

Disain Sistem Manufaktur Manipulator Paralel 3-RRPaR

Manufacturing System Design of The 3-RRPaR Parallel Manipulator

Anrinal Anrinal^{1,*}, Redo Kurnia Illahi², Asmara Yanto¹

¹ Department of Mechanical Engineering, Institut Teknologi Padang

² Undergraduated Program of Mechanical Engineering, Institut Teknologi Padang
Jl. Gajah Mada Kandis Nanggalo, Padang, Indonesia

[doi.10.21063/jtm.2024.v14.i2.38-44](https://doi.org/10.21063/jtm.2024.v14.i2.38-44)

*Correspondence should be addressed to anrinal@itp.ac.id

Copyright © 2024 Anrinal, R.K. Illahi & A. Yanto. This is an open access article distributed under the [CC BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Article Information

Received:

August 3, 2024

Revised:

October 3, 2024

Accepted:

October 20, 2024

Published:

October 31, 2024

Abstract

This study aims to design a manufacturing system to produce the 3-RRPaR Parallel Manipulator Robot. The manufacturing system design includes Bill of Material (BOM), Operational Process Chart (OPC), Production Routing and Assembly Routing which will be used to calculate the Production Cost and Determination of the Selling Price. Some important components of the 3-RRPaR parallel manipulator include Box Controller, Actuator, Passive Link, Movable platform, Gripper and Frame. The manufacturing process of the 3-RRPaR parallel manipulator takes 33 working hours with a Production Cost of Rp 11.887.050,-.

Keywords: Parallel Manipulator Robot, Manufacturing System Design, Bill of Material, Operational Process Chart, Production Cost

1. Pendahuluan

Kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi yang berkembang pesat saat ini mulai mempengaruhi gaya hidup manusia. Kebutuhan manusia akan teknologi yang lebih modern dan praktis menjadi lebih meningkat, salah satunya adalah sistem pengendalian otomatis. Pekerjaan yang pada awalnya dilakukan secara manual, diupayakan agar dapat dikerjakan secara otomatis dengan penerapan komputer pada sistem pengendaliannya. Perpaduan antara komputer dengan peralatan mekanis, tentu akan menjadi dimensi baru yang diminati oleh banyak orang. Salah satu pekerjaan yang akan diterapkan sistem otomasi adalah memindahkan suatu bahan atau barang dari suatu tempat ke tempat lain.

Proses pemindahan yang dilakukan dalam jumlah yang banyak tentu saja sangat memungkinkan terjadi ketidaksesuaian dari tuntutan yang diinginkan. Beberapa pekerjaan

pemindahan yang membutuhkan waktu yang cepat salah satunya adalah memasukan biskuit atau makanan ringan ke dalam kotak pengemasan di dalam industri makanan. Pekerjaan tersebut membutuhkan proses pemindahan yang berulang-ulang dengan tuntutan jarak tertentu. Apabila dilakukan secara manual dengan tenaga manusia dalam jumlah yang banyak, maka manusia akan mengalami kelelahan dan ketika lelah maka konsentrasi dalam memindahkan makanan ringan tersebut tidak lagi sesuai dengan yang ditentukan dan makanan bisa mengalami kerusakan.

Robot industri adalah komponen utama dalam teknologi otomasi yang dapat berfungsi sebagai layaknya pekerja manusia di dalam pabrik, namun memiliki kemampuan bekerja secara terus menerus tanpa lelah. Salah satu robot yang sering digunakan di industri adalah robot manipulator. Hal ini dibuktikan dengan kenaikan penjualan robot industri sebesar 59%

yaitu 183.000 unit pada tahun 2016 untuk kawasan Asia saja. Contoh penggunaan robot manipulator terdapat pada proses pemindahan barang. Dalam melakukan tugas tersebut, robot manipulator memindahkan barang dari satu titik ke titik yang lain. Dalam melakukan perpindahan tersebut diperlukan sebuah metode untuk membuat robot bergerak ke posisi yang diinginkan. Kebutuhan tersebut membuat banyak penelitian mengenai pergerakan robot manipulator, Richard P. Paul telah berhasil menurunkan persamaan kinematika untuk setiap manipulator yang ditentukan dari posisi dalam koordinat Cartesian dan orientasi dari end effector yang diberikan dari koordinat masing-masing joint yang ada pada manipulator.

Kemudian Jin Huang pada tahun 2012 telah membuat simulasi untuk pergerakan joint pada manipulator menggunakan metode inverse kinematics yang lebih efisien dan akurat., namun belum diterapkan pada manipulator sesungguhnya. Pada tahun 2013, Yang Si menemukan solusi metode inverse kinematics pada robot manipulator 4 DOF (Degree of Freedom). Berdasarkan penelitian ini, untuk menyelesaikan permasalahan inverse kinematics tergantung dari struktur kinematika dari manipulator. Dengan begitu prosedurnya pun berasal dari seberapa panjang perubahan struktur manipulator. Penurunan metode inverse kinematics dapat diketahui setelah dilakukan analisa kinematika pada robot manipulator tersebut. Model kinematika didapatkan dengan menggambarkan geometri dari robot. Dari gambar geometri tersebut dapat ditemukan Denavit-Haternberg Parameter dan matriks transformasi homogenya. Setelah didapatkan hasil permodelan kinematika dari robot manipulator, maka dapat dihitung inverse kinematics dari robot manipulator tersebut. Metode inverse kinematics digunakan untuk menghitung sudut-sudut setiap joint pada manipulator dengan posisi end effector yang telah diketahui.

Robot manipulator merupakan robot dengan lengan yang memberikan gerakan robot untuk memutar, melipat, dan menjangkau objek. Gerakan ini disebut dengan Degree of Freedom (DoF) atau jumlah sumbu yang ada pada robot. Manipulator terdiri dari beberapa segment (link) dan sambungan (joint). Manipulator memiliki 2 bagian, yaitu bagian dasar (base) dan bagian tambahan. Bagian base manipulator bisa kaku (rigid bodies) terpasang pada lantai area kerja (workspace). Bagian tambahan merupakan perluasan dari bagian base, biasa disebut juga lengan (arm). Bagian ujungnya

terpasang efektor (end-effector) yang berfungsi sebagai tool yang akan melakukan suatu pekerjaan pada bagian ujung robot. Manipulator digerakan oleh aktuator (actuator) atau disebut sistem drive. Aktuator atau sistem drive menyebabkan gerakan yang bervariasi dari manipulator [1]. Robot manipulator disusun (assembly) dari serangkaian rigid bodies, link dan joint yang menjadi penghubung antar link. Setiap posisi joint ditentukan dengan variabel tunggal sehingga jumlah joint sama dengan nilai DoF [2].

Robot manipulator sangat bermanfaat dan pada era industri 4.0 dan banyak dipakai dalam bidang industri, terutama dalam bagian manufacturing dan packing dalam suatu pabrik. Selain untuk menghemat waktu, robot digunakan agar menghasilkan produk yang jauh lebih baik dari pada menggunakan mesin-mesin konvensional atau tangan manusia [3].

Sejalan dengan perkembangan teleoperators adalah pengembangan peralatan mesin Computer Numerically Controlled (CNC) untuk milling yang akurat untuk suku cadang pesawat bervolume rendah dan berperforma tinggi. Robot pertama “Unimate” pada Gambar 2.2, yang dikembangkan oleh George Devol pada tahun 1959, menggantikan manipulator master teleoperator dengan kemampuan program pengontrol alat mesin CNC [4].

Di era revolusi industri keempat, mekatronika dan robotika memainkan peran yang semakin penting. Dibandingkan dengan manipulator robot serial, manipulator robot paralel memiliki keuntungan akurasi yang lebih tinggi, karena kesalahan antara pin dikompensasi satu sama lain tanpa harus menumpuk disatu pin yang sama, massa link bergerak lebih ringan, stabilitas yang lebih baik. Meskipun kerugian dari robot paralel adalah bahwa ruang kerjanya lebih kecil dan memerlukan analisis singularitas yang lebih kompleks daripada robot serial, robot manipulator sering digunakan untuk tugas dengan kecepatan tinggi dan presisi tinggi [5].

Robot manipulator dengan satu lengan memiliki lengan yang dapat dianggap sebagai sebuah balok kantilever, dimana salah satu ujungnya dijepit dan ujung lainnya bebas. Teori yang terkenal dalam menurunkan model matematika untuk sebuah balok adalah Teori Euler-Bernoulli. Kemudian Rayleigh memperbaiki model Euler-Bernoulli ini dengan menambahkan efek inersia rotasional yang disebabkan oleh gerak rotasi dari cross-section selama terjadi getaran pada balok [6].

Sebuah robot industri terdiri dari manipulator robot, power supply, dan pengendali. Robot Manipulator terdiri dari beberapa sendi yang dihubungkan. Pergelangan digunakan untuk mengarahkan posisi benda di lokasi kerja. Robot manipulator diciptakan dari urutan link dan kombinasi bersama. Link adalah anggota kaku yang menghubungkan sendi. Sumbu adalah komponen bergerak dari robot manipulator yang menyebabkan gerakan relatif antara link sebelah. Sendi mekanis digunakan untuk membangun lengan manipulator robot. Sendi mekanis terdiri dari lima jenis utama yaitu dua dari sendi yang linear dan tiga jenis rotari. Dua dari sendi linier adalah gerakan relatif antara link yang berdekatan atau disebut dengan non-rotasi. Sedangkan tiga jenis rotari yaitu gerakan relatif yang melibatkan rotasi antara link [7].

Robot manipulator adalah bagian mekanik yang dapat difungsikan untuk memindah, mengangkat, dan memanipulasi benda kerja. Robot manipulator merupakan jenis robot lengan dengan material lengan pembawa beban. Robot manipulator dapat membawa beban dengan lokasi yang berpindah-pindah, berbahan material tipis, lebih ringan, lebih hemat dalam konsumsi daya, hanya memerlukan aktuator yang kecil, lebih mudah dioperasikan, serta lebih murah dalam proses manufacturing. Saat ini robot banyak digunakan di dunia industri seiring dengan perkembangan teknologi yang cepat dan produksi yang fleksibel. [8].

Robot paralel adalah struktur mekanik spasial yang terdiri dari rantai tertutup kinematik. Umumnya, manipulator paralel, memiliki dua platform. Salah satunya melekat pada bingkai referensi fix. Yang lain dapat memiliki gerakan sewenang-wenang di ruang kerjanya. Tiga kaki bergerak, dibuat sebagai robot serial, menghubungkan effector, yang melekat pada platform bergerak, ke platform tetap. Elemen-elemen robot terhubung satu sama lain oleh sendi bola, sendi revolute atau sendi prismatic [9].

Robot manipulator paralel adalah mekanisme loop tertutup dimana end-effector akhir terhubung dengan dua pangkalan rantai kinematik independen. Manipulator paralel penuh merupakan mekanisme loop tertutup dengan end-effector memiliki derajat kebebasan (Degree Of Freedom) yang terhubung ke basis rantai kinematik independen yang memiliki maksimal dua tautan yang digerakkan oleh aktuator prismatic [10].

Manipulator paralel adalah jenis robot yang terdiri dari platform bergerak, dasar dan dua atau lebih anggota badan. Seluruh sistem membentuk loop tertutup [11].

Robot serial merupakan robot yang memiliki struktur kinematiknya berbentuk rantai loop terbuka terdiri dari beberapa tautan yang dihubungkan secara seri oleh berbagai jenis sambungan, biasanya revolute dan prismatic. Salah satu ujung robot melekat pada ground dan ujung lainnya bebas bergerak di ruang angkasa. Tautan tetap disebut alas, dan ujung bebas tempat gripper atau tangan mekanis terpasang, efektor ujung robot manipulator serial [12].

Manipulator paralel 3-RRPaR berbasis arduino uno adalah robot yang lengan-lengannya memiliki sambungan (*joint*) prismatic (translasi) dan putar (rotasi) yang bergerak bersamaan. Aktuator pada paralel manipulator 3-RRPaR diletakkan pada basis sehingga terdapat sambungan pada basis saja yang bergerak secara aktif. Alat ini menggunakan motor stepper sebagai sumber penggerak nya. dimana mekanik akan bergerak sesuai dengan file yang dikirimkan melalui mikrokontroler Arduino Uno ke Driver motor L293D dan motor stepper. Agar menjadi sebuah robot manipulator paralel 3-RRPaR diperlukan proses Perancangan dan Analisis Struktur Manipulator Paralel 3-RRPaR, analisis gerak dan perancangan sistem kontrol manipulator paralel 3-RRPaR, analisis performa manipulator paralel 3-RRPaR dan desain sistem manufaktur manipulator paralel 3-RRPaR.

Robot paralel memiliki keunggulan untuk banyak aplikasi di bidang robotika, seperti rigiditas, kecepatan, gerak rendah massa dan akurasi yang superior. Namun, kelemahan utama dari robot paralel adalah ruang kerjanya yang kecil dan kemampuan manipulasinya yang terbatas di area tertentu di ruang tersebut.

Beberapa inisiatif penelitian yang dilakukan dalam domain ini, terutama yang dilakukan oleh Clavel, telah menghasilkan arsitektur inovatif seperti robot DELTA yang terkenal.

Robot DELTA telah menarik banyak perhatian baik di dunia akademis maupun industri. Literatur berisi banyak informasi tentang sejarah dan jenis robot paralel. Secara umum, robot DELTA terdiri dari alas segitiga sama sisi, dengan satu lengan (digerakkan melalui sambungan revolute) yang memanjang dari setiap sisi. Pelat kecil berbentuk segitiga dihubungkan ke setiap lengan oleh sepasang lengan bawah berbentuk jajaran genjang. Hasilnya adalah tiga derajat kebebasan translasi,

dengan satu derajat kebebasan rotasi tambahan yang tidak digabungkan pada end-effector, menghasilkan satu motor yang dipasang ke alas dan dihubungkan ke end effector oleh lengan teleskopik dengan dua sambungan universal [13].

Robot industri paralel delta adalah jenis robot koneksi paralel. Karena strukturnya yang kompak, beban kaku yang besar, dan kesalahan sambungan yang lebih sedikit, ini adalah salah satu robot yang paling banyak digunakan. Di dalam struktur mekanisnya, platform tetap, tiga tautan input, dan platform bergerak dihubungkan bersama oleh tiga tautan yang terdiri dari empat tautan paralel. Karena tautan atas sejajar dengan tautan bawah dalam empat tautan paralel, platform yang bergerak selalu sejajar dengan platform tetap, yang diamankan oleh tiga tautan paralel. Ini memberikan kemampuan gerakan tiga derajat kebebasan (3DOF) dalam area yang telah ditentukan, dengan bantuan struktur mekanisnya yang unik. Karena arsitektur paralel, tidak ada simpangan kumulatif pada sumbu manapun [14].

Manipulator paralel 3-RRPaR berbasis arduino uno adalah robot yang lengan-lengannya memiliki sambungan (*joint*) prismatic (translasi) dan putar (rotasi) yang bergerak bersamaan. Aktuator pada paralel manipulator 3-RRPaR diletakkan pada basis sehingga terdapat sambungan pada basis saja yang bergerak secara aktif. Alat ini menggunakan motor stepper sebagai sumber penggerak nya. dimana mekanik akan bergerak sesuai dengan file yang dikirimkan melalui mikrokontroler Arduino Uno ke Driver motor L293D dan motor stepper. Agar menjadi sebuah robot manipulator paralel 3-RRPaR diperlukan proses Perancangan dan Analisis Struktur Manipulator Paralel 3-RRPaR, analisis gerak dan perancangan sistem kontrol manipulator paralel 3-RRPaR, analisis performa manipulator paralel 3-RRPaR dan desain sistem manufaktur manipulator paralel 3-RRPaR. [15].

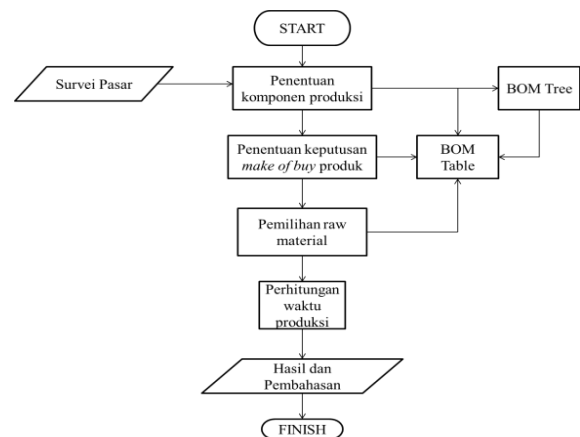
2. Metode

Pada penelitian ini, rancangan *Manipulator Paralel 3-RRPaR* dapat dilihat seperti pada Gambar 1. Manipulator Paralel 3-RRPaR digerakkan dengan motor stepper yang terhubung dengan poros, gerakan ini terjadi setelah pengimputan data dari komputer kepada alat berupa kode G-Code menggunakan aplikasi *Univerval G-Code Sender*.

Proses desain sistem manufaktur sebuah Manipulator Paralel 3-RRPaR dilakukan melalui tahapan proses seperti pada Gambar 2.



Gambar 1. Rancangan Manipulator Paralel 3-RRPaR



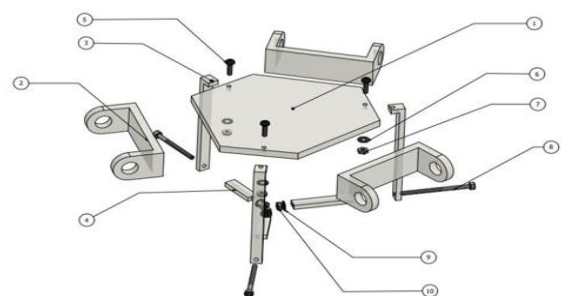
Gambar 2. Diagram alir tahapan proses penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

Proses desain sistem manufaktur sebuah Manipulator Paralel 3-RRPaR meliputi proses produksi dan pembelian komponen, selanjutnya dilakukan proses assembly beberapa Sub-Assembly berikut ini:

Unit Moveble Platform

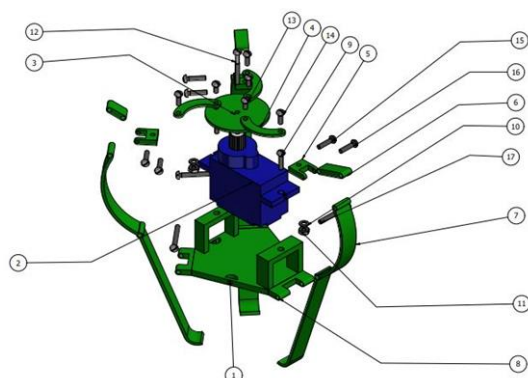
Hasil pembuatan dan perancangan moveble platform beserta komponen-komponen penyusunnya sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Sub-Assembly Moveble Platform

Unit Greeper

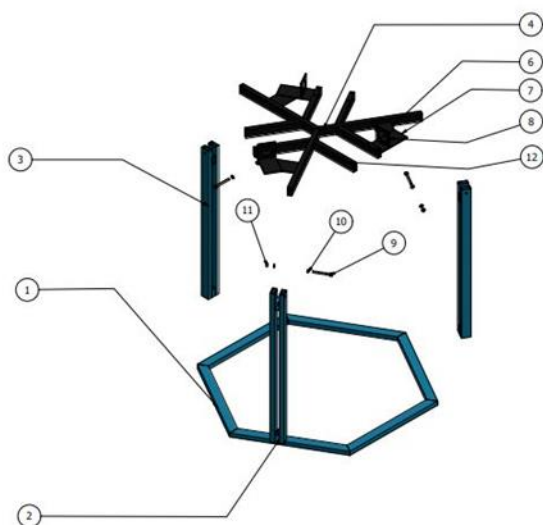
Hasil pembuatan dan perancangan greeper beserta komponen-komponen penyusunnya diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Greeper dan komponen penyusunnya

Unit Rangka

Hasil pembuatan dan perancangan rangka beserta komponen-komponen penyusunnya diperlihatkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Assembly Rangka

Unit Box Controller

Hasil rancangan *box controller* beserta komponen penyusunnya diperlihatkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Assembly Box Controller

Tabel 1. Spesifikasi komponen penyusun Box controller

No	Nama Komponen	Jumlah	Spesifikasi
1	Box controller	1	Plastic polimer transparan
2	Saklar power	1	220V
3	Ardiuno	1	lampiran
4	Kipas pendingin	1	plastic
5	Kepala usb betina	4	Stainless Steel
6	Power supply	3	12 volt
7	Driver controller	3	lampiran
8	Kepala usb jantan	4	Stainless steel
9	Kabel warna	1	-
10	Pembungkus kabel	1	Plastic

Tabel 2 Assembly routing Box Controller

Jenis Assembly	Mesin / Tools	Waktu Assembly
Pemasangan akrilik menggunakan lem super dan papan sebagai lantai menggunakan sekrup	Obeng	30 menit
Pemasangan saklar power ke akrilik bagian depan	Tang	25 menit
Pemasangan laser <i>Controller</i> dan ardiuno ke akrilik bagian kanan	Obeng	30 menit
Pemasangan kipas pendingin ke akrilik bagian belakang	Obeng	25 menit
Pemasangan kepala usb betina ke akrilik bagian kiri	Obeng	30 menit
Pemasangan power supply dan driver <i>controller</i> ke papan	Obeng	30 menit
Pemasangan kepala usb jantan ke kabel warna menggunakan solder	Solder	60 menit
Pembungkusan kabel	-	25 menit

Assembly Routing

Spesifikasi komponen penyusun dan hasil assembly routing untuk *Box Controller* masing-masing dapat dilihat pada Table 1 dan Tabel 2, Assembly routing greeper dapat dilihat pada Tabel 3, assembly routing untuk movable platform dapat dilihat pada Tabel 4 dan assembly routing aktuatur dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 3. Assembly routing unit Y-Axis

Jenis Assembly	Mesin/Tools	Waktu Assembly
Assembly masing-masing komponen secara berurutan	Obeng(+)	25 menit
Assembly masing-masing komponen	Obeng(+)	30 menit
Assembly pengelasan masing-masing komponen	Obeng(+)	30 menit
Pemasangan komponen antara rangka vertikal dengan rangka atas menggunakan baut dan mur	Kunci dan obeng	25 menit
Assembly gripper ke rangka menggunakan ring, mur dan baut	Kunci dan obeng	20 menit
Assembly movable platform ke gripper menggunakan ring, mur dan baut	Kunci dan obeng	25 menit
Assembly link pasif ke movable platform menggunakan ring, mur dan baut	Kunci dan obeng	15 menit
Assembly aktuator ke link pasif menggunakan ring, mur dan baut	Kunci dan obeng	20 menit
Assembly kabel ke box control ke aktuator dan komponen penyusunnya	-	25 menit

Tabel 4. Assembly routing unit movable platform

Jenis Assembly	Mesin/Tools	Waktu Assembly
Assembly pengelasan movable platform ke kedudukan spherical joint link pasif	Mesin Las	20 menit
Pemasangan rel linear shaft ke holder bracket dan lead screw ke bearing pillow block menggunakan baut L	Obeng	30 menit

Tabel 5. Assembly routing unit Aktuator

Jenis Assembly	Mesin/Tools	Waktu Assembly
Assembly pengelasan masing-masing komponen	Kunci L, ring 10, obeng,	20 menit
Pemasangan tiap-tiap komponen ke poros motor	Kunci L	30 menit

Dari data tabel produksi manipulator paralel 3-RRPaR diperlukan waktu total 1.075 menit,

untuk komponen penting seperti Box Controller, Aktuator, Link pasif, Movable platform, gripper dan rangka diperlukan waktu total 880 menit.

Optimized Production Cost

Setelah semua biaya dihitung dan dibuatkan rekapitulasi biaya yang dibutuhkan untuk pembuatan sebuah Manipulator Paralel 3-RRPaR yang dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Biaya pembuatan sebuah Manipulator Paralel 3-RRPaR

No	Jenis Pengeluaran	Jumlah Biaya (Rp)
1	Biaya Pembelian Bahan	9.887.050
2	Biaya Sewa Alat	330.000
3	Biaya produksi	120.000
4	Biaya assembly	1.150.000
Total Biaya		11.487.050

Total biaya pembuatan Manipulator Paralel 3-RRPaR didapatkan sebesar Rp 11.887.050,-

4. Simpulan

Berdasarkan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa perhitungan Bill of material (BOM) untuk pembuatan komponen dan pembelian komponen diperlukan membutuhkan biaya sebesar Rp 9.887.050,- (83,17%).

Waktu yang dibutuhkan dalam proses produksi per-komponen berdasarkan *operation process chart* dengan total waktu 1.075 menit atau 18 jam kerja. sedangkan penggunaan waktu untuk proses perakitan komponen berdasarkan *assembly routing* dengan total waktu 880 menit atau 15 jam kerja. Jadi waktu yang digunakan untuk proses produksi manipulator paralel 3-RRPaR ini dapat diselesaikan dalam waktu 33 jam kerja. Total biaya yang dibutuhkan untuk pembuatan sebuah Manipulator Paralel 3-RRPaR sebesar Rp 11.887.050,-

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih diucapkan kepada seluruh Staf Teknik Mesin Institut Teknologi Padang yang telah memberikan kontribusi sehingga artikel ini dapat diselesaikan.

Referensi

- [1] Anshori, D. Y. (2017). Pengendalian Posisi Sudut Joint Robot Manipulator 4 DOF (Degree of Freedom). Institut <http://repository.its.ac.id/47947/>
- [2] Utomo, B., & Munadi. (2013). Analisa Forward dan Inverse Kinematics pada Simulator Arm Robot 5 Derajat Kebebasan. 1(3), 11–20.
- [3] Wibowo, A. (2020). Prototipe Robot Manipulator Sendi Lengan (Joint-Arm) Berbasis 29 Arduino Uno Pada Sistem Pemilah Barang. In Laporan Penelitian Mandiri. <http://repository.unas.ac.id/883/>
- [4] Murray, R. M., Li, Z., & Shankar Sastry, S. (2017). A mathematical introduction to robotic manipulation. In *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. <https://doi.org/10.1201/9781315136370>
- [5] Hoang, N. Q., Boudon, B., BAE, H.-J., DANG, T. T., & Bouzgarrou, C. (2022). Modeling of parallel manipulators with flexible links and joints driven by electric actuators. *Vietnam Journal of Mechanics*, 44(4), 474–489. <https://doi.org/10.15625/0866-7136/17944>
- [6] Dermawan, Sultan, A. Z., & Muhammad, A. K. (2009). Uji Getaran Robot Manipulator Yang Bergerak Translasi Dan Rotasi. 2000, 279–286.
- [7] Alfianto, M. A., Sugandi, B., & Toar, H. (2017). Kendali lengan robot manipulator menggunakan kamera stereo. *Journal of applied electrical engineering*, 1–6.
- [8] Alici, G., & Shirinzadeh, B. (2005). A systematic technique to estimate positioning errors for robot accuracy improvement using laser interferometry based sensing. *Mechanism and Machine Theory*, 40(8), 879–906.
- [9] Staicu, S., & Carp-Ciocordia, D. C. (2003). Dynamic analysis of Clavel's delta parallel robot. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3(May), 4116–4121. <https://doi.org/10.1109/robot.2003.1242230>
- [10] Merlet, J. P. (1993). Parallel manipulators: state of the art and perspectives. *Advanced Robotics*, 8(6), 589–596. <https://doi.org/10.1163/156855394X00275>
- [11] Zhang, D., & Wei, B. (2017). Modelling and optimisation of a 4-DOF hybrid robotic manipulator. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 30(11), 1179–1189. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2017.1305505>
- [12] Pandilov, Z., & Dukovski, V. (2014). Comparison of the Characteristics Between Serial and Parallel Robots. *Fascicule*, 1, 2067–3809.
- [13] Lin, Jonqlan, Ci-Huang Luo, and Kao-Hui Lin. "Design and implementation of a new delta parallel robot in robotics competitions." *International Journal of Advanced Robotic Systems* 12.10 (2015): 153.
- [14] Gürgen, Mert, Cenk Eryılmaz, and Vasfi Emre Ömürlü. "Parametric design of delta robot." *CBU International Conference Proceedings*. Vol. 4. 2016.
- [15] Jorge E. Correa, Joseph Toombs, Nicholas Toombs, Placid M. Ferreira, 2016. *Design and fabrication of a flexure-based Delta robot.*:1-6