

# Analisis Kinematik dan Statika dari Gerak Jari Prostetik dengan Mekanisme Rack and Pinion

<sup>1\*</sup> Bagus M. Arthaya, <sup>1</sup> Faisal Wahab, <sup>1</sup> Christian F. Naa, <sup>2</sup> Ari Setiawan, <sup>3</sup> G.R. Prasetyo, <sup>3</sup> J.E. Mulyadi

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Elektro Kons. Mekatronika, Unpar, Bandung

<sup>2</sup> Program Studi Teknik Industri, ITHB, Bandung

<sup>3</sup> Pusat Studi CeCASE, Unpar, Bandung

<sup>1,3</sup> bagusart@unpar.ac.id, <sup>1,3</sup> faisal@unpar.ac.id, <sup>1,3</sup> christian.fredy@unpar.ac.id, <sup>2</sup> ariset@ithb.ac.id,

<sup>1</sup> 6152301006@student.unpar.ac.id, <sup>1</sup> 6152301010@student.unpar.ac.id

## Article Info

### Keyword:

Tangan prostetik  
Rancangan mekanik  
Mekanisme rack and pinion  
Relasi gerak rotasi-translasi  
Pola gerak jari

Copyright © 2025 -SNTE  
All rights reserved

## ABSTRACT

Abstrak—Anak-anak yang lahir sebagai anak penyandang disabilitas, terutama lahir tanpa tangan, akan merasakan banyak sekali kesulitan untuk melakukan kegiatan sehari-hari di tahap awal masa belajar dalam kehidupan mereka. Oleh karena itu, alat bantu tangan prostetik yang dibahas dalam artikel akan dapat membantu mereka bekerja seperti layaknya orang biasa. Tangan prostetik dibuat dengan bentuk yang lebih sederhana dari tangan manusia umumnya. Pergerakan rotasi antar engsel ruas jari dibangkitkan dengan mekanisme *rack and pinion* dengan tujuan untuk mendapatkan kekakuan rakitan yang baik. Konfigurasi jari-jari tangan diatur sedemikian rupa agar ruang genggam/jepit yang terbentuk memiliki volume sebesar mungkin. Perhitungan matematis dilakukan untuk mengetahui semua gaya yang bekerja pada setiap sambungan ruas jadi, gaya di dalam seluruh batang serta kapasitas motor penggerak yang digunakan pada mekanisme di atas. Sejumlah perhitungan beban disajikan dalam artikel ini dan sekaligus analisis beban aktual beserta defleksi maksimum yang terjadi pada setiap ruas tangan prostetik. Hasil pengujian/perhitungan menunjukkan bahwa rancangan tangan jari-jari dari tangan prostetik ini memiliki kekuatan yang baik dan tidak menunjukkan defleksi batang yang dapat merugikan kekakuan rancangan.

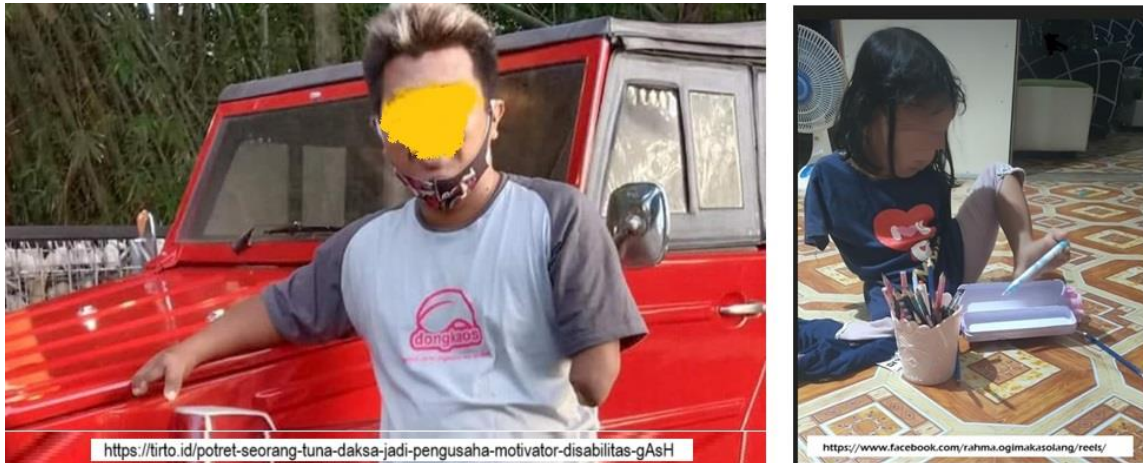
### Corresponding Author:

Bagus M. Arthaya,  
Program Teknik Mekatronika, Universitas Parahyangan, Bandung,  
Jl. Ciumbuleuit 94, Bandung, 40141.  
Email: bagusrt@unpar.ac.id

## I. PENDAHULUAN

Seseorang yang terlahir sebagai manusia normal akan sungguh bersyukur karena dapat melakukan aktivitas fisik secara sempurna karena memiliki anggota tubuh yang lengkap dan sempurna. Akan tetapi, anak-anak yang lahir sebagai anak penyandang disabilitas, terutama lahir tanpa tangan, akan merasakan banyak sekali kesulitan untuk melakukan kegiatan sehari-hari di tahap awal masa belajar dalam kehidupan mereka seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Berdasarkan data Susenas 2020 (BPS 2020), jumlah penduduk penyandang disabilitas di Indonesia diperkirakan mencapai 22,97 juta jiwa yang tersebar di seluruh wilayah Indonesia. Dari angka tersebut, sebanyak 6,12 juta jiwa tergolong sebagai penyandang disabilitas kategori berat, dengan rincian 1,2 juta disabilitas fisik, 3,07 juta disabilitas sensorik, 149 ribu disabilitas mental, 1,7 juta penyandang disabilitas intelektual dan sisanya yang lain [1]. Bagi mereka yang kehilangan anggota tubuh, akan mengalami kesulitan dalam menjalankan aktivitas sehari-hari, khususnya yang berhubungan

dengan kegiatan produksi. Oleh karena itu, alat bantu berupa tangan/ lengan prostetik akan dapat membantu mereka bekerja seperti layaknya orang biasa. Saat ini, terdapat beberapa perangkat bantu yang tersedia secara komersial untuk membantu penyandang disabilitas menjalankan pekerjaannya, seperti prostetik anggota tubuh bagian atas, prostetik bagian bawah, dan sebagainya [2,3,4].



Gbr. 1 Kondisi tangan dari dua orang penyandang disabilitas yang selayaknya memerlukan bantuan lengan/tangan prostetik [5, 6]

Tujuan utama dari artikel ini adalah menganalisis rancangan satu bentuk jari prostetik dari aspek kinematik dan statika saja. Kajian ini sangat diperlukan pada perancangan produk mekatronika cerdas, dimana aspek gaya dan moment/torsi yang selanjutnya berubah menjadi tegangan sangat sedikit mendapatkan perhatian, padahal topik ini sangat krusial untuk menghasilkan produk mekatronika yang kuat, kokoh dan handal. Secara detail kajian ini mengkhususkan pada perancangan fisik tangan prostetik, terutama rancangan detail jari dengan memanfaatkan penggerak *rack-and-pinion* sebagai alternatif solusi dari rancangan *in-house* sebelumnya [7,8] maupun rancangan tangan lainnya. Langkah untuk mewujudkan benda fisik rancangan tangan prostetik ini adalah teknik printing 3-D sebagai media pendukung penelitian ini. Pada akhirnya rancangan ini diharapkan memiliki aspek mudah dibuat, mampu melakukan fungsi-fungsi dasar gerakan jari, mudah dirakit dan pada ujungnya nanti dapat digerakkan berdasarkan sinyal perintah gerak dari otot lengan pengguna.

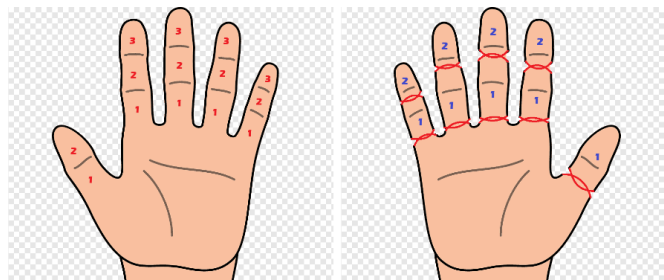
Berbeda dengan rancangan jari-jari prostetik pada umumnya yang memodelkan 3-segmen di setiap ruas 4-jari utama dan 2-segmen pada ibu jari [9,10,11,12] yang dapat menunjukkan pola gerak jari-jari dengan baik, pada rancangan ini setiap jari akan dirancang berbeda agar memiliki 2-derajat kebebasan (*2-DoF, Degree of Freedom*) sementara ibu jari disederhanakan hanya berupa segmen dengan 1-derajat kebebasan. Setiap ruas jari, digerakkan dengan aktuator berupa sebuah motor servo (*stepper*) dan dapat bergerak independen terhadap ruas-ruas jari lainnya. Setiap satuan jari dapat melakukan gerakan fleksi dan ekstensi hingga batas-batas tertentu. Tangan prostetik ini dirancang dengan menempatkan 4 buah jari pada bidang rata telapak tangan dan sebuah ibu jari pada bidang yang bersudut  $45^{\circ}$  pada bidang telapak tangan dan  $75^{\circ}$  dari padangan atas tangan. Posisi dan orientasi semua jari-jari yang ada diyakini cukup baik untuk menghasilkan ruang genggam yang cukup besar. Tujuan lain dari penelitian ini adalah untuk membantu seseorang yang terlahir tanpa tangan (akibat amputasi) agar dapat memiliki tangan prostetik yang dapat dipasang pada anggota tubuh yang hilang sehingga tangan dapat melakukan berbagai fungsi layaknya tangan asli manusia, sehingga aspek kebahagiaan memiliki "tangan" akan menjadi hasil ikutan dari rancang bangun produk pendukung ini.

Aktuator yang terpasang pada ruas jari bertugas untuk menghasilkan gerakan rotasi dari setiap segmen jari dimana kombinasi gerakan dari setiap segmen jari akan membentuk pola gerak dari ujung jari. Kurva gerak yang dihasilkan pada tingkatan tertentu dapat diprediksi dan dikelola oleh pengendali tangan prostetik. Pola gerak ini juga nantinya akan terbatas karena adanya konstrain gerak dari segmen akibat berbagai halangan struktur yang mungkin muncul selanjutnya. Pola-pola gerak jari tangan yang akan dirancang misalnya konfigurasi memegang, mencengkram, membuka/menutup tangan, serta konfigurasi umum tangan lainnya. Kinerja sistem gerak jari-jari ini ditunjukkan melalui keberhasilan mencapai pola gerak dan tekanan yang

ditentukan pada ujung jari yang diinginkan. Luaran yang ditargetkan adalah suatu model jari prostetik pada skala laboratorium, yang dapat melakukan gerakan jari melengkung, setidaknya satu pola lintasan jari pada gerak fleksi dan ekstensi.

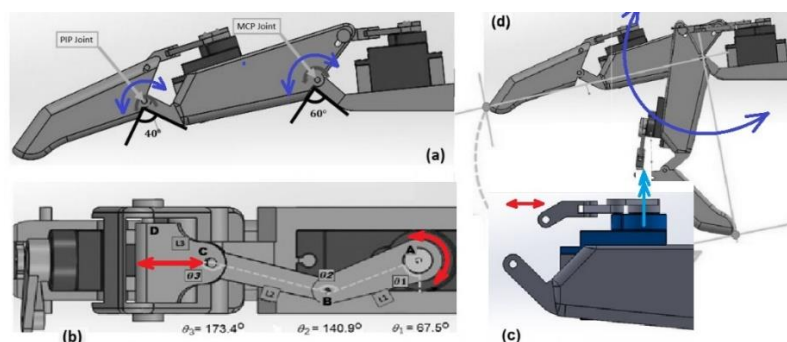
## II. RANCANGAN TANGAN PROSTETIK

Konsep pembentukan model jari dari suatu tangan prostetik dimulai dengan membuat bentuk model dari 4-jari utama dan 1-ibu jari. Dibandingkan dengan tangan sempurna, model tangan prostetik ini hanya akan memiliki 9-ruas engsel untuk dapat melakukan gerakan dasar tangan, seperti memegang benda dan lain-lain (Gambar 2). Strategi paling mudah untuk merancang tangan prostetik ini adalah dengan memastikan semua ruas jari memiliki bentuk dan mekanisme gerak yang sama. Hal yang dibedakan adalah semua ruang yang bernomor dua (2) dibuat dengan dimensi panjang sedikit lebih kecil sehingga proporsionalitas ukuran jari menjadi lebih mamadai. Mekanisme gerak antar ruas segmen juga dikembangkan berdasar keseragaman tadi.



Gbr. 2 Perbandingan jumlah ruas jari yang terdapat pada tangan alami dan kondisi ruas jari yang dikurangi per jari tangan, menjadi hanya 9 ruas [13]

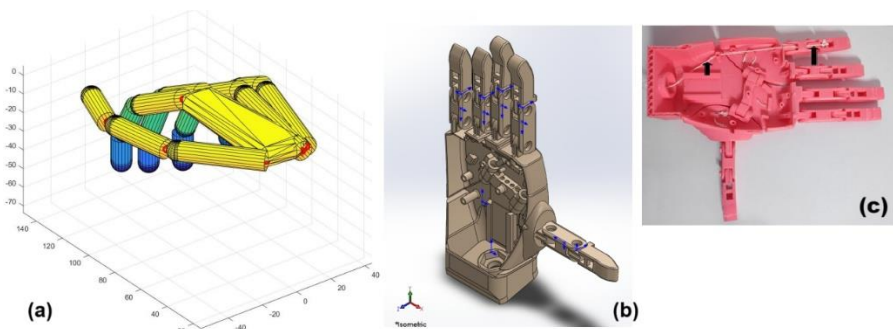
Arthaya dan Ivan [7] berhasil merancang suatu model tangan prostetik dengan konsep yang sama. Konsep pergerakan rotasi dari setiap ruas segmen memanfaatkan sistem *slider-crank mechanism*. Gerak awal diberikan oleh sebuah aktuator (motor stepper) dan kemudian gerak rotasi ini diubah menjadi gerak linear, yang mendorong slider kedepan, sekaligus menekan ujung atas ruas di depannya. Secara skematik, gerakan sistem *slider-crank* ini disajikan pada Gambar 3. Bidang gerak dari *slider-crank* berada pada suatu bidang horizontal sejajar dengan bidang putar tuas pendorong pada aktuator (Gambar 3, (b) dan (c)). Gerakan pada bidang yang mengambang di atas bidang tumpuan (bidang dasar), menyebabkan gerakan ini menjadi sangat mudah terganggu dan rentan terhadap kegagalan dan kerusakan komponen yang dipasang. Dari hasil penelitian ini, muncul ide baru untuk memperbaiki kelemahan dari rancangan ini.



Gbr. 3 Konfigurasi ruas-ruas jari yang dihasilkan pada penelitian [7] yang digerakkan dengan mekanisme *slider crank* dan rentang sudut sapuan yang dihasilkan

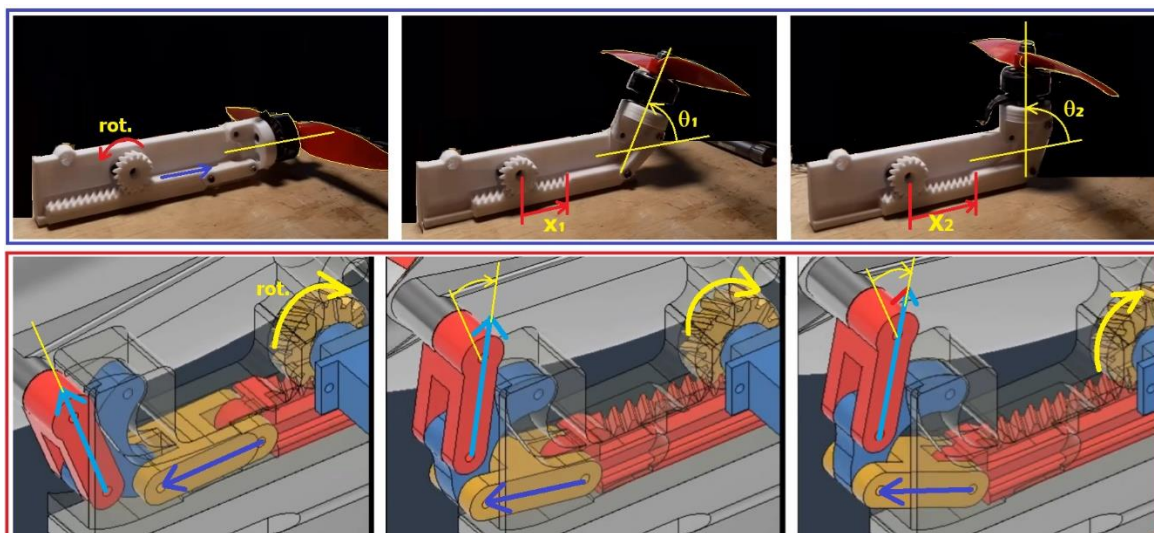
Sementara itu, Hernando et.al. [8] juga berhasil mengembangkan suatu model tangan prostetik yang diawali dengan kajian kinematika tangan manusia secara utuh (Gambar 3a). Setelah mendapatkan model matematis kinematika tangan, maka dilakukan simulasi gerak pada perangkat lunak Matlab. Selanjutnya model kinematik tangan tersebut direalisasi dengan teknik pencetakan 3D (Gambar 3b) dan dirakit dengan sangat baik. Sistem perengselan yang dihasilkan pada teknik cetak ini sangat sempurna dan ukuran tangan sangat mendekati dimensi tangan pada umumnya. Untuk menggerakkan setiap ruas jari tangan, lima (5) buah

motor stepper servo digunakan untuk menggulung benang yang terikat pada ujung jari tangan (Gambar 3c). Penggulungan benang ini menghasilkan gerak fleksi jari-jari sementara gerakan balik setiap ruas dilakukan oleh pegas tarik. Keunggulan dari rancangan ini adalah kemudahan perakitan dan pemasangan sistem gerak yang hanya menggunakan benang/tali yang diikatkan pada motor penggerak ke ujung jari. Kelemahan dari rancangan ini adalah ketidak-sederhaan gerak balik pada saat jari dilepaskan dari kondisi ditarik/teregang dibandingkan dengan memanfaatkan motor servo sebagai penggerak utama. Penerapan motor servo memungkinkan jari bebas bergerak hingga posisi sudut ruas manapun (dalam rentang fleksi dan ekstensi).



Gbr. 4 Rancangan tangan prostetik dengan ruas-ruas jari yang seutuhnya meniru tangan manusia [8]

Rancangan jari prostetik pada penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kinerja dan kualitas konstruksi dari dua penelitian yang telah kami laksanakan di Lab. Proyek Mekatronika Unpar. Perbaikan rancangan pertama adalah meniadakan mekanisme *slider-crank* yang cenderung ringkih (tidak rigid) dalam menghasilkan gerakan putar ruas jari di depannya. Strategi yang dipandang lebih kokoh adalah mekanisme *rack-pinion* karena struktur ini memiliki bangun struktur yang kokoh. Gerak linier yang dihasilkan pada *rack* merupakan konversi gerak rotasi *pinion* atau motor penggerak. Gerakan linier dari *rack* ini akan menghasilkan gerakan rotasi dari ruas jari di depannya dengan menerapkan satu batang penghubung (*connecting rod*). Berbagai contoh pemanfaatan mekanisme *rack-pinion* disajikan pada Gambar 5, dimana rigiditas dari dari mekanisme ini terlihat lebih baik untuk berbagai rancangan produk industri.



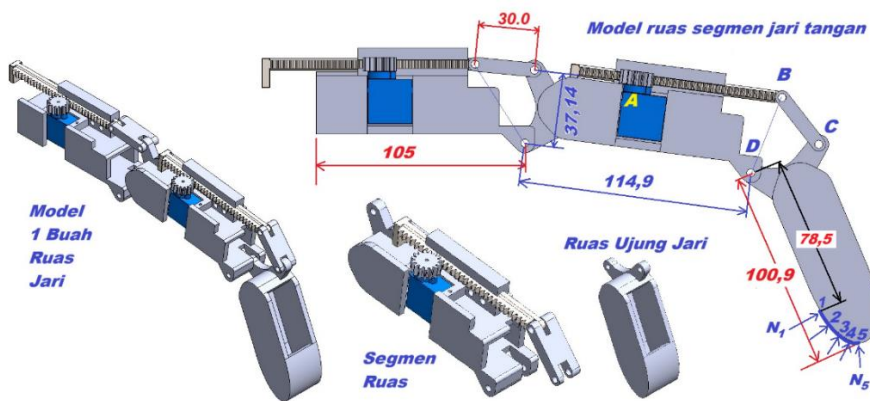
Gbr. 5 Contoh 2 buah rancangan mekanisme *rack-pinion* sebagai rujukan kerja [14]

Gerakan rotasi pada ruas yang diinginkan akan secara pasti dan tegas dihasilkan pada sumbu putar ruas jari di depan ruas jari penggerak. Batang penghubung (*connecting rod*) memastikan gerakan linear *rack* akan diubah menjadi gerakan rotasi. Perbandingan antara sudut putar pinion, panjang lintasan *rack* dengan putaran sumbu ruas ditentukan secara matematis oleh dimensi semua komponen yang terlibat, antara lain adalah

ukuran *pitch* dari *pinion* dan *rack*, serta panjang *connecting rod*. Dengan kata lain relasi gerak rotasi-translasi akan sangat penting dalam rangka menghasilkan gerakan di ujung rangkaian rakitan jari-jari.

A. Rancangan Kinematika Jari

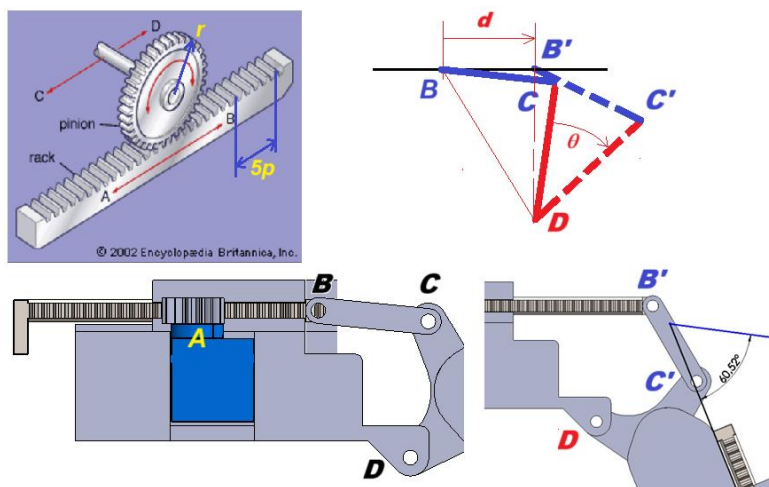
Untuk rancangan tangan prostetik kali ini, sebuah jari tangan dibentuk dari 2 ruas (seperti pada Gambar 2) kecuali untuk ibu jari. Masing masing jari memiliki bentuk dan dimensi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6). Batang sebuah jari hanya terdiri dari 2-segmen saja, dan dihubungkan dengan sambungan engsel. Dimensi dari setiap ruas dan sudut putarnya akan digunakan untuk menghitung gaya-gaya pada engsel akibat dari gaya tekan yang muncul pada ujung jari tangan. Disamping gaya engsel, selanjutnya berbagai gaya dalam berupa tegangan normal dan geser di dalam batang struktur dapat dihitung dengan cermat. Saat tangan mencengkram atau memegang benda dengan erat, diketahui bahwa gaya tekan yang muncul pada ujung jari bernilai sekitar 40-80 N [15] berupa gaya normal dengan rentang posisi dari  $N_1$  hingga  $N_5$ .



Gbr. 6 Konstruksi ruas-ruas pada satu jari dari telapak tangan hingga ujung jari

Dari data-data kinematik di atas, maka dapat dihitung pergerakan sudut ruas jari di depan unit penggerak pada gambar rancangan jari yang telah dibuat seperti ditunjukkan Gambar 7, yakni sudut  $\theta$ . Dari paket *rack-pinion* yang digunakan pada rancangan ini didapat data teknis sebagai berikut:

1. Radius pinion : 15 mm
2. Jumlah gigi : 15
3. Jarak *pitch* : 3,14 mm
4. Putaran *pinion* :  $180^\circ$
5. Pergerakan *rack* yang dihasilkan:  $(180/360) * 15 * 3.14 = 23,55$  mm



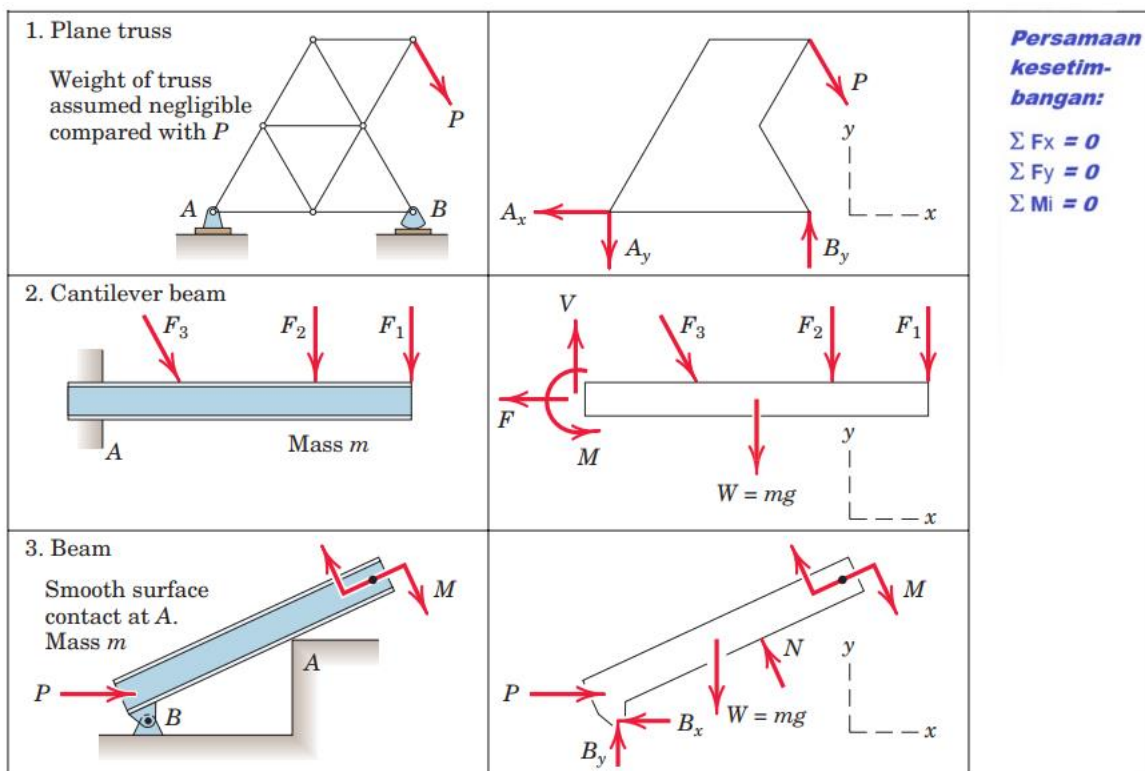
Gbr. 7 Konstruksi sambungan ruas jari dengan sistem penggerak *rack and pinion* [16]

Dengan gerakan linier *rack* sebesar 23,55 mm, terjadilah gerakan rotasi batang CD sebesar sudut  $\theta = 60,52^\circ$ . Dari dua ruas jari yang akan digerakkan pada 1 buah jari, maka didapat total sudut rotasi batang jari sebesar  $121^\circ$  terhadap titik awal pada telapak tangan. Kemampuan mengubah konfigurasi tekukan jari ini akan menyesuaikan dengan bentuk ruang benda yang akan/sedang digenggam/dipegang.

Dalam kajian kinematik ini, konfigurasi jari-jari saat mencekam/memegang benda diasumsikan terjadi pada saat setiap ruas jari telah melakukan gerak rotasi maksimum yakni sebesar  $60,52^\circ$ . Berdasarkan besar sudut rotasi ini dan dimensi ruas yang telah diketahui maka gaya engsel/tumpuan pada setiap sambungan dapat ditentukan dengan konsep dasar Statika. Kelengkapan semua gaya tumpuan pada batang, dapat digunakan untuk menghitung gaya dalam pada ruas batang, seperti gaya aksial, gaya normal dan gaya geser. Semua gaya dalam ini akhirnya direpresentasikan dalam bentuk tegangan normal dan geser. Kedua nilai tegangan inilah yang akan menentukan ketangguhan struktur terhadap beban yang harus ditanggung. Disamping itu, seorang perancang dapat menentukan faktor keamanan yang layak diberikan pada rancangan agar tetap tangguh menanggung beban yang mungkin terjadi.

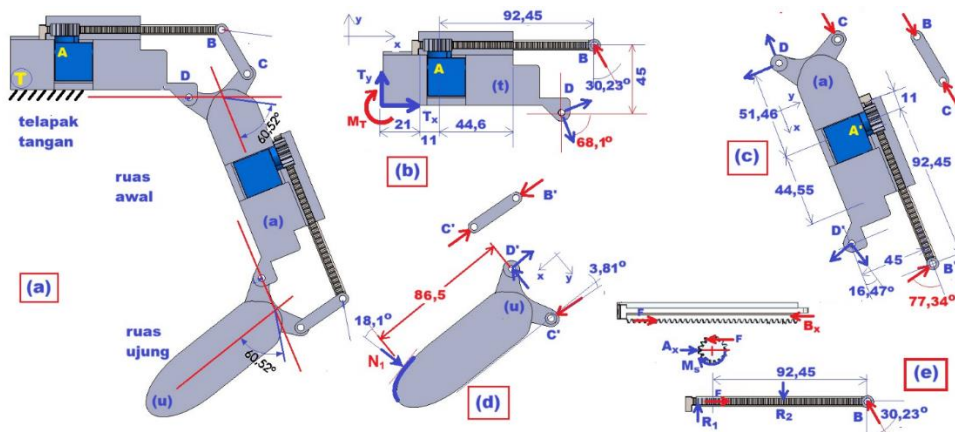
**B. Model Statika Pembebanan Jari dan Gaya Aksi-reaksi**

Perhitungan beban yang bekerja pada setiap bagian ruas jari dimulai dengan membuat Diagram Benda Bebas (DBB), berdasarkan konsep dasar statika yang umum digunakan. Pada Gambar 8 disajikan gambar DBB beberapa struktur baku/dasar dengan semua jenis tumpuannya dan persamaan kesetimbangan yang harus dipenuhi kondisinya. Kondisi pembebanan yang terjadi adalah kondisi statis tertentu dimana semua variabel yang harus dihitung/diketahui jumlahnya tidak melebihi jumlah persamaan yang tersedia.



Gbr. 8 Model baku pembebanan dan reaksi tumpuan beserta gambar DBB-nya [17]

Berdasarkan rujukan model DBB pada Gambar 8, maka untuk semua ruas jari yang terlibat dalam rancangan jari ini, gambar DBB detail per ruas jari disajikan pada Gambar 9. Penyelesaian perhitungan beban diawali dari datangnya tekanan/gaya reaksi dari benda yang dipegang, yakni gaya  $N_1 = 80$  N (diambil nilai maksimumnya). Satu contoh perhitungan beban dan reaksi tumpuan untuk segmen ujung jari disajikan secara detail dan hasil segmen lainnya disajikan pada Tabel I. Salib sumbu digambarkan sesuai dengan arah utama segmen yang dianalisis dan hasil perhitungan gaya pada tahap ini dapat diteruskan pada ruas segmen sebelumnya (dengan penyesuaian arah salib-sumbu yang diperlukan).



Gbr. 9 Model pembebanan dan jenis reaksi tumpuan yang terjadi pada setiap ruas

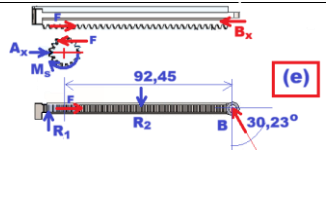
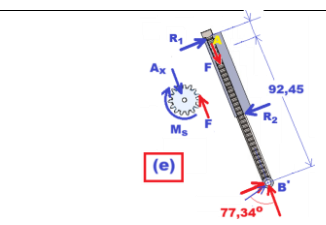
Untuk menerapkan persamaan kesetimbangan dari setiap segmen yang mendapat beban, dua asumsi diterapkan yakni: faktor gesekan pada setiap pasangan bergerak diabaikan, dan massa (berat) dari masing-masing komponen ruas jadi tidak diperhitungkan karena sangat kecil dibandingkan dengan gaya luar yang bekerja. Dari Gambar 9 (d), terapkan persamaan kesetimbangan bagi segmen ujung jari ini, maka didapat:

$$\begin{aligned} \sum M_{D'} = 0 &\rightarrow N_1 \cdot \cos(18,1) \cdot (86,5) - C'_{(u)} \cdot \cos(3,81) \cdot (37,14) = 0 \\ &C'_{(u)} = 177,49 \text{ N} \\ \sum F_x = 0 &\rightarrow D'_{x(u)} = C'_{(u)} \cdot \sin(3,81) - N_1 \cdot \sin(18,1) = 152,24 \text{ N} \\ \sum F_y = 0 &\rightarrow D'_{y(u)} = N_1 \cdot \cos(18,1) - C'_{(u)} \cdot \sin(3,81) = 64,25 \text{ N} \end{aligned}$$

Dengan menerapkan persamaan yang sama bagi semua segmen jari ini, maka nilai total gaya-gaya yang bekerja pada setiap segmen disajikan dalam Tabel I.

TABEL I  
HASIL PERHITUNGAN GAYA PADA SETIAP SEGMENT JARI

No. gbr	Perhitungan gaya dan torsi (merujuk pada Gambar 9)	
	Gambar DBB	Besar Gaya Aksi dan Reaksi Tumpuan
(d)		$N_{1(u)} = 80 \text{ N}$ $C'_{(u)} = 177,49 \text{ N} \rightarrow (= B'_{(a)})$ $D'_{x(u)} = 152,24 \text{ N}$ $D'_{y(u)} = 64,25 \text{ N}$
(c)		$D'_{x(a)} = 64,25 \cdot \cos(16,47) + 152,24 \cdot \sin(16,47) = 104,78 \text{ N}$ $D'_{y(a)} = 64,25 \cdot \sin(16,47) - 152,24 \cdot \cos(16,47) = -127,79 \text{ N}$ $B'_{(a)} = 177,49 \text{ N}$ $C_{x(a)} = (177,49 \cdot (\sin(77,3) \cdot 143,91 + \cos(77,3) \cdot 45) - 127,79 \cdot 114,9) / 37,14 = 321,45 \text{ N}$ $C_{(a)} = 322,16 \text{ N} \rightarrow (= B_{(t)})$ $D_{x(a)} = 387,3 \text{ N}$ $D_{y(a)} = 24 \text{ N}$
(b)		$D_{x(t)} = 24 \cdot \sin(68,1) + 387,3 \cdot \cos(68,1) = 166,73 \text{ N}$ $D_{y(t)} = 24 \cdot \cos(68,1) - 387,3 \cdot \sin(68,1) = -350,4 \text{ N}$ $B_{(t)} = 322,16 \text{ N}$ $T_{x(t)} = 225,2 \text{ N}$ $T_{y(t)} = 54,36 \text{ N}$ $M_{(T)} = 36,019 \text{ Nm}$

	$F_{(aT)} = 322,16 * \sin(30,23) = 162,2 \text{ N}$ $A_{x(a)} = 162,2 \text{ N}$ $M_{s(T)} = 0,0075 * 162,2 = 1,2165 \text{ Nm}$ <p>(pilih motor servo dengan torsi minimal 2,028 Nm)</p> $R_{2(t)} = (322,16 * \cos(30,23) * 103,45) / 55,6 = 517,9 \text{ N}$ $R_{1(t)} = 517,9 - 322,16 * \cos(30,23) = 239,6 \text{ N}$
	$F_{(a)} = 177,49 * \cos(77,34) = 38,9 \text{ N}$ $A_{x(a)} = 38,9 \text{ N}$ $M_{s(a)} = 0,0075 * 38,9 = 0,2918 \text{ Nm}$ $R_{2(a)} = (177,49 * \sin(77,34) * 103,45) / 55,6 = 322,21 \text{ N}$ $R_{1(a)} = 322,21 - 177,49 * \sin(77,34) = 149 \text{ N}$

Tabel I menyajikan semua gaya yang muncul di setiap titik engsel dari segmen yang berhubungan satu dengan lainnya. Hasil perhitungan ini diperlukan untuk menjamin tepatnya pemilihan torsi dari motor penggerak pada segmen awal ( $M_{s(a)}$ ) maupun pemilihan torsi dari motor penggerak pada segmen telapak tangan ( $M_{s(T)}$ ). Motor penggerak yang harus digunakan dalam rancangan ini setidaknya memiliki kapasitas torsi sebesar 2,028 Nm dan 0,4862 Nm.

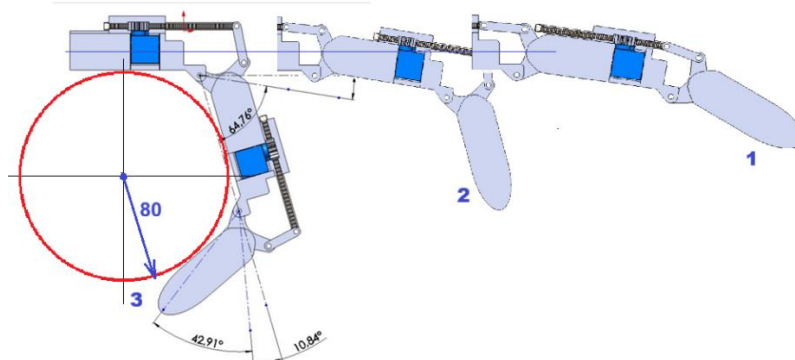
Disamping itu, gaya-gaya pada tumpuan akan menentukan berapa besar defleksi yang mungkin terjadi pada setiap segmen ruas jari beserta tegangan normal dan tegangan geser yang akan terjadi. Nilai tegangan ini dapat digunakan pada iterasi perancangan fisik jari tangan pada proses selanjutnya. Fungsi *Computer Aided Engineering* (CAE) pada Solidwork (SW) dapat digunakan untuk membantu perancang menentukan tegangan dan defleksi yang terjadi pada rancangannya. Di dalam perangkat lunak Solidworks fungsi CAE ini dapat diaktifkan melalui jendela SW Simulation. Hasil CAE ini nantinya dapat digunakan untuk menilai kelayakan desain dari sisi kekuatan material dan besarnya defleksi yang terjadi apakah masih berada dalam batas aman.

### III. ANALISIS RANCANGAN

Perhitungan beban pada setiap komponen dari ruas jari prostetik telah disajikan pada Tabel I. Segmen ruas telapak tangan, segmen jari awal, dan segmen jari ujung masing-masing mendapatkan beban secara berturut-turut dari gaya tekan di ujung jari (berupa gaya  $N_1$ ). Pada akhir langkah perhitungan ini dapat ditentukan besarnya torsi yang harus dihasilkan oleh setiap unit penggerak dalam hal ini adalah servo motor pada segmen telapak tangan dan segmen awal.

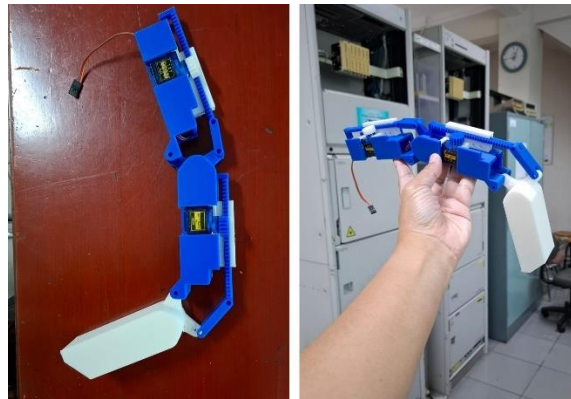
#### A. Analisis Ruang Kerja Satu Jari Prostetik

Secara kinematika, rancangan jari di atas memiliki sapuan ruang genggam sebesar sudut rotasi total  $121,4^\circ$  dengan offset awal sebesar  $2 \times 9^\circ$ . Sapuan luas sebesar ini akan dapat menggenggam suatu benda berbentuk bola dengan jari-jari sekitar 80 mm. Konfigurasi satu jari saat berhasil menahan posisi bola (pandangan 2-D) dapat ditunjukkan pada Gambar 10. Karena penelitian ini sedang berlangsung, usaha revisi rancangan saat ini terus dilakukan, agar didapat konstruksi fisik jari yang lebih mampu menggenggam benda-benda dengan jari-jari yang lebih kecil.



Gbr. 10 Besar area sapuan sebuah jari hasil rancangan

Hasil rancangan di atas kemudian direalisasi dengan mencetak secara fisik semua komponen ruas jari yang terlibat. Setiap segmen dicetak dengan mesin printing 3-D berkualitas baik bersama dengan bagian-bagian komponen pendukung seperti batang penghubung dan lain-lain. Variable proses pencetakan 3-D dipilih yang dapat memberikan kualitas produk terbaik dari mesin yang tersedia dan tidak menjadi topik bahasan dalam artikel ini. Gambar 11 menunjukkan hasil pencetakan satu ruas jari yang masih terus mengalami pengembangan dan perbaikan.



Gbr. 11 Hasil pencetakan ruas jari dengan mesin printin 3-D

#### B. Analisis Kesetimbangan Gaya/Momen Segmen Jari

Dalam analisis statika, kondisi setiap segmen yang terlibat dalam perhitungan gaya/momen harus memenuhi persamaan kesetimbangan. Secara rinci, hasil penerapan persamaan kesetimbangan itu, maka gaya pada setiap segmen jari dapat diperinci lebih detail sebagai berikut:

- 1) *Segmen Ujung Jari*: Ujung jari menerima gaya reaksi dari objek cekam sebesar 80N. Komponen yang harus menghasilkan gaya tekan ini adalah batang 2-gaya B'C'. Batang ini hanya akan dapat memberikan tekanan bila komponen *gear* pada mekanisme *rack and pinion* yang terpasang pada segmen jari awal, tetap mampu menjaga konfigurasi saat aksi menekan ini dilakukan. Nilai gaya dorong ini adalah sebesar 177,5N. Untuk menjaga kesetimbangan statika (baik momen dan gaya), maka engsel D' harus menahan sepasang gaya dalam sumbu-x dan -y yang bersesuaian dengan definisi yang ditetapkan (lihat sub-gambar (d)).
- 2) *Segmen Jari Awal*: Berdasarkan konsep yang sama dengan langkah sebelumnya, pada segmen ini juga terjadi kesetimbangan gaya dan momen. Gaya-gaya yang bekerja pada segmen ini berasal dari dorongan batang 2-gaya BC dan juga dorongan/tarikan dari engsel D' yang bertumpu pada segmen ini. Pasangan gaya inilah yang menjadi beban utama yang harus ditanggung agar kesetimbangan statika tetap berlaku. Untuk tujuan ini, maka harus terapat dorongan dari batang 2-gaya di titik C sebesar 322,16 N. Kembali lagi serupa dengan proses sebelumnya, batang ini hanya akan dapat memberikan tekanan bila komponen *gear* pada mekanisme *rack and pinion* yang terpasang pada segmen telapak, tetap mampu menjaga konfigurasi saat aksi menekan ini dilakukan. Untuk menjaga kesetimbangan statika (baik momen dan gaya) pada segmen ini, maka engsel D harus menahan sepasang gaya dalam sumbu-x dan -y yang bersesuaian dengan definisi yang ditetapkan (lihat sub-gambar (c)).
- 3) *Segmen Telapak Tangan*: Berbeda dengan dua analisis gaya/momen di atas, segmen ini bertugas memberikan dorongan awal dari mekanisme *rack and pinion* yang terpasang pada segmen ini. Gear harus bergerak sehingga dihasilkan gaya aksi pada titik B sebesar  $B_{(0)} = 322,16 \text{ N}$  yang arahnya searah dengan batang 2-gaya CB. Gaya ini akan menjadi beban cukup berat pada *rack* karena *gear* pada mekanisme *rack and pinion* hanya bisa memberikan arah dorongan horizontal (gaya tangensial dari *gear*). Beban lain yang harus dihadapi oleh segmen ini adalah gaya total pada engsel D dimana segmen jari awal bertumpu untuk melakukan aksinya. Dengan pengertian yang sama, maka untuk menjaga kesetimbangan statika (baik momen dan gaya) pada segmen ini, maka tumpuan awal (*fixed support*) T harus menahan sepasang gaya dan sebuah momen dalam sumbu-x dan -y yang bersesuaian dengan definisi yang ditetapkan (lihat sub-gambar (b)).

4) *Segmen Rack and Pinion*: Pada saat aksi mencekam ini dilakukan, batang *rack* dari mekanisme *rack and pinion* pada segmen jari awal dan telapak tangan mendapat gaya tekan yang tidak searah dengan arah gerakannya. Gaya itu berasal dari batang penghubung (berupa batang 2-gaya) masing-masing bernilai 177,49 N dan 322,16 N. Gaya-gaya yang bekerja pada masing-masing *rack* ini berupa kombinasi gaya geser dan gaya aksial, yang pada akhirnya dapat menyebabkan kegagalan pada komponen ini, bila tegangan yang bekerja melebihi batas kekuatan material yang dipakai. Perhatian khusus harus diberikan pada komponen ini agar fungsi alat (*rack*) yang dipakai dapat dijalankan (lihat sub-gambar (e)).

### C. Kemampuan Motor Penggerak

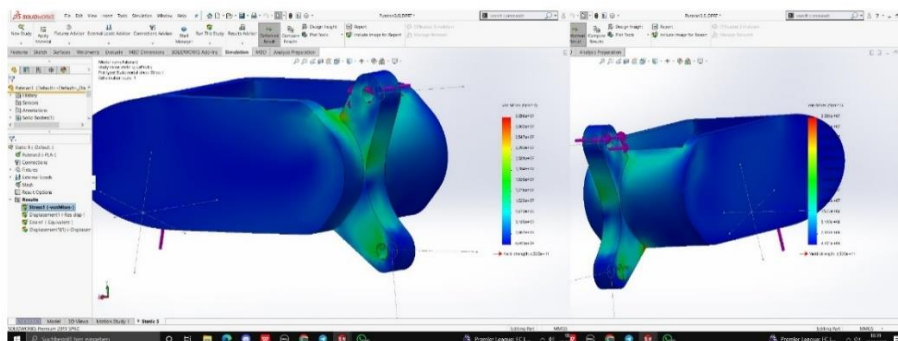
Pada sub-gambar (e) dapat dilihat bagaimana gaya dorong oleh batang penghubung diterjemahkan menjadi gaya reaksi pada mekanisme *rack and pinion*. *Gear* pada segmen jari awal harus menghasilkan gaya tangensial sebesar 162,2 N dan minimal torsi motor sebesar 1,2165 Nm untuk menjaga kesetimbangan statika pada DBB *rack* ini. Sementara dari *gear* pada segmen telapak tangan, harus menghasilkan gaya tangensial sebesar 38,9 N dan torsi motor cukup sebesar 0,2918 Nm saja. Dari kedua mekanisme ini, didapat kebutuhan torsi dari motor penggerak mekanisme *rack and pinion* setidaknya adalah 2,0275 Nm. Pada percobaan awal yang dilakukan, motor servo yang digunakan adalah tipe MTR-0268: MOTOR SERVO SG90 180 DERAJAT CNC X TIANKONGRC, yang mudah diperoleh di pasaran. Akan tetapi motor servo ini memiliki torsi hanya sebesar 1,8 kg.cm atau setara dengan 0,18 Nm. Motor ini hanya mampu memberi gerakan untuk mencapai konfigurasi awal saja, tetapi belum menghasilkan gaya cekam maksimum seperti dalam analisis di atas.

Kandidat unit penggerak lain yang lebih realistis adalah servo motor tipe POWER HD W50 HIGH VOLTAGE WINCH SERVO SET CORELESS MOTOR 50KG 0.9S, yang sudah memiliki torsi lebih besar yakni 35 kg.cm yang setara dengan 3,5 Nm untuk dapat menangani gaya cekam hingga 80 N. Motor ini sudah memenuhi kriteria pencekaman dalam rancangan ini. Kendala yang utama adalah massa yang relatif lebih besar dan kesulitan mendapatkan motor penggerak jenis ini di pasaran. Berhubung penelitian ini masih sedang berjalan, maka motor penggerak di atas tetap diusahakan secepatnya dapat dipasang pada rancangan.

### D. Simulasi Tegangan pada Segmen Jari

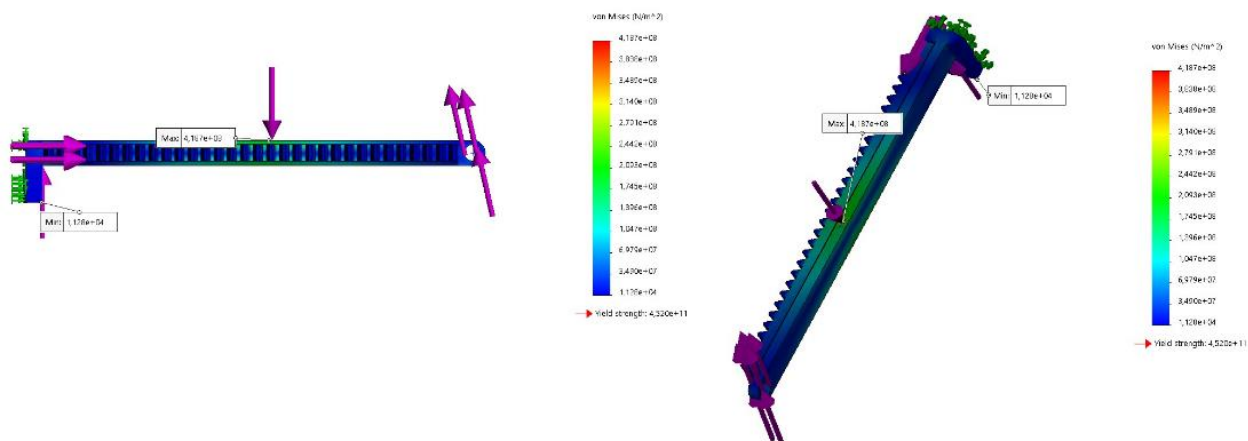
Untuk mengetahui kemungkinan terjadinya kegagalan pada daerah-daerah yang kritis akibat gaya-gaya luar yang bekerja pada komponen rancangan, maka simulasi pembebanan diterapkan pada rancangan di atas. Beban gaya dan momen yang telah berhasil dihitung seperti yang disajikan pada Tabel I, dijadikan beban yang paling mungkin (realistis) terjadi pada setiap komponen jari yang dirancang. Gambar 12 menunjukkan hasil simulasi pembebanan pada komponen segmen ujung jari yang mendapat beban akibat aksi mencekam benda sebesar 80 N.

Warna-warna yang terlihat pada selubung benda menunjukkan besarnya tegangan yang terjadi pada semua bagian benda yang mendapat beban (baik momen/gaya). Jelas terlihat pada gambar bahwa daerah kritis terjadi pada bagian penghubung antara segmen ujung jari dengan segmen jari awal. Secara logika, dapat dijelaskan bahwa bagian komponen yang paling tipis/kecil yang paling rentan terhadap beban yang bekerja. Pada simulasi ini terkonformasi bahwa daerah tipis itu mengalami beban terbesar. Lebih utama dari pada itu, hasil simulasi ini juga memberikan nilai numerik berapa besarnya tegangan yang dapat terjadi. Dalam kasus ini, didapat bahwa tegangan terbesar terjadi dengan nilai sebesar  $3.056 \cdot 10^7 \text{ Nm}^2$  untuk material printing berupa filamen PLA.

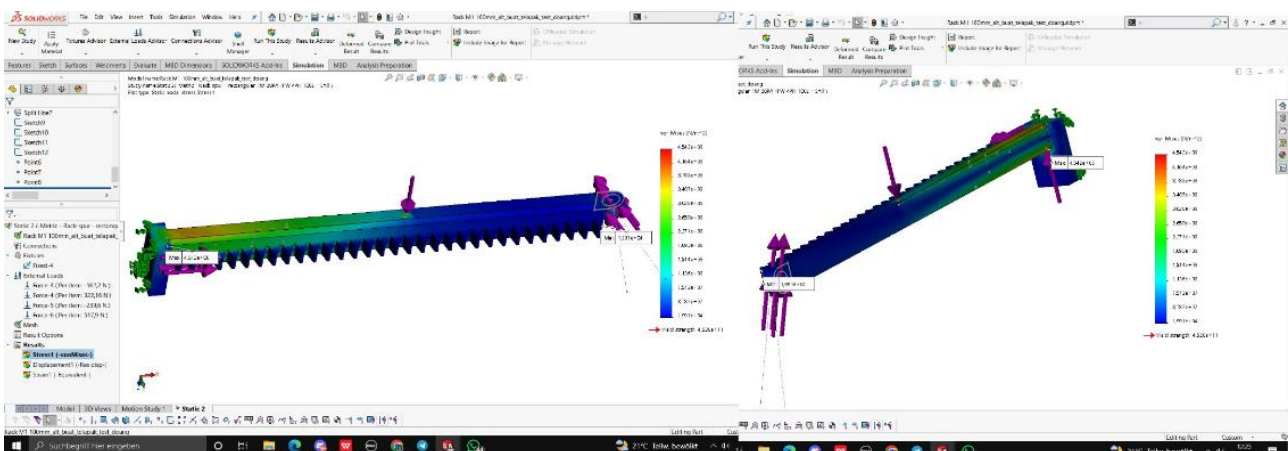


Gbr. 12 Hasil simulasi pembebanan pada segmen ujung jari

Simulasi untuk segmen jari awal dan telapak tangan belum berhasil diselesaikan karena kendala teknis proses perhitungan yang memakan waktu sangat lama dan masih terdapat kendala teknis lainnya. Namun berbeda dengan komponen *rack and pinion* yang ada, karena strukturnya sederhana, maka hasil simulasi pembebanannya dapat disajikan dalam artikel ini. Gambaran pembebanan pada kedua *rack* ini disajikan pada Gambar 12 dan 13, dimana intensitas tegangan yang terjadi pada batang disajikan dalam gradasi warna biru (aman) hingga warna merah (bahaya). Tegangan maksimum sebesar  $4.187 \cdot 10^8 \text{ Nm}^2$  terjadi pada Gambar 13 (*rack* pada segmen jari awal) dan pada Gambar 14 terdapat tegangan maksimum sebesar  $6.052 \cdot 10^8 \text{ Nm}^2$  (*rack* pada segmen telapak tangan).



Gbr. 13 Hasil simulasi pembebanan pada *rack* yang mendorong segmen ujung jari



Gbr. 14 Hasil simulasi pembebanan pada *rack* yang terpasang di telapak tangan

Dalam penelitian ini telah dilakukan perancangan tangan prostetik, lebih spesifik adalah bagian ruas jari dari suatu model tangan. Kajian penting yang dapat dipelajari dari perancangan awal ini adalah sebagai berikut:

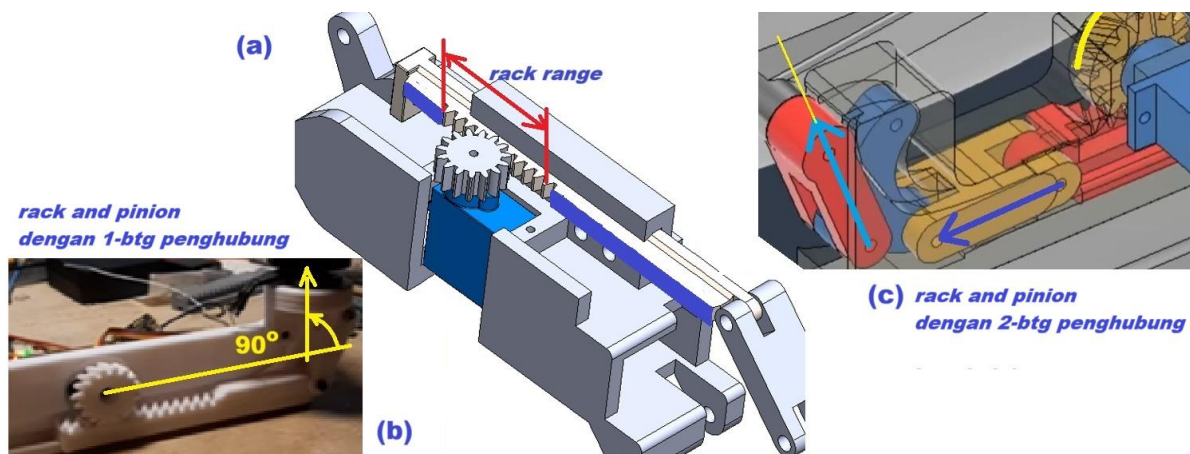
1. Rancangan tangan menjadi lebih sederhana dengan membuat ruas jari menjadi 2-buah segmen dan memerlukan 2-buah motor penggerak yang memungkinkan gerakan independen antar ruas,
2. Model kinematika dan model diagram benda bebas disiapkan untuk mengetahui setiap beban gaya/momen yang bekerja pada semua komponen ruas jari,
3. Model beban statika membantu penentuan kebutuhan spesifikasi motor penggerak yang tepat untuk menghasilkan gaya cekam/tekan tertentu pada ujung jari dapat ditentukan,
4. Pemilihan motor penggerak harus dilakukan dengan memperhatikan besar torsi minimal yang harus dimiliki oleh motor penggerak.

5. Bedan tegangan pada segmen (yang terbuat dari bahan PLA) yang kritis masih berada dalam batas aman kekuatan material.

#### IV. KESIMPULAN DAN PENGEMBANGAN LANJUT

Dalam penelitian ini telah dilakukan perancangan tangan prostetik, lebih spesifik adalah bagian ruas jari dari suatu model tangan. Model jari disederhana dengan membuat setiap jari memiliki 2-buah segmen ruas dan 1 ruang untuk ibu jari. Setiap segmen jari digerakkan dengan sebuah motor penggerak sehingga setiap segmen dapat berputar/bergerak secara individu dan independen. Dari model kinematika dan model diagram benda bebas dapat diketahui beban gaya/momen yang bekerja pada semua komponen ruas jari dan selanjutnya besar torsi minimal motor penggerak dapat ditentukan dengan tepat. Simulasi pembebanan dilanjutkan dilakukan pada paket CAE untuk melihat dan menilai kemungkinan beban berupa tegangan maksimum yang terjadi pada semua komponen rancangan.

Dari proses perancangan ruas jari yang telah dilakukan, terdapat banyak aspek yang harus diperhatikan dengan seksama. Kemampuan mekanisme rancangan untuk mendapatkan sudut putar engsel tidak selalu sesuai dengan konsep rancangan. Kesalahan dalam menentukan fitur tertentu dalam rancangan juga sangat menentukan performa produk yang dirancang. Perbaikan yang segera akan dilakukan pada tahap adalah mengubah rancangan batang penghubung dan penempatan posisi engsel penghubung. Disamping itu fitur *rack* dalam mekanisme *rack and pinion* tidak harus dibuat sepanjang batang, tetapi menyesuaikan dengan berapa panjang langkah linier maksimum yang diperlukan seperti ditunjukkan pada Gambar 16. Perbaikan ini dipandang akan dapat meningkatkan kinerja rancangan jari secara keseluruhan.



Gbr. 16 Rencana perbaikan pada bagian pembentukan gerak rotasi dan penyesuaian panjang fitur *rack*

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih sebesar-besarnya kami haturkan kepada KemDikTiSainTek dalam dukungan dana hibah berupa Skema Penelitian Fundamental-Regular tahun 2025 berdasarkan kontrak LPPM Unpar Nomor: III/LPPM/2025-06/166-PE. Atas dukungan dana ini, tim kami dapat memulai penelitian dengan judul: perancangan, pemodelan, pembuatan dan analisis kinerja tangan prostetik terbuat dengan teknik printin 3-D.

#### REFERENSI

- [1] \_\_\_\_, "Pedoman Operasional Asistensi Rehabilitasi Sosial (ATENSI) Penyandang Disabilitas Tahun 2020", KemSos RI, Direktur Jendral Rehabilitasi Sosial, Januari 2019.
- [2] S. Olney, (2019), "Promoting Employment Opportunities for People with Disabilities", ILO 1, [Online]. Available: [https://www.ilo.org/global/topics/disability-and-work/WCMS\\_735531/lang--en/index.htm](https://www.ilo.org/global/topics/disability-and-work/WCMS_735531/lang--en/index.htm)
- [3] A. Vlachaki, Paterson A. M. J., C. S. Porter, R. J. Bibb, "A Survey of Prosthetic Preferences in The UK

- and Greece”, in *Proc. of the Design Research Society, International Conference: Catalyst 2*, Univ. of Limerick, (2018). pp. 747-761.
- [4] (2024) J. L. Siege et.al, “A Performance Evaluation of Commercially Available and 3D-Printable Prosthetic Hands: A Comparison Using The Anthropomorphic Hand Assessment Protocol”, *BMC Biomedical Engineering*, vol. 6:11, hal 2 of 14.
- [5] (2025) R. Setiawan, "Potret Seorang Tuna Daksa jadi Pengusaha & Motivator Disabilitas", [Online]. Available: <https://tirto.id/potret-seorang-tuna-daksa-jadi-pengusaha-motivator-disabilitas-gAsH>
- [6] (2025) “Adik Bayi Rahma Aisyah Sairah”, [Online]. Available: <https://www.facebook.com/search/top?q=rahma%20aisyah%20sairah>
- [7] B. Arthaya dan V. Ivan, “Preliminary Design of 3D Printing Prosthetic Hand”, *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, pp. 1–18, 2022.
- [8] Hernando, T.A. Tamba, B.M. Arthaya, B. Hu, “Design and Analysis of Virtual Prosthetic Hand Simulator”, *8<sup>th</sup> International Conference on Instrumentation, Control and Automation (ICA)*, Jakarta, pp. 143-148, 2023.
- [9] Damerla, R. et.al, “A Review of the Performance of Extrinsically Powered Prosthetic Hands”, *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, Vol. 3, No. 3, pp. 640-660,2021.
- [10] Nikafrooz N. et.al, “Grasp Control of a Cable-Driven Robotic Hand Using a PVDF Slip Detection Sensor”, 2022, arXiv preprint arXiv:2202.06140, [Online]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://arxiv.org/pdf/2202.06140>.
- [11] Nikafrooz N. et.al, “A Single-Actuated, Cable-Driven, and Self-Contained Robotic Hand Designed for Adaptive Grasps”, *Robotics 2021, 10*, 109. <https://doi.org/10.3390/robotics10040109>.
- [12] Weiner P, et.al, “Designing Prosthetic Hands with Embodied Intelligence: the KIT Prosthetic Hands”, *Front. Neurorobot*, 16:815716. doi: 10.3389/fnbot.2022.815716.
- [13] (2025) Pngtree, [Online]. Available: <https://www.pngwing.com/id/free-png-vylrm>
- [14] (2025) Lombokfpv, “3D Printing Tutorial: Fusion 360 Tilt Rotor Project”, [Online]. Available: <https://www.tiktok.com/@lombokfpv/video/7488899360558796050>
- [15] J. A. Cort, and J.R. Potvin, “Maximum isometric finger pull forces”, *Int'l. Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 41, iss. 2, pp. 91-95, 2011.
- [16] (2025) Britannica, Rack-pinion, [Online]. Available: <https://www.britannica.com/technology/rack-and-pinion>
- [17] J.L. Meriam and L.G. Kraig, *Engineering Mechanics: Statics*, 7<sup>th</sup> ed., John Wiley and Sons, 2017.