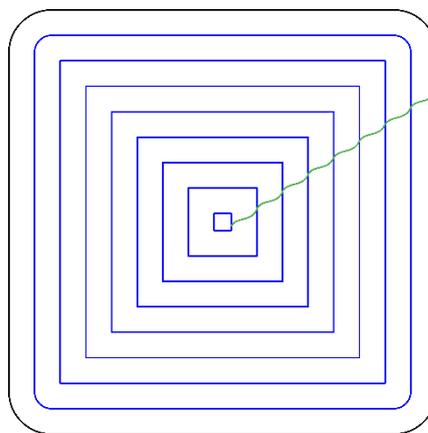


BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Proses pemesinan berbasis *Computer Numerical Control* (CNC) sudah menjadi bagian yang penting dalam industri manufaktur modern karena kemampuannya untuk menghasilkan produk dengan presisi tinggi secara berulang. Dari berbagai macam jenis pemesinan CNC, salah satu yang paling umum digunakan adalah *milling*, yaitu proses pemotongan material menggunakan alat potong yang berputar dan bergerak terhadap benda kerja untuk memotong material dan membentuk kontur atau rongga sesuai desain yang diinginkan. Suryono dkk. (2024) mengatakan bahwa mesin CNC *milling* merupakan mesin yang bekerja secara otomatis untuk membentuk material sesuai dengan program yang dimasukkan. Salah satu teknik pemesinan yang umum digunakan adalah *2D pocketing*, yaitu proses mengosongkan area material berbentuk dua dimensi menggunakan jalur pemotongan yang dirancang dalam perangkat lunak *Computer-Aided Manufacturing* (CAM). Teknik ini termasuk salah satu proses yang penting dalam industri manufaktur karena kemampuannya dalam membentuk rongga presisi. Patel dkk. (2016) mengatakan bahwa pengaplikasian *pocket milling* sering kali digunakan dalam industri kedirgantaraan, kapal, otomotif, dan cetakan. Sedangkan *pocketing* adalah proses menghilangkan seluruh isi dari bagian dari suatu benda kerja dalam profil tertutup (Suryono dkk., 2024).



Gambar I.1 Jalur pemotongan *contour-parallel* pada proses *pocket milling*.

Ilustrasi dari jalur pemotongan dalam *pocket milling* dapat dilihat pada Gambar I.1. Jalur pemotongan direpresentasikan oleh garis biru, sedangkan garis hijau adalah pergerakan menuju *offset* paralel yang berikutnya, pada Gambar I.1 yang menunjukkan lintasan alat potong selama proses pemotongan *pocketing contour-parallel*. Jalur pemotongan ini menggunakan strategi membentuk geometri rongga persegi sesuai bentuk desain, dengan titik masuk dari tengah sebagai permulaan pemotongan kemudian menghilangkan material di dalam area profil tertutup, strategi inilah yang disebut dengan *pocket milling*.

Secara konvensional dalam proses *pocket machining*, jalur pemotongan *contour-parallel* merupakan yang paling umum digunakan untuk pembuangan material dalam skala besar (Seo dkk., 2005). Namun, strategi ini masih menyisakan tantangan teknis signifikan, terutama dalam proses *linking* antar jalur *offset* agar dapat menghindari *retract* (penarikan alat potong ke atas) dan *repositioning* (perpindahan posisi alat sebelum pemotongan dilanjutkan) yang tidak diperlukan. Dalam kajian sebelumnya, Seo dkk. (2005) mengelompokkan tantangan tersebut ke dalam tiga kategori utama, yaitu: (1) penentuan *offset curve* yang tepat, (2) pencegahan area yang tidak terpotong (*uncut regions*), dan (3) perancangan jalur pemotongan yang bebas dari *tool-retraction*. Kajian ini berfokus pada poin nomor tiga dari pengelompokan tersebut. Meskipun perangkat lunak CAM modern seperti Autodesk Fusion atau Autodesk Inventor CAM telah menyediakan strategi pemotongan otomatis berbasis *contour-parallel*, permasalahan *retract* dan *repositioning* ini masih umum terjadi, terutama pada bentuk *pocket* yang kompleks dan mengandung banyak *island* (Bagian dari material yang berada di dalam area *pocket*, tetapi tidak ikut dipotong karena harus tetap dipertahankan). Bentuk ini dapat muncul dalam aplikasi industri kreatif, seperti dalam proses pengukiran motif batik sederhana pada bidang kayu, yang membutuhkan lintasan pemotongan mengikuti kontur organik dan menyisakan area tidak terpotong (*island*) sebagai bagian dari desain. Bentuk *modular curved-island* yang akan digunakan dalam kajian ini merepresentasikan kontur kompleks yang sering dijumpai dalam industri kreatif, misalnya dalam pembuatan ukiran batik sederhana pada permukaan kayu. Motif batik juga telah banyak digunakan dalam produk kerajinan seperti perhiasan keramik menggunakan teknologi CAD/CAM (Bawono dkk., 2024), menunjukkan

tantangan pemesinan kontur yang rumit dengan presisi tinggi secara berulang. Gerakan-gerakan non-produktif yang dihasilkan pada pemesinan bentuk tersebut bukan hanya memperpanjang waktu siklus pemesinan, tetapi juga berdampak pada penurunan efisiensi proses produksi secara keseluruhan.

Dalam mengatasi permasalahan gerak non-produktif tersebut, pendekatan berbasis algoritma optimasi lintasan seperti pendekatan *Traveling Salesman Problem* (TSP) dapat dipertimbangkan. Singh dkk. (2022) mengembangkan metode dengan memanfaatkan algoritma TSP Lin-Kernighan Helsgaun (LKH) dalam membuat jalur pemotongan pada *wire arc additive manufacturing* (WAAM) menggunakan TSP *solver* untuk menciptakan jalur WAAM tanpa perlu menarik *nozzle* akibat posisi awal dan akhir jalur yang berbeda. Pendekatan seperti algoritma LKH yang digunakan Singh dkk. (2022) dapat diadaptasi untuk meningkatkan efisiensi jalur pemotongan *pocket milling* dengan menyusun urutan pemakanan yang meminimalkan kebutuhan akan pergerakan *retract* maupun *repositioning* alat potong.

Pendekatan TSP memiliki potensi untuk mengoptimalkan lintasan pemotongan permesinan *milling* dengan meminimalkan waktu pemotongan total dengan menghilangkan gerakan menarik alat potong untuk mereposisi kembali ke awal jalur pemotongan. Dengan demikian, penerapan algoritma tersebut dapat dibandingkan dalam hal permesinan dengan strategi konvensional seperti *2D Pocket* pada Autodesk Inventor CAM yang menggunakan *contour-parallel pocketing*. Dalam kajian ini, penyelesaian TSP dilakukan menggunakan solver LKH yang dikembangkan oleh Helsgaun (2000) dan tersedia secara terbuka melalui situs resmi Roskilde University. Pemilihan algoritma LKH sebagai *solver* pada kajian ini didasarkan pada Singh dkk. (2022) yang menggunakan LKH sebagai algoritma pengembangan metode nya pada WAAM dan juga pada keberhasilan LKH dalam mengatasi permasalahan optimasi lintasan non-produktif pada berbagai proses manufaktur seperti *laser cutting* dan *additive manufacturing* (Hu dkk., 2022). LKH terbukti mampu menghasilkan lintasan tanpa *retraction* pada *freeform surfaces* (bentuk bebas) (Z. Lin dkk., 2015) dan *irregular compound surfaces* (permukaan majemuk tidak beraturan) (Z. Lin dkk., 2017). Selain itu, LKH dikenal

sebagai salah satu solver TSP tercepat dan paling efisien, serta telah digunakan dalam kasus skala besar hingga 1.904.711 kota (Hu dkk., 2022).

Untuk melakukan penerapan TSP dalam konteks jalur pemotongan *2D pocket CNC*, diperlukan titik-titik koordinat yang akan merepresentasikan kota dalam masalah TSP. Titik-titik ini bisa didapat dengan mengekstrak titik dari program konvensional *2D pocket*. Titik dari jalur pemotongan *2D pocket* dari CAM dapat diekstraksi menggunakan *post-process* G-code xy yang tersedia pada Autodesk (n.d.) yang terdapat di Autodesk Fusion Library, khususnya koordinat X dan Y dari pergerakan pemotongan. Penggunaan titik-titik hasil ekstraksi dari CAM diharapkan tetap menjaga karakteristik strategi *pocketing* yang digunakan (dalam kajian ini digunakan *contour-parallel* sebagai pembanding maupun sumber ekstraksi titik), sehingga dapat meminimalkan risiko terbentuknya area yang tidak terpotong (*uncut region*) selama proses pemesinan. Tetapi, data G-code berpotensi mengandung titik-titik redundan, misalnya akibat perbedaan posisi Z atau segmentasi pada kurva yang berlebihan dalam konteks kota pada TSP. Oleh karena itu, diperlukan pengolahan lanjutan berupa pengurangan jumlah titik-titik yang memiliki posisi berdekatan menggunakan metode seperti reduksi titik berbasis jarak (*Distance-Based Point Reduction*) dan Ramer–Douglas–Peucker (RDP) untuk menyederhanakan jalur sebelum dioptimasi dengan solver TSP. Konsep ini mirip dengan penerapan algoritma RDP dalam pengenalan pola, yang mengaproksimasi kontur menjadi poligon melalui identifikasi titik-titik sudut untuk mempertahankan bentuk utama sambil mengurangi kompleksitas, sebagaimana dijelaskan oleh Saalfeld (1999, dalam Lee & Park, 2022).

Untuk mendukung pengujian efektivitas lintasan pemotongan yang dihasilkan dari metode ini, pemilihan material kerja menjadi faktor penting yang perlu dipertimbangkan. Dalam praktik manufaktur, material seperti aluminium 6061 sering digunakan dalam proses *pocket milling* karena memiliki sifat mekanik yang baik serta mudah diproses. Oleh karena itu, kajian ini juga menggunakan material tersebut sebagai basis pengujian jalur potong yang dihasilkan. Dalam konteks material, Aluminium 6061 sering digunakan dalam industri karena mudah dikerjakan dan daya tahan tinggi terhadap korosi. Chakraborty dkk. (2024) mengatakan paduan aluminium, khususnya Al-6061, banyak digunakan dalam

berbagai aplikasi proses rekayasa karena memiliki kombinasi karakteristik mekanis, ketahanan korosi, dan densitas yang baik.

Berdasarkan latar belakang tersebut, suatu pendekatan baru yang mampu merancang lintasan pemotongan *pocket* secara lebih efisien layak untuk dikaji. Oleh karena itu, kajian ini mengusulkan pendekatan penyusunan lintasan pemotongan yang dinamakan metode PRT-GCAM (*Point Reduction and TSP using G-code from CAM*), yaitu proses optimasi jalur pemotongan *2D pocket* berdasarkan titik hasil *post-process* CAM yang telah disederhanakan menggunakan RDP dan *Distance-Based Point Reduction*, kemudian diurutkan kembali menggunakan algoritma TSP melalui *solver* LKH. Kajian ini akan mengkaji kelayakan metode PRT-GCAM sebagai strategi penyusunan lintasan pemotongan, dengan membandingkannya dengan strategi konvensional *2D Pocketing Contour-parallel* pada Autodesk CAM. Selain itu, validasi dilakukan menggunakan material Aluminium 6061, yang umum digunakan dalam proses *pocket milling* karena karakteristik mekanisnya yang baik dan kemudahan dalam pemesinan.

I.2 Perumusan Masalah

Bagaimana metode PRT-GCAM yang menggabungkan ekstraksi titik dari G-code, *Distance-Based*, RDP, dan algoritma TSP Lin-Kernighan Helsgaun dapat mengoptimalkan lintasan pemotongan *2D pocket milling* dibandingkan strategi *contour-parallel* konvensional terhadap bentuk *modular curved-island*?

I.3 Tujuan Tugas Akhir

Kajian ini bertujuan untuk menghasilkan jalur pemotongan *2D pocket milling* yang lebih efisien dengan meminimalkan gerakan non-produktif *retract* melalui pendekatan optimasi berbasis TSP menggunakan titik-titik dari G-code CAM.

I.4 Manfaat Tugas Akhir

1. Mengusulkan pendekatan alternatif untuk mengoptimalkan lintasan pemotongan berbasis G-code.
2. Mengurangi waktu pemotongan dan jumlah *retract* dalam proses *milling*.

3. Mendukung efisiensi produksi melalui validasi pada simulasi dan mesin CNC aktual.

I.5 Batasan dan Asumsi Tugas Akhir

Dalam pelaksanaan tugas akhir ini, terdapat beberapa batasan dan asumsi yang ditetapkan untuk menyederhanakan ruang lingkup perancangan serta menjaga fokus kajian agar tetap sesuai dengan tujuan utama. Batasan dan asumsi ini diperlukan agar proses pengumpulan data, pemrosesan, dan analisis dapat dilakukan secara lebih terarah dan dapat diselesaikan dalam waktu yang tersedia. Adapun batasan dan asumsi yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

Batasan Tugas Akhir:

1. Jenis gerakan pemotongan yang dianalisis terbatas pada perintah G01 (gerakan pemotongan linear) dan G00 (gerakan *rapid move*).
2. Optimasi lintasan hanya dilakukan dalam ruang dua dimensi (X dan Y). Yang secara tidak langsung berdampak pada *retract* dan *entry helix* pada jalur strategi *contour-parallel*.
3. Proses permesinan yang dianalisis bersifat *roughing* (penghilangan material dalam jumlah besar), tidak mencakup *finishing* atau pembuatan detail akhir.
4. Perbandingan lintasan hanya dilakukan antara metode konvensional CAM 2D *pocket* konvensional Autodesk Inventor CAM dan metode PRT-GCAM.

Asumsi Tugas Akhir:

1. Setiap titik hasil ekstraksi dari G-code CAM merepresentasikan posisi jalur pemotongan yang valid dan dapat dijadikan sebagai "kota" dalam pemodelan TSP.
2. Proses optimasi menggunakan *solver* LKH dianggap menghasilkan urutan lintasan terbaik secara jarak total (optimal secara matematis).

I.6 Sistematika Penulisan

Penyusunan tugas akhir ditulis dalam beberapa bab. Dalam pembagian bab berisi pemaparan dan keterangan aktivitas yang dilakukan dalam kajian. Penulisan dengan pembagian bab dilakukan agar pembahasan masalah dapat dipaparkan secara terstruktur dan memudahkan navigasi dan pemahaman pembaca.

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menyampaikan latar belakang kajian khususnya pada operasi *2D pocket milling*, dan potensi penggunaan algoritma Lin-Kernighan Helsgaun (LKH). Pada bab ini diuraikan rumusan masalah, tujuan dan manfaat kajian. Batasan dan asumsi kajian juga akan dirumuskan agar kajian tidak meluas.

BAB II LANDASAN TEORI

Studi literatur dan dasar teori mengenai proses *2D pocket milling*, strategi jalur pemotongan konvensional *Contour-parallel*, penyederhanaan kontur dengan RDP serta *Distance-Based* dan algoritma Lin-Kernighan Helsgaun diuraikan pada bab ini.

BAB III METODE PENYELESAIAN MASALAH

Bab tiga akan menjelaskan pendekatan metodologi kajian, metode PRT-GCAM (*Point Reduction and TSP using G-code from CAM*). tahapan-tahapan utama seperti ekstraksi titik dari G-code, proses penyederhanaan titik, optimasi urutan lintasan menggunakan solver LKH disampaikan pada bab ini.

BAB IV PENYELESAIAN PERMASALAHAN

Pada bab ini disampaikan proses teknis penyusunan lintasan pemotongan, seperti ekstraksi titik koordinat, penyederhanaan dengan metode *Distance-Based* dan RDP, hingga pembentukan lintasan optimal menggunakan *solver* TSP.

BAB V EVALUASI DAN VALIDASI

Evaluasi terhadap kinerja metode PRT-GCAM berdasarkan pengukuran waktu pemotongan dan jumlah *retract*, dari hasil simulasi dan pemotongan aktual. Juga mencakup analisis implementasi metode serta implikasi proses manufaktur.

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

Terakhir kesimpulan mengenai kelayakan metode optimasi jalur pemotongan PRT-GCAM. Saran juga disertakan untuk pengembangan kajian selanjutnya.