

Effect of Quadrilateral and Triangular Mesh Models on Fsw Process Temperature

Pengaruh Model Mesh Segiempat dan Segitiga Terhadap Temperatur Proses Fsw

Muhamad Abbi Rozzaq¹⁾, Mulyadi^{*2)}

¹⁾ Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

²⁾ Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Email Korespondensi: mulyadi@umsida.ac.id

Abstract. Meshing is the division of stress and pressure calculations. In this analysis uses 2 mesh shapes, namely rectangular mesh and triangular mesh to see the calculation rician, and uses 4 tools with Cilynder pin, Cilynder Tapper, Square Tapper, and Hexagonal. This study aims to determine the effect of rectangular and triangular mesh models on the temperature of the FSW process. This research uses the transient thermal method to study all heat generation parameters. In this study using process parameters tool rotation speed 80.11, 126.50, 199.70, 316.46 (rad/s), concave shoulder angle 2, 5, 8, 11 ($^{\circ}$), tool tilt angle 2, 2.5, 3, 3.5 ($^{\circ}$), and welding speed 24, 43, 65, 90 (mm/s). This research uses the standard optimal maximum temperature of 315 $^{\circ}$ C according to Weis Olea, C. A. (2008). The results in this study show the maximum optimal temperature of the rectangular mesh with the optimal result of the maximum temperature of 313.31 $^{\circ}$ C, namely the hexagonal pin geometry ex 11 with the standard maximum optimal temperature with the tool rotation speed factor 199.70 (rad/s), concave shoulder angle 8 ($^{\circ}$), tool tilt angle 2 ($^{\circ}$), welding speed 43 (mm/s). And the triangular mesh shows the optimal temperature of the maximum temperature of 314.21 $^{\circ}$ C, namely the hexagonal pin geometry ex 11 with the optimal temperature with a tool rotation speed factor of 199.70 (rad/s), concave shoulder angle 8 ($^{\circ}$), tool tilt angle 2 ($^{\circ}$), welding speed 43 (mm/s).

Keyword - Heat Generation; Mesh; Transient Thermal

Abstrak. Meshing merupakan pembagian hitung tegangan dan tekanan. Dalam analisis ini memakai 2 bentuk mesh, yaitu mesh segiempat dan mesh segitiga untuk melihat rician hitungan, dan memakai 4 tools dengan pin Cilynder, Tapper Cilynder, Tapper Square, dan Hexagonal. Penelitian ini memiliki tujuan untuk mengetahui pengaruh model mesh segiempat dan segitiga terhadap temperatur proses FSW. Penelitian ini menggunakan metode transient thermal untuk mempelajari semua parameter heat generation. Pada penelitian ini menggunakan parameter kecepatan rotasi tool 80.11, 126.50, 199.70, 316.46 (rad/s), sudut bahu cekung 2, 5, 8, 11 ($^{\circ}$), sudut kemiringan tool 2, 2.5, 3, 3.5 ($^{\circ}$), dan kecepatan pengelasan 24, 43, 65, 90 (mm/s). Penelitian ini menggunakan standart optimal temperature maksimal 315 $^{\circ}$ C menurut Weis Olea, C. A. (2008). Hasil pada penelitian ini menunjukkan temperature optimal maksimal terhadap mesh segiempat dengan hasil optimal suhu maksimal 313,31 $^{\circ}$ C yaitu geometri pin hexagonal eks 11 dengan temperature optimal maksimal standart dengan faktor kecepatan rotasi tool 199.70 (rad/s), sudut bahu cekung 8 ($^{\circ}$), sudut kemiringan tool 2 ($^{\circ}$), kecepatan pengelasan 43 (mm/s). Dan pada mesh segitiga menunjukkan temperature optimal suhu maksimal 314,21 $^{\circ}$ C yaitu geometri pin hexagonal eks 11 dengan temperature optimal dengan faktor kecepatan rotasi tool 199.70 (rad/s), sudut bahu cekung 8 ($^{\circ}$), sudut kemiringan tool 2 ($^{\circ}$), kecepatan pengelasan 43 (mm/s).

Kata Kunci - Heat Generation; Mesh; Transient Thermal

I. PENDAHULUAN

Meshing merupakan pembagian hitung tegangan dan tekanan. Dalam analisis ini memakai 2 bentuk mesh, yaitu mesh segiempat dan mesh segitiga untuk melihat rician hitungan, dan memakai 4 tools dengan pin yang berbeda yang terdiri dari Cilynder, Tapper Cilynder, Tapper Square, dan Hexagonal. Ada 4 pin geometri dan 4 proses parameter yang digunakan untuk pekerjaan ini. Geometri pin berbentuk Cilynder, Tapper Cilynder, Tapper Square, dan Hexagonal. Parameter proses adalah kecepatan putaran pahat, kecepatan pengelasan, sudut kemiringan dan sudut bahu cekung. Setiap geometri pin akan dioptimalkan menggunakan Taguchi dan 4 geometri terbaik akan dipilih sebagai geometri alat terbaik. Kriteria kondisi optimal adalah suhu maksimum proses harus mendekati 315 $^{\circ}$ C, menurut Weis Olea, C. A. (2008) [1], kekuatan suhu optimum untuk nilai kekerasan, kekuatan luluh, dan kekuatan tarik tertinggi adalah suhu maksimum 315 $^{\circ}$ C.

Tingkat pemanasan permukaan bahu dibagi menjadi terbagi menjadi dua bagian, yaitu area horizontal dan sudut. Tingkat pemanasan sudut dihitung sebagai kalikan sudut bahu cekung, yang dalam hal ini adalah ($\alpha < 45^{\circ}$). Pada saat

yang sama kemiringan pahat (β), nilai yang diukur dari garis vertikal digunakan sebagai pengali laju pemanasan semua bagian. Dalam penelitian ini menggunakan faktor geser, jadi ada dua jenis yaitu geser dan tempel [2]. *Analisis Heat Generation Temperatur* dengan memakai 4 pin (*Cylinder, Tapper Cylinder, Tapper Square, dan Hexagonal*), bertujuan untuk membandingkan *heat generation* yang diperoleh dari masing-masing *pin* terhadap bentuk mesh. Salah satunya yaitu Simulasi *Transient Thermal* digunakan dalam metode ini untuk mendapatkan hasil hitung yang akan diperbandingkan pada tiap bentuk *mesh* terhadap pin.

Proses *Friction Stir Welding* (FSW) dikembangkan dan diperkenalkan pertama kali pada tahun 1991 oleh Wayne Thomas dari The Welding Institute (TWI) dalam bahasa Inggris. Ini adalah salah satu dari 40 jenis pengelasan yang terus beroperasi dengan pengenalan energi listrik (Dawes, 1999). Aluminium dan paduannya umumnya digunakan dalam bidang teknis karena memiliki berbagai sifat yang diinginkan, termasuk ringness, formability baik, kekuatan Tarik tinggi, tahan terhadap korosi dan sifat mekanis yang dapat ditingkatkan dengan dingin atau panas lainnya, dan kemampuan las yang bervariasi sesuai dengan jenis paduan yang digunakan (Mandal, 2005) [3].

Selain pengambilan data pada spesimen yang berfungsi untuk mengetahui nilai tegangan dan gaya aksialnya, selanjutnya akan dilakukan *input* data pada beberapa *software* pengolah data untuk memperlancar pelaksanaan *progres* ini, Salah satunya menggunakan *software Ansys* untuk mensimulasikan secara visual *Heat Generation Pin* terhadap *mesh* menggunakan metode *Transient Thermal*. Sejak tahun 1990, Edison Welding Institute (EWI) telah melakukan proses termal transien. Proses termal transien menggunakan prinsip tegangan konstan dan tidak memerlukan pendinginan, dan proses panda lokal di area tersebut dapat diotomatisasi untuk proses pengelasan. Untuk menghasilkan tegangan termal tarik pada saat pendinginan sisa yang lebih parah daripada tegangan tegangan yang dihasilkan oleh proses pengelasan, proses termal transien melibatkan penggunaan sumber panas bergerak yang dekat dengan las[4].

Adanya *Ansys* ini berfungsi untuk mengetahui tingkat *error mesh terhadap pins*, simulasi kinerja *Heat Generation mesh* dapat terlihat dalam visual layar untuk di ambil *Temperatur Min dan Max*. Berlangsungnya pemrograman dan input data kedalam *Ansys*, terlihat perbandingan nilai *Heat Generation* masing – masing *mesh* dan pins untuk diambil kecocokan *mesh* terhadap pins dari beberapa hasil yang telah diperoleh.

II. METODE

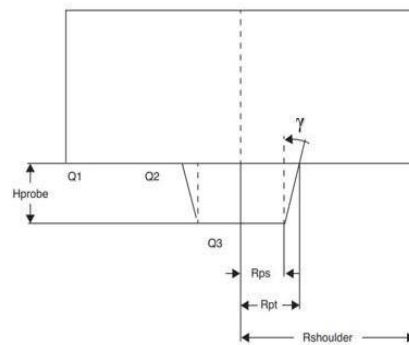
Pada penelitian ini memakai 4 geometri pin tool untuk menunjang keberlangsungan penelitian ini, terlebih dahulu mendesain 4 geometri tool FSW yang digunakan dalam melakukan penelitian ini. Dengan desain bentuk pin *tools* yang berbeda dengan maksud dapat mendapatkan hasil yang relevan dari tiap model pin terhadap batas pencapaiannya. Sebelum nantinya dibuat secara fisik dan digunakan sebagai perbandingan penelitian hasil dari tiap pin. Pada tahap selanjutnya yaitu pengukuran gaya aksial untuk mengambil data yang dihasilkan dari uji tekan terhadap suatu material uji kali ini. Tahapan ini dilakukan pada tiap pin secara bergantian. Satu persatu *tool* dengan uji coba sebanyak 3 kali untuk mencari gaya aksial *minimum, between, dan maximalnya*, menggunakan mesin *milling/freis universal X6322C WEIDA* dengan RPM 3000. Lalu dilakukan input data menggunakan *software* dikomputer yang bertujuan untuk memperoleh hasil *Heat Generation* yang harus dicapai pada batasnya dari proses input data gaya aksial yang sudah diolah.

Tahap berikutnya merupakan tahapan simulasi visual dari heat generation yang merambat dari simulasi pengelasan FSW. Jadi dilakukannya simulasi transient thermal ini bertujuan untuk melihat secara visual proses rambatan panas dan hasil structure dari tegangan dan tekanan yang ditimbulkan oleh pengelasan dari tiap tool yang berbeda pin dengan kecepatan pengelasan yang bermacam. Proses simulasi ini dilakukan sebelum dilakukannya proses pengelasan FSW secara langsung/fisik, untuk mengamati secara visual simulasi terlebih dahulu tentang bagaimana sebab dan akibat hasil prosesnya nanti. Proses ANOVA dilangsungkan untuk melihat hasil visual grafik dari eksperimen yang telah dilakukan terhadap nilai yang sudah ditetapkan pada standarnya, suatu nilai yang dihasilkan diinputkan untuk dilihat secara grafik terhadap nilai dalam grafik standarnya ataupun mendekati diharapkan tidak lebih dan tidak kurang.

Pada proses selanjutnya ini dilakukan bertujuan untuk membahas hasil dari proses penelitian pengaruh model mesh segiempat dan segitiga terhadap temperatur proses fsw menggunakan metode simulasi *transient thermal*, dan juga telah dilakukan proses pengamatan desain pin tool fsw. Dari hasil yang didapat dari pengamatan desain pin akan disajikan hasil pengamatan sesuai dengan variasi simulasi pin yang berbeda untuk perbandingan pada variasinya.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan Pembahasan : Menganalisa desain geometri pin yang akan di uji dengan seksama, menggunakan hitungan untuk ukuran pada area tool dengan bermacam pin, dan melihat ukuran tingkat kekuatan desain tiap geometri pin saat digunakan untuk uji analisa ini, maka desain nantinya cukup kuat digunakan dalam jangka yang lama dan beberapa kali pemakaian. Bentuk desain geometri pin menggunakan hitungan dalam berbagai pertimbangan hingga tool bisa dibuat secara fisik dalam menjalani proses analisa ini.



Gambar 1 Heat generation area in FSW

Pemilihan ukuran bahu 12 mm dan diameter pin 4 mm untuk semua geometri pahat didasarkan pada studi yang dilakukan oleh Silva (2015) yang menemukan bahwa rasio diameter bahu/pin = 2,5 akan menghasilkan hasil pengelasan FSW yang baik [5]. Menggunakan alat loadcell untuk pengambilan parameter gaya aksial, dan dengan menggunakan mesin *milling/freis*, untuk menggunakan alat uji gaya aksial diperlukan terlebih dahulu untuk mengkalibrasi alatnya, supaya mempermudah untuk memproses uji gaya aksial, yang kemudian dapat digunakan untuk pengambilan hasil gaya aksial pada tiap *tool* dengan perbedaan geometri pin yang akan diuji. Parameter yang diterapkan pada mesin *milling/freis* juga berlaku untuk pengujian gaya aksial ini, seperti setting RPM dan torsi yang ada di mesin *milling/freis*.

Sehingga dari dorongan tool yang menekan material terhadap loadcell, dapat terbaca angka ketika awal tool menyentuh material/memberikan sedikit tekanan pada material (*minimum*), lalu ketika tool mulai berjalan masuk melebur kedalam material (*between*), dan ketika tool sudah masuk kedalam material sampai batas yang sudah ditetapkan (*maximal*). Memperhatikan loadcell ketika proses sedang berjalan untuk mengambil hasil data. Tiap proses pengambilan data gaya aksial ini diperlukan dua sampai tiga kali test supaya mendapat perbandingan yang relevan tiap geometri pin nya.

Tabel 1 Hasil Uji Gaya Aksial

| No | Tool FSW | AA6061-T651 | | Rata-Rata | |
|----|----------------|-------------|-----|-----------|--|
| | | Data Awal | Pin | Shoulder | |
| 1 | Silinder Lurus | 710 | 171 | 92 | |
| 2 | Taper Silinder | 960 | 211 | 86 | |
| 3 | Taper Square | 1030 | 118 | 98 | |
| 4 | Hexagonal | 930 | 166 | 102 | |

Heat generation pada tiap pin dengan kecepatan pengelasan yang berbeda, (24, 43, 65, 90) mm/s sehingga tercapailah perbandingan hasil pada tiap pin yang memiliki tingkat resiko *error* yang rendah dengan batas temperatur *heat generation* yang digunakan adalah 315⁰ C. Satu persatu pin akan mengalami proses yang berbeda, sehingga hasil yang ditimbulkan dari proses tersebut dapat diperbandingkan terhadap masing-masing pin. Dari data rata-rata gaya aksial yang sudah diketahui maka selanjutnya dapat diolah lagi untuk keperluan input data selanjutnya dengan metode pengolahan secara berbeda, dengan rumus-rumus yang sudah ditetapkan untuk mencari hasil yang akan di gunakan untuk analisa selanjutnya yang akan di lakukan secara bertahap.

Beberapa acuan data yang telah di dapat untuk mencari hasil relevan nya pada tiap geometri pin dengan oalahan data yang berbeda juga tentunya, sehingga setiap geometri pin memiliki olahan data yang sudah memiliki hasil yang relevan dari tiap perhitungan yang digunakan.

$$Q_1 = \frac{2}{3} \pi \tau_{contact} \omega (R_{shoulder}^3 - R_{pin}^3) \tan(1+\alpha) \left(\frac{1}{\cos\beta}\right)^3$$

$$Q_{2total} = (1 - \delta) 2\pi \tau_{contact} \omega R_{pin}^2 H_{pin} + \delta 2\pi \tau_{contact} \omega R_{pin}^2 H_{pin}$$

$$\text{Contoh perhitungan: } Q_{2total} = 0,5 \times 209,71 + 0,5 \times 2,29$$

[6]

$$Q_{3total} = (1 - \delta) \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{contact} R_{pin}^3 + \delta \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{contact} R_{pin}^3$$

Tabel 2 Heat Generation pin silinder mesh segiempat

| No | Kecepatan rotasi tool (rad/s) | Sudut bahu cekung ($^{\circ}$) | Tilt angle ($^{\circ}$) | Gaya aksial (N) | Kecepatan pengelasan (mm/s) | Q1 (Watt) | Q2 (Watt) | Q3 (Watt) |
|----|-------------------------------|----------------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 80,11 | 2 | 2,0 | 171 | 24 | 13,23 | 106,00 | 33,28 |
| 2 | 80,11 | 5 | 2,5 | 171 | 43 | 26,56 | 106,11 | 33,32 |
| 3 | 80,11 | 8 | 3,0 | 171 | 65 | 40,08 | 106,24 | 33,36 |
| 4 | 80,11 | 11 | 3,5 | 171 | 90 | 53,86 | 106,40 | 33,41 |
| 5 | 126,50 | 2 | 2,5 | 171 | 65 | 20,91 | 167,55 | 52,61 |
| 6 | 126,50 | 5 | 2,0 | 171 | 90 | 41,90 | 167,38 | 52,55 |
| 7 | 126,50 | 8 | 3,5 | 171 | 24 | 63,38 | 168,01 | 52,75 |
| 8 | 126,50 | 11 | 3,0 | 171 | 43 | 84,93 | 167,76 | 52,67 |
| 9 | 199,70 | 2 | 3,0 | 171 | 90 | 33,06 | 264,83 | 83,15 |
| 10 | 199,70 | 5 | 3,5 | 171 | 65 | 66,39 | 265,23 | 83,28 |
| 11 | 199,70 | 8 | 2,0 | 171 | 43 | 99,68 | 264,23 | 82,96 |
| 12 | 199,70 | 11 | 2,5 | 171 | 24 | 133,91 | 264,50 | 83,05 |
| 13 | 316,46 | 2 | 3,5 | 171 | 43 | 52,46 | 420,30 | 131,97 |
| 14 | 316,46 | 5 | 3,0 | 171 | 24 | 105,06 | 419,68 | 131,77 |
| 15 | 316,46 | 8 | 2,5 | 171 | 90 | 158,12 | 419,15 | 131,61 |
| 16 | 316,46 | 11 | 2,0 | 171 | 65 | 211,98 | 418,72 | 131,47 |
| | | α | β | P | | | | |

$$Q_1 = \frac{2}{3} \pi \tau_{contact} \omega (R_{shoulder}^3 - R_{pin}^3) \tan(1 + \alpha) \left(\frac{1}{\cos \beta}\right)^3$$

$$Q_2 = (1 - \delta) \frac{\pi \omega \tau_{contact} H_{pin}}{2 \cos \gamma} (R_{PS} + R_{PT})^2 + \delta \frac{\pi \omega \tau_{contact} H_{pin}}{2 \cos \gamma} (R_{PS} + R_{PT})^2$$

$$Q_3 = (1 - \delta) \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{contact} R_{PS}^3 + \delta \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{contact} R_{PS}^3$$

Tabel 3 Heat Generation pin taper silinder mesh segiempat

| No | Kecepatan rotasi tool (rad/s) | Sudut bahu cekung ($^{\circ}$) | Tilt angle ($^{\circ}$) | Gaya aksial (N) | Kecepatan pengelasan (mm/s) | Q1 (Watt) | Q2 (Watt) | Q3 (Watt) |
|----|-------------------------------|----------------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 80,11 | 2 | 2,0 | 188 | 24 | 13,30 | 183,43 | 4,17 |
| 2 | 80,11 | 5 | 2,5 | 188 | 43 | 26,71 | 183,62 | 4,17 |
| 3 | 80,11 | 8 | 3,0 | 188 | 65 | 40,30 | 183,85 | 4,18 |
| 4 | 80,11 | 11 | 3,5 | 188 | 90 | 54,16 | 184,12 | 4,18 |
| 5 | 126,50 | 2 | 2,5 | 188 | 65 | 21,03 | 289,95 | 6,59 |
| 6 | 126,50 | 5 | 2,0 | 188 | 90 | 42,13 | 289,65 | 6,58 |
| 7 | 126,50 | 8 | 3,5 | 188 | 24 | 63,73 | 290,74 | 6,61 |
| 8 | 126,50 | 11 | 3,0 | 188 | 43 | 85,40 | 290,31 | 6,60 |
| 9 | 199,70 | 2 | 3,0 | 188 | 90 | 33,24 | 458,30 | 10,41 |
| 10 | 199,70 | 5 | 3,5 | 188 | 65 | 66,76 | 458,98 | 10,43 |

| | | | | | | | | |
|----|--------|----------|---------|-----|----|--------|--------|-------|
| 11 | 199,70 | 8 | 2,0 | 188 | 43 | 100,22 | 457,25 | 10,39 |
| 12 | 199,70 | 11 | 2,5 | 188 | 24 | 134,64 | 457,72 | 10,40 |
| 13 | 316,46 | 2 | 3,5 | 188 | 43 | 52,75 | 727,34 | 16,53 |
| 14 | 316,46 | 5 | 3,0 | 188 | 24 | 105,63 | 726,26 | 16,50 |
| 15 | 316,46 | 8 | 2,5 | 188 | 90 | 158,98 | 725,35 | 16,48 |
| 16 | 316,46 | 11 | 2,0 | 188 | 65 | 213,14 | 724,60 | 16,47 |
| | | α | β | P | | | | |

$$Q_1 = (1 - \delta) \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{contact} \left(R_{shoulder}^3 - \left(\frac{F_R F_A}{2\pi} \right) R_p^3 \right) \tan(1 + \alpha) \left(\frac{1}{\cos \beta} \right)^3$$

$$+ \delta \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{contact} \left(R_{shoulder}^3 - \left(\frac{F_R F_A}{2\pi} \right) R_p^3 \right) \tan(1 + \alpha) \left(\frac{1}{\cos \beta} \right)^3$$

$$Q_2 = (1 - \delta) \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{cont} \left(\frac{3F_R F_P}{4\pi} \right) R_p^2 H_{pin} + \delta \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{cont} \left(\frac{3F_R F_P}{4\pi} \right) R_p^2 H_{pin}$$

$$Q_3 = (1 - \delta) \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{contact} \left(\frac{F_R F_A}{2\pi} \right) R_{PS}^3 + \delta \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{contact} \left(\frac{F_R F_A}{2\pi} \right) R_{PS}^3$$

Tabel 4 Heat Generation pin tapper square mesh segiempat

| No | Kecepatan rotasi tool (rad/s) | Sudut bahu cekung ($^{\circ}$) | Tilt angle ($^{\circ}$) | Gaya aksial (N) | Kecepatan pengelasan (mm/s) | Q1 (Watt) | Q2 (Watt) | Q3 (Watt) |
|----|-------------------------------|----------------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 80,11 | 2 | 2,0 | 118 | 24 | 13,49 | 56,65 | 1,86 |
| 2 | 80,11 | 5 | 2,5 | 118 | 43 | 27,09 | 56,71 | 1,86 |
| 3 | 80,11 | 8 | 3,0 | 118 | 65 | 40,88 | 56,78 | 1,86 |
| 4 | 80,11 | 11 | 3,5 | 118 | 90 | 54,94 | 56,87 | 1,86 |
| 5 | 126,50 | 2 | 2,5 | 118 | 65 | 21,33 | 89,55 | 2,93 |
| 6 | 126,50 | 5 | 2,0 | 118 | 90 | 42,74 | 89,46 | 2,93 |
| 7 | 126,50 | 8 | 3,5 | 118 | 24 | 64,64 | 89,80 | 2,94 |
| 8 | 126,50 | 11 | 3,0 | 118 | 43 | 86,62 | 89,66 | 2,94 |
| 9 | 199,70 | 2 | 3,0 | 118 | 90 | 33,72 | 141,55 | 4,64 |
| 10 | 199,70 | 5 | 3,5 | 118 | 65 | 67,72 | 141,76 | 4,64 |
| 11 | 199,70 | 8 | 2,0 | 118 | 43 | 101,67 | 141,22 | 4,63 |
| 12 | 199,70 | 11 | 2,5 | 118 | 24 | 136,58 | 141,37 | 4,63 |
| 13 | 316,46 | 2 | 3,5 | 118 | 43 | 53,51 | 224,64 | 7,36 |
| 14 | 316,46 | 5 | 3,0 | 118 | 24 | 107,16 | 224,31 | 7,35 |
| 15 | 316,46 | 8 | 2,5 | 118 | 90 | 161,27 | 224,02 | 7,34 |
| 16 | 316,46 | 11 | 2,0 | 118 | 65 | 216,21 | 223,79 | 7,33 |
| | | α | β | P | | | | |

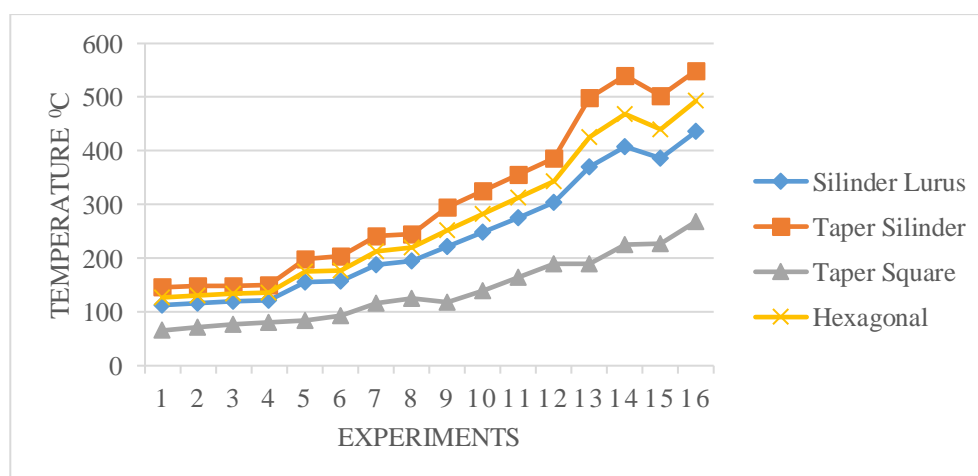
$$Q_1 = \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{contact} (R_{shoulder}^3 - \left(\frac{2 N \sin\theta \cos^2\theta}{2 \pi}\right) R_{pin}^3)$$

$$Q_2 = \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{contact} \left(\frac{6 N \sin\theta \cos\theta}{4 \pi}\right) R_{pin}^2 H_{pin}$$

$$Q_3 = \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{contact} \left(\frac{2 N \sin\theta \cos^2\theta}{2 \pi}\right) R_{pin}^3$$

Tabel 5 Heat Generation pin hexagonal mesh segiempat

| No | Kecepatan rotasi tool (rad/s) | Sudut bahu cekung ($^{\circ}$) | Tilt angle ($^{\circ}$) | Gaya aksial (N) | Kecepatan pengelasan (mm/s) | Q1 (Watt) | Q2 (Watt) | Q3 (Watt) |
|----|-------------------------------|----------------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 80,11 | 2 | 2,0 | 166 | 24 | 13,47 | 137,76 | 25,93 |
| 2 | 80,11 | 5 | 2,5 | 166 | 43 | 27,03 | 137,90 | 25,96 |
| 3 | 80,11 | 8 | 3,0 | 166 | 65 | 40,79 | 138,08 | 25,99 |
| 4 | 80,11 | 11 | 3,5 | 166 | 90 | 54,82 | 138,28 | 26,03 |
| 5 | 126,50 | 2 | 2,5 | 166 | 65 | 21,29 | 217,76 | 40,99 |
| 6 | 126,50 | 5 | 2,0 | 166 | 90 | 42,64 | 217,54 | 40,94 |
| 7 | 126,50 | 8 | 3,5 | 166 | 24 | 64,51 | 218,36 | 41,10 |
| 8 | 126,50 | 11 | 3,0 | 166 | 43 | 86,44 | 218,04 | 41,04 |
| 9 | 199,70 | 2 | 3,0 | 166 | 90 | 33,64 | 344,20 | 64,79 |
| 10 | 199,70 | 5 | 3,5 | 166 | 65 | 67,58 | 344,71 | 64,88 |
| 11 | 199,70 | 8 | 2,0 | 166 | 43 | 101,45 | 343,42 | 64,64 |
| 12 | 199,70 | 11 | 2,5 | 166 | 24 | 136,29 | 343,77 | 64,70 |
| 13 | 316,46 | 2 | 3,5 | 166 | 43 | 53,40 | 546,27 | 102,82 |
| 14 | 316,46 | 5 | 3,0 | 166 | 24 | 106,93 | 545,45 | 102,66 |
| 15 | 316,46 | 8 | 2,5 | 166 | 90 | 160,93 | 544,77 | 102,54 |
| 16 | 316,46 | 11 | 2,0 | 166 | 65 | 215,75 | 544,21 | 102,43 |
| | | α | β | P | | | | |



Gambar 2 Heat Generation Mesh Segiempat

Dari tiap geometri pin mencari hasil dari Q1, Q2, dan Q3 terhadap rumus yang sudah ditetapkan oleh tiap pin dalam mencari hasil.

Tabel 6 Heat Generation pin silinder mesh segitiga

| No | Kecepatan rotasi tool (rad/s) | Sudut bahu cekung ($^{\circ}$) | Tilt angle ($^{\circ}$) | Gaya aksial (N) | Kecepatan pengelasan (mm/s) | Q1 (Watt) | Q2 (Watt) | Q3 (Watt) |
|----|-------------------------------|----------------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 80,11 | 2 | 2,0 | 171 | 24 | 13,23 | 106,00 | 33,28 |
| 2 | 80,11 | 5 | 2,5 | 171 | 43 | 26,56 | 106,11 | 33,32 |
| 3 | 80,11 | 8 | 3,0 | 171 | 65 | 40,08 | 106,24 | 33,36 |
| 4 | 80,11 | 11 | 3,5 | 171 | 90 | 53,86 | 106,40 | 33,41 |
| 5 | 126,50 | 2 | 2,5 | 171 | 65 | 20,91 | 167,55 | 52,61 |
| 6 | 126,50 | 5 | 2,0 | 171 | 90 | 41,90 | 167,38 | 52,55 |
| 7 | 126,50 | 8 | 3,5 | 171 | 24 | 63,38 | 168,01 | 52,75 |
| 8 | 126,50 | 11 | 3,0 | 171 | 43 | 84,93 | 167,76 | 52,67 |
| 9 | 199,70 | 2 | 3,0 | 171 | 90 | 33,06 | 264,83 | 83,15 |
| 10 | 199,70 | 5 | 3,5 | 171 | 65 | 66,39 | 265,23 | 83,28 |
| 11 | 199,70 | 8 | 2,0 | 171 | 43 | 99,68 | 264,23 | 82,96 |
| 12 | 199,70 | 11 | 2,5 | 171 | 24 | 133,91 | 264,50 | 83,05 |
| 13 | 316,46 | 2 | 3,5 | 171 | 43 | 52,46 | 420,30 | 131,97 |
| 14 | 316,46 | 5 | 3,0 | 171 | 24 | 105,06 | 419,68 | 131,77 |
| 15 | 316,46 | 8 | 2,5 | 171 | 90 | 158,12 | 419,15 | 131,61 |
| 16 | 316,46 | 11 | 2,0 | 171 | 65 | 211,98 | 418,72 | 131,47 |
| | | α | β | P | | | | |

Tabel 7 Heat Generation pin taper silinder mesh segitiga

| No | Kecepatan rotasi tool (rad/s) | Sudut bahu cekung ($^{\circ}$) | Tilt angle ($^{\circ}$) | Gaya aksial (N) | Kecepatan pengelasan (mm/s) | Q1 (Watt) | Q2 (Watt) | Q3 (Watt) |
|----|-------------------------------|----------------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 80,11 | 2 | 2,0 | 188 | 24 | 13,30 | 183,43 | 4,17 |
| 2 | 80,11 | 5 | 2,5 | 188 | 43 | 26,71 | 183,62 | 4,17 |
| 3 | 80,11 | 8 | 3,0 | 188 | 65 | 40,30 | 183,85 | 4,18 |
| 4 | 80,11 | 11 | 3,5 | 188 | 90 | 54,16 | 184,12 | 4,18 |
| 5 | 126,50 | 2 | 2,5 | 188 | 65 | 21,03 | 289,95 | 6,59 |
| 6 | 126,50 | 5 | 2,0 | 188 | 90 | 42,13 | 289,65 | 6,58 |
| 7 | 126,50 | 8 | 3,5 | 188 | 24 | 63,73 | 290,74 | 6,61 |
| 8 | 126,50 | 11 | 3,0 | 188 | 43 | 85,40 | 290,31 | 6,60 |
| 9 | 199,70 | 2 | 3,0 | 188 | 90 | 33,24 | 458,30 | 10,41 |
| 10 | 199,70 | 5 | 3,5 | 188 | 65 | 66,76 | 458,98 | 10,43 |
| 11 | 199,70 | 8 | 2,0 | 188 | 43 | 100,22 | 457,25 | 10,39 |
| 12 | 199,70 | 11 | 2,5 | 188 | 24 | 134,64 | 457,72 | 10,40 |
| 13 | 316,46 | 2 | 3,5 | 188 | 43 | 52,75 | 727,34 | 16,53 |
| 14 | 316,46 | 5 | 3,0 | 188 | 24 | 105,63 | 726,26 | 16,50 |
| 15 | 316,46 | 8 | 2,5 | 188 | 90 | 158,98 | 725,35 | 16,48 |
| 16 | 316,46 | 11 | 2,0 | 188 | 65 | 213,14 | 724,60 | 16,47 |
| | | α | β | P | | | | |

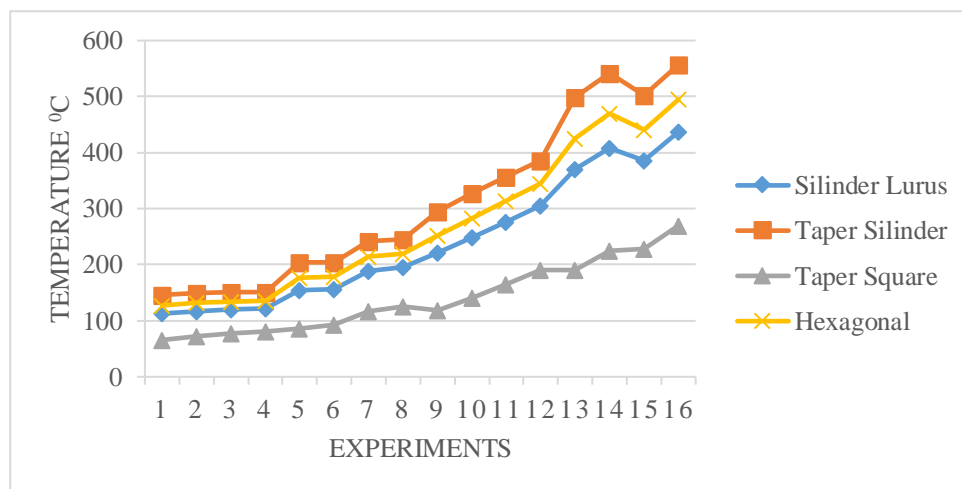
Tabel 8 Heat Generation pin taper square mesh segitiga

| No | Kecepatan rotasi tool (rad/s) | Sudut bahu cekung ($^{\circ}$) | Tilt angle ($^{\circ}$) | Gaya aksial (N) | Kecepatan pengelasan (mm/s) | Q1 (Watt) | Q2 (Watt) | Q3 (Watt) |
|----|-------------------------------|----------------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 80,11 | 2 | 2,0 | 118 | 24 | 13,49 | 56,65 | 1,86 |
| 2 | 80,11 | 5 | 2,5 | 118 | 43 | 27,09 | 56,71 | 1,86 |
| 3 | 80,11 | 8 | 3,0 | 118 | 65 | 40,88 | 56,78 | 1,86 |
| 4 | 80,11 | 11 | 3,5 | 118 | 90 | 54,94 | 56,87 | 1,86 |
| 5 | 126,50 | 2 | 2,5 | 118 | 65 | 21,33 | 89,55 | 2,93 |
| 6 | 126,50 | 5 | 2,0 | 118 | 90 | 42,74 | 89,46 | 2,93 |
| 7 | 126,50 | 8 | 3,5 | 118 | 24 | 64,64 | 89,80 | 2,94 |
| 8 | 126,50 | 11 | 3,0 | 118 | 43 | 86,62 | 89,66 | 2,94 |
| 9 | 199,70 | 2 | 3,0 | 118 | 90 | 33,72 | 141,55 | 4,64 |
| 10 | 199,70 | 5 | 3,5 | 118 | 65 | 67,72 | 141,76 | 4,64 |
| 11 | 199,70 | 8 | 2,0 | 118 | 43 | 101,67 | 141,22 | 4,63 |
| 12 | 199,70 | 11 | 2,5 | 118 | 24 | 136,58 | 141,37 | 4,63 |
| 13 | 316,46 | 2 | 3,5 | 118 | 43 | 53,51 | 224,64 | 7,36 |
| 14 | 316,46 | 5 | 3,0 | 118 | 24 | 107,16 | 224,31 | 7,35 |
| 15 | 316,46 | 8 | 2,5 | 118 | 90 | 161,27 | 224,02 | 7,34 |
| 16 | 316,46 | 11 | 2,0 | 118 | 65 | 216,21 | 223,79 | 7,33 |
| | | α | β | P | | | | |

Tabel 9 Heat Generation pin hexagonal mesh segitiga

| No | Kecepatan rotasi tool (rad/s) | Sudut bahu cekung ($^{\circ}$) | Tilt angle ($^{\circ}$) | Gaya aksial (N) | Kecepatan pengelasan (mm/s) | Q1 (Watt) | Q2 (Watt) | Q3 (Watt) |
|----|-------------------------------|----------------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 80,11 | 2 | 2,0 | 166 | 24 | 13,47 | 137,76 | 25,93 |
| 2 | 80,11 | 5 | 2,5 | 166 | 43 | 27,03 | 137,90 | 25,96 |
| 3 | 80,11 | 8 | 3,0 | 166 | 65 | 40,79 | 138,08 | 25,99 |
| 4 | 80,11 | 11 | 3,5 | 166 | 90 | 54,82 | 138,28 | 26,03 |
| 5 | 126,50 | 2 | 2,5 | 166 | 65 | 21,29 | 217,76 | 40,99 |
| 6 | 126,50 | 5 | 2,0 | 166 | 90 | 42,64 | 217,54 | 40,94 |
| 7 | 126,50 | 8 | 3,5 | 166 | 24 | 64,51 | 218,36 | 41,10 |
| 8 | 126,50 | 11 | 3,0 | 166 | 43 | 86,44 | 218,04 | 41,04 |
| 9 | 199,70 | 2 | 3,0 | 166 | 90 | 33,64 | 344,20 | 64,79 |
| 10 | 199,70 | 5 | 3,5 | 166 | 65 | 67,58 | 344,71 | 64,88 |
| 11 | 199,70 | 8 | 2,0 | 166 | 43 | 101,45 | 343,42 | 64,64 |
| 12 | 199,70 | 11 | 2,5 | 166 | 24 | 136,29 | 343,77 | 64,70 |
| 13 | 316,46 | 2 | 3,5 | 166 | 43 | 53,40 | 546,27 | 102,82 |
| 14 | 316,46 | 5 | 3,0 | 166 | 24 | 106,93 | 545,45 | 102,66 |
| 15 | 316,46 | 8 | 2,5 | 166 | 90 | 160,93 | 544,77 | 102,54 |

| | | | | | | | | |
|----|--------|----------|---------|-----|----|--------|--------|--------|
| 16 | 316,46 | 11 | 2,0 | 166 | 65 | 215,75 | 544,21 | 102,43 |
| | | α | β | P | | | | |



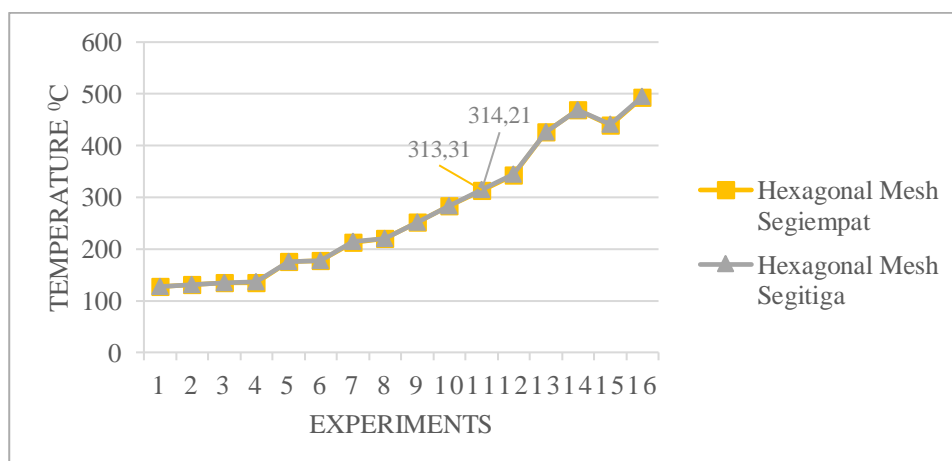
Gambar 3 Heat Generation Mesh Segitiga

Untuk simulasi ini menggunakan modul transient thermal untuk mengetahui hasil daripada perhitungan heat generation dengan harapan mendapatkan hasil yang maksimal. Modul daya resistansi transient thermal (Zth) mewakili karakteristik kinerja penting yang digunakan untuk memperkirakan arus keluaran maksimum untuk beban transient selain itu mengevaluasi bagaimana sistem menanggapi kondisi batas yang tetap dan bervariasi terhadap waktu analisis transient dapat menunjukkan kepada Anda respons termal dari sistem. Menggunakan software Ansys pada penelitian ini untuk simulasi transient thermal, dengan Ansys ini nanti nya kita tidak hanya dapat mengetahui simulasi transient thermal nya saja, namun nanti nya kita juga dapat melihat bagaimana proses terjadi nya heat generation transfer pin terhadap materialnya, dan juga dapat melihat dengan jelas perbedaan structure mesh pada penelitian ini, yaitu mesh segiempat dan mesh segitiga.

Tabel 10 Hasil temperature maksimal modul transient thermal mesh segiempat dan segitiga pada tiap pin

| Mesh | Pin | | | |
|-----------|----------|----------------|---------------|-----------|
| | Silinder | Taper Silinder | Tapper Square | Hexagonal |
| Segiempat | 304,23 | 326,43 | 268,34 | 313,31 |
| Segitiga | 305,27 | 326,99 | 269,81 | 314,21 |

Setelah proses hasil temperature maksimal dari 2 mesh tsb. Maka diambil hasil temperature yang mendekati target daripada 315°C dari 2 mesh tsb yang kemudian dibandingkan lagi untuk diambil hasil terhadap penelitian ini.



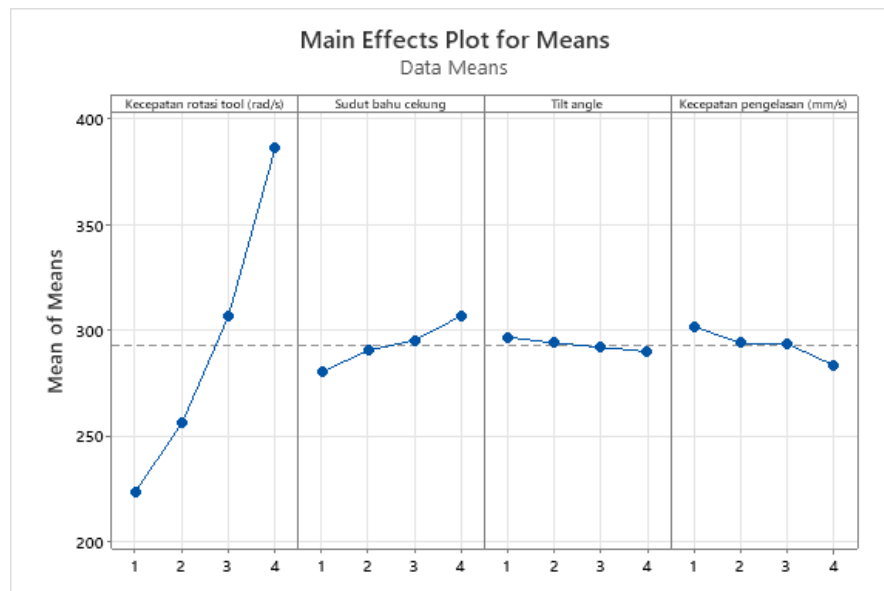
Gambar 4 Grafik Perbandingan Heat Generation Modul Transient Thermal Mesh Segiempat dan Segitiga

Untuk melihat hasil tingkat factor yang mempengaruhi proses penelitian temperature mesh pada pin terhadap nilai optimum temperature maksimal, menggunakan minitab grafik nilai yang menentukan hasil eksperimen tersebut mendekati standart guna atau belum mencapai target operation, factor yang mempengaruhi hasil temperature maksimal pin harusnya tidak lebih dari 5% yaitu memiliki tingkat kepastian sebesar 95% aman. Dibawah ini adalah table hasil ANOVA analyse taguchi design dan grafik main effects plot for means mesh segiempat (**Tabel 11**) dan mesh segitiga (**Tabel 12**) pin hexagonal

Tabel 11 Hasil ANOVA pin hexagonal, mesh segiempat:

Analysis of Variance for Means

| Source | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F | P |
|-------------------------------|----|---------|---------|---------|---------|-------|
| Kecepatan rotasi tool (rad/s) | 3 | 60089,9 | 60089,9 | 20030,0 | 2949,83 | 0,000 |
| Sudut bahu cekung | 3 | 1426,9 | 1426,9 | 475,6 | 70,05 | 0,003 |
| Tilt angle | 3 | 100,2 | 100,2 | 33,4 | 4,92 | 0,112 |
| Kecepatan pengelasan (mm/s) | 3 | 677,9 | 677,9 | 226,0 | 33,28 | 0,008 |
| Residual Error | 3 | 20,4 | 20,4 | 6,8 | | |
| Total | 15 | 62315,4 | | | | |

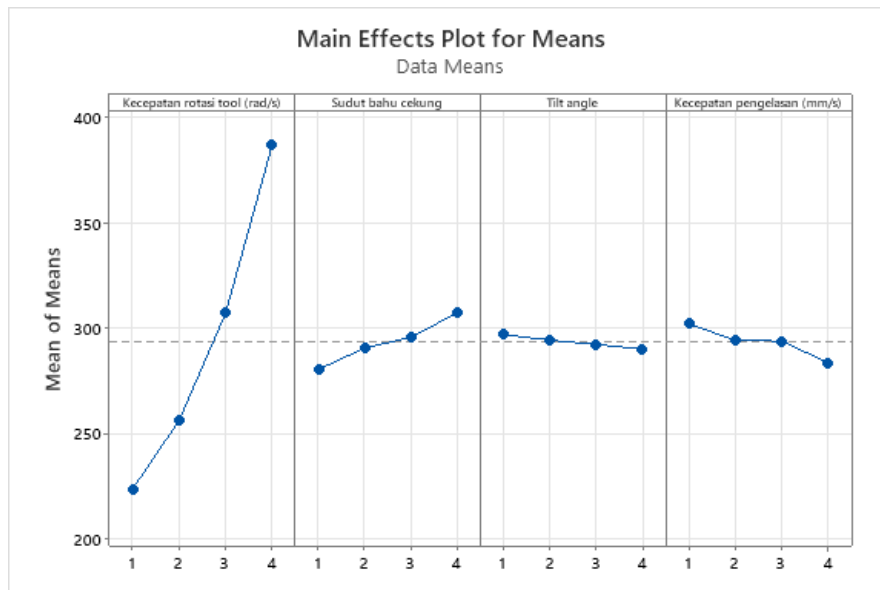


Gambar 5 Grafik ANOVA pin hexagonal, mesh segiempat.

Tabel 12 Hasil ANOVA pin hexagonal, mesh segitiga:

Analysis of Variance for Means

| Source | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F | P |
|-------------------------------|----|---------|---------|---------|---------|-------|
| Kecepatan rotasi tool (rad/s) | 3 | 60322,9 | 60322,9 | 20107,6 | 2917,79 | 0,000 |
| Sudut bahu cekung | 3 | 1475,7 | 1475,7 | 491,9 | 71,38 | 0,003 |
| Tilt angle | 3 | 104,5 | 104,5 | 34,8 | 5,06 | 0,108 |
| Kecepatan pengelasan (mm/s) | 3 | 686,0 | 686,0 | 228,7 | 33,18 | 0,008 |
| Residual Error | 3 | 20,7 | 20,7 | 6,9 | | |
| Total | 15 | 62609,8 | | | | |



Gambar 6 Grafik ANOVA pin hexagonal, mesh segitiga.

IV. SIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan tentang analisa pengaruh model mesh segiempat dan segitiga terhadap temperatur proses FSW dengan modul transient thermal memiliki kesimpulan bahwa simulasi modul transient thermal menunjukkan hasil mesh segiempat masih kurang optimal terhadap optimum temperature 315° jika dibandingkan dengan mesh segitiga yang mendekati suhu optimal 315° dengan material yang sama Aluminium AA6061-T651 juga di karenakan mesh segitiga lebih signifikan dalam heat generation yang lebih detail dan merinci. Kontribusi masing-masing geometri pin terhadap temperature hasil simulasi modul transient thermal mesh segiempat adalah, 'geometri pin silinder eks 12' $304,23^{\circ}\text{C}$, 'geometri taper silinder eks 10' $326,43^{\circ}\text{C}$, 'geometri taper square eks 16' $268,34^{\circ}\text{C}$, 'geometri hexagonal eks 11' $313,31^{\circ}\text{C}$. Dengan kontribusi pengaruh faktor/parameter proses kecepatan rotasi tool, sudut bahu cekung, kecepatan pengelasan terhadap temperature sangat signifikan ditunjukkan dengan P value kurang dari 5%, sedangkan faktor proses sudut kemiringan tool (tilt angle) terhadap temperatur tidak signifikan ditunjukkan dengan P value lebih dari 5% di simpulkan bahwa geometri pin hexagonal dengan suhu optimum yaitu memiliki temperature $313,31^{\circ}\text{C}$. Dan Kontribusi masing-masing geometri pin terhadap temperature hasil simulasi modul transient thermal mesh segitiga adalah, 'geometri pin silinder eks 12' $305,27^{\circ}\text{C}$, 'geometri taper silinder eks 10' $326,99^{\circ}\text{C}$, 'geometri taper square eks 16' $269,81^{\circ}\text{C}$, 'geometri hexagonal eks 11' $314,21^{\circ}\text{C}$ Dengan kontribusi pengaruh faktor/parameter proses kecepatan rotasi tool, sudut bahu cekung, kecepatan pengelasan terhadap temperature sangat signifikan ditunjukkan dengan P value kurang dari 5%, sedangkan faktor proses sudut kemiringan tool (tilt angle) terhadap temperatur tidak signifikan ditunjukkan dengan P value lebih dari 5% di simpulkan bahwa geometri pin hexagonal dengan suhu optimum yaitu memiliki temperature $314,21^{\circ}\text{C}$.

UCAPAN TERIMA KASIH

Saya mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Program Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Sidoarjo yang telah memberikan ilmu dan wawasan yang sangat bermanfaat, serta kepada rekan-rekan laboratorium dan teman-teman yang membantu menyelesaikan penelitian ini.

REFERENSI

- [1] Weis Olea, C. A. (2008). Influence of Energy Input in Friction Stir Welding on Structure Evolution and Mechanical Behaviour of Precipitation-Hardening in Aluminium Alloys (AA2024-T351, AA6013-T6 and Al-Mg-Sc). Geesthacht: Von der Fakultät für Maschinenbau der Ruhr-Universität Bochum.
- [2] Durdanović, M.B., Mijajlović, M.M., Milčić, D.S., & Stamenković, D.S.: Heat generation during friction stir welding process. *Tribology in Industry* 31(1–2), 8–14, 2009.
- [3] Mandal.,2005, “Aluminium welding”, 2 ed., Kharagpur, India.
- [4] Pujono, P. (2017). Perubahan Nilai Kekuatan Tarik Pada Hasil Pengelasan Friction Stir Welding Aluminium 2024-T3 Yang Menggunakan Perlakuan Transient Thermal. *Bangun Rekaprima: Majalah Ilmiah Pengembangan Rekayasa, Sosial dan Humaniora*, 3(1, April), 1-9.
- [5] Soleh, M. Z. A., & Mulyadi, M. (2021). Design and Build JIG Design on Friction Stir Welding Using Fillet Connection on AA6061-T6 Material. *Indonesian Journal of Innovation Studies*, 14, 10-21070.
- [6] Mulyadi, Mulyadi, et al. "The Influence of the Tool Concave Shoulder Angle on Heat Generation in the Stir Friction Welding Process with AA6061-T651 Materials." *Key Engineering Materials* 943 (2023): 55-61.

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.