasil ini sesuai dengan teori bahwa laju erosi berbanding lurus dengan kecepatan. Dalam hal ini peningkatan laju alir fasa cair berarti peningkatan kecepatan aliran fluida yang pada akhirnya meningkatkan kecepatan partikel yang menumbuk dinding material target. Kondisi ini sesuai dengan hasil penelitian Zhang et al. yang menunjukkan bahwa laju erosi meningkat dengan kenaikan kecepatan fluida cair. Pada Gambar 7 terlihat bahwa erosi sebagian besar terdistribusi ke bagian luar belokan dengan kenaikan laju alir fasa cair. Hal ini menunjukkan bahwa fluida dengan kecepatan yang lebih tinggi bergerak dari inti (sumbu pipa vertikal) aliran ke arah punggung belokan. Studi eksperimen aliran dua fasa air-udara yang dilakukan Yadav menunjukkan bahwa fluida di daerah belokan mengalami gaya sentripetal yang mengarahkan aliran dari pusat ke bagian luar belokan.



Gambar 7. Profil erosi pada laju alir fasa cair (a) 7,26 kg/s (b) 9,075 kg/s (c) 10,890 kg/s (d) 12,705 kg/s (e) 14,520 kg/s.

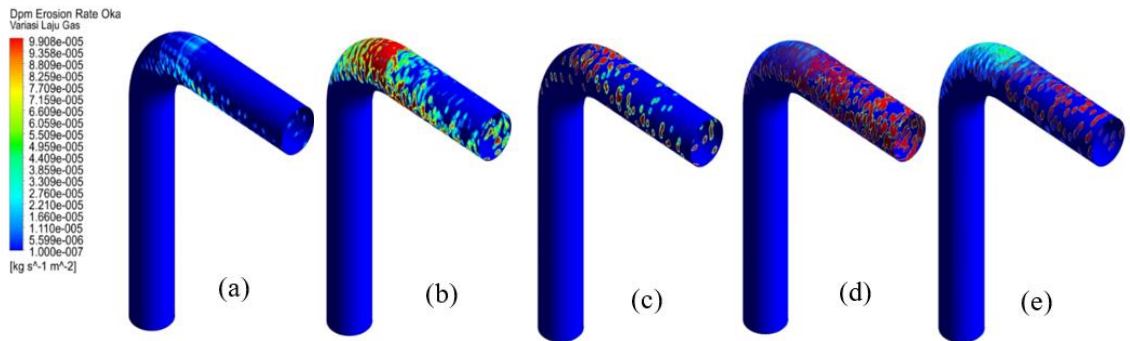
3.3. Pengaruh Laju Alir Massa Gas Terhadap Laju Erosi

Pada diameter pipa tetap dengan laju alir minyak mentah dan diameter partikel tetap, laju erosi maksimum meningkat dengan kenaikan laju alir gas seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Hal ini disebabkan dengan meningkatnya laju alir gas maka kecepatan fluida semakin meningkat sesuai dengan penjumlahan kecepatan superficial masing-masing fasa didalam fluida.



Gambar 8. Pengaruh laju alir fasa gas terhadap laju erosi

Dari Gambar 9 dapat dilihat bahwa pada laju alir gas rendah, erosi maksimum terjadi di belokan bagian samping dan semakin bergeser ke tengah seiring peningkatan laju alir gas. Disamping itu peningkatan aliran gas cenderung menyebabkan lebih banyak partikel yang menumbuk dinding pipa. Keadaan ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Xu et al. bahwa kenaikan kecepatan gas menyebabkan kapasitas pengangkutan partikel oleh gas meningkat dan meningkatkan energi kinetik partikel sehingga tekanan sentuh lebih besar pada dinding dalam pipa.



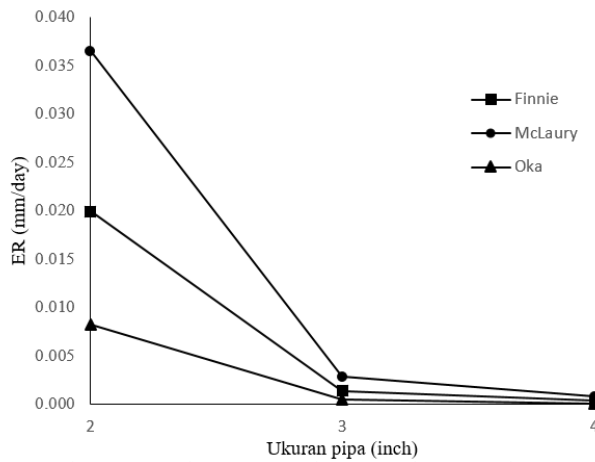
Gambar 9. Profil erosi pada laju alir gas (a) 0,0025 kg/s; (b) 0,0125 kg/s; (c) 0,025 kg/s; (d) 0,05 kg/s; (e) 0,075 kg/s.

Perbedaan besaran laju erosi maksimum antara ketiga model dengan kenaikan laju alir fluida dapat dilihat dari beberapa hal. Pertama adalah bagaimana perbedaan ketiga model dalam menentukan eksponen kecepatan, Finnie menggunakan nilai 2, McLaury menggunakan nilai 1,73, sementara Oka menggunakan eksponen 0,19. Hal ini yang memungkinkan laju Erosi yang dihasilkan oleh model Oka paling kecil dibandingkan model lainnya. Kedua, penentuan konstanta empiris pada ketiga model menggunakan pendekatan yang berbeda sesuai dengan kondisi eksperimen masing-masing model. Ketiga, acuan sudut tumbukan kritis yang digunakan ketiga model juga berbeda, Finnie mengambil sudut kritis pada $18,5^\circ$, McLaury menggunakan sudut 15° , sementara Oka secara tidak langsung menunjukkan sudut sekitar 40° sebagai sudut tumbukan maksimum, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.

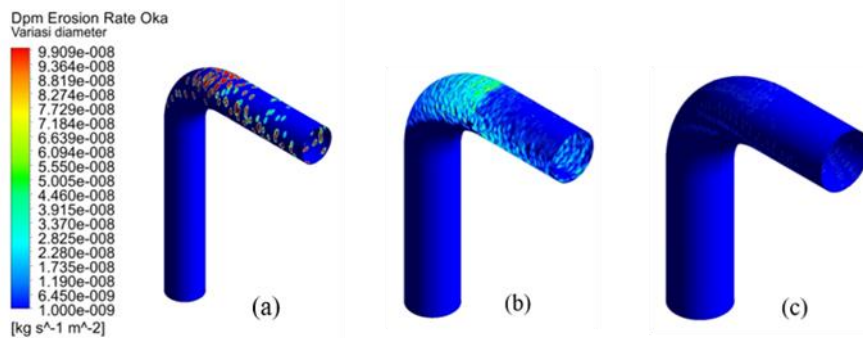
Dari grafik pengaruh laju alir fluida terhadap laju erosi maksimum, terlihat bahwa semakin tinggi laju alir (kecepatan) menghasilkan perbedaan relatif laju erosi maksimum yang semakin besar antar model erosi. Hal ini mengindikasikan bahwa penerapan model erosi dalam suatu simulasi sangat bergantung kepada rentang kecepatan aliran yang digunakan.

3.4. Pengaruh Diameter Pipa Terhadap Laju Erosi

Hasil simulasi dengan variasi diameter pipa ditunjukkan pada Gambar 10. Dari Gambar tersebut dapat dilihat bahwa semakin besar diameter pipa maka semakin kecil laju erosi yang terjadi. Hal ini disebabkan dengan bertambahnya diameter pipa maka kecepatan aliran fluida semakin rendah dan laju erosi semakin rendah sebanding dengan eksponen kecepatan masing-masing model. Xu et al. mengobservasi dari penelitiannya bahwa kenaikan diameter pipa meningkatkan dispersi partikel sehingga tumbukan partikel pada dinding dalam pipa juga terdispersi, dengan demikian laju erosi maksimum menurun.



Gambar 10. Pengaruh diameter pipa terhadap laju erosi



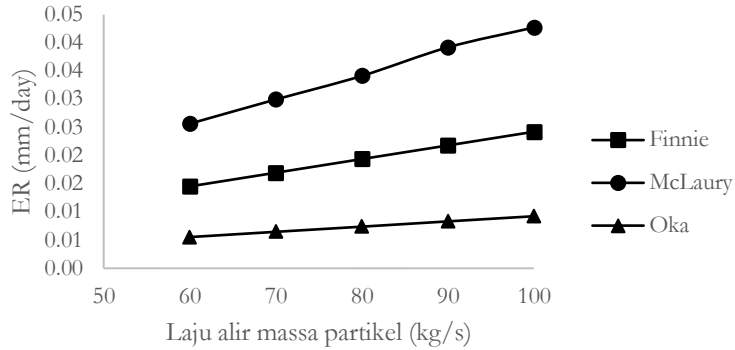
Gambar 11. Profil erosi pada pipa diameter (a) 2 inch (b) 3 inch (c) 4 inch.

Gambar 11 menunjukkan bahwa distribusi erosi pada pipa 2 inch hampir sama dengan pipa 3 inch yaitu terdistribusi dominan pada punggung belokan, yang membedakan adalah pada besaran laju erosi. Pada pipa berdiameter 4 inch selain menurunnya laju erosi, profil erosi tidak lagi pada punggung belokan melainkan bergeser ke bawah. Hal ini dimungkinkan dengan meningkatnya diameter pipa kecepatan aliran menurun sehingga gaya sentripetal yang menyebabkan aliran dari daerah inti mengarah ke dinding belokan bagian luar juga menurun. Penurunan dua kali kecepatan setara dengan penurunan empat kali gaya sentripetal fluida. Selain itu penurunan kecepatan menyebabkan bilangan Stokes menurun, artinya dominasi aliran fluida terhadap gerakan partikel tidak terlalu besar, sehingga inersia partikel cenderung mengarahkan partikel ke bawah.

3.5. Pengaruh Laju Alir Massa Partikel Terhadap Laju Erosi

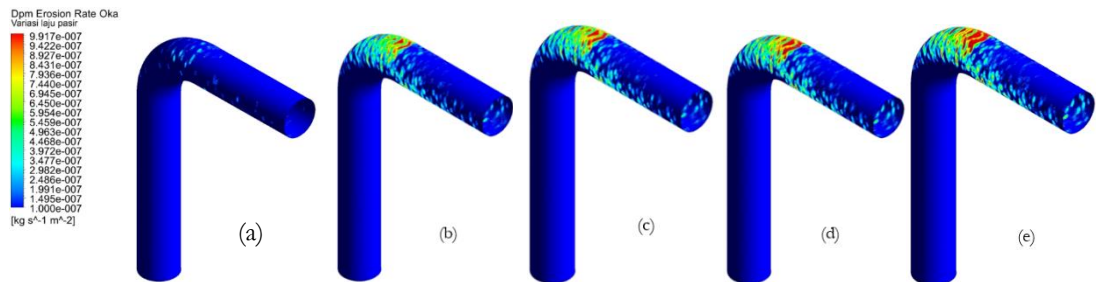
Hasil simulasi variasi laju alir partikel abrasif ditunjukkan pada Gambar 12. Dari Gambar terlihat bahwa laju erosi bertambah dengan kenaikan laju alir massa partikel. Kondisi ini disebabkan dengan meningkatnya laju alir massa partikel maka semakin banyak partikel yang

menumbuk dinding dalam pipa sehingga meningkatkan laju erosi. Fenomena peningkatan erosi akibat meningkatnya laju alir massa partikel memiliki kecenderungan yang sama dengan kenaikan laju alir fluida cair, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 12. Pengaruh laju alir partikel terhadap laju erosi

Gambar 13 memperlihatkan profil erosi dengan variasi laju alir massa fluida 60 – 100 kg/day. Pada laju alir partikel rendah, besaran laju erosi terlihat rendah dan distribusi erosi yang tidak terlalu banyak pada daerah punggung belokan. Laju erosi meningkat seiring dengan meningkatnya distribusi erosi didaerah punggung belokan ketika laju alir massa partikel mulai dari 70 hingga 100 kg/day dengan pola yang sama dengan profil erosi pada variasi laju alir fasa cair. Di dalam ANSYS Fluent, laju alir massa partikel digunakan untuk menentukan massa partikel yang kemudian akan dimasukkan kedalam perhitungan model erosi. Karena itu laju erosi dengan peningkatan massa partikel menghasilkan kenaikan yang linier, sedangkan peningkatan kecepatan fluida menghasilkan kecenderungan laju erosi yang naik secara eksponensial sesuai dengan konstanta eksponen yang digunakan didalam masing-masing model erosi.

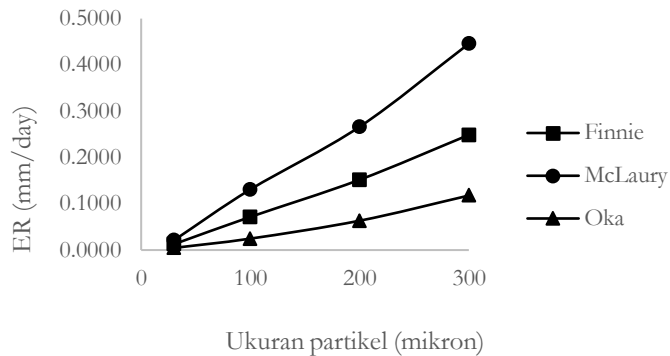


Gambar 13. Profil erosi pada laju alir partikel (a) 60kg/day (b) 70kg/day (c) 80kg/day (d) 90kg/day (e) 100kg/day.

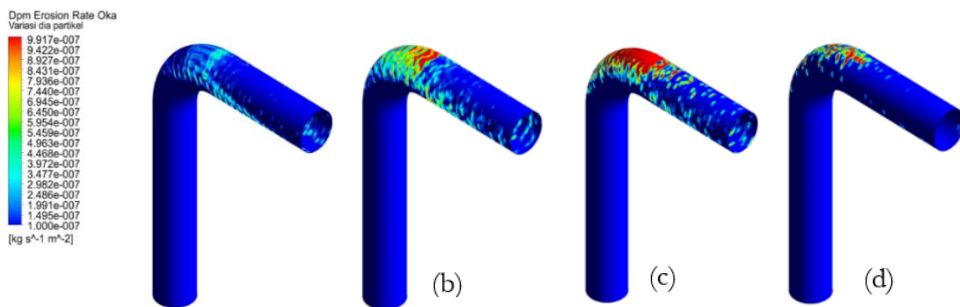
3.6. Pengaruh Ukuran Partikel Terhadap Laju Erosi

Hasil simulasi variasi ukuran partikel ditunjukkan pada Gambar 14. Dari Gambar tersebut terlihat bahwa laju erosi maksimum meningkat dengan semakin besarnya ukuran

partikel. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan Desale yang menyimpulkan bahwa peningkatan ukuran partikel menyebabkan meningkatnya laju erosi. Kenaikan diameter partikel berarti meningkatnya massa partikel, yang pada kecepatan tetap memberikan energi kinetik tumbukan terhadap material target lebih besar. Hasil simulasi juga didukung oleh hasil eksperimen yang dilakukan Okita yang menunjukkan bahwa semakin besar ukuran partikel cenderung meningkatkan rasio erosi pada sembarang nilai viskositas.



Gambar 14. Pengaruh ukuran partikel terhadap laju erosi.



Gambar 15. Profil erosi pada variasi ukuran partikel

(a) 30 μm ; (b) 100 μm ; (c) 200 μm ; (d) 300 μm .

Gambar 15 menunjukkan distribusi erosi yang hampir sama pada variasi diameter partikel 30 – 300 μm dengan dominasi erosi terbesar pada daerah punggung belokan, yang membedakan adalah pada intensitas laju erosinya. Pada diameter 200 μm , terlihat konsentrasi laju erosi tinggi lebih padat dibandingkan pada diameter partikel 300 μm . Hal ini dimungkinkan bahwa pada partikel berdiameter lebih besar atau lebih berat, kecenderungan partikel untuk turun dari *streamline* fluida pembawa lebih besar. Peningkatan diameter partikel juga berarti meningkatkan bilangan Stokes yang berbanding lurus dengan kuadrat diameter partikel, sehingga kecenderungan partikel untuk tidak didominasi oleh aliran fluida semakin besar. Dapat dikatakan bahwa pada diameter partikel 300 μm , sebagian partikel terbawa oleh aliran fluida hingga menumbuk dinding dan sebagian lain keluar dari *streamline* fluida yang mengarah ke dinding pipa.

4. KESIMPULAN

Pada studi ini prediksi erosi dengan menggunakan CFD dilakukan dengan menggunakan tiga model erosi yaitu model Finnie, McLaury dan Oka. Dari semua skenario simulasi yang dibuat, model McLaury menghasilkan laju erosi yang paling besar dibandingkan dua model lainnya. Model Oka secara konsisten menghasilkan laju erosi yang paling rendah. Perbedaan ini disebabkan ketiga model erosi dibangun dari pendekatan mekanistik maupun eksperimen yang berbeda, sehingga dimungkinkan masing-masing model erosi hanya berlaku pada kondisi tertentu saja. Dalam studi ini model Oka lebih unggul dibandingkan model Finnie dan McLaury dimana model Oka menghasilkan perbedaan relatif yang paling rendah terhadap eksperimen yang dijadikan acuan dalam validasi.

Hasil simulasi lanjutan menunjukkan bahwa laju erosi meningkat dengan peningkatan laju alir fasa cair, laju alir fasa gas, laju alir partikel, ukuran partikel dan laju erosi menurun dengan kenaikan diameter pipa.

Pada semua variasi laju alir fasa cair, profil erosi relatif sama yaitu kerapatan erosi terjadi pada punggung belokan akibat gaya sentripetal yang mengarahkan fluida dari inti pipa ke bagian luar belokan. Pada kenaikan laju alir gas, profil erosi terdistribusi di punggung belokan hingga bagian pipa keluaran yang disebabkan oleh peningkatan kapasitas pengangkutan partikel oleh fluida gas. Kenaikan ukuran pipa menyebabkan kecepatan aliran menurun dan gaya sentripetal menurun sehingga tumbukan partikel pada punggung belokan berkurang. Kenaikan laju alir partikel berarti peningkatan jumlah partikel yang menumbuk dinding pipa sehingga laju erosi meningkat. Lintasan partikel berdiameter kecil cenderung didominasi aliran fluida sehingga menghasilkan profil erosi terdistribusi pada bagian samping maupun punggung belokan sesuai dengan turbulensi di daerah belokan. Sementara semakin besar diameter partikel terdapat kecenderungan sebagian partikel keluar dari *streamline* fluida pembawa saat masuk ke daerah belokan karena dominasi fluida terhadap partikel semakin kecil (bilangan Stokes meningkat dengan kenaikan diameter partikel) sehingga semakin sedikit yang menumbuk punggung belokan.

5. DAFTAR PUSTAKA

ANSYS Fluent 18.2. *ANSYS Workbench Help*.

Arabnejad H., A.Mansouri, S.A. Shirazi, B.S. McLaury, 2015, Evaluation of solid particle erosion equations and models for oil and gas industry applications, Journal Paper of SPE Annual Technical Conference and Exhibition. *Society of Petroleum Engineers*, SPE-174987-MS.

Chen X., B.S. McLaury, S.A. Shirazi, 2004, Application and Experimental Validation of a Computational Fluid Dynamics (CFD)-based Erosion Prediction Model in Elbows and Plugged-Tees, *Journal of Computers & Fluids*, Vol. 33, pp. 1251-1272.

Desale, G.R., Gandhi, B.K., Jain, S.C., 2009, Particle Size Effects on The Slurry Erosion of Aluminum Alloy (AA 6063). *Journal of Wear*, Vol. 266, Page 1066-1071.

Edwards J.K. B.S McLaury, S.A. Shirazi, 2001, Modeling solid particle erosion in elbows and plugged tees. ASME Journal of Energy Resources Technology, Vol. 123, Page 277-284.

Finnie I, 1960, Erosion of Surface by Solid Particles, *Journal of Wear*, Vol. 3, Page 87-103.

Fluent 6.0 User's Guide, 2001.

Oka Y.I., K.Okamura, T.Yoshida, 2005, Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation, *Journal of Wear*, Vol. 259, Page 95-101.

Oka Y.I., K.Okamura, T.Yoshida, 2005, Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact Part 2: Mechanical Properties of Materials Directly Associated with Erosion Damage, *Journal of Wear*, Vol. 259, Page 102-109.

Okita, R., Y. Zhang, B.S. McLaury, S.A. Shirazi, 2012, Experimental and Computational Investigation to Evaluate the Effect of Fluid Viscosity and Particle Size on Erosion Damage. *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 134.

Parsi M., K. Najmi, F. Najafifard, S. Hassani, B.S. McLaury, S.A. Shirazi, 2014, A comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 21, pp. 850-873.

Sedrez, T.A., S.A. Shirazi., Y.R. Rajkumar, K. Sambath, H.J. Subramani, 2019, Experiments and CFD Simulations of Erosion of a 90° elbow in liquid-dominated liquid-solid and dispersed-bubble-solid flows. *Journal of Wear*, 426-427. Page 570-580.

Vieira, R.E., A. Mansouri, B.S. McLaury, S.A. Shirazi, 2016, Experimental and computational study of erosion in elbows due to sand particles in air flow, *Journal of Powder Technology*, Vol. 288, pp. 339-353.

Xu, J., Z. Lian, J. Hu, M. Luo, 2018, Prediction of Maximum Erosion Rate of Gas-Solid Two-Phase Flow Pipelines. *Journal of Energies*.

Yadav, M. S., 2013, Interfacial Area Transport Across Vertical Elbows in Air-Water Two Phase Flow, *Dissertation*, Department of Mechanical and Nuclear Engineering, The Pennsylvania State University.

Zhang, Y., E.P. Reuterfors, B.S. McLaury, S.A. Shirazi, E.F. Rybicki, 2007, Comparison of Computed and Measured Particle Velocities and Erosion in Water and Air Flows, *Journal of Wear*, Vol. 263, pp. 330-338.

Pengaruh Kecepatan Punch Terhadap Kedalaman Penetrasi dan Cacat Hasil Micro Deep Drawing dengan Sistem Pneumatik pada Material Aluminium AA1100

M. Habibi^{1*} dan M. Mahardika^{1,2}

¹Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.

Jl. Grafika No. 2, Yogyakarta 55281, Indonesia

²Centre for Innovation of Medical Equipment and Devices (CIMEDs), Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

Jl. Grafika No. 2, Yogyakarta 55281, Indonesia

E-mail: *mohd.habibie09@gmail.com

Abstrak

Proses produksi dengan micro deep drawing menjadi salah satu pilihan yang tepat untuk pembuatan komponen dengan bentuk yang kompleks. Akan tetapi semakin kecil dimensi komponen semakin sulit process manufakturnya. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh kecepatan punch terhadap kedalaman penetrasi dan cacat produk hasil micro deep drawing. Material yang digunakan pada penelitian ini adalah aluminium AA1100 ketebalan 250 μm . Parameter yang diperhatikan pada penelitian ini adalah pengaruh kecepatan punch dan tekanan terhadap kedalaman penetrasi dan cacat yang timbul pada produk hasil micro deep drawing. Parameter yang digunakan adalah kecepatan dari punch sebesar 10, 20 dan 30 mm/s serta tekanan kompresor 3, 4 dan 5 bar. Dari hasil-hasil yang diperoleh dalam penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa kedalaman cup dan cacat pada cup hasil micro deep drawing dipengaruhi oleh kecepatan dan tekanan punch, seperti yang terlihat bahwa penambahan ketinggian cup terjadi pada setiap peningkatan kecepatan dan tekanan punch. Hal ini disebabkan oleh perubahan energi yang dihasilkan saat kecepatan dan tekanan yang dinaikkan sehingga berpengaruh pada kedalaman dan cacat tearing dan wrinkling pada cup. Parameter kecepatan punch dan tekanan kompresor sangat penting diperhatikan dalam proses micro deep drawing dengan sistem pneumatik.

Kata kunci: *micro deep drawing, microforming, micro cup, micro punch.*

Abstract

The micro deep drawing production process is one of the choices for manufacturing components with complex shapes. However, the smaller the dimensions of a component, the more difficult is the manufacturing process. This research is conducted to determine the effect of punch speed on the depth of penetration and the defects obtained from the micro deep drawing process. The material used in this research is aluminum AA1100 with a thickness of 250 μm . The parameters studied in this research are punch speed and pressure on the depth of penetration and defects that arise in the micro deep drawing product. The punch speed used in this research were 10, 20 and 30 mm/s and the compressor pressure applied were 3, 4 and 5 bar. Based on the results obtained from this research, it can be concluded that the depth of the cup and the defects of the product of the micro deep drawing cup are affected by the speed and pressure of the punch, as can be seen from the increasing of cup height that occurs with the

increase of punch speed and pressure. This is caused by the changes in energy produced when the speed and the pressure are increased, so that this affects the depth and defects by tearing and wrinkling defects of the cup. The parameters of punch speed and compressor pressure are therefore critical to be considered in the process of micro deep drawing with a pneumatic system.

Keywords: *micro deep drawing, microforming, micro cup, micro punch.*

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan untuk memproduksi berbagai bagian miniatur khususnya yang terbuat dari lembaran logam semakin meningkat. Untuk menghasilkan komponen mikro dengan fitur yang lebih kompleks dan standar kualitas dengan fungsionalitas yang tinggi, perusahaan manufaktur harus mengembangkan proses fabrikasi baru dan inovatif sehingga perusahaan manufaktur tetap dapat bersaing. Jika ingin memproduksi komponen mikro maka sangat penting untuk memperhatikan proses dan material yang memiliki kemampuan bentuk yang baik dalam skala mikro, industri harus menggunakan teknologi modern agar mendukung proses produksi. Untuk produksi dalam skala makro diketahui bahwa kecepatan *punch* memiliki pengaruh pada proses *deep drawing*. Pengaruh ini sangat disebabkan oleh gesekan dan kecepatan antara *blank* dan *tool punch*. Pengaruh lebih lanjut adalah perilaku pembentukan bahan yang bergantung pada laju regangan dari material. Dalam rentang mikro, meningkatnya ukuran butir, resiko cacat juga meningkat yang menyebabkan anisotropi pada material. Jenis cacat *tearing* terjadi pada ukuran butir yang lebih besar. Jenis cacat *thinning* terjadi di tempat dengan daerah tertipis di bagian *cup*. Ketebalan *cup* yang terbentuk meningkat secara bertahap di sepanjang dinding samping dari jari-jari bawah ke pinggiran cangkir dan yang tertipis muncul di jari-jari bawah sementara tekanan maksimum terletak di tepi cangkir yang disebabkan oleh deformasi yang tidak homogen. Hal ini dapat diatasi dengan menambahkan aliran pemanas pada *sheet blank* (Guo et al., 2017). ketika radius *die* dikurangi maka beban *punch* akan meningkat dan ketika gaya *blank holder* yang lebih besar diterapkan, peningkatan beban *punch* juga harus diperbesar. Gaya *blank holder* dan beban *punch* ditingkatkan berdasarkan ketebalan material. Radius *die* yang besar akan membatasi kedalaman dari sebuah *cup*. Sudut *cup* akan meningkat dengan meningkatnya gaya *blank holder* akan tetapi terjadi pengurangan ketebalan di sudut *die* dan semakin besar gaya *blank holder* maka penipisan akan semakin besar yang dapat menyebabkan *cup* cacat (Wang et al., 2009). Jenis cacat yang terjadi pada produk hasil drawing yaitu *wrinkling in the flang*, *wrinkling in the wall*, *tearing* (robek), *earing* dan *surface scratches* (goresan permukaan).

2. METODE PENELITIAN

Perkembangan produk miniatur telah mendorong penelitian di bidang *micro forming*, terutama dalam produksi bagian mikro, untuk mengurangi berat dan volumenya. Atas dasar ini diperlukan suatu analisis transfer pengetahuan dari dunia makro ke dunia mikro, seperti ulasan tentang penelitian dasar dan terapan terbaru yang terkait dengan efek ukuran, dalam hal proses dan pembentukan. Teknologi yang sudah mapan dalam skala makro tidak dapat langsung diterapkan ke ukuran mikro, karena sifat-sifat bahan ukuran mikro bervariasi secara signifikan dibandingkan dengan ukuran makro. Dalam penelitian ini material *punch* dan *die* yang digunakan adalah *mild steel* atau baja karbon rendah karena berdasarkan sifat mekaniknya *mild steel* dianggap dapat digunakan untuk memotong atau *punch* material aluminium AA1100 dengan ketebalan

0.25 mm. Spesifikasi mesin *micro deep drawing* pneumatik adalah ukuran mesin $669 \times 330 \times 350$ mm, tipe pneumatik SC 160 \times 100 R, *Working Pressure* $1 \sim 9,0$ Kg_f / cm², *maximal stroke* 1500, *sensor proximity* LJ12A3-4-Z/BX (4 mm), *detection distance* 4 mm (*effective* 0 – 4 mm) dan *detection object* (metal material). Untuk mengukur kecepatan *punching* digunakan sensor *infrared* (*receiver* dan *transmitter*) yang dihubungkan dengan mikrokontroler dan LCD *display* agar hasil dapat terbaca dengan baik, mikroskop digital digunakan untuk mengamati dan melihat cacat yang terjadi pada hasil *drawing*. Mikroskop digital yang digunakan adalah *Dino Lite* tipe AM2111 dan AM4515T5.

Tabel 1. Kondisi material dan *tools* pada saat pengujian

Material	Aluminium AA1100
<i>Punch diameter</i> (mm)	3,15
<i>Die inner diameter</i> (mm)	3,94
<i>Punch radius</i> (mm)	0,5
<i>Clearence</i> (mm)	0,29
<i>Blank thickness</i> (mm)	0,25
<i>Blank diameter</i> (mm)	6,00
Kecepatan <i>punch</i> (mm/s)	10, 20 dan 30
<i>Drawing</i> limit ratio	1,90
<i>Blank holder force</i> (N)	67,88

Tabel 1 di atas menampilkan kondisi *tools* yang digunakan pada proses *drawing*. Proses *drawing* dilakukan dengan variasi kecepatan yaitu 10, 20 dan 30 mm/s yang diatur menggunakan valve/katup pada aliran udara dari pneumatik agar dapat diketahui pengaruh kecepatan yang berbeda terhadap produk hasil *drawing*. Tekanan kompresor pada saat *drawing* juga divariasikan yaitu 3, 4 dan 5 bar yang diatur pada regulator kompresor, hal ini dilakukan untuk mengetahui perbedaan hasil *drawing* dengan tekanan yang berbeda.

2.1. Pengacuan Pustaka

Untuk mendapatkan pemahaman yang lebih komprehensif, peneliti melakukan studi literatur untuk mendapatkan pemahaman dan pengetahuan tentang *micro deep drawing* dan perkembangannya melalui penelitian yang terdahulu seperti uraian dibawah ini.

Ada perbedaan antara *micro deep drawing* dengan *deep drawing* konvensional, dalam *micro deep drawing*, sebuah *cup* dibentuk menggunakan logam lembaran dengan tebal antara 0,001 dan 0,300 mm, dan sebuah *punch* yang berdiameter antara 1 sampai 9 mm. sedangkan *deep drawing* konvensional adalah *cup* yang dibentuk dari bahan dengan tebal antara 0,09 dan 1 mm, dengan *punch* yang berdiameter antara 100 dan 1000 mm (Geiger et al., 2002). *Drawing* merupakan salahsatu proses *sheet metal forming* yang dipakai untuk membuat bagian yang berbentuk cangkir, berbentuk kotak, atau bagian melengkung dan cekung yang rumit. Proses tersebut dilakukan dengan cara meletakkan lembaran logam diatas rongga cetakan kemudian lembaran logam diberikan dorongan ke dalam lubang dengan *punch*. Kedua ujung lembaran biasanya dijepit oleh *blankholder*. Produk dari *drawing* seperti kaleng minuman, amunisi, panci masak, dan bodi mobil. (Groover, 2010). *Deep drawing* adalah salah satu proses yang paling banyak digunakan dalam *Sheet Metal forming*, dimana blank secara radial ditarik ke dalam *dies* oleh aksi mekanis dari *punching*. *Deep drawing* efektif dalam pembuatan bagian-bagian yang presisi dan rumit dengan fitur simetris dan asimetris yang memiliki aplikasi luas dalam kehidupan kita sehari-hari (Luo et al., 2015).

Parameter penting dalam proses *micro deep drawing* ialah ketebalan material yang bervariasi yang akan mempengaruhi hasil *drawing*, dapat menyebabkan konsentrasi tegangan di berbagai zona bagian yang di *drawing* dan dapat memunculkan bagian yang cacat. Variasi ketebalan material akan memiliki pengaruh lebih besar ketika produk yang dibuat dalam skala mikro dengan material yang sangat tipis. Material yang digunakan Al 1050 dengan gaya *punch* 5, 13, 20 N/mm² pada material dengan ketebalan 0,50, 0,1, 0,2 mm dan menghasilkan produk dengan cacat *thinning* (penipisan) dan *cracking* (putus) (Brabie et al., 2013). Dalam pembentukan makro sudah diketahui, bahwa kecepatan pukulan memiliki pengaruh pada proses *deep drawing*. Pengaruh ini sangat disebabkan oleh perilaku gesekan tergantung kecepatan antara *blank* dan *tool punch*. Pengaruh lebih lanjut adalah perilaku pembentukan bahan yang bergantung pada laju regangan. Dalam rentang mikro, terdapat pengaruh kecepatan *punch* pada proses *deep drawing*, bisa karena efek ukuran, berbeda dari yang ada di kisaran makro. penelitian ini menggunakan strip aluminium 99,5 dengan ketebalan 0,05 mm dilakukan dengan kecepatan *punch* berkisar dari 1 mm/s hingga 1000 mm / s dan gaya *punch* 3 N/mm². Perilaku regangan yang terjadi dengan kecepatan pukulan yang berbeda diselidiki berdasarkan mikroskop (Hanna et al., 2012). *Micro deep drawing* telah banyak dilakukan penelitian. Namun biasanya dilakukan dengan kecepatan *punch* yang relatif rendah, misalnya 1 mm/s. Pada saat yang sama, *die* yang ringan dalam proses *micro deep drawing* memungkinkan untuk memvariasikan kecepatan *punch* dalam kisaran yang relatif besar. Selain itu, meningkatkan kecepatan *punch* sangat mempengaruhi proses produksi massal di industri. Jadi *micro deep drawing* dengan diameter *punch* 1 mm dilakukan dengan kecepatan *punch* yang berbeda (1, 10 dan 100 mm/s) dalam penelitian ini. Koefisien gesekan dalam *micro deep drawing* berkurang dengan meningkatnya kecepatan *punch*. Menggunakan material blank Al99.5 dengan ketebalan 0,02 mm, limit *drawing ratio* $b = 1,8$ cocok digunakan dengan kecepatan *punch* dari 1 hingga 100 mm/s. *Blank holder force* akan meningkat dengan meningkatnya kecepatan *punch*. Koefisien gesekan juga diketahui dipengaruhi oleh kecepatan *punch* (Frank and Zhengyu, 2010).

2.2. Landasan Teori

Pembagian area pada proses *cup drawing* menjadi tiga area agar mudah untuk dipahami. Daerah annular luar disebut *flensa* dimana lembaran *blank* biasanya bersentuhan langsung dengan bahu *die* dan *blank holder*. Kemudian area *cup wall* yaitu bagian dalam yang terletak pada ruang antara sudut-sudut sekitar *punch* dan *die*. Area terakhir adalah area yang bersentuhan dengan bagian bawah *punch drawing*. Karena banyak variabel yang harus diperhatikan dalam proses ini, seperti gesekan, *blank holder force*, radius sudut *die*, radius sudut *punch* dan ketebalan *blank* agar diperoleh *cup* yang baik tanpa cacat (Amit, 2018). Gaya untuk *drawing* dijelaskan adalah sebagai berikut:

$$P = \left[\pi D_p t (1.1 \sigma_0) \ln \left(\frac{D_0}{D_p} \right) + \mu \left(2 H_B \frac{D_p}{D_0} \right) \right] \exp \left(\frac{\mu \pi}{2} \right) \quad (1)$$

$$H_B = \left[\{ \pi (D_0^2 - D_d^2) \} / 4 \right] \times \sigma_H \quad (2)$$

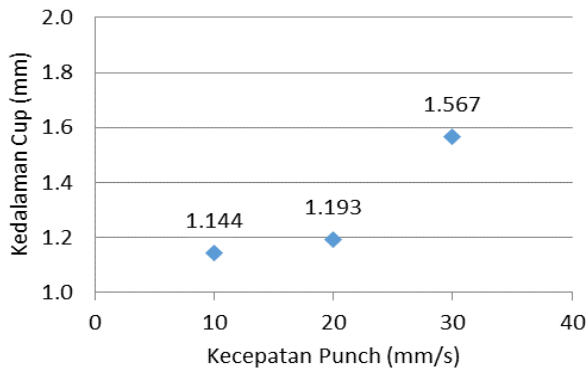
$$\sigma_H = 0.02 \times \frac{\sigma_0 + S_u}{2} \quad (3)$$

Keterangan:

P	= Gaya total untuk <i>drawing</i> (N)	μ	= Koefisien gesekan pada material
t	= Ketebalan dinding <i>cup</i> (mm)	HB	= Gaya blank holder (N)
σ_0	= Tegangan pada material (N/mm ²)	sH	= Tegangan saat di <i>holder blank</i> (N/mm ²)
D0	= Diameter lembaran <i>blank</i> (mm)	s0	= True stress (N/mm ²)
Dp	= Diameter <i>punch</i> (mm)	Su	= Ultimate Tensile Stress (N/mm ²)
Dd	= Diameter <i>die</i> (mm)	II	= 3.14

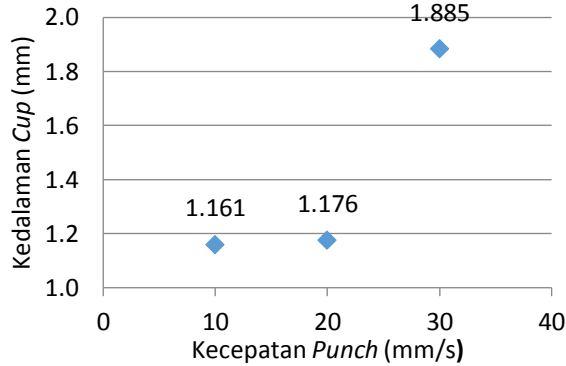
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut adalah hasil pengujian pengaruh kecepatan *punch* terhadap kedalaman penetrasi pada proses *micro deep drawing* seperti pada Gambar 1, 2 dan 3 di bawah ini.



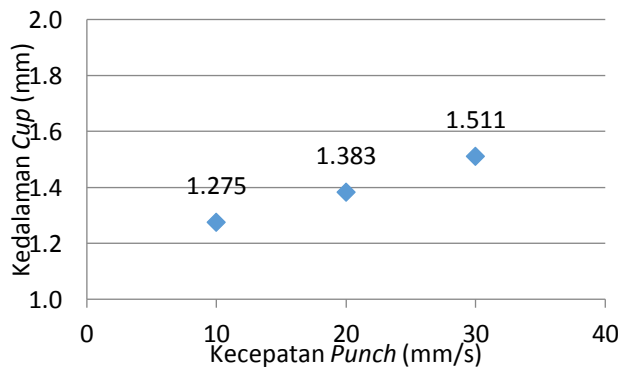
Gambar 1. Pengaruh kecepatan *punch* terhadap kedalaman *cup* tekanan 3 bar.

Hasil pengamatan di atas dapat disimpulkan bahwa dengan tekanan kompresor yang sama yaitu 3 bar dan variasi kecepatan *punch* 10, 20, 30 mm/s. Setiap penambahan kecepatan akan berpengaruh pada kondisi *cup* yang akan terbentuk, setiap peningkatan kecepatan flensa akan mengecil sebesar 0,04 mm, diameter dalam *cup* akan bertambah sebesar 0,05 sampai 0,29 mm, diameter luar *cup* berkurang sebesar 0,07 mm, sedangkan ketebalan dinding akan mengalami penipisan di area sudut bawah dan atas *die* sebesar 0,05 sampai 0,15 mm di area sudut *die* bawah dan sudut atas *die* sebesar 0,02 mm. Kemudian tinggi *cup* juga akan bertambah dengan pertambahan kecepatan *punch* yaitu berkisar antara 0,049 sampai 0,374 mm. Seluruh *cup* dengan tekanan 3 bar dapat digunakan atau tanpa cacat.



Gambar 2. Pengaruh kecepatan *punch* terhadap kedalaman *cup* tekanan 4 bar

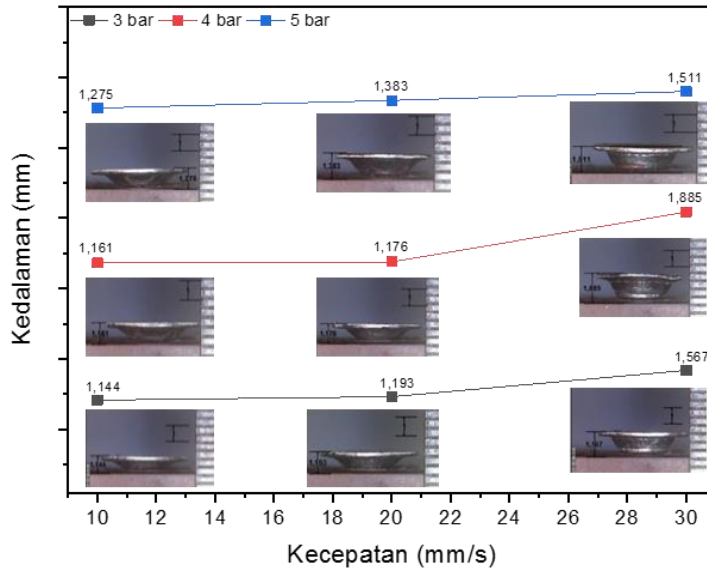
Hasil pengamatan di atas dapat disimpulkan bahwa dengan tekanan kompresor yang sama yaitu 4 bar dan variasi kecepatan *punch* 10, 20, 30 mm/s. Setiap penambahan kecepatan akan berpengaruh pada kondisi *cup* yang akan terbentuk, setiap peningkatan kecepatan flensa akan mengecil sebesar 0,015 sampai 0,709 mm, diameter dalam *cup* akan bertambah sebesar 0,20 mm, diameter luar *cup* berkurang sebesar 0,08 mm, sedangkan ketebalan dinding akan mengalami penipisan di area sudut atas *die* sebesar 0,01 mm, sudut bawah *die* akan mengalami penipisan sebesar 0,03 mm, sedangkan *cup* dengan kecepatan 30 mm/s di bagian sudut *die* bawah mengalami cacat sobek (*tearing*). Kemudian tinggi *cup* juga akan bertambah dengan pertambahan kecepatan *punch* yaitu berkisar antara 0,015 sampai 0,709 mm. Pada kombinasi ini terdapat cacat *wrinkling* dan *tearing* pada *cup* dengan kecepatan 30 mm/s, sedangkan sisanya *cup* dapat dibentuk dengan baik.



Gambar 3. Pengaruh kecepatan *punch* terhadap kedalaman *cup* tekanan 5 bar.

Hasil pengamatan di atas dapat disimpulkan bahwa dengan tekanan kompresor yang sama yaitu 5 bar dan variasi kecepatan *punch* 10, 20, 30 mm/s. Setiap penambahan kecepatan akan berpengaruh pada kondisi *cup* yang akan terbentuk, setiap peningkatan kecepatan flensa yang terbentuk akan tetap sama yaitu 0,74 mm, diameter dalam *cup* akan bertambah sebesar 0,29 mm, diameter luar *cup* berkurang sebesar 0,05 mm, sedangkan ketebalan dinding akan mengalami penipisan di area sudut atas *die* sebesar 0,01 sampai 0,02 mm, sudut bawah *die* akan mengalami penipisan sebesar 0,02 sampai 0,05 mm, sedangkan *cup* dengan kecepatan 30 mm/s di bagian sudut *die* bawah mengalami cacat sobek (*tearing*). Kemudian tinggi *cup* juga akan

bertambah dengan pertambahan kecepatan *punch* yaitu berkisar antara 0,108 sampai 0,128 mm. Pada kombinasi ini semua *cup* mengalami cacat *wrinkling*, sedangkan *cup* dengan kecepatan 30 mm/s mengalami cacat *wrinkling* dan *tearing*.



Gambar 4. Grafik perbandingan ketinggian *cup* keseluruhan

Dari hasil pengamatan *cup* dengan menggunakan mikroskop digital pada kecepatan yang ditingkatkan, maka dapat disimpulkan bahwa kecepatan *punch* berpengaruh terhadap tinggi *cup*. Bertambahnya kecepatan akan menghasilkan energi kinetik yang lebih besar dan semakin besar gaya yang dibutuhkan untuk menghentikannya, hal itu menyebabkan *cup* akan semakin dalam, maka dapat disimpulkan bahwa kecepatan *punch* berpengaruh terhadap tinggi *cup*. *Cup* dengan kecepatan 20 mm/s dengan tekanan 4 bar mencapai kedalaman maksimum 1,176 mm menjadi *cup* yang direkomendasikan karena memiliki bentuk yang baik tanpa cacat.

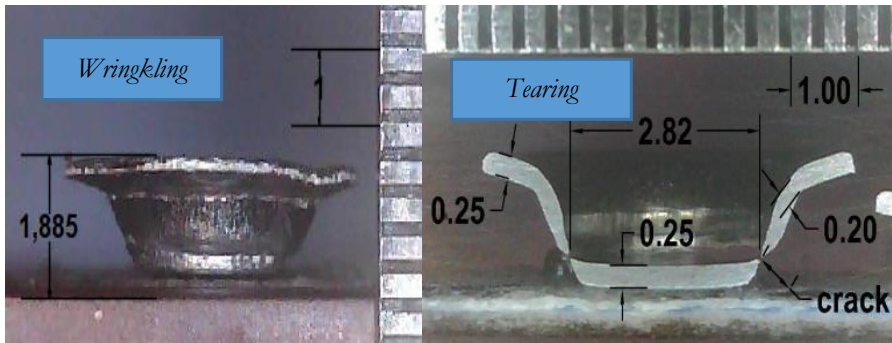
Berikut adalah hasil pengujian yang menunjukkan pengaruh kecepatan *punch* terhadap cacat yang ditimbulkan pada *cup* hasil *drawing* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2 berikut ini.

Tabel 2. Pengaruh kecepatan *punch* terhadap cacat *cup* hasil *drawing*

Tekanan kompresor (bar)	Kecepatan <i>punch</i> (mm/s)		
	10	20	30
3	✓	✓	✓
4	✓	✓	<i>Wrinkling</i> <i>Tearing</i>
5	<i>Wrinkling</i>	<i>Wrinkling</i>	<i>Wrinkling</i> <i>Tearing</i>

Keterangan:

✓ : baik/tidak terjadi cacat



Gambar 5. Cacat *wrinkling* dan cacat *tearing* yang terjadi pada hasil *drawing*.

Pada Tabel 2 menjelaskan hubungan kecepatan *punch* terhadap *cup* dan cacat yang ditimbulkan. Seluruh *cup* dengan tekanan 3 bar dapat terbentuk dengan baik tanpa cacat yang ditimbulkan. Sedangkan *cup* dengan tekanan 4 bar dan kecepatan yang sama terdapat hasil yang berbeda, dimana *cup* dengan kecepatan 10 dan 20 mm/s terbentuk dengan baik tanpa cacat, akan tetapi *cup* dengan tekanan 4 bar pada kecepatan 30 mm/s, *cup* mengalami cacat *wrinkling* pada sisi bawah *cup* dan *tearing* pada flensa *cup*. Kondisi *cup* dengan tekanan 5 bar seluruhnya mengalami cacat, *cup* dengan kecepatan 10 dan 20 mm/s mengalami cacat *wrinkling* pada area sudut bawah *cup*. Sedangkan *cup* dengan kecepatan 30 mm/s mengalami 2 jenis cacat yaitu *wrinkling* pada area sudut bawah *cup* dan *tearing* pada sisi flensa. Dari tabel di atas dapat disimpulkan bahwa tekanan kompresor dan kecepatan *punch* akan mempengaruhi jenis cacat yang akan timbul pada *cup* hasil *drawing*, maka untuk menghasilkan *cup drawing* tanpa cacat harus memperhatikan 2 parameter *drawing* yaitu tekanan dan kecepatan *punch*.

4. KESIMPULAN

Kecepatan *punch* dan tekanan kompresor terbukti berpengaruh terhadap tinggi *cup* yang dihasilkan. *Cup* dengan tekanan kompresor 3 bar kecepatan *punch* 10 mm/s diperoleh *cup* dengan ketinggian 1,144 mm, kecepatan *punch* 20 mm/s diperoleh *cup* dengan ketinggian 1,193 mm dan kecepatan *punch* 30 mm/s diperoleh *cup* dengan ketinggian 1,567 mm. *Cup* dengan tekanan kompresor 4 bar kecepatan *punch* 10 mm/s diperoleh *cup* dengan ketinggian 1,161 mm, kecepatan *punch* 20 mm/s diperoleh *cup* dengan ketinggian 1,176 mm dan kecepatan *punch* 30 mm/s diperoleh *cup* dengan ketinggian 1,885 mm. *Cup* dengan tekanan kompresor 5 bar kecepatan *punch* 10 mm/s diperoleh *cup* dengan ketinggian 1,275 mm, kecepatan *punch* 20 mm/s diperoleh *cup* dengan ketinggian 1,383 mm dan kecepatan *punch* 30 mm/s diperoleh *cup* dengan ketinggian 1,511 mm. *Cup* akan mengalami penambahan tinggi dengan bertambahnya kecepatan dan tekanan kompresor.

Kecepatan *punch* dan tekanan kompresor terbukti berpengaruh terhadap jenis cacat yang timbul pada *cup* hasil *drawing*. Seluruh *cup* dengan tekanan 3 bar dapat terbentuk dengan baik tanpa cacat yang ditimbulkan. Sedangkan *cup* dengan tekanan 4 bar dan kecepatan yang berbeda terdapat hasil yang berbeda, dimana *cup* dengan kecepatan 10 dan 20 mm/s terbentuk dengan baik tanpa cacat, akan tetapi *cup* dengan tekanan 4 bar pada kecepatan 30 mm/s, *cup* mengalami cacat *wrinkling* pada sisi bawah *cup* dan *tearing* pada flensa *cup*. Kondisi *cup* dengan tekanan 5 bar seluruhnya mengalami cacat, *cup* dengan kecepatan 10 dan 20 mm/s mengalami cacat *wrinkling* pada area sudut bawah *cup*. Sedangkan *cup* dengan kecepatan 30 mm/s mengalami

2 jenis cacat yaitu *wrinkling* pada area sudut bawah *cup* dan *tearing* pada sisi flensa. Dapat disimpulkan bahwa tekanan kompresor dan kecepatan *punch* akan mempengaruhi jenis cacat yang akan timbul pada *cup* hasil *drawing*, maka untuk menghasilkan *cup drawing* tanpa cacat harus memperhatikan 2 parameter *drawing* yaitu tekanan dan kecepatan *punch*.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Amit, B., 2018, Mechanical properties and working of metals and alloys, *Springer Nature Singapore*, Singapore.
- Brabic, G., Costache, E, M., Nanu, N dan Chirita, B., 2013, Prediction and minimisation of sheet thickness variation during deep drawing of micro/milli part, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vasile Alecsandri, University of bacau, Romania.
- Frank, V dan Zhengyu, H, 2010, Analysis of punch velocity dependent process window in micro deep drawing, *German Academic Society for Production Engineering*, Bremen, Germany.
- Geiger, M., Kleiner, M., Eckstein., Tlesler, N dan Engel, U., 2002, Microforming, *Journal of Materials Processing Technology*, Dortmund, Germany.
- Groover, M.P., 2010, Fundamentals of Modern Manufacturing: materials, processes, and systems, ed.4 , *John Wiley & Sons, Inc*, United States.
- Guo. N., Suna. C.Y., Fub. M.W., 2017, Size effect affected deformation characteristics in micro deep drawing of TWIP domed-bottom cups, *International Conference on the Technology of Plasticity*, Cambridge, United Kingdom.
- Hanna, W., Zhenyu, H., dan Frank, V., 2012, Influence of Punch Velocity on Spring Back in Micro Forming, *Trans Tech Publications*, Switzerland.
- Luo, L., Jiang, Z., Wei, D., Manabe, K, dan Sato, H., 2015, Experimental and numerical study of micro deep drawing. *MATEC Web of Conferences*, Australia.
- Wang C.J., Guo B., Shan D.B., 2009., Effect of die cavity dimension on micro U deep drawing behaviour with T2 foil, *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*.