KAJIAN SIMULASI SUHU PEMESINAN PADA PROSES *MICROMILLING* TI-6AL-4V

(Skripsi)

Oleh:

MUHAMAD BAHARUDIANTO

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

BANDAR LAMPUNG

2020

ABSTRAK

KAJIAN SIMULASI SUHU PADA PROSES PEMESINAN *MICROMILLING* TI-6AL-4V

Oleh

MUHAMAD BAHARUDIANTO

Paduan titanium Ti-6Al-4V adalah material yang sulit untuk dipotong karena konduktivitas yang rendah, ketanguhannya yang tinggi, reaktivitas kimia yang tinggi. Hal ini menyebabkan ketidaktepatan dimensi, residual tekanan, distorsi pada pahat dan benda kerja bersamaan dengan keausan dan kerusakan pahat yang cepat. Banyak sekali Titanium dan paduanya digunakan untuk membuat komponen mikro yang mana dibutuhkannya pemesinan mikro dengan dimensi yang sangat akurat. Oleh karena itu diperlukanya kajian suhu pahat selama proses pemesinan mikro titanium dan paduanya. Peneltian ini menggunakan metode elemen hingga untuk mengkaji distribusi suhu pada proses pemesinan *micromilling* Ti-6Al-4V dengan menggunakan Pahat Karbida (WC/Co) yang berdiameter 500 µm. Analisis telah dilakukan pada kedalaman 40 µm dengan tiga variasi kecepatan spindel yaitu 16000 rpm, 32000 rpm dan 48000 rpm dengan dua gerak makan yaitu 0,005 mm/rev dan 0,009 mm/rev. Rata-rata nilai suhu pahat ada pada ujung pahat hasil yang diperoleh semakin tinggi nilai parameter dibuat maka suhu akan meningkat dan hasil menunjukkan suhu pahat 3D lebih rendah dibandingkan dengan suhu pahat 2D.

Kata Kunci: Titanium Ti-6Al-4V, *micromilling,* metode elemen hingga, suhu

ABSTRACT

SIMULATION OF TEMPERATURE REVIEW ON MICROMILLING MACHINE PROCESS TI-6AL-4V

By

MUHAMAD BAHARUDIANTO

Titanium alloy Ti-6Al-4V is a material that is difficult to cut because of low conductivity, high toughness, high chemical reactivity. This causes dimensional imprecision, residual pressure, distortion to the tool and workpiece together with rapid wear and tool damage. Lots of Titanium and its use are used to make micro components which require micro-machining with very accurate dimensions. Therefore it is necessary to study the temperature of the tool during the machining of titanium microstructure and its foundation. This research uses finite element method to study the temperature distribution in the machining process of Ti-6Al-4V micromilling using a carbide tool (WC/Co) with a diameter of 500 μm. Analysis has been carried out at a depth of 40 μm with three variations of the spindle speed of 16000 rpm, 32000 rpm and 48000 rpm with two feeding movements namely 0.005 mm / rev and 0.009 mm / rev. The average tool temperature value at the tool tip results obtained the higher the value of the parameters made, the temperature will increase and the results show 3D tool temperature is lower than the 2D tool temperature.

Keywords: Titanium Ti-6Al-4V, micromilling, finite element method, temperature

KAJIAN SIMULASI SUHU PEMESINAN PADA PROSES *MICROMILLING* TI-6AL-4V

(Skripsi)

Oleh:

MUHAMAD BAHARUDIANTO

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Sarjana Teknik

Pada

Jurusan Teknik Mesin

Fakultas Teknik Universitas Lampung

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

BANDAR LAMPUNG

2020

Judul Skripsi	: **KAJIAN SIMULASI SUHU PEMESINAN PADA PROSES *MICROMILLING* TI-6AL-4V**
Nama Mahasiswa	: Muhamad Baharudianto
Nomor Pokok Mahasiswa	: 1315021041
Jurusan	: Teknik Mesin
Fakultas	: Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Dr. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T.	**Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M.T.**
NIP 19710817 199802 1 003	NIP 1964056 200003 1 001

2. Ketua Jurusan Teknik Mesin

Dr. Amrul, S.T., M.T.
NIP 19710331 199903 1 003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Dr. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T.** .....

Anggota Penguji : **Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M.T.** .....

Penguji Utama : **Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, S.T., M.T.** .....

2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung

Prof. Suharno, M.S., M.Sc., Ph.D.
NIP 19620717 198703 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 16 Januari 2020

PERNYATAAN PENULIS

TUGAS AKHIR INI DIBUAT SENDIRI OLEH PENULIS DAN BUKAN HASIL PLAGIAT SEBAGAIMANA DIATUR DALAM PASAL 27 PERATURAN AKADEMIK UNIVERSITAS LAMPUNG DENGAN SURAT KEPUTUSAN REKTOR No.3178/H26/DT/2010.

YANG MEMBUAT PERNYATAAN

MUHAMAD BAHARUDIANTO
NPM 1315021041

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Jambi pada 10 April 1995 sebagai anak pertama dari lima bersaudara pasangan Kasuri dan Wiwit Andriani. Penulis menyelesaikan Pendidikan Sekolah Dasar di SDN Kali Deras Mesuji Ogan Komering Ilir pada tahun 2001-2007, Pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP Tri Sukses Natar Lampung Selatan pada tahun 2007-2010 dan Pendidikan Sekolah Menengah Atas di Sma Tri Sukses Natar Lampung Selatan pada tahun 2010-2013. Pada tahun 2013 penulis melanjutkan Pendidikan tinggi di Universitas Lampung sebagai Mahasiswa di jurusan Teknik Mesin. Pada tahun 2010 penulis pernah merasakan mondok sambil Sekolah di Yayasam Nurul Huda Lampung selatan dan telah ditugaskan untuk menyampaikan Ilmu Quran Hadist selama satu tahun setengah di TPA Masjid Tawakall Tanjung Gading Kedamaian Bandar lampung. Pada tahun 2018 penulis melakukan penelitian pada bidang Produksi dengan judul tugas akhir "Kajian Simulasi Suhu Pemesinan Pada Proses *Micromilling* Ti-6Al-4V" dibawah bimbingan Bapak Dr. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T. dan Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M.T.

PERSEMBAHAN

Alhamdulilahirrobilalamin bersyukur kepada Allah yang telah memberikan kelancaran dan kebarokahan didalam perjalanan kehidupan penulis, Kupersembahkan Karya ini untuk orang-orang yang aku cintai.

Emak dan Bapakku

Atas segala pengorbanan yang tak terbalaskan, doa, kesabaran, keikhlasan, cinta dan kasih sayangnya

Dosen Teknik Mesin

Yang selalu membimbing, mengajarkan, memberikan saran serta saran baik secara akademis maupun non akademis

Sahabat Seperjuangan TM 13

Yang selalu memberikan semangat dan berdiri tegap disampingku saat suka maupun duka, berbagi nasihat dan keceriaan

Almamater Tercinta Teknik Mesin Universitas Lampung

Republik Indonesia

SANWACANA

Bersyukur kepada Allah atas segala kenikmatan dan selalu dalam hidayahnya. Penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul "Kajian Simulasi Suhu Pada Pemesinan *Micromilling* Ti-6Al-4V" Skripsi ini merupakan salah satu syarat kelulusan untuk mendaptkan Sarjana Tekni Mesin Universitas Lampung. Penulis menyadari betapa besar bantuan dari semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan penyusunan skripsi ini, Oleh sebab itu penulis mengucapkan ucapan terimakasih kepada:

1. Emak dan Bapak yang telah memberikan dukungan, sabar menunggu dan mendoakan atas harapan akan kesuksesan penulis hingga dapat menyelesaikan studi S-1.
2. Bapak Dr. Amrul, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin yang selalu memberikan kemudahan didalam persetujuan melalui tanda tangannya
3. Bapak Dr. Jamiatul Akmal, S.T., MT. selaku sekertaris jurusan Teknik mesin yang selalu memberikan kemudahan dalam pengurusan administrasi.
4. Bapak Dr. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T. selaku pembimbing satu yang selalu memberikan ilmu, arahan dan motivasinya kepda penulis.

5. Bapak Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M.T. selaku pembimbing dua yang telah menyediakan waktu dan memberikan arahan kepada penulis.
6. Bapak Dr. Eng. Suryadiwansa harun, S.T., M.T. selaku dosen pembahas yang telah memberikan kritik dan saran perbaikan dalam tugas akhir ini
7. Bapak Nafrizal, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing akademik yang telah memberikan arahan, bimbingan dan motivasi kepada penulis mulai dari semester awal perkuliahan sampai semester terselesaikanya skripsi ini.
8. Adik-adikku tercinta Riska Isnaini, Abdullah Ariffuddin, Asri Rahma Dewi dan Eva Nur Baiti.
9. Teman-teman seperjuangan Xenon, Topik, Alan, Cahya, Agung, Rian, Prasetyo, Wahyu, Aufa, Aldino.

Akhir kata, penulis menyadari meskipun segala usaha yang telah dilakukanya semaksimal mungkin, skripsi ini tidak luput dari kekurangan. Semoga dengan adanya skripsi ini dapat menambah wawasan dan berguna bagi kita semua.

Bandar Lampung, 16 Januari 2020

Penulis,

Muhamad Baharudianto
NPM. 1315021041

MOTTO

Jika kamu menolong (agama) Allah, niscaya Dia akan menolongmu dan meneguhkan kedudukanmu. (Qs Muhammad ayat 7)

Seorang laki-laki datang kepada Rasulullah ﷺ dan bertanya, "Ya Rasulullah, siapakah orang yang lebih berhak saya hormati?" Rasulullah menjawab, "Ibumu." Orang tersebut bertanya lagi, "Lalu siapa?" Rasulullah menjawab, "Ibumu." Orang itu bertanya lagi, "Setelah itu siapa?" Rasulullah menjawab, "Ibumu." Orang tersebut bertanya lagi, "Kemudian siapa?" Akhirnya Rasulullah pun menjawab, "Kemudian ayahmu, (HR. Muslim)

Orang bodoh seringkali beralasan sabar terhadap segala sesuatu yang sebenarnya dia mengalah dengan keadaan tanpa pernah berusaha. (Albert Einstein)

Beri nilai dari usahanya jangan dari hasilnya. Baru kita bisa mengerti kehidupan. (Albert Einstein)

Janganlah mencoba menjadi orang sukses. Jadilah orang yang bernilai. (Albert Einstein)

DAFTAR ISI

Halaman Sampul **Halaman**

ABSTRAK i

ABSTRACT iii

HALAMAN JUDUL v

LEMBAR PERSETUJUAN vi

LEMBAR PENGESAHAN vii

LEMBAR PERNYATAAN PENULIS viii

RIWAYAT HIDUP ix

PERSEMBAHAN x

SANWACANA xi

Motto xiii

DAFTAR ISI xiv

DAFTAR GAMBAR xvi

DAFTAR TABEL xix

I. PENDAHULUAN 1

A. Latar Belakang 1

B. Tujuan Penelitian 5

C. Batasan Kajian 6

D. Sistematika Penulisan 6

II. TINJAUAN PUSTAKA 8

A. Titanium 8

B. Paduan Ti-6Al-4V (Material Benda Kerja) 11

C. Micromilling 12

D. Material Pahat 20

E. Suhu Pemotongan 25

F. Proses Pemesinan (Machining Process) 27

G. FEM (Finite Element Method) 28

III. METODE PENELITIAN 34

A. Waktu dan Tempat 34

B. Tahapan Penelitian 34

1. Studi literatur 34

2. Pemodelan 3-D *micromilling* 34

3. Simulasi *micromilling* 35

4. Analisis data 35

C. Peralatan dan *Software* Penelitian 35

1. Peralatan Penelitian 35

2. *Software* Penelitian 36

D. Preprocessing (Rancangan) 36

1. Pemodelan 36

3. Elemen *(Meshing)* 41

E. Parameter Permesinan 42

F. Diagram alir penelitian 43

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN 44

A. Data Hasil 44

B. Pembahasan 51

C. Distribusi suhu pahat *endmill* dan geram 55

D. Perbandingan Suhu Pahat antara pembanding 62

V. KESIMPULAN DAN SARAN 64

A. Kesimpulan 64

B. Saran 64

DAFTAR PUSTAKA 65

LAMPIRAN 65

DAFTAR GAMBAR

Gambar **Halaman**

Gambar 2.2 Titanium..... 8

Gambar 2.3 Diagram fasa Ti-6Al-4V..... 11

Gambar 2.4 Mesin komersial *micromilling*..... 15

Gambar 2.5 Konfigurasi mesin *milling* 3-sumbu 16

Gambar 2.6 peralatan dalam bidang biomedis 18

Gambar 2.7 Tingkat kekerasan panas..... 22

Gambar 2.8 Tingkat kekerasan dan ketahanan aus..... 23

Gambar 2.9 Distribusi panas pada area pemotongan 26

Gambar 2.10 Keakuratan Machining..... 28

Gambar 2.11 Diskritisasi pembentukan geram dalam FEM 30

Gambar 2.12 Meshing adaptif 33

Gambar 3.1 Dimensi Pahat..... 37

Gambar 3.2 Pemodelan pahat endmill..... 37

Gambar 3.3 Pemodelan Benda kerja 38

Gambar 3.4 Meshing Benda kerja 41

Gambar 3.5 Meshing Pahat 41

Gambar 3.6 Diagram alir penelitian 43

Gambar 4.1 Grafik suhu terhadap waktu..... 44

Gambar 4.2 Grafik suhu terhadap waktu..... 45

Gambar 4.3 Grafik suhu terhadap waktu 46

Gambar 4.4 Grafik suhu terhadap waktu 47

Gambar 4.5 Grafik suhu terhadap waktu 48

Gambar 4.6 Grafik suhu terhadap waktu 49

Gambar 4.7 Grafik pengaruh putaran spindel terhadap suhu pahat 51

Gambar 4.8 Grafik pengaruh gerak makan terhadap suhu pahat 53

Gambar 4.9 Distribusi suhu pahat dengan n = 16000 55

Gambar 4.10 Distribusi suhu pahat dengan n = 32000 56

Gambar 4.11 Distribusi suhu pahat dengan n = 48000 57

Gambar 4.12 Distribusi suhu geram dengan n = 16000 58

Gambar 4.13 Distribusi suhu geram dengan n = 32000 59

Gambar 4.14 Distribusi suhu geram dengan n = 48000 60

Gambar 4.15 Prediksi suhu pahat 60

DAFTAR TABEL

Tabel **Halaman**

Tabel 2.1 Sifat-sifat fisik material Titanium 9

Tabel 2.2 Sifat-sifat Kimia 10

Tabel 2.3 Sifat-sifat mekanik titanium 10

Tabel 2.4 Komposisi kimia dan aplikasi dari titanium α+β alloy 11

Tabel 2.5 Presentase Komposisi Ti-6Al-4V 12

Tabel 2.6 Daftar teknik micromachining 13

Tabel 2.7 Sumber kesalahan mesin *milling* biasa 14

Tabel 2.8 Karakteristik dari spindel berkecepatan tinggi 17

Tabel 2.9 Perbandingan sifat-sifat pahat 23

Tabel 2.10 Permodelan material dalam pemotongan logam 31

Tabel 3.1 Spesifikai pahat *endmill* 37

Tabel 3.2 Property benda kerja dan pahat 40

Tabel 3.3 Parameter pemesinan dengan kedalaman potong (d) 0,04 mm 42

Tabel 4.1 Data hasil simulasi suhu pahat pada kedalaman potong 0,04 mm 50

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Saat ini dalam industri manufaktur membutuhkan solusi yang dapat memproduksi bagian-bagian komponen dalam ukuran mikro, dengan kualitas tinggi dan akurasi yang lebih baik. Salah satu material yang digunakan dalam membuat komponen-komponen dengan ukuran mikro adalah titanium. Titanium merupakan logam transisi dengan densitas yang tinggi dibandingkan dengan logam lainnya. Beberapa fakta yang dimiliki oleh titanium dan paduannya antara lain titanium paduan tahan korosi, ringan dan memiliki ketangguhan yang relatif lebih baik dibandingkan dengan material lain, memiliki *biokompatibel* atau kemampuan suatu material untuk dapat ditanamkan dalam tubuh manusia tanpa menimbulkan reaksi negatif sehingga dapat digunakan dalam tubuh manusia, memiliki sifat *nonmagnetik* dan memiliki kemampuan pasif dengan demikian menunjukkan tingkat kekebalan terhadap material asam dan klorida (Donachie, 2000).

Namun titanium disamping memiliki beberapa kelebihan, para pakar proses pemesinan (Donachie, 2000) menemukan fakta bahwa bukan hal yang mudah memotong paduan titanium karena sifat ketermesinan paduan titanium yang rendah. Titanium juga memiliki konduktifitas termal rendah sehingga pada proses pemesinan panas yang dihasilkan tidak berkurang dengan cepat,

sebagian besar panas terkosentrasi pada tepi pemotongan dan permukaan pahat. Hal ini akan menyebabkan pahat cepat aus dan umur menjadi lebih pendek. Selain itu proses pemesinan titanium membutuhkan gaya pemotongan *(cutting force)* yang sedikit lebih besar, hal ini yang menyebabkan titanium disebut sebagai material yang sulit dipotong *(difficult to cut matrial).*

Penggunaan titanium dan paduannya dapat digunakan dalam perhiasan, sarung tangan kipper, aplikasi kimia, lingkungan laut, aplikasi biomaterial dan struktur pesawat. Yang memiliki kekuatan pada temperatur tinggi, tetapi dibawah 1500 ℃ keuletannya akan menurun. Alloy ini jumlah hampir setengah dari produksi titanium alloy, alloy ini banyak dipakai karena kekuatannya (1100 MPa) ketahanan mulur 300 ℃, ketahanan fatiq dan mudah dicor (Wahyu, 2017).

Kebutuhan alat atau produk yang berukuran kecil dimana prosesnya memerlukan teknologi mikro. Salah satu teknologi manufaktur yang digunakan untuk membuat alat atau produk dengan ukuran mikrometer adalah *micromilling*. *Micromilling* merupakan proses pemesinan yang dapat digunakan untuk membuat fitur bentuk bebas 3D dan, karenanya, digunakan dalam pembuatan komponen mikro dan fitur mikro. Namun dalam pemesinan mikro itu memiliki beberapa tantangan seperti mencapai kualitas permukaan yang diinginkan, menghindari kerusakan, menghilangkan getaran benda kerja, memiliki kesulitan pemesianan *(difficult to machine)* karena suhu yang tinggi, modulus elastisitas rendah, konduktivitas termal rendah dan reaktivitas kimia tinggi (Pratap, 2015).

Diantara paduan logam yang paling penting adalah aluminium, vanadium, molibdenum, mangan, besi, timah, kromium dan zirconium. Salah satu yang paling sering digunakan memiliki komposisi 90% titanium, 6% aluminium, 4% vanadium yang sering direpresentasikan sebagai Ti-6Al-4V. Industri kedirgantaraan adalah pengguna terbesar dari paduan titanium, material tersebut digunakan dalam badan pesawat terutama bodi dari pesawat, diberbagai bagian mesin, roda pendaratan dan tubing hidrolik.

Sebelum percobaan proses pemesinan dapat dilakukan secara eksperimental ataupun simulasi. Dalam proses pemesinan secara eksperimental memiliki permasalahan yaitu kesulitan pemesinan dan mahalnya pemesinan alat, untuk mengganti percobaan dalam proses pemesinan yang dilakukan secara eksperimental maka solusinya dengan simulasi FEM. Tujuan simulasi FEM pada pemesinan adalah untuk melihat fenomena atau perilaku proses pemesinan. percobaan eksperimental memerlukan waktu dan juga biaya yang cukup besar jika dibandingkan dengan simulasi. Maka dari itu untuk mengurangi biaya tambahan dalam proses sebaiknya pecobaan awal dilakukan secara simulasi.

Metode komputasi atau teknik simulasi dapat digunakan sebagai alternatif dalam eksperimentasi untuk menyediakan solusi lengkap dengan estimasi dari setiap respon yang dibutuhkan. Secara khusus, Metode Elemen Hingga atau FEM adalah salah satu metode yang banyak digunakan untuk memprediksi respon dari proses pemesinan. FEM juga digunakan untuk menyelidiki mekanisme deformasi material dalam proses pemesinan. Dalam kasus *micromilling* penggunaan metode FEM sangat bermanfaat, karena jika

hanya eksperimen saja sangat sulit dalam proses pemesinan. Simulasi FEM telah diterapkan dalam studi *micromachining* untuk berbagai kegunaan diantaranya gaya pemotongan, suhu, untuk memprediksi keausan dalam pahat, desain alat pemotongan mikro, proses optimasi, analisis permukaan dan mengetahui chip (Thepsonthi, 2013).

Pada penelitian Ozel et. al., (2012) menggunakan FEM dengan variasi material pahat cBN dan WC/Co, keceptan putar spindel (n) 16000 rpm, 32000 rpm, 48000 rpm, dan pemakanan (f) 0.001 mm/rev, 0.005 mm/rev, 0.009 mm/rev, untuk menganalisis temperatur pada pemesinan *micromilling* Ti-6Al-4V dengan Lagrangian (Deform 2D). Dimana didapatkan hasil yaitu pada kecepatan spindel (n) 48000 rpm, pemakanan (f) 0.009 mm/rev dengan menggunakan pahat WC/Co menghasilkan temperatur maksimal 450 °C, sedangkan untuk temperatur minimal didapatkan pada kecepatan spindel (n); 16000 rpm, pemakanan (f) 0.001 mm/rev sebesar 120 °C dengan menggunkan pahat cBN.

Selanjutnya berdasarkan penelitian oleh Thepsonthi et. al., (2013) menggunakan FEM yang berbeda dengan penelitian sebelumnya yaitu dengan Deform 3D. Tapi parameter yang digunakan hanya satu variasi yaitu kecepatan putar spindel (n) 16000 rpm, pemakanan (f) 0.009 mm/rev, kedalaman potong (d) 0.1 mm dengan menggunakan pahat WC/Co didapatkan hasil sebesar 150 °C.

Berdasarkan uraian diatas Ozel et. al., (2012) telah melakukan penelitian dengan *software* Deform 2D dengan tiga variasi yang berbeda, sedangkan Thepsonthi et. al., (2013) melakukan penelitian dengan *software* Deform 3D

tetapi hanya satu variasi. Dapat dilihat bahwa penelitian keduanya mempunyai kekurangan masing-masing, yaitu Ozel et. al., (2012) hanya melakukan penelitian dengan *software* Deform 2D, dan Thepsonthi et. al., (2013) melakukan penelitian dengan *software* Deform 3D tetapi hanya satu variasi. Oleh karena itu pada penelitian kali ini akan melakukan penelitian dengan menggunakan *software* berbasis FEM dengan tiga variasi yaitu variasi kecepatan putar spindel (n) 16000 rpm, 32000 rpm, 48000 rpm, pemakanan (f) 0.005 mm/rev, 0.009 mm/rev dan kedalaman potong (d) 0.04 mm. Dengan adanya penelitian ini yang berjudul ''Kajian Simulasi Suhu Pemesianan pada Proses *Micromilling* Ti-6Al-4V'' diharapkan dapat mengetahui parameter yang mempengaruhi distribusi temperatur yang didapat dari proses *micromilling* yang telah diuji secara simulasi.

B. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Membuat pemodelan pemesinan *micromilling* menggunakan *software* berbasis FEM.
2. Mensimulasikan proses pemesinan *micromilling* menggunakan *software* berbasis FEM.
3. Mengkaji parameter yang mempengaruhi distribusi suhu pada proses *micromilling* menggunakan *software* berbasis FEM.

C. Batasan Kajian

Pada penelitian ini diberikan batasan kajian agar mendapatkan hasil yang lebih terarah:

1. Penelitian dilakukan menggunakan software FEM.
2. Material diasumsikan memiliki sifat plastik dan isotropis.
3. Data untuk sifat-sifat model material diambil berdasarkan SI *(System International)* dimana data yang digunakan adalah sifat-sifat titanium Ti-6Al-4V.
4. Pemodelan dilakukan pada kondisi simetri.

D. Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan laporan dengan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bab I Pendahuluan

   Bab ini menjelaskan tentang latar belakang penelitian titanium paduan khusus Titanium Ti-6Al-4V dengan proses pemesinan *micromilling*. Bab ini juga menjelaskan tentang tujuan, batasan kaian dan sistematika penulisan.

2. Bab II Tinjauan Pustaka

   Bab ini berisikan teori yang berkaitan dengan penelitian ini seperti pengertian dan penjelasan titanium khususnya Ti-6Al-4V pemesinan *micromilling.*

3. Bab III Metodologi Penelitian

   Bab ini membahas hal-hal yang berhubungan dengan pelaksanaan penelitian yaitu waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan yang digunakan dan parameter yang digunakan.

4. Bab IV Data dan Pembahasan

   Bab ini berisikan hasil dan pembahasan dari data-data yang diperoleh saat penelitian, serta analisa data dari semua parameter yang diambil.

5. Bab V Penutup

   Bab ini berisikan hal-hal yang dapat disimpulkan dari semua analisa dan percobaan yang dilakukan serta saran yang berisi informasi agar dilakukan pada penelitian selanjutnya.

6. Daftar Pustaka

   Memuat daftar referensi-referensi yang digunakan penulis dalam penulisan laporan penelitian.

7. Lampiran

   Pada lampiran memuat data perlengkapan penelitian.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Titanium

Titanium merupakan sebuah unsur kimia yang dalam tabel periodik memiki simbol Ti dan nomor atom 22. Unsur ini merupakan logam transisi yang ringan, kuat, berkilau, tahan korosi (termasuk tahan terhadap air laut, aqua regia, dan klorin) dengan warna putih metalik keperakan (Wima, 2017).

Gambar 2. 1 Titanium (Wima, 2017)

Titanium pertama kali ditemukan di Cornwall, kerajaan Britania Raya pada tahun 1791 oleh Wiliam Gregor dan dinamai oleh Martin Heinrich Klaproth dari mitologi Yunani Titan (Wima, 2017). Logam ini ada diantara berbagai mineral, diantaranya rutile dan ilmenit, yang banyak terdapat pada kerak bumi dan litosfer, serta hampir semua makhluk hidup, batuan, air dan tanah. Logam ini diekstrak dari bijih mineralnya melalui proses Kroll atau proses Hunter (Wima, 2017). Senyawa yang paling umum, titanium dioksida adalah fotokatalisator umum dan sering digunakan dalam pembuatan pigmen

putih. Senyawa lainya yaitu titanium tetraklorida ($TiCl_4$), komponen layar asap dan katalis dan titanium triklorida ($TiCl_3$), digunakan sebagai katalis dalam produksi polipropilena (Wima, 2017).

Titanium dapat digunakan sebagai paduan dengan besi, aluminium, vanadium dan molybdenum, untuk memproduksi paduan yang kuat namun ringan untuk penerbangan, militer, proses industri (kimia dan petrokimia, pabrik desalinasi, pilp dan kertas), otomotif, agro industri, alat kedokteran, implan ortopedia, peralatan dan instrument dokter gigi, implan gigi, alat olahraga, perhiasan, telepon genggam dan masih banyak aplikasi lainnya (Wima, 2017). Dua sifat yang paling berguna pada titanium yaitu ketahanan terhadap korosi dan rasio kekuatan terhadap densitasnya yang paling tinggi di antara semua logam lain. Pada kondisi murni, titanium sama kuat dengan beberapa baja, namun lebih ringan (Wima, 2017).

1. Sifat-sifat Titanium

   Titanium bersifat paragmatic (lemah tertarik dengan magnet) dan memiliki konduktivitas listrik dan konduktivitas termal yang cukup rendah

   Tabel 2.1 Sifat-sifat fisik material Titanium

Sifat fisik	Keterangan
Fasa	Padat
Masa jenis	3.506 g/cm^3(suhu kamar)
Masa jenis cair	4.11 g/cm^3 (pada titik lebur)
Titik lebur	1941 K (16680 C, 30340 F)
Titik didih	3560 K (32870 C, 59490F)
Kalor peleburan	14.15 kJ/mol
Kalor penguapan	425 kJ/mol
Kapasitas kalor (25° C)	25.060 J/mol.K
Penampilan	Logam perak metalik
Resistivitas listrik (20° C)	0.420 μΩ.m
Konduktivitas termal (300 K)	21.9 W/(m.K)
Ekspansi termal (25° C)	8.6 μm/(m.K)

Kecepatan (pada wujud kawat) (suhu kamar)	5090 m/s

Sumber: (Wima, 2017)

2. Sifat Kimia

Adapun sifat-sifat kimia yang ada pada material titanium yaitu:

Tabel 2.2 Sifat-sifat Kimia

Sifat Kimia	Keterangan
Nama, lambang, nomor atom	Titanium, Ti, 22
Deret kimia	Logam transisi
Golongan, periode, blok	4, 4, d
Massa atom	47.867 (1) g/mol
Konfigurasi electron	[Ar] 3 d3 4s2
Jumlah elektron tiap kulit	3, 8, 10, 2
Struktur Kristal	Hexagonal
Bilangan oksidasi	4
Elektronegativitas	1.54 (skala pauling)
Energi ionisasi	Ke-1: 658.8 kJ/mol Ke-2: 1309.8 kJ/mol Ke-3: 2652.5 kJ/mol
Jari-jari atom	140 pm
Jari-jari atom (terhitung)	176 pm
Jari-jari kovalen	136

Sumber: (Wima, 2017)

3. Sifat Mekanik

Adapun sifat-sifat mekanik yang ada pada material titanium dan paduan diantaranya yaitu:

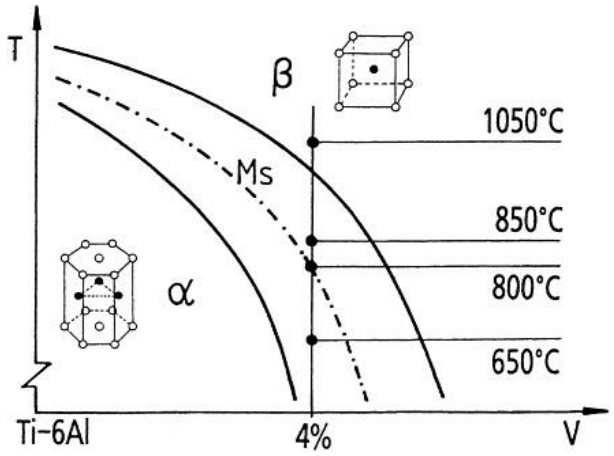
Tabel 2.3 Sifat-sifat mekanik titanium

Sifat Mekanik	Keterangan
Modulus young	116 Gpa
Modulus geser	44 Gpa
Modulus ruah	110 Gpa
Nisbah poisson	0.32
Skala kekerasan	6
Kekerasan Vickers	970 Mpa
Kekerasan Brinell	716 Mpa
Nomor CAS	7440-32-6

Sumber: (Wima, 2017)

B. Paduan Ti-6Al-4V (Material Benda Kerja)

Paduan titanium Ti-6Al-4V disebut juga dengan TC4 merupakan paduan tipikal dari jenis α+β yang banyak dipergunakan. Yang memliki kekuatan pada temperatur tinggi, tetapi dibawah 150° C keuletannya akan menurun. Alloy ini jumlah hampir setengah dari produksi titanium alloy, alloy ini banyak dipakai karena kekuatannya (1100 MPa) ketahanan mulur 300° C, ketahanan fatik dan mudah dicor (Wahyu, 2017). Ini adalah salah satu paduan titanium paling banyak diterapkan dalam berbagai aplikasi dimana kepadatnnya rendah dan tahan korosi yang sangat baik siperlukan seperti misalnya industri *aerospace* dan aplikasi biomekanik (implan dan prostesis) (Wahyu, 2017).



Gambar 2.2 Diagram fasa Ti-6Al-4V (Antonio, 2013)

Tabel 2.4 Komposisi kimia dan aplikasi dari titanium α+β alloy

Alloy composition	Condition	Typical application
6%Al, 4% V	Annealed; Solution+age	Rocket motor cases; blandes and disks for aircraft turbines and compressors; structural forgings and fasteners; pressure vessels; gas and chemical pumps; eryogenic parts; ordnance equipment; marine componets; steam-turbine blodes.

6%Al, 4% V (low O_2)	Annealed	High-pressure eryogenic vessels operating down to-320^0 F.
7% Al, 4% Mo	Annealed; Solution+age	Rocket motor cases; ordnance components; structural aircraft parts and landing gaers; responds well to heat treatments; good hardenability.
6% Al, 2% Sn, 2% Mo	Solution+age	Components for advanced jet engines
6% Mo, 2% Sn, 2% Zr 2% Mo, 2% Cr, 0.25% Si	Solution+age	Strength, fracture toughness in heavy sections; landing-gear wheels.

Sumber: (Wima, 2017)

Tabel 2.5 Presentase Komposisi Ti-6Al-4V

Ti	Titanium – 90%
Al	Aluminium – 6%
V	Vanadium – 4%
C	Carbon - <0.10%
O	Oxygen - <0.20%
N	Nitrogen - <0.05%
H	Hydrogen - <0.0125%
Fe	Iron -<0.3%

Sumber: AMS 4911 Datasheet Ti-6Al-4V

C. Micromilling

M*icromilling* merupakan proses dimana parameter alat dan komponen atau parameter pemotongan memiliki rentang antara 1-999 µm (Masuzawa, 2000). Proses penyayatan benda kerja menggunakan alat potong dengan mata potong banyak yang berputar. Proses penyayatan dengan mata potong banyak yang mengitari pisau ini bisa menghasilkan proses pemesinan lebih cepat. Permukaan yang disayat bisa berputar datar, menyudut atau melengkung (Dwi, 2010).

Micromilling mekanik umumnya tidak diterapkan untuk *micromachining* karena kesulitan substansial dalam memperoleh *microtool* yang sesuai (Jackson, 2009). Sebuah perbandingan antara kemampuan proses *micromilling* dan non-mekanik lainnya proses *micromachining* diberikan pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Daftar teknik *micromachining* dan kemampuannya dibandingkan dengan high-speed milling (HSM)

Kemampuan *micromachining*					
	High Speed Milling	Sinker EDM	Wire EDM	X-ray Lithography	Ion Beam Machining
Minimum structure size (µm)	50	5 to 10	15-20	-	<0.1
Surface finish Ra (µm)	1	0.2	0.05	-	0.04 to 0.15
Inner radius (µm)	50	<10	~ 15	-	0.01
Aspect ratio	100-150	~ 20	100-150	100	10
Drawback	Heat Fracture	Slow removal rates	Through shapes only	Learning curve to moldmakers	Learning curve to moldmakers

Sumber: (Jackson, 2009)

1. Mesin *micromilling*

   Mesin *micromilling* sangat penting untuk menghasilkan produk dengan kualitas tinggi. Untuk memenuhi persyaratan dengan akurasi dimensi tinggi, bentuk dan permukaan akhir baik maka mesin *micromilling* harus memiliki kekuatan yang tinggi. Selain itu, kecepatan potong tinggi maksimum diperlukan untuk mencapai kinerja pemotongan yang optimal. Oleh karena pahat pemotong mikro berdiameter kecil, mesin

micromilling umumnya dilengkapi dengan spindel berkecepatan tinggi dan run-out rendah (Huo, 2013).

Ukuran dan kualitas produk mikro tergantung pada sifat-sifat yang digunakan peralatan mesin untuk memproduksinya, termasuk akurasi keseluruhan dan kinerja dinamis. Kemampuan yang sangat baik dari alat mesin sangat penting untuk produk tersebut persyaratan sebagai ukuran, akurasi, kekasaran permukaan dan pengulangan dimensi. Di khususnya, tempat tidur mesin, poros, pemandu dan sistem penggerak menghasilkan faktor kunci dalam desain mesin *micromilling* (Gandarias, 2017).

Tabel 2.7 Sumber kesalahan mesin *milling* biasa

Spindle run-out	0,025 at 15 Krpm	0,050 µm at 60 Krpm	> 1 µm 100 Krpm
Spindle stiffness	Radial < 70 N/µm Axial < 35 N/µm		
Tool mount offset	> 1 µm		
Tool geometry tolerances	Precision machining > 2 µm		FIB < 1 µm
Linear Axis accuracy (per axis)	Highly Precise Systems 0,15 µm		Industrial System > 0,5 µm
Rotation Axis run out (per axis)	> 0,1 µm		
Tool-tip deflection	< 3-4 µm		
Tool expansion	> 1µm		
Workpice referencing	> 1µm		

This error is after CNC compensation Tool expansion prior to compensation can be tenths of microns

Sumber: (Gandarias, 2017)

Selanjunya konfigurasi multi-axis juga penting untuk memastikan fleksibilitas dan pembentukan proses akurasi dalam komponen bentuk mesin yang unik. Seiring dengan meningkatnya pemahaman tentang proses pemesinan mikro dan khusus persyaratan untuk mesin

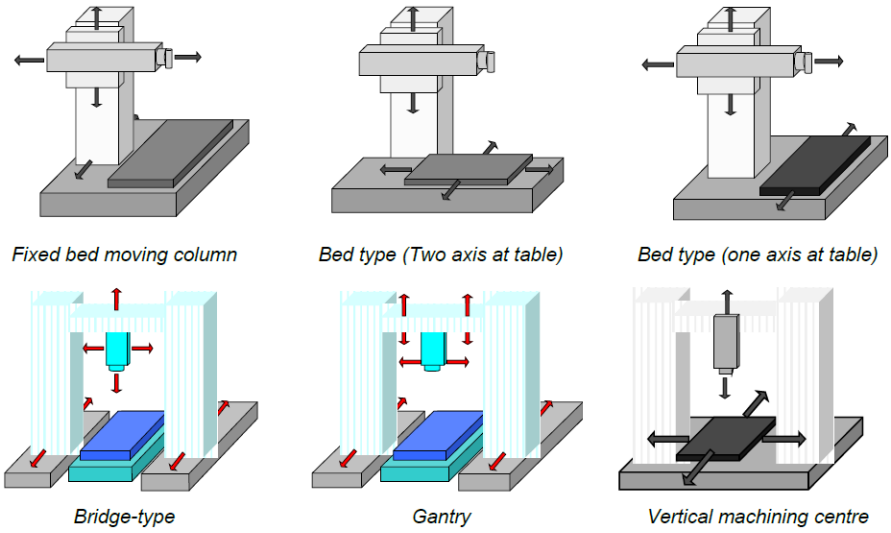
micromilling, beberapa mesin *micromillng* dengan presisi yang tinggi secara komersial dapat dilihat pada Gambar 2.3 (Huo, 2013).

Gambar 2.3 Mesin komersial *micromilling* (a) Kern Micro (b) Kuglar Micromaster (c) Moore Nanotech 350UPM (d) Makino Hyper2J (Huo, 2013)

2. *Machine Bed* & Arsitektur

Granit lebih disukai sebagai bahan struktural karena koefisien termal yang rendah ekspansi. Beton polimer juga dipilih dalam beberapa kasus, terutama karena tingginya karakteristik redaman. Untuk meningkatkan kekakuan rangka baja dapat dimasukkan, dan bahkan prototipe struktur dasar keramik alumina telah dipelajari (Gandarias, 2017).

Mesin *milling* konvensional dapat ditemukan dengan berbagai konfigurasi, seperti tergantung pada benda kerja dan kendala proses, dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Konfigurasi mesin milling 3-sumbu paling umum (Gandaris, 2017)

Sebagian besar arsitektur mesin *micromilling* yang tersedia saat ini sesuai dengan konfigurasi vertikal, di mana sumbu arah vertikal berada di sisi pahat dan benda kerja hanya memiliki derajat kebebasan horizontal. Konfigurasi ini biasanya digunakan dalam mesin *micromilling* karena hasil gravitasi tidak begitu kritis mengakibatkan menurunkan resiko jatuhnya komponen dan mengurangi distorsi fitur (Gandarias, 2017).

3. Spindel

Dalam *micromilling*, kecepatan revolusi tinggi diperlukan karena diameter pahat yang kecil, dan kecepatan setinggi 250.000 rpm saat ini tersedia. Namun demikian, secara umum disepakati bahwa kecepatan spindel masih harus meningkat dalam waktu dekat masa depan dan

mencakup berbagai revolusi yang lebih luas untuk mencapai tingkat kompetitif efisiensi dibandingkan dengan proses *micromachining* lainnya. Spindel yang digunakan saat ini sering kali membuatnya mustahil untuk mencapai kecepatan pemotongan yang disarankan, bahkan setelahnya menggunakan spindel mekanisme turbin udara. Memang, penelitian yang sedang berlangsung cukup untuk meningkatkan kemampuan spindel sedang dilakukan (Gandarias, 2017).

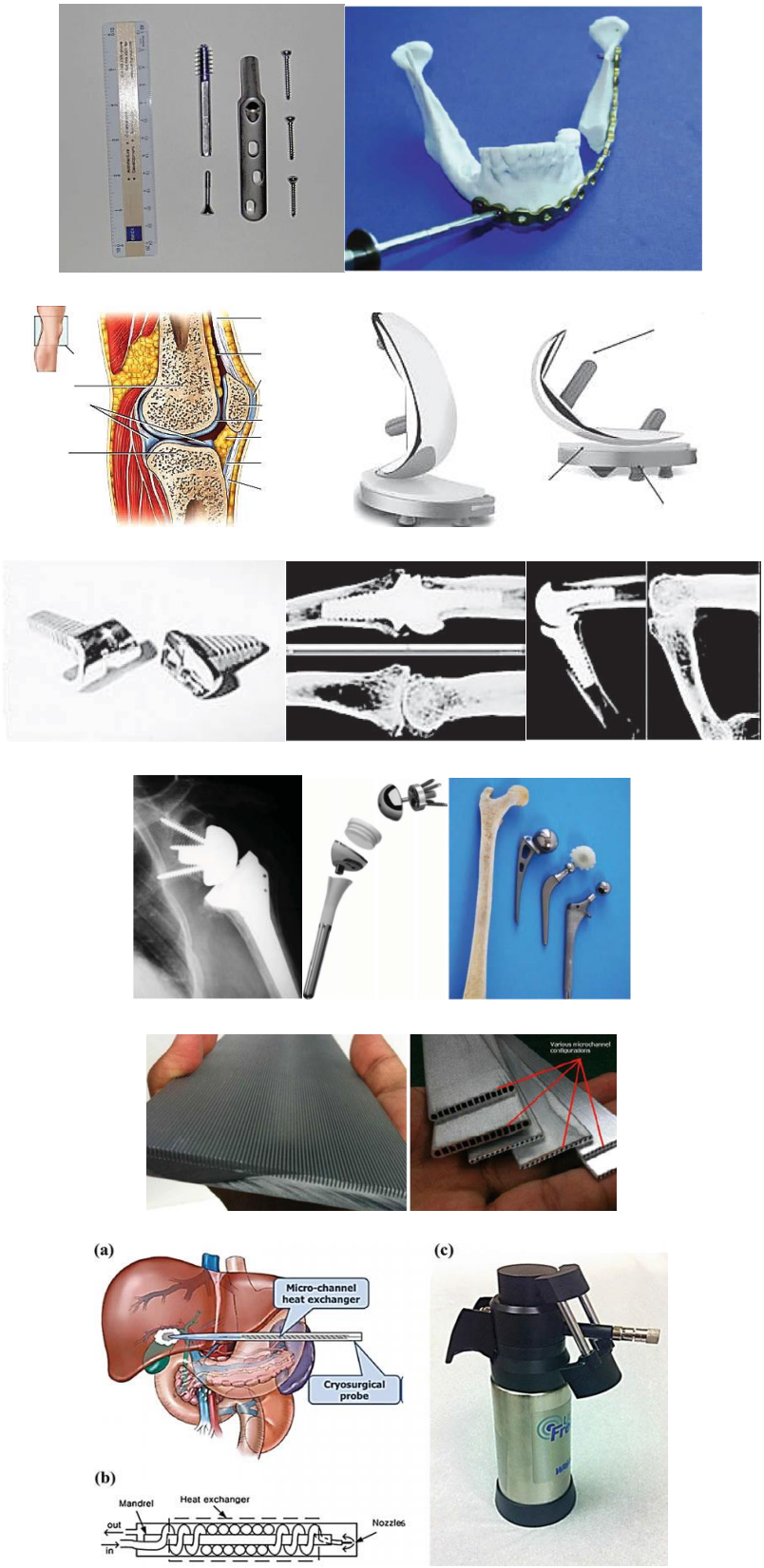
Tabel 2.8 Karakteristik dari spindel berkecepatan tinggi

Spindle Manufacturer	Type	Body diameter (mm)	Weight (kg)	Max. Speed (rpm)	Stiffness		Run-out (μm)	
					Radial (kg/μm)	Axial (kg/μm)	Static	Dynamic
Microdyne™	Air bearing	61.91	3.24	125K	0.59	1.07	5.00	8.00
Airturbine Tools 602JS	Ceramic bearings	39.67	0.68	90K			5.08	
Westwind D1733	Air bearing	53.34	1.86	250K			5.00	
Precise SC 1060-OA	Oil-air lubricated Hybrid ceramic	60.00	2.50	160K	2.50	1.70	2.00	
Colibri Spindles HF80L2S140	Air bearing	80.00	9.00	140K	0.30	0.40	0.20 - 0.50	

Sumber: (Gandaris, 2017)

4. Aplikasi *micromilling*.

Teknologi *micromilling* dapat memenuhi banyak tuntutan untuk membuat sebuah komponen mikro dalam bidang aerospace, otomotif, biomedis, elektronik, teknologi informasi, optik, industri telekomunikasi, perhiasan, pembuatan jam tangan, dll. Salah satu contoh aplikasi dalam bidang biomedis dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Peralatan dalam bidang biomedis (Ozel, 2017)

5. Parameter *micromilling*

Didalam proses pemesinan *micromilling* terdapat beberapa parameter yang digunakan antaranya kecepatan pemakanan, kecepatan potong dan kedalaman potong. Parameter proses *micromiling* adalah dasar-dasar perhitungan yang digunakan untuk menentukan perhitungan-perhitungan dalam proses pemesinan *micromilling*. Parameter tersebet seperti:

a. Kedalaman potong ditentukan berdasarkan selisih tebal kerja awal terhadap tebal benda kerja akhir. Kedalaman pemakanan berhubungan erat dengan kecepatan pemakanan dan juga dari diameter pahat itu sendiri. Semakin tinggi kecepatan pemakanan maka pahat yang digunakan semakin kecil diameternya.

b. Kecepatan potong adalah jarak ditempuh oleh satu titik (dalam satu meter) pada selubung pahat dalam waktu satu menit. Kecepatan potong sendiri ditentukan oleh kombinasi material pahat dan material benda kerja. Rumus kecepatan potong pada mesin frais. Pada proses frais besarya diameter yang digunakan adalah diameter pahat.

$$V = \frac{\pi dn}{1000} \quad \text{.....(2.1)}$$

Dimana:

V = Kecepatan potong (m/min)

d = Diameter pahat (mm)

n = Putaran pahat (rpm)

c. Putaran spindel atau kecepatan putaran mesin adalah kemampuan kecepatan mesin dalam satu menit. Dalam hal ini mengingat nilai kecepatan potong untuk semua jenis bahan sudah ditetapkan secara buku, maka komponen yang biasa diatur dalam proses adalah putaran mesin.

d. Kecepatan makan atau gerak makan adalah jarak lurus yang ditempuh pahat dengan laju konstan relatif terhadap benda kerja terhadap satuan waktu.

$$V_f = n f_z Z \quad \text{.....(2.2)}$$

Dimana:

V_f = Kecepatan makan (mm/min)

n = Putaran pahat (rpm)

f_z= Kecepatan makan per gigi (mm/tooth)

D. Material Pahat

1. Syarat dan Jenis-Jenis Bahan Pahat

Prinsip dasar pemesinan yaitu kemampuan ketangguhan *(toughness)* pahat terhadap benda kerja. Banyak perkembangan pada bahan pahat guna meningkatkan kemampumesinan dimana geometri dan bahan pahat merupakan hal yang perlu dipertimbangkan. Syarat bahan pahat yang harus dipenuhi diantaranya:

a. Kekerasan terutama pengerasan karena panas, dengan tujuan untuk menjaga suhu pemotongan dan mencegah perubahan bentuk plastik *(Plastic Deformatin).*

b. Ketangguhan harus dapat menahan beban yang tiba-tiba.

c. Rendah sifat adhesi terhadap benda kerja untuk mencegah BUE.
d. Rendah penyerapan *(solubility)* pahat terhadap unsur benda kerja untuk mencegah aus pahat.
e. Tahan aus untuk mendapatkan umur pahat yang panjang.
f. Kemampuan kesetimbangan secara kimia terhadap pengaruh benda kerja (Kalpakjian dan Schamid, 2009).

Kekerasan yang rendah dan daya adhesi yang tinggi tidak diinginkan sebab mata potong akan terdeformasi, terjadi keausan tepi dan keausan kawah yang besar. Keuletan yang rendah serta ketahanan beban kejut termal yang kecil mengakibatkan rusaknya mata potong maupun retak mikro yang menimbulkan kerusakan fatal. Pada umumnya kekerasan dan daya tahan termal yang di pertinggi selalu diikuti oleh penurunan keuletan.

Berbagai penelitian dilakukan untuk mempertinggi kekerasan dan menjaga supaya keuletan tidak terlalu rendah sehingga pahat tersebut dapat digunakan pada kecepatan tinggi. Hal ini dapat dimaklumi karena peninggian kecepatan potong berarti menaikkan produktivitas.

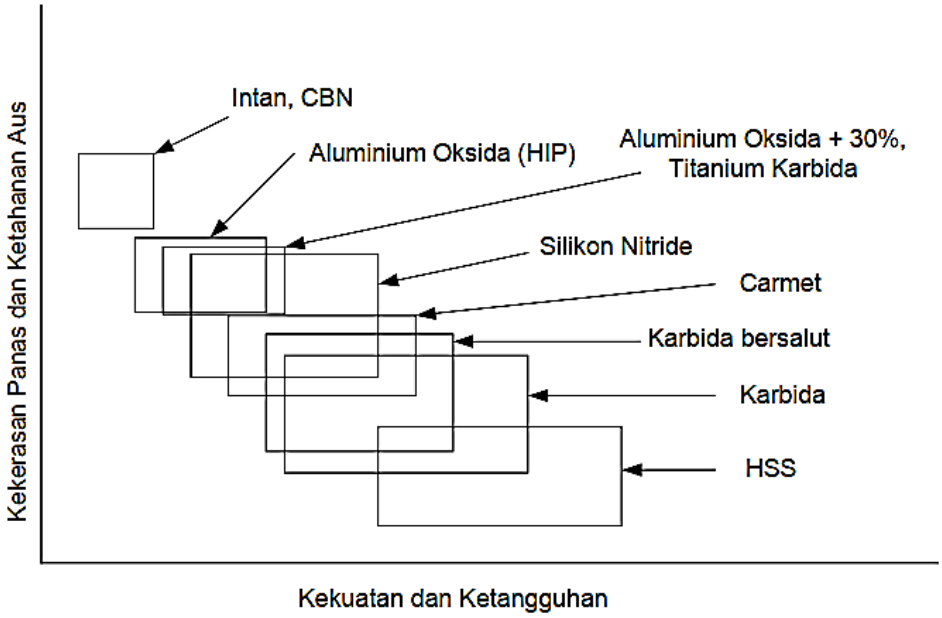
Jenis-jenis pahat yang digunakan pada proses pemesinan adalah sebagai berikut:

a. Baja Karbon *(High Carbon Steel)*
b. HSS *(High Speed Steels)*
c. Paduan Cor *nonferro (Cast Nonferrous Alloy)*
d. Karbida *(Cemented Carbides)*
e. Keramik *(Ceramics)*

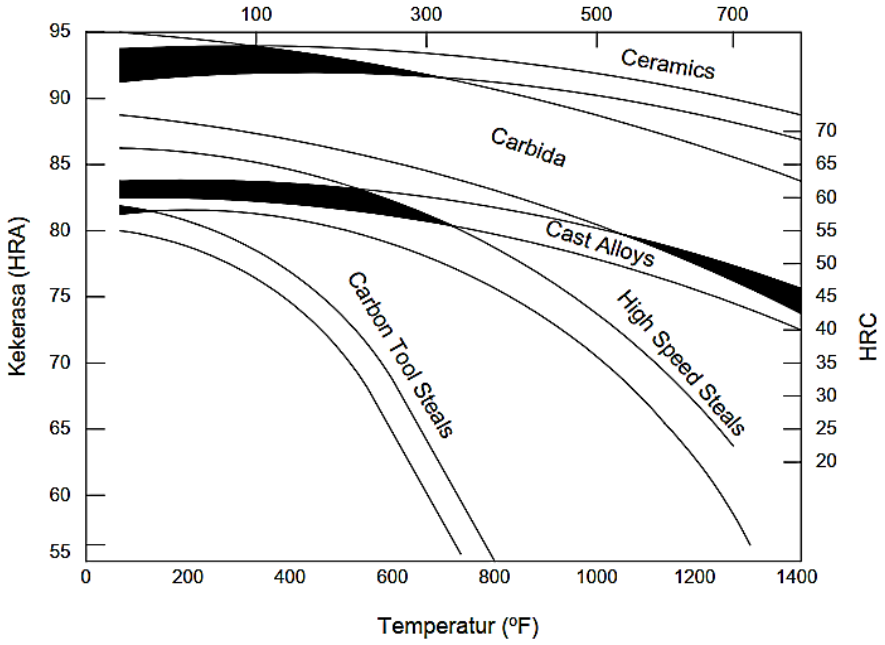
f. CBN *(Cubic Boron Nitride)*

g. Intan *(Sinteran Diamonds and Natural Diamonds)*

Untuk menetapkan jenis pahat yang tepat maka perlu pertimbangan pemilihan berdasarkan pada sifat-sifat pahat yang berhubungan dengan kekerasan, kekuatan dan ketangguhan seperti yang tertera pada Gambar 2.6 dan 2.7 serta Tabel 2.9.



Gambar 2.6 Tingkat kekerasan panas dan ketahanan aus pahat terhadap kekuatan dan ketangguhan (Kalpakjian dan Schmid, 2009)



Gambar 2.7 Tingkat kekerasan dan ketahanan aus pahat terhadap temperatur (Kalpakjian dan Schmid, 2009)

Tabel 2.9 Perbandingan sifat-sifat pahat

Bahan Pahat	Kecapatan Potong (m/min)	Temperatur Kekerasan Panas (° C)	Kekerasan (HRA)
Baja karbon	10	300	60
HSS	25-65	650	83-86
Paduan kobolt cor	50-200	925	82-84
Karbida	÷ 650	1200	90-95
Keramik	33-650	>2000	91-95
CBN	500-800	1300	4000-5000 HK
Intan	300-1500	>550	7000-8000

Sumber: (Kalpakjian dan Schmid, 2009)

2. Karbida *(Cemented Carbides)*

Karbida ditemukan pada tahun 1923 merupakan material pahat yang dibuat dengan memadukan serbuk karbida *(nitrida, oksida)* dengan bahan pengikat *Cobalt* (Co). Memulai proses *Carbolising* material dasar penyusun pahat (serbuk) *Tungsten/Wolfrom* (W), Titanium (Ti), Tantalum

(Ta) dibuat menjadi karbida yang kemudian digiling dan disaring (Groover, 2010). Salah satu atau campuran serbuk karbida yang kemudian dicampur dengan bahan pengikat (Co) dan dicetak. Semakin besar persentase *cobalt* (Co) kekerasan pahat akan menurun dan keuletannya membaik. Ada tiga jenis utama dari pahat karbida yaitu:

a. Karbida *Tungsten* (WC+Co) merupakan jenis pahat karbida yang digunakan untuk memotong besi cor (*cas iron grade)*
b. Karbida Lapis *(Cemented Carbide)* merupakan jenis karbida *tungsten* yang dilapisi karbida, nitrida atau oksida lain. Umumnya sebagai material dasar menggunakan karbida *tungsten* (WC+Co) yang dilapisi dengan bahan keramik (karbida, nitrida dan oksida yang tahan dengan temperatur tinggi serta non adhesif) (Rochim, 2007).
c. Karbida *Tungsten* Paduan (WC-TiC+Co; WC-TiC-TaC-Co; WC TaC+Co; WC-TiC-TiN+Co; TiC+Ni, Mo) merupakan pahat karbida yang digunakan untuk memotong baja *(steel cutting grade).* Karbiada *tungsten* paduan ini ada beberapa macam antara lain:
    1) Karbida *Tungsten* (WC+Co) Murni merupakan jenis sederhana terdiri dari Karbida *Tungten* (WC) dan pengikat (Co) *Cobalt.* Jenis pahat ini cocok untuk pemesinan dimana mekanisme keausan pahat disebabkan oleh proses abrasi seperti terjadi pada berbagai besi cor, apabila digunakan untuk memotong baja maka akan terjadi keausan kawah yang berlebihan. Untuk baja digunakan jenis karbida *tungten* paduan (Rochim, 2007).

2) Karbida (WC-TiC+Co) pengaruh pemberian dari TiC adalah untuk mengurangi tendensi dari geram untuk melekat pada muka pahat (BUE: *Built Up Edge*) serta menaikkan daya keausan kawah (Rochim, 2007.

3) Karbida (WC-TiC-TaC-Co) penambahan material TaC akan menambah efek samping TiC yang menurunkan sifat *Transverse Rupture Strength, Hot Hardness* dan *Compressive Strength* yang dipertinggi sehingga ujung pahat tahan terhadap deformasi plastic (Rochim, 2007).

4) Karbida (WC-TaC+Co) pengaruh TaC hampir serupa dengan pengaruh TiC, akan tetapi TaC lebih lunak dibandingkan dengan TiC. Jenis ini lebih tahan terhadap *Thermal Shock* cocok digunakan untuk pembuatan alur (Rochim, 2007)

E. Suhu Pemotongan

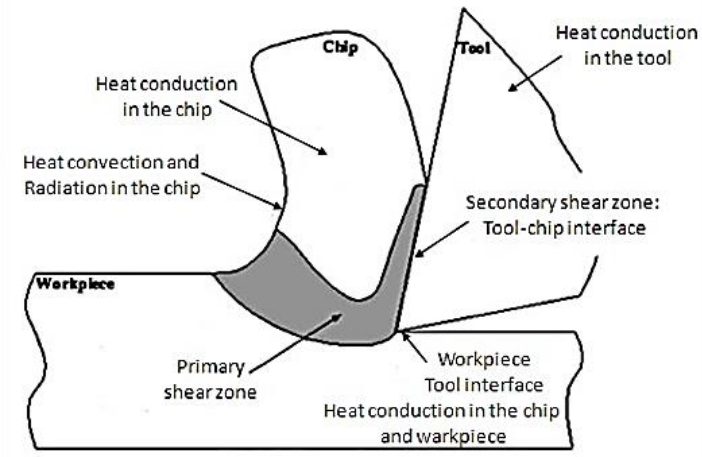
Hampir seluruh energi pemotongan diubah menjadi panas melalui proses gesekan, antara geram dengan pahat dan antara pahat dengan benda kerja. Panas yang ditimbulkan cukup besar karena tekanan yang besar akibat gaya pemotongan dan luas bidang kontak relatif kecil maka suhu pahat dan bidang utamanya akan sangat tinggi suhunya. Meskipun prosentase panas yang terbawa geram sangat tinggi tidaklah berarti bahwa suhu geram menjadi lebih tinggi dari pada suhu pahat (Shaw, 1984).

Panas mengalir bersama-sama geram yang selalu terbentuk dengan kecepatan tertentu, sedangkan panas yang merambat melalui pahat terjadi

sebagai proses konduksi panas yang dipengaruhi oleh konduktivitas panas material pahat serta penampang pahat yang relatif kecil.

Panas dalam proses pemesinan ketika logam dipotong, sejumlah energi di butuhkan dalam mendeformasi geram dan mengatasi gesekan antara pahat dan benda. Hampir semua energi yang dibutuhkan itu diubah menjadi panas sekitar 95% (Wiyono, 2015), menghasilkan suhu yang tinggi dalam area zona deformasi *(primary and secondary deformation zone)* lihat Gambar 2.8. ini dapat menyebabkan suhu panas yang sangat tinggi pada benda kerja dan pahat, energi yang tersisa sekitar 2% adalah tetap dipertahankan sebagai energi elastis dalam geram (Wiyono, 2015).

Area distribusi suhu pada proses pemotongan terbagi menjadi tiga area, yaitu area geram, pahat dan benda kerja:



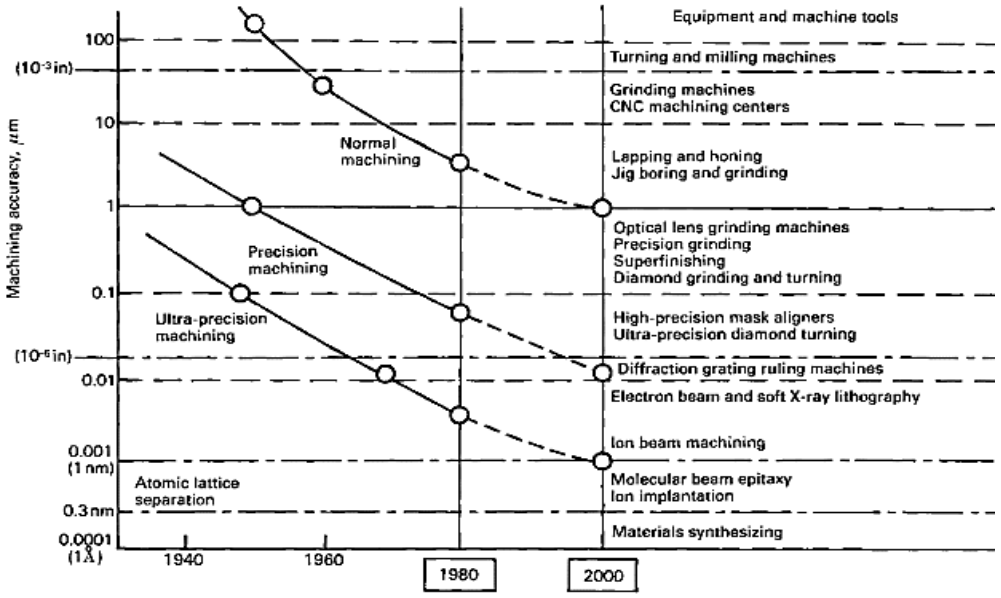
Gambar 2.8 Distribusi panas pada area pemotongan (Wiyono, 2015)

Gambar 2.8 menunjukkan tiga area yang menyebabkan kenaikkan temperatur selama proses pemotongan berlangsung, yaitu *primary shear zone, secondary shear zone, Workpiece tool interface.* Pada zona geser dimana deformasi plastis terjadi, energi geser akan meningkatkan temperatur geram. Panas yang dihasilkan pada area ini mencapai 80-85% dari panas total yang

dihasilkan selama proses pemotongan. Panas ini terbawa oleh geram ketika bergerak ke atas di sepanjang permukaan pahat. Pada *zona tool chips interface,* terjadi deformasi plastis sekunder karena gesekan antara geram dan pahat (Wiyono, 2015). Hal ini menyebabkan kenaikkan temperatur pada permukaan pahat. 15-20% dari total panas selama proses pemesinan dihasilkan dari zona ini. Sedangkan sisanya dihasilkan dari *workpiece tool interface* (Wiyono, 2015). Panas yang dihasilakan selanjutnya terserap oleh geram mencapai 60%, 10-30% terserap oleh pahat dan sisanya 10% terserap oleh benda kerja (Groover, 2002).

F. Proses Pemesinan (Machining Process)

Pemesinan *(Machining Process)* yaitu proses pembentukan suatu produk dengan memanfaatkan gerakan pahat dan benda kerja untuk mencapai bentuk dan ukuran yang diinginkan. Umumnya, benda kerja yang digunakan berasal dari proses sebelumnya, seperti proses penuangan *(Casting)* dan proses pembentukan *(Metal Forging)* (Jackson, 2007). Salah satu proses pemesinan *(Machining Process)* adalah dengan mengunakan mesin mikro frais *(Micromilling).*



Gambar 2.9 Keakuratan Machining (Jackson, 2007)

G. FEM (Finite Element Method)

Hasil penelitian yang cepat dan tidak mengeluarkan biaya yang banyak, sangat dibutuhkan saat ini. Pada awal tahun 1970 ribuan karya ilmiah telah dipublikasikan makalah mengenai penelitian metode elemen hingga. Perkembangan terus dilakukan untuk menyempurnakan penggunaan metode elemen hingga. Hasil elemen hingga sendiri mendekati data eksperimental, terlebih lagi biaya dan waktu yang dibutuhkan berkurang (Moel, 2017).

FEM atau metode elemen hingga adalah pendekatan numerik untuk memprediksi suatu sistem. Secara umum metode elemen hingga ditingkatkan untuk memperoleh nilai tegangan dari perpidahan suatu struktur. Struktur dibagi menjadi elemen-elemen kecil yang memiliki titik nodal di setiap elemen. Titik nodal tersebut digunakan untuk menyambung elemen kecil dengan elemen kecil lainnya sehingga menjadi suatu struktur. Jika dilakukan pemberian beban pada struktur maka nodal akan merespon tegangan dengan

perpindahan. Nilai perpindahan setiap nodal dikonversi menjadi nilai tegangan. Jika digunakan elemen yang kecil maka nilai nodal menjadi semakin banyak, sehingga perhitungan suatu elemen semakin akurat (Moel, 2017).

Terdapat beberapa hal penting yang harus diperhatikan agar simulasi pemodelan dengan FEM dapat mendekati hasil data pengujian dengan eksperimental:

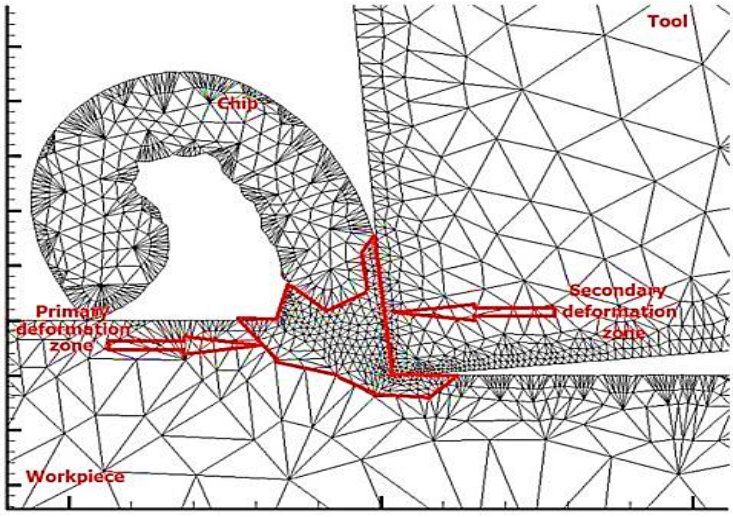
1. Perumusan Model

   Terdapat tiga tipe analisis perumusan pemodelan elemen hingga yaitu Eulerian, Lagrarian dan ALE (Arbritrary Langrarian-Eulerian). Perumusan Eularian, Langrarian dan ALE di gunakan untuk perumusan model pembentukan geram. Eularian cocok digunakan untuk simulasi pemotongan kondisi *steady*. Langrarian dapat mengurangi waktu simulasi di dalam proses pemesianan. Sedangkan ALE merupakan gabungan antara perumusan model Eularian dan Langrarian.

2. Mesh, Elemen, Kondisi Batas dan Kontak

   Jumlah *mesh* yang digunakan di dalam pemodelan sangat mempengaruhi hasil simulasi. Semakin besar jumlah *mesh* yang digunakan maka semakin banyak elemen yang digunakan, dan perhitungan semakin akurat, akan tetapi waktu komputasi akan semakin lama. Di dalam Gambar 2.10 diperlihatkan penggunaan *mesh* pembagi elemen dimana daerah primer dan sekunder memiliki diskritisasi yang lebih baik (pembentukan geram) dari pada benda kerja, sehingga pembentukan geram pun semakin akurat.

Setelah itu juga kondisi batas suhu tidak kalah penting dimana faktor perpindahan panas dapat terjadi di dalam proses pemesinan. Perpindahan panas yang digunakan dalam operasi pemotongan yaitu dari konduktivitas jenis cairan pendingin atau tipe pemisahan kering dan juga perpindahan panas dari benda kerja, geram dan pahat ke lingkungan. Nilai yang menjadi perhatian adalah koefisien perpindahan panas secara konveksi.



Gambar 2.10 Diskritisasi pembentukan geram dalam FEM (Davim, 2013)

3. Pemodelan Material

Pemodelan material sangat penting khususnya untuk sifat aliran tegangan benda kerja dan persamaan yang sesuai harus dimasukkan ke dalam FEM. Di dalam Tabel 2.10 di lampirkan beberapa persamaan yang di gunakan di dalam pemodelan material elemen hinggga. Pemodelan dalam pemesian mengacu pada persamaan konstitutif. Persamaan konstitutif menggambarkan tegangan aliran atau kekuatan luluh sesaat dimana benda kerja mulai berdeformasi, regangan elastis jauh lebih rendah jika di bandingkan dengan regangan plastis.

Tabel 2.10 Permodelan material dalam pemotongan logam

Model	Constiutive equation
Usui et al.	$\sigma=B\left[\frac{\dot{\varepsilon}}{1000}\right]^{M}\left\{\int_{Path} e^{kT/N}\left[\frac{\dot{\varepsilon}}{1000}\right]^{-m/N} d\varepsilon\right\}^{N}$
Oxley	$\sigma=\sigma_1\varepsilon^{n}$
Johnson-Cook	$\sigma=(A+B\varepsilon^{n})\left[1+\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0}\right)\right]\left[1-\left(\frac{T-T_0}{T_m-T_0}\right)^{m}\right]$
Zerilli-Armstrong	$\sigma=C_0+C_1\exp[-C_3T+C_4T\ln(\dot{\varepsilon})]+C_5\epsilon^{n}$ $\sigma=C_0+C_1\varepsilon^{n}\exp[-C_3T+C_4T\ln(\dot{\varepsilon})]$

Sumber: (Davim, 2013)

4. Pemodelan Gesekan

Pemodelan gesekan sama pentingnya dengan pemodelan material. Pemodelan gesekan ini digunakan untuk menentukan gaya pemotongan, keausan pahat dan juga kualitas permukaan benda kerja. Rumus yang biasanya digunakan untuk pemodelan gesekan dalam pemotongan logam yaitu hukum Colomb's. Berikutnya ini dalam Tabel 2.11 beberapa hukum yang digunakan untuk pemodelan gesekan.

Tabel 2.11 Pemodelan gesekan dalam pemotongan logam

Model	Equation
Coulomb	$\tau=\mu\sigma$
Zorev	$\tau=\begin{cases}k, 0\le l\le l_c\\ \mu\sigma, l>l_c\end{cases}$
Usui	$\tau=k\left[1-\exp\left(-\frac{\mu\sigma}{k}\right)\right]$
Childs	$\tau=mk\left[1-\exp\left(-\frac{\mu\sigma}{k}\right)^{n}\right]^{1/n}$
Iwata et al.	$\tau=\frac{Hy}{0.07}\tan h\left(\frac{\mu\sigma}{H_V/_{0.07}}\right)$
Sekhon and Chenot	$\tau=-\alpha K\|D_f\|^{p-1}D_f$
Yang and Liu	$\tau=\sum_{k=0}^{4}\mu_k\sigma^{k}$

Sumber: (Davim, 2013)

5. Pemisahan Geram dan Pemecahan Geram

Dalam pemodelan pemisahan geram digunakan perumusan model Lagrarian, dalam keadaan actual pemisahan geram terjadi deformasi dan beberapa retakan akibat pemotongan. Di bawah ini di lampirkan beberapa pemodelan sebagai kriteria untuk pemisahan geram dan pemecahan geram di dalam Tabel 2.12.

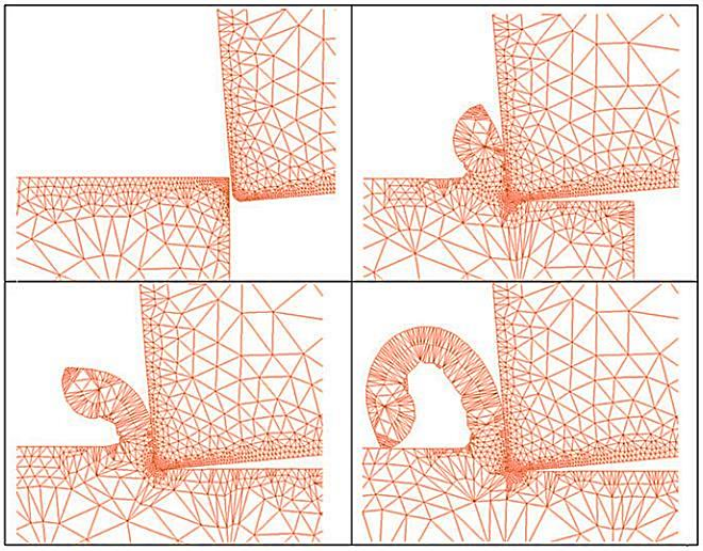
Tabel 2.12 Kriteria pemisahan geram dan pemecahan geram

Crietion	Definition
Nodal distance	$d=d_{cr}$
Equivalent plastic work	$I_{cr}=\varepsilon$
Energy density	$I_{cr}=\int \sigma:d\varepsilon$
Brozzo et al.	$I_{cr}=\int \left(2_{\sigma 1}/3\ (\sigma_1\sigma_H)\right) d\varepsilon$
Oskada et al.	$I_{cr}=\int (\varepsilon+b_1\sigma_H+b_2)d\varepsilon$
Stress index	$f=\sqrt{\left(\sigma/\sigma f\right)^2\left(\tau/\tau f\right)^2}$
Maximum principal stress	$\sigma f=\sigma 1$
Toughness	$\sigma f=K_{1C}/\sqrt{2\pi l}$
Rice and Tracey	$\varepsilon f=2.48\exp\left(-3\sigma H/2\sigma Y\right)$
Obikawa et al.	$\varepsilon f=\varepsilon_0-\alpha\, p/\sigma-\beta\,\dot{\varepsilon}/Vc$
Obikawa and Usui	$\varepsilon f=-\left[0.074\ln\left(\dot{\varepsilon}/100\right)\right]-\sigma H/37.8+0.09\exp\left(T/293\right)$
Jonhson-Cook	$\varepsilon f=\left[D_1+D_2\exp\left(D_3\,\sigma H/\sigma Y\right)\right]\times\left[1+D_4\ln\left(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}\right)\right]\left[1+D_5\left(T-T_0/T_m-T_0\right)\right]$
Damage considerations	$\varepsilon_f=A\left\{\sigma_y^2/2Er\left[2/3\ (1+v)+3(1-2v)\left(\sigma H/\sigma_y^2\right)\right]\right\}^{-s}+\partial\varepsilon/\partial T\ (T-T_0)$

Sumber: (Davim, 2013)

6. *Meshing* Adatif

Di dalam Gambar 2.11 terlihat bahwa *meshing* adatif di gunakan oleh komputer guna melakukan *remeshing* secara berkala dengan bagian-bagian tertentu sebelum terjadinya distorsi pada material. Langkah-langkahnya dimulai dengan, saat tempat antara pahat dan benda kerja yang terdistorsi akan dilakukan *remeshing* agar solusi perhitungan numerik dapat dianalisis dengan akurat. Selama node atau penambahan mesh baru.



Gambar 2.11 Meshing adaptif (Davim, 2013)

III. METODE PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilakukan dalam waktu tiga bulan. Di mulai bulan September tahun 2018 hingga bulan Oktober 2019. Tempat penelitian di Laboratorium CNC/CAD-CAM, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

B. Tahapan Penelitian

1. Studi literatur

Studi literatur yang digunakan antara lain menggunakan sifat ketermesinan Titanium TI-6AL-4V, pemodelan permesianan *micromilling* menggunakan software FEM dan *flow stress* material Titanium Ti-6Al-4V.

2. Pemodelan 3-D *micromilling*

Pemodelan 3-D *micromilling* yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada penelitian yang telah dilakukan oleh Ozel, et al., (2012). Ada beberapa tahapan dalam pemodelan *micromilling* diantaranya sebagai berikut:

a. Membuat geometri pahat dan benda kerja dengan menggunakan *software* Autodeks Inventor Professional 2019.

b. Pemodelan geometri disimpan dengan format yang dapat impor ke software FEM.

3. Simulasi *micromilling*

Proses simulasi *micromilling* yang dilakukan untuk dapat melihat sifat ketermesinan dari Ti-6Al-4V dan pengaruh suhu terhadap parameter pemotongan. Dalam melakukan simulasi ada beberapa proses persiapan diantaranya sebagai berikut:

a. Memasukkan geometri pahat dan benda kerja ke *software* FEM
b. Memasukkan sifat material Titanium TI-6AL-4V dan parameter permesinan.
c. Mengimputkan data *flow stress* persamaan konstitutif Johson-Cook yang telah dikembangkan oleh Ozel, et al., (2012) ke *software* FEM.
d. Mendefinisikan gerakan kinematik pahat dan memasukkan parameternya ke *software* FEM

4. Analisis data

Setelah data simulisi *micromilling* lalu dilakukan analisis data suhu terhadap parameter pemotongan material TI-6AL-4V. Adapun parameter yang dianalisis adalah sebagai berikut:

1. Pengaruh kecepatan putaran spindel terhadap suhu pahat
2. Pengaruh gerak makan terhadap suhu pahat

C. Peralatan dan *Software* Penelitian

1. Peralatan Penelitian

Dalam penelitian ini peralatan yang digunakan untuk simulasi *micromilling* adalah komputer. Yang mana komputer digunakan untuk

menjalankan *software* simulasi dan mengelolah data hasil simulasi. Adapun spesifikasi yang digunakan adalah sebagai berikut:

Merek	Asus X450CA
Prosesor	Intel(R) Celeron (R) CPU 1007U @ 1.50GHz
Ram	4 GB DDR3
HDD	500 GB
OS	*Windows* 10

2. *Software* Penelitian

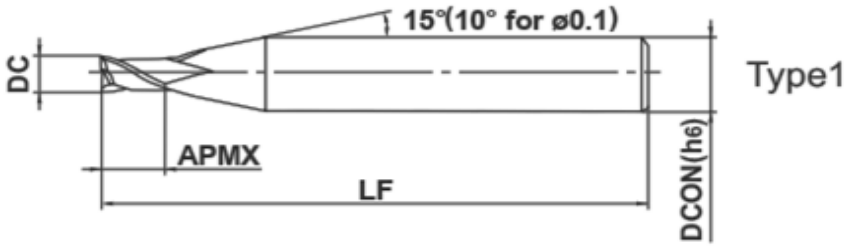
Software yang digunakan adalah *Software* FEM. Software ini merupakan *software* berbasis elemen hingga yang dapat mensimulasikan beberapa manufaktur, diantaranya pembentukan permesinan logam. Dalam penelitian ini pemodelan elemen hingga untuk proses *micromilling*.

Pemodelan yang dilakukan secara simulasi sama halnya yang dilakukan dengan eksperimental. Yang mana terdapat parameter *(input)* seperti kecepatan putaran sepindel, kedalaman potong, gerak makanan dan kecepatan potong. Dengan adanya pemodelan dan simulasi yang menggukan *software* maka biaya dapat diminimalisir karna pengujian tidak dilakukan secara fisik.

D. Preprocessing (Rancangan)

1. Pemodelan

Bentuk dari geometri pahat dan benda kerja dibuat dengan menggunakan *software* Autodesk Inventor Professional 2019 kemudian disimpan dengan format STL agar dapat diimpor ke *software* FEM. Adapun ukuran dimensi pahat *endmill* dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Dimensi Pahat

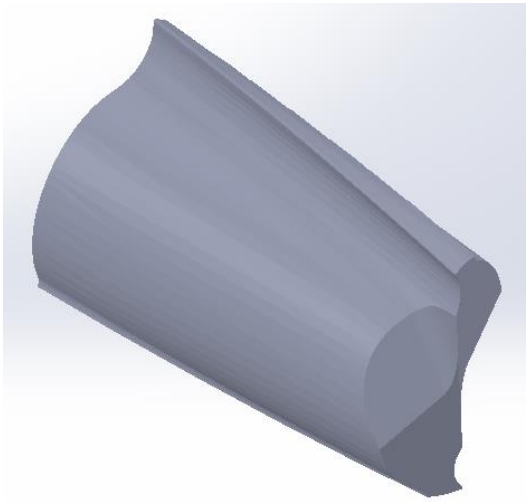
Adapun penjelasan ukuran dimensi pahat endmill dapat dilihat pada Tabel 3.1:

Tabel 3.1 Spesifikai pahat *endmill*

PRODUK	MSTAR END MILLS
Item Number	MS2SSD0050
DC	500 µm
APMX	750 µm
LF	49
DCON	4 mm
Flute	2
Material	WC/Co

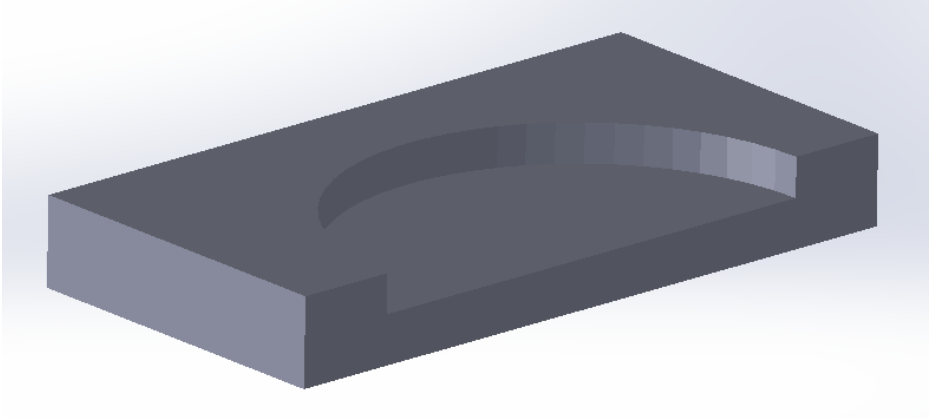
Sumber: Solid End Mill J048

Gambar 3.2 menunjukkan hasil dari pembuatan geometri pahat dengan menggunakan *software* Autodesk Inventor Professional 2019 yang telah disederhanakan agar mempermudah dalam proses analisis suhu.



Gambar 3.2 Pemodelan pahat endmill

Kemudian gambar 3.3 adalah benda kerja yang telah disederhanakan agar mempermudah dalam menganalisis suhu pahat endmill.



Gambar 3.3 Pemodelan Benda kerja

Setelah pemodelan geometri pahat dan benda kerja kemudian memasukkan parameter kecepatan putaran spindel, gerak makan dan kedalaman pemotongan. Asumsi benda kerja bersifat plastis yang mana benda kerja akan mengalami deformasi plastis secara permanen sesuai bentuk yang diinginkan menggunakan mesin perkakas dan pahat dianggap dalam kondisi kaku *(rigit body).*

Pada skripsi ini data *flow stress* yang digunakan mengacu pada penelitian yang telah dilakukan oleh Ozel.et al., (2012). Data *flow stress* digunakan sebagai acuan karena hasil simulasi lebih mendekati dengan hasil eksperimental. Yang mana pada penelitian Ozel et al (2012) pemodelan material dibuat menggunakan software FEM dengan menggunakan persamaan konstitutif Johnson-Cook sebagai pemodelan *flow stress* material Ti-6Al-4V yang dituliskan pada persamaan (3.1). Persamaan ini digunakan oleh peneliti karena memiliki *error* yang cukup

kecil jika dibandingkan dengan persamaan yang lain yang mana telah dibuktikan oleh (Sima, et al., 2010).

$$\sigma=\left[A+B.\ \varepsilon^{n}\left(\frac{1}{exp(\varepsilon^{a})}\right)\right].\ \left[1+C.\ \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]\ .\ \left[1-\left(\frac{T-T_0}{T_m-T_0}\right)^{m}\right]$$

$$\left[D+(1-D)\left[tanh\left(\frac{1}{(\varepsilon+p^{r})}\right)\right]^{s}\right]$$

Dimana $D=1-\left(\frac{T}{T_m}\right)^{d}$, $p=\left(\frac{T}{T_m}\right)^{b}$, σ adalah *flow stress*, ε adalah *true strain*, ε̇ adalah *plastic strain rate*, $\dot{\varepsilon}_0$ adalah *true strain reference*, T adalah suhu kerja, T_m adalah suhu leleh material, T_0 adalah suhu lingkungan, dan A, B, n, C, m, s adalah konstanta model. Nilai-nilai dari A = 782,7 MPa, B = 498,4 MPa, n = 0.28, C = 0,028, m = 1,0, $\dot{\varepsilon}_0 = 10^{-5}$ s=0,05, T_0= 20 °C dan T_m = 1450 °C.

2. *Friction* dan Perpindahan panas

Dua jenis kontak diterapkan pada pemodelan simulasi FE yaitu kontak sticking (menempel) dan kontak sliding (geser). Kontak sticking didefinisikan τf = mk dimana k adalah tegangan kerja material geser, m adalah faktor gesekan geser dan τf adalah tegangan gesekan. Kontak sliding didefinisikan τf = μp dimana μ adalah koefisien gesekan dan p adalah tekanan antarmuka (Ozel, 2013).

Untuk kontak antara pahat (WC/Co) dengan benda kerja (Ti-6Al-4V), jenis kontak diputuskan secara otomatis (oleh software FEM) untuk setiap node dalam panjang kontak. Jika μp < mk, kontak ini dianggap

kontak sliding; tetapi jika jika μp ≥ mk, kontak itu dianggap sebagai kontak sticking. Untuk kontak antara pahat dan benda kerja friction cefficient μ kerja material geser yield stress masing-masing diberi 0,4 dan 0,9 (Ozel, 2013). Kontak antara chip dan benda kerja diasumsikan mengalami kontak sliding. Friction coefficient μ antara chip dan benda kerja diberi nilai 0.2.

Heat transfer coefficient yang sangat tinggi (h=100 kW/m2/ ℃) adalah untuk memungkinkan perubahan suhu yang cepat pada pahat. Sifat material tergantung pada suhu yang digunakan yaitu thermal expansion α(T), thermal conductivity λ(T) dan heat capacity cp(T) Tertera pada Tabel 3.2. Suhu lingkungan diatur pada 20 ℃. Panas yang diizinkan untuk transfer dari benda kerja terhadap pahat ke lingkungan oleh convection dengan convection coefficient 0,02 N sec-1 mm-1 ℃-1 (Ozel, 2013).

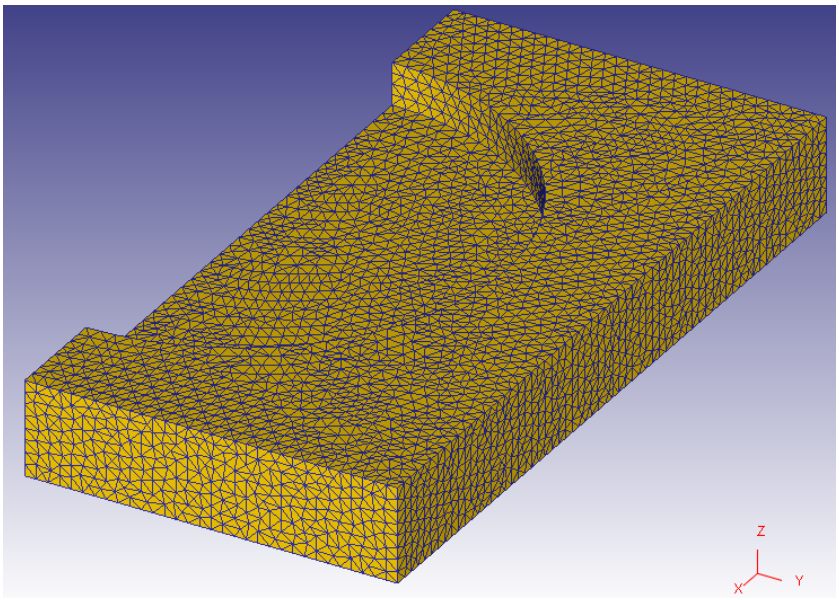
Tabel 3.2 Property benda kerja dan pahat

Property	Ti-6AL-4V	WC/Co
Konduktivitas termal (N sec^{-1} ℃)	$7{,}039e^{0.00011*T}$	55
Kapasitas panas spesifik (N mm^{-2} $℃^{-1}$)	$2{,}34e^{0.0007*T}$	$0.005^{*}T+2{,}07$
Koefisien ekspansi termal ($℃^{-1}$)	$3{,}10^{-9*}T+7{,}10^{-6}$	$4{,}7^{*}10^{-6}$

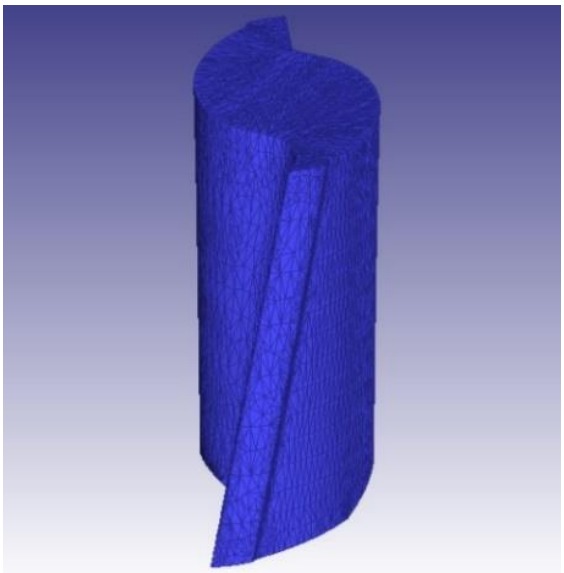
Sumber: (Ozel, 2013)

3. Elemen *(Meshing)*

Tipe elemen yang digunakan adalah tetrahedral. Pada penelitian ini jumlah elemen yang digunakan untuk benda kerja 45000 dengan elemen minimum 0.05 µm, alasan menggunakan *mensh* yang pada ujung pahat memiliki *mesh* sangat halus supaya hasil suhu menjadi akurat. Sedangkan untuk benda kerja adalah 45000 dengan ukuran 0.05 µm, alasan menggunakan *mesh* ini supaya hasil menjadi akurat.



Gambar 3.4 Meshing Benda kerja



Gambar 3.5 Meshing Pahat

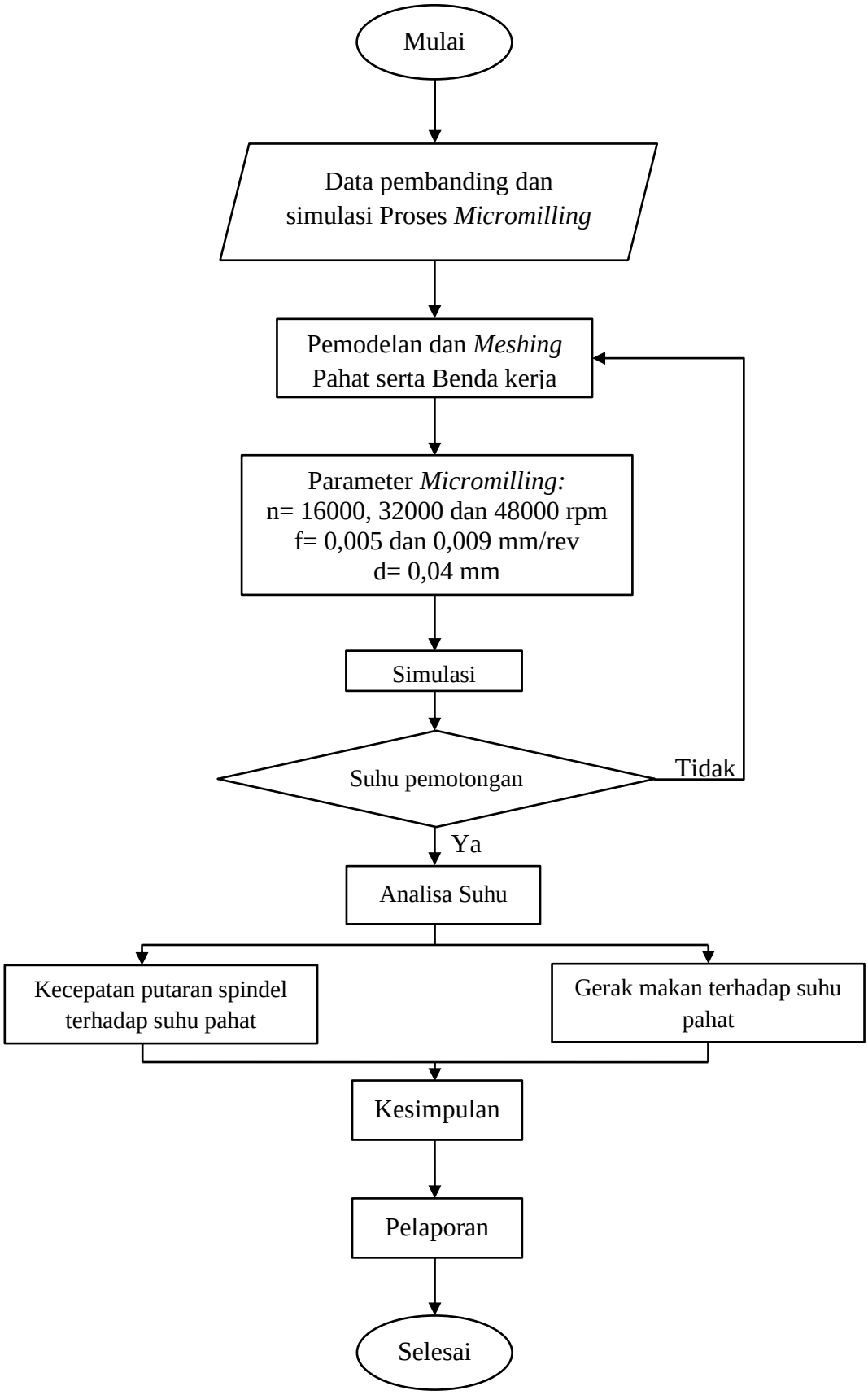
E. Parameter Permesinan

Parameter permesinan *micromilling* ditentukan berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Ozel el al (2012) pada penelitiannya hanya menggunakan satu variasi sedangkan pada penelitian ini menggunakan tiga variasi, yaitu secara hasilparameter pemesinan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagaimana yang ditunjukkan pada tabel 3.4.

Tabel 3.3 Parameter pemesinan dengan kedalaman potong (d) 0.04 mm

Kecepatan Spindel (rpm)	Pemakanan (mm/rev)
16000	0.005
	0.009
32000	0.005
	0.009
48000	0.005
	0.009

F. Diagram alir penelitian



Gambar 3.6 Diagram alir penelitian

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari penelitian kajian suhu pada proses *micromilling* adalah sebagai berikut:

1. Pemodelan dan simulasi permesinan *micromilling* Ti-6Al-4V berbasis FEM telah berhasil dilakukan dan memodelkan material Titanium Ti-6Al-4V dengan menggunkan persamaan *flow stress* Johnson Cook.
2. Secara umum hasil pengujian permesinan *micromilling* secara simulasi 2D dan 3D memiliki kecendrungan grafik meningkat dan lebih rendah dibandingkan dengan 2D pada kondisi pemotongan tertentu.
3. Pengaruh kecepatan putaran spindel (n), gerak makan (f), dan kedalaman potong (d) berbanding lurus dengan nilai suhu pahat. Apabila n, f dan d meningkat maka nilai suhu pahat akan meningkat.

B. Saran

Adapun saran dalam pemodelan simulasi *micromilling* Ti-6Al-4V adalah sebagai berikut:

1. Dalam penelitian selanjutnya penulis berharap supaya dilakukannya validasi suhu pemotongan pada permesinan *micromilling* Ti-6Al-4V.
2. Untuk mendapatkan hasil yang lebih presisi dapat dilakukan dengan penambahan jumlah *mesh* pada pahat dan benda kerja.

DAFTAR PUSTAKA

Antonio, D. 2013. *An Automated Visual Inspection System for the Classification of the Phases of.* Italy.

Chae, S.S. 2006. *Investigation of micro-cutting operations*. University of Calgary. Canada.

Davim, P.J. 2013. *Springer Briefs in Applied Sciences and Technology Manufacturing and Surface Engineering*. Series Editor ed. London

Donachie Jr, Matthew J. 2000. *Titanium: A Technical Guide, Secon Edition*. ASM International

Dwi, R. 2010. *Materi Kuliah Proses Pemesinan. Yogyakarta*. Universitas Negri Yogyakarta. Yogyakarta.

Gandarias, E. 2017. *Micromilling Technology.* Mondragon University, Basque.

Groover. 2002. *Fundamentals of Modern Manufacturing; Materials Processing and system*, John Wiley and Sons, New York

Groover. 2013. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems.* 5 ed. United States: John Wiley & Sons.

Huo, D. and Cheng, K. 2013. *Micro-Cutting*. Newcastle University, UK.

Ibrahim, G.A. 2009. *Pengaruh Pemesinan Kering Terhadap Kekasaran dan Kekerasan Permukaan Paduan Titanium*. Universitas Lampung. Bandar Lampung.

Jackson, J. 2007. *Micro and Nanomanufacturing.* Purdue University, USA.

Jackson, J. and Davim, P.J. 2009. *Nano and Micromachining.* Hoboken, USA.

Kalpakjian, Serope. 2009. *Manufacturing Engineering and Technology 6th Edition.* California: Addison Publishing Companya Inc.

Klocke, F., Konig, W. and Gerschwiler, K. 1996. *Advanced Machining Of Titanium.* New York.

Masuzawa, T., 2000. *State of the Art of Micromachinin.* Tokyo: University of Tokyo. Moel, S. S. H., 2017.

Moel, S. S. H., 2017. *Analisis Komputasional Mekanika Retak pada Pelat Metal Berlubang Berpenambal Metal dan Komposit*. Institut Teknologi Bandung. Bandung.

Nugroho, T.U., Saputro, H. and Estriyanto. 2012. *Pengaruh Kecepatan Pemakanan dan Waktu Pemberian Pendingin Terhadap Tingkat Keausan Cutter End Mill Hss Hasil Pemesinan Cnc Milling*. Universitas Sebelas Maret. Surakarta.

Ozel, T.2012. *Finite Element Modeling and Simulation of Micro-Milling*. Rutgers University. New Jersey, USA.

Ozel, T. 2017. *Biomedical Devices.* New Jersey, USA

Paul, K. and Xinpei, L. 2014. *Low Temperature Plasma Technology*. London, NewYork.

Pratap, T.2015.*Modeling Cutting Force in Micro-Milling of Ti-6Al-4V Titanium Alloy*. South Ural State University. Bihar, India.

Rochim, T. 2007, Proses pemesinan buku 1: Klasifikasi proses, gaya dan Pemesinan. Bandung.

Thepsonthi, T. 2013. *3-D Finite Element Simulation of Micro-Milling Ti-6Al-4V Titanium Alloy.* Rutgers University. New Jersey, USA.

Wahyu dkk. 2017. *Ilmu Logam Pengenalan Titanium.* Universitas Negri Malang. Malang.

Williams, J. and Lutjering, G. 2007. *Engineering Materials and Processes.* Columbus, OH 43210: Technical University Hambung-Harbung.

Wima. 2017. *Ilmu Logam Pengenalan Titanium.* Universitas Negri Malang. Malang

Wiyono, S. 2015. *Distribusi Temperatur Area Pemotongan Pada Proses Dray Machining.* Universitas Sultan Agung Tritayasa. Banten.