

Perencanaan Peningkatan Kapasitas Mesin Penanam Padi Berbasis Sintesis Kinematika Dan Dinamika

Rice Planning Machine Capacity Increase Based on Kinematics And Dynamics Synthesis

Samuel Tabah Penemuan Parulian Silalahi¹, Agus Wijianto^{1*}, Jupri Yanda Zaira¹, Mustaza Ma'a¹
¹Prodi Teknik Mesin, Politeknik Caltex Riau, Pekanbaru 28265, Indonesia

*Corresponding author: aguswiji@pcr.ac.id

Diterima: 30-06-2025

Disetujui: 11-08-2025

Dipublikasikan: 20-08-2025

IRAJTMA is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.



Abstrak

Padi merupakan komoditas tanaman pangan penghasil beras yang memegang peranan penting dalam kehidupan ekonomi Indonesia. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem yang dirancang mampu menghasilkan jarak tanam antar bibit sebesar 25 cm secara konsisten melalui gerak harmonik lengan penanam. Pergerakan sudut dan linear seluruh linkage berlangsung stabil dan periodik, menghasilkan proses penanaman yang seragam. Kecepatan sudut poros utama tercatat konstan, mendukung kestabilan putaran, sedangkan torsi motor maksimum berada dalam rentang yang realistis untuk aplikasi lapangan. Sistem juga menunjukkan efisiensi mekanisme yang baik, ditandai dengan kestabilan energi kinetik komponen rotasi dan konsumsi daya motor yang terkendali. Temuan ini memiliki signifikansi praktis bagi praktisi dan industri alat dan mesin pertanian, karena dapat menjadi acuan pengembangan rice transplanter yang lebih efisien energi, presisi tinggi, dan sesuai dengan kondisi lahan sawah di Indonesia, sehingga berpotensi meningkatkan produktivitas dan mengurangi ketergantungan pada tenaga kerja manual.

Kata Kunci: Mesin penanam padi, Sintesis kinematika, Dinamika mekanisme, Kapasitas tanam.

Abstract

Rice is a food crop commodity that plays a vital role in the Indonesian economy. The results of this study indicate that the designed system is capable of consistently maintaining a 25 cm spacing between seedlings through the harmonic motion of the planting arm. The angular and linear movements of the entire linkage are stable and periodic, resulting in a uniform planting process. The angular velocity of the main shaft is recorded as constant, supporting rotational stability, while the maximum motor torque is within a realistic range for field applications. The system also demonstrates good mechanical efficiency, characterized by stable kinetic energy of the rotational components and controlled motor power consumption. These findings have practical significance for practitioners and the agricultural machinery industry, as they can serve as a reference for the development of rice transplanters that are more energy efficient, highly precise, and suited to rice field conditions in Indonesia, thus potentially increasing productivity and reducing reliance on manual labor.

Keywords: Rice planting machine, Kinematic synthesis, Mechanism dynamics, Planting capacity.

1. Pendahuluan

Padi merupakan salah satu komoditas pangan utama di Indonesia yang menjadi sumber karbohidrat bagi sebagian besar penduduk. Proses penanaman padi di Indonesia umumnya masih menggunakan metode manual yang membutuhkan tenaga kerja dalam jumlah besar dan

waktu yang lama. Menurut (Jaka Budi Santosa, 2025), keterbatasan tenaga kerja disektor pertanian, terutama di daerah pedesaan, telah mendorong perlunya inovasi teknologi untuk meningkatkan efisiensi produksi. Penelitian lain menunjukkan bahwa mekanisasi penanaman padi dapat meningkatkan produktivitas hingga lebih dari 20% dibanding metode manual, sekaligus mengurangi ketergantungan pada tenaga kerja musiman (Randi Saputra 2023; Ristiawan et al. 2018; Hilmy, Hendrarini, and Setiawan 2025).

Lebih dari 25% total kebutuhan tenaga kerja dalam budidaya padi terserap pada proses penanaman. Situasi ini menjadi semakin kompleks karena menurunnya ketersediaan tenaga kerja akibat berkurangnya minat generasi muda terhadap pertanian tradisional dan bertambahnya usia produktif petani. Oleh karena itu, upaya mekanisasi pertanian melalui penerapan alat dan mesin pertanian (alsintan), seperti *rice transplanter*, menjadi kebutuhan strategis guna meningkatkan efisiensi dan produktivitas. Berbagai studi menunjukkan bahwa penggunaan *rice transplanter* mampu menekan biaya tanam, mempercepat waktu penanaman, serta mengurangi ketergantungan terhadap tenaga kerja yang kian langka (Yantony et al. 2024a; Deshmukh et al. 2018; Salam et al. 2024; Sugiarto, Astutik, and Saputra 2023).

Berbagai inovasi mesin penanam padi (*rice transplanter*) telah dikembangkan, baik oleh industri maupun akademisi. Misalnya, [Saferi, Yanto, Bintarnel, 2022] mengembangkan desain lengan penanam berbasis mekanisme empat batang yang mampu menjaga konsistensi jarak tanam, sementara (IEEE, 2024) menerapkan pendekatan optimasi kinematika untuk mengurangi getaran pada mekanisme. Namun, sebagian besar penelitian sebelumnya fokus pada satu aspek saja misalnya peningkatan presisi jarak tanam atau efisiensi energi tanpa mengintegrasikan analisis kinematika dan dinamika secara komprehensif (Zha et al. 2020; Hu and Zhang 2018; Deshmukh et al. 2018; Rofarsyam 2019).

Berdasarkan permasalahan tersebut, dibutuhkan pendekatan perancangan teknis yang lebih mendalam berbasis sintesis kinematika dan dinamika untuk menghasilkan sistem mekanik penanam padi yang lebih ringan, efisien energi, dan presisi tinggi. Melalui pendekatan ini, perancang dapat memodelkan dan mensimulasikan gerakan mekanis secara virtual, meminimalkan beban torsi, serta mengoptimalkan konsumsi daya sistem penggerak motor. Seiring kemajuan teknologi, pemanfaatan perangkat lunak seperti *SolidWorks Analisis Gerak* memungkinkan visualisasi dan validasi performa gerak dan beban kerja secara komprehensif sebelum proses manufaktur dilakukan (Salam et al. 2025; Yantony et al. 2024b; Sulistyaningsih 2022; Susanti and Arif 2020; Sarwoko and Revino 2020).

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menganalisis sistem mekanisme mesin penanam padi melalui sintesis kinematika dan dinamika secara terpadu. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi performa mekanisme tidak hanya dari segi ketepatan gerak penanam, tetapi juga dari kestabilan energi dan torsi yang diperlukan. Penelitian ini terletak pada integrasi metode analisis kinematika dan dinamika dalam satu kerangka perancangan, yang jarang dilakukan pada studi sebelumnya, serta penerapannya pada kondisi lapangan khas sawah Indonesia untuk mencapai efisiensi energi dan presisi tanam yang optimal (Zhong et al. 2025; Yang et al. 2024; Fitri Amalia and Syafruddin 2022; Irmayani et al. 2024; Pimpalgaonkar et al. 2020; Al-Hossain et al. 2024).

2. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan rekayasa desain dan simulasi berbasis teknik kinematika-dinamika untuk merancang dan menganalisis peningkatan kapasitas mesin penanam padi. Desain rancang bangun mesin penanam padi yang dibuat melibatkan beberapa parameter desain awal seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Tabel parameter desain awal

Parameter	Simbol / satuan	Nilai awal (direkomendasikan)	Keterangan
Jarak tanam antar bibit	s (m)	0,25 m	Target jarak tanam konsisten
Frekuensi siklus lengan	f (Hz)	1,67 Hz	Frekuensi gerak lengan penanam pada desain
Kecepatan sudut poros	ω (deg/s)	3000 deg/s ($\approx 52,36$ rad/s)	Dipakai sebagai kondisi input pada simulasi
Amplitudo perpindahan lengan	A (mm)	± 103 mm	Detail amplitudo dipindahkan ke bagian hasil
Torsi motor puncak	τ_{max} (N·mm)	± 465 N·mm	Nilai puncak torsi dari simulasi (dipakai untuk sizing motor)
Daya motor puncak	P (W)	4000 – 7000 W	Rentang konsumsi daya saat beban puncak
Kecepatan maju	v (m/s / km/h)	0,42 m/s \approx 1,50 km/h	Dihitung dari $s \cdot f = 0,25 \times 1,67 = 0,4175$ m/s \approx 1,5 km/h
Lebar kerja	W (m)	sesuaikan desain (mis. 1,0–2,0 m)	Tentukan sesuai jumlah baris penanaman pada mesin

2.1. Asumsi Simulasi

a) Kondisi lahan

- Tanah: lapisan lumpur/pasir sawah (*muddy loam*) dengan kohesi dan gesek permukaan rata-rata; kedalaman air operasi 2–5 cm (kondisi sawah musim tanam basah).
- Permukaan: diasumsikan relatif rata, toleransi gelombang permukaan ± 1 –2 cm (tidak termasuk kondisi terjal/berteras).
- Resistensi tanah pada pencucuk: digunakan nilai hambatan penetrasi rata-rata untuk tanah sawah basah (angka spesifik bila tersedia dari pengukuran lapangan).

b) Jenis bibit/tray

- Bibit: bibit padi siap tanam umur ~ 21 hari, tray tray benih standar (nampan) ukuran bibit dan kepadatan diambil sesuai praktik lokal.
- Karakteristik bibit: massa per bibit dan dimensi ditetapkan sebagaimana standar lokal.

c) Kondisi operasi

- Kecepatan input poros dikunci pada $\omega = 3000$ deg/s; frekuensi lengan $f = 1,67$ Hz
- Kecepatan gerak maju mesin disesuaikan dengan frekuensi tanam: $v = s \times f = 0,25 \times 1,67 \approx 0,4175$ m/s \approx 1,5 km/h.
- Beban dinamis: beban periodik akibat pengambilan bibit dan kontak tanah dimodelkan sesuai kurva torsi yang diperoleh dari simulasi (lonjakan periodik di sekitar τ_{max}).

d) Syarat batas dan model material

- Elemen kinematik diasumsikan kaku (rigid body) kecuali pada sambungan yang diberi redaman (*bearing friction coef.* ditentukan).
- Redaman internal dan gesekan pengguna diperkirakan menggunakan nilai literatur/pengukuran pabrikan *bearing*; sebutkan nilai jika Anda punya data eksperimen.

e) Kondisi lingkungan

- Suhu, kelembapan, dan kondisi korosi tidak dimasukkan dalam simulasi awal; dipertimbangkan pada studi lanjut/perawatan.

2.2. Validasi dan Verifikasi

a) Validasi eksperimental lapangan (utama)

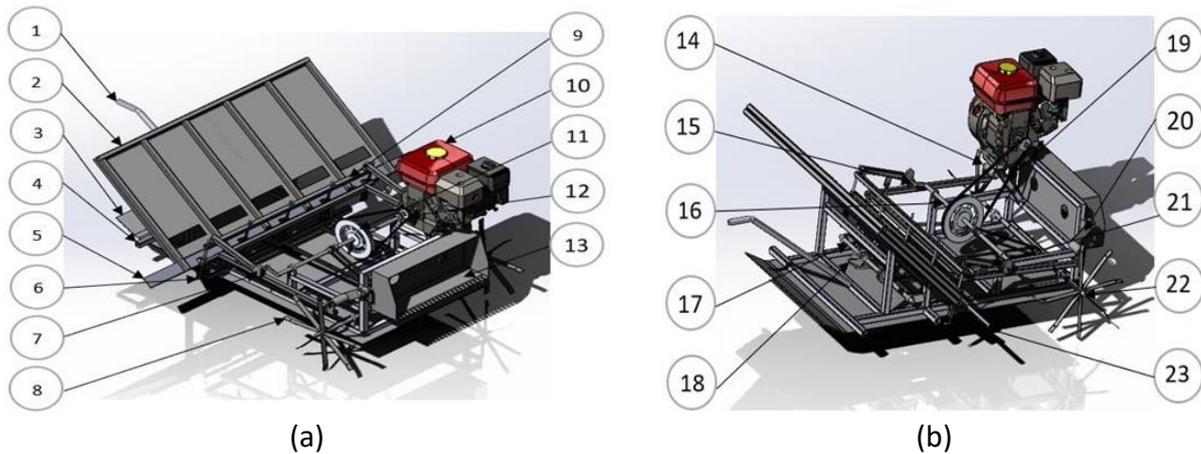
1. Pembuatan prototipe — bangun satu unit prototipe sesuai desain CAD yang digunakan pada simulasi.

2. Pengukuran lapangan — lakukan uji coba pada minimal 3 lokasi sawah representatif (berbeda tekstur tanah/kemiringan): untuk tiap lokasi, rekam metrik berikut selama ≥ 10 menit operasi stabil:
 - Jarak antar bibit (ukur $N = 200\text{--}500$ titik acak) \rightarrow hitung rata-rata dan CV (koefisien variasi).
 - Konsumsi daya motor (W) dan torsi ($N\cdot m$) menggunakan sensor/*torque sensor inline dan Wattmeter*.
 - Kecepatan maju aktual (GPS/odometer) dan frekuensi siklus lengan (*encoder*).
 3. Kriteria penerimaan:
 - Jarak tanam: rata-rata mendekati $0,25$ m dengan $CV \leq 5\%$ dianggap baik.
 - Torsi puncak & profil: puncak torsi lapangan berada dalam $\pm 10\%$ dari hasil simulasi (untuk validitas sizing).
 - Konsumsi daya total: selisih antara simulasi dan rata-rata lapangan $\leq \pm 15\%$ (mempertimbangkan kehilangan efisiensi).
 4. Analisis statistik: gunakan RMSE dan koefisien determinasi (R^2) untuk membandingkan kurva waktu (torsi, daya) antara simulasi dan data lapangan.
- b) Verifikasi numerik (internal)
1. Mesh / *time-step convergence test* (jika menggunakan FEM atau solver numerik): jalankan simulasi dengan parameter diskritisasi berbeda sampai perubahan hasil $< 2\%$ untuk variabel kunci (torsi puncak, displacement).
 2. *Sensitivity analysis*: variasikan $\pm 10\text{--}20\%$ pada parameter kritis (massa inersia, friksi sambungan, hambatan tanah) untuk melihat pengaruhnya terhadap hasil—laporkan parameter yang paling sensitif. Ini membantu prioritas pengukuran lapangan.
- c) Kalibrasi model
1. Jika ada perbedaan sistematis antara simulasi dan pengukuran, lakukan kalibrasi parameter (mis. koef. gesek, hambatan tanah efektif, redaman) menggunakan metode optimisasi sederhana (*least squares*) sehingga kurva simulasi cocok dengan pengukuran lapangan.
 2. Setelah kalibrasi, ulangi validasi pada set data terpisah (*cross-validation*) untuk menghindari overfitting.
- d) Dokumentasi & reproducibility
- Simpan konfigurasi simulasi (file CAD, pengaturan solver, nilai parameter) dan sertakan sebagai lampiran / repositori (mis. GitHub atau drive kampus) sehingga pembaca dapat mereplikasi studi.

3. Hasil dan Pembahasan

3.3. Desain Mesin

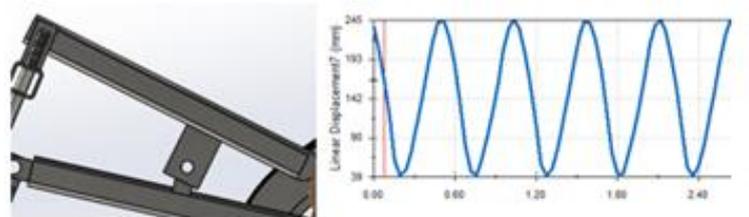
Pemilihan desain ini dilakukan melalui beberapa tahapan variabel- variabel tertentu dan pertimbangan dari beberapa konsep desain, maka dari hasil pertimbangan tersebut berhasil terpilih konsep desain Mesin penanam dan pemanen padi, seperti Gambar 1. Pada Gambar 1, terlihat bahwa mesin penanam dan pemanen padi terdiri dari komponen: 1) Rangka, 2) Alas, 3) As penggeser nampan, 4) As roda, 5) As ukuran pendek, 6) Bandul, 7) Dudukan pencucuk bibit, 8) Link pengambil bibit, 9) Link pencucuk bibit sebelah kanan, 10) Link pencucuk bibit sebelah kiri, 11) Link setting kedalaman penanaman, 12) Nampan bibit, 13) Pemanen padi, 14) Penarik bibit, 15) Pendorong bibit ke tanah, 16) Penggerak nampan, 17) Plat link pengatur kedalaman penanaman, 18) Poros penggerak, 19) Pulley mesin, 20) Pulley penggeser nampan, 21) Pulley poros penggerak, 22) Pulley roda, 23) Roda.



Gambar 1. Desain mesin penanam padi isometri kiri (a) dan kanan (b)

3.2. Analisis Jarak Tanam Bibit Padi

Berdasarkan pada Gambar 2, menunjukkan grafik hubungan antara Linear Displacement (mm) terhadap Time (detik) dari gerakan lengan penanam padi yang dianalisis menggunakan simulasi di SolidWorks Analisis Gerak. Grafik ini berbentuk gelombang sinusoidal periodik, menandakan adanya gerak bolak-balik (reciprocating motion) dari lengan penanam. Sumbu Y menunjukkan perpindahan linear (mm) lengan tanam, dengan nilai berkisar antara sekitar 40 mm hingga 245 mm. Sumbu X menunjukkan waktu (detik) selama periode simulasi yaitu 0–6 detik, dalam rentang waktu tersebut tercatat sekitar 10 siklus penuh yang berarti frekuensi gerak dapat dihitung, yang menunjukkan jarak total gerak maju-mundur lengan penanam dalam proses penanaman padi maka jarak tanam antar bibit yang sudah di dapat adalah sekitar 25 cm.



Gambar 2. Grafik perpindahan linier lengan penanam bibit

Beberapa parameter penting dari grafik dapat diuraikan sebagai berikut:

- Displacement maksimum (y_{max}): 245 mm
- Displacement minimum (y_{min}): 39 mm
- Amplitudo (A):

$$A = \frac{y_{max} - y_{min}}{2} = \frac{245 - 39}{2} = 103 \text{ mm}$$

Displacement rata-rata (\bar{y}):

$$\bar{y} = \frac{y_{max} + y_{min}}{2} = \frac{245 + 39}{2} = 142 \text{ mm}$$

Periode gerak (T):

Dari grafik didapat sekitar 10 siklus dalam 6 detik, sehingga:

$$T = \frac{6}{10} = 0,6 \text{ detik}$$

Frekuensi gerak (f):

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,6} \approx 1,67 \text{ Hz}$$

Dengan demikian, lengan penanam melakukan gerakan naik-turun sebanyak $\pm 1,67$ kali setiap detik. Gerakan lengan ini dapat dimodelkan menggunakan persamaan gerak harmonik sederhana berikut:

$$y(t) = A \sin(2\pi ft + \phi) + y^- \tag{1}$$

Dimana:

- $A=103$ mm (amplitudo)
- $f=1,67$ Hz (frekuensi)
- $y^-=142$ mm (displacement rata-rata)
- $\phi=0$ (fase awal diasumsikan nol)

Sehingga:

$$y(t) = 103 \sin(10,5t) + 142$$

Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa gerakan periodik ini sangat penting untuk memastikan bahwa alat penanam melakukan pelepasan bibit secara teratur dan konsisten di setiap siklus. Pola harmonik yang stabil seperti ini menunjang proses penanaman agar jarak antar bibit seragam, sesuai dengan desain jarak antar lubang tanam sebesar 25 cm.

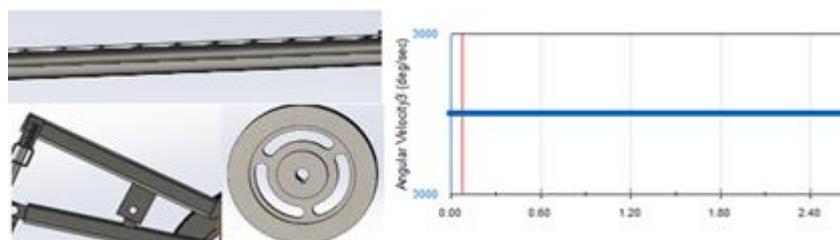
Perhitungan jumlah lubang tanam yang dihasilkan dapat dihitung sebagai berikut:

$$\text{Jumlah lubang per detik} = \frac{v}{s} = \frac{9,62 \text{ m/s}}{0,25 \text{ m}} = 38,48 \text{ lubang/detik}$$

Hasil simulasi kinematika menunjukkan bahwa mekanisme lengan penanam mampu menghasilkan lintasan ujung penanam yang konsisten dengan jarak tanam target sebesar 0,25 m. Pergerakan lengan memiliki pola siklik yang stabil, dengan fase penetrasi dan pelepasan bibit berlangsung pada interval waktu yang teratur. Hal ini mengindikasikan bahwa mekanisme yang dirancang dapat bekerja dengan ritme tanam yang seragam, sehingga potensi kesalahan jarak tanam dapat diminimalkan.

3.3. Analisis Perhitungan Kecepatan Sudut dalam Menentukan Kinerja Mekanis

Berdasarkan pada Gambar 3, grafik tersebut menunjukkan kecepatan sudut (*Angular Velocity*) dari komponen 3 terhadap waktu, hasil dari simulasi Analisis Gerak di *SolidWorks*. Sumbu Y menyatakan kecepatan sudut (*Angular Velocity*) dalam satuan derajat per detik (*deg/sec*) sedangkan sumbu X menunjukkan waktu dalam satuan detik (*sec*), dari 0 hingga 6 detik yang dimana kecepatan sudutnya konstan terlihat bahwa kecepatan sudut berada di angka sekitar 3000 *deg/sec* sepanjang waktu simulasi ini menunjukkan bahwa komponen berputar dengan kecepatan konstan selama 6 detik. Tidak terdapat fluktuasi atau perubahan nilai pada grafik, yang mengindikasikan bahwa rotasi berlangsung stabil tanpa percepatan atau perlambatan adapun juga terlihat garis vertikal sangat pendek di awal (sekitar 0–0.05 detik).



Gambar 3. Grafik kecepatan sudut poros, pulley, dan lengan penanam bibit

Sistem bergerak dengan kestabilan tinggi (tidak ada percepatan atau perlambatan) kondisi ini sangat diharapkan pada mesin penanam padi agar aliran daya tetap konstan ke lengan penanam, total rotasi selama simulasi 6 detik adalah 50 putaran penuh. Kecepatan sudut ini menunjukkan sistem mekanik telah bekerja sesuai desain, tanpa getaran atau gangguan pada torsi gerak putar.

Interpretasi Kinematika:

1. Nilai Kecepatan Sudut Konstan:

$$\omega = 3000 \text{ deg/sec}$$

Karena konstan, maka percepatan sudutnya (α) adalah:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = 0 \text{ deg/sec}^2$$

2. Konversi ke radian/detik (SI Unit):

$$\omega = 3000 \times \frac{\pi}{180} = 52,36 \text{ rad/sec}$$

3. Periode (T) dan Frekuensi (f):

Frekuensi (f):

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{52,36}{2\pi} \approx 8,33 \text{ Hz}$$

Periode (T):

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{8,33} \approx 0,12 \text{ detik}$$

Sudut total yang ditempuh selama simulasi (0–6 detik):

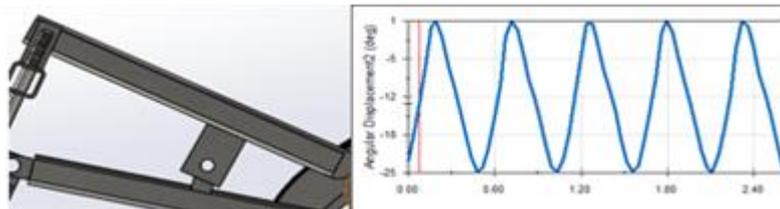
$$\theta = \omega \times t = 3000 \text{ deg/sec} \times 6 \text{ sec} = 18000^\circ$$

Artinya, dalam waktu 6 detik, poros telah berputar total 18000 derajat atau setara dengan:

$$\frac{18000}{360} = 50 \text{ putaran penuh.}$$

3.4. Analisis Perpindahan Sudut pada Linkage Penanam Bibit

Berdasarkan pada Gambar 4, menunjukkan hubungan antara pergeseran sudut (angular displacement) terhadap waktu dari komponen link penanam yang bergerak akibat rotasi input poros/pulley. Grafik diperoleh dari hasil simulasi gerak menggunakan SolidWorks Analisis Gerak. Sumbu Y menunjukkan nilai sudut dalam derajat ($^\circ$) sedangkan sumbu X menunjukkan waktu simulasi selama 6 detik. Bentuk grafik adalah gelombang sinusoidal periodik, menandakan bahwa link mengalami gerak osilasi rotasi (bolak-balik sudut). Sudut minimum sekitar -25° dan maksimum sekitar $+1^\circ$, berarti link bergerak dengan amplitudo rotasi sekitar 13° (dihitung dari tengah).



Gambar 4. Grafik perpindahan sudut link penanam bibit

1. Frekuensi (f):

Dalam 6 detik terdapat sekitar 10 siklus

$$\Rightarrow f = 10 / 6 = 1.67 \text{ Hz}$$

2. Periode (T):

$$T = 1 / f = 1 / 1.67 \approx 0.6 \text{ detik}$$

3. Amplitudo (A):

Dari grafik: dari -24° ke $+1^\circ$, maka $A = (24 + 1) / 2 = 12.5^\circ$

4. Fungsi Osilasi:

Secara umum, fungsi sudut terhadap waktu bisa dinyatakan dengan bentuk:

$$\theta(t) = A \cdot \sin(2\pi ft + \phi) + C \tag{2}$$

Keterangan:

$\theta(t)$: Sudut (derajat)

A : Amplitudo $\approx 12.5^\circ$

F : Frekuensi ≈ 1.67 Hz

ϕ : Fase awal (dari grafik terlihat mendekati 0)

C : Pergeseran vertikal (center), dari grafik sekitar -11.5°

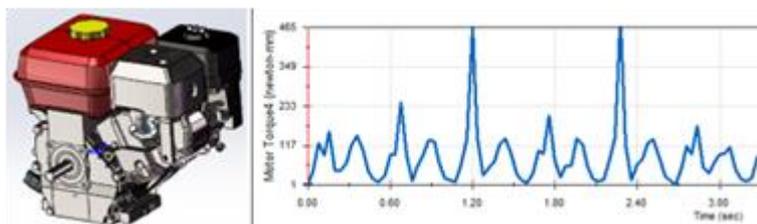
Sehingga:

$$\theta(t) = 12.5 \cdot \sin(2\pi \cdot 1.67 \cdot t) - 11.5$$

Grafik tersebut menunjukkan gerakan osilasi sudut dari suatu komponen mekanik (seperti link penanam) yang berayun secara periodik dengan Frekuensi 1.67 Hz, Amplitudo $\pm 12.5^\circ$, dan berayun di sekitar titik tengah -11.5° .

3.5. Analisis Kemampuan Torsi Motor Bensin untuk Menggerakkan Sistem Mekanik

Berdasarkan pada Gambar 5, Sumbu Y menunjukkan nilai torsi motor (dalam Newton-milimeter) sedangkan sumbu X menunjukkan waktu (dalam detik), dari 0 hingga 6 detik terlihat bahwa nilai torsi berfluktuasi secara periodik dengan beberapa puncak tajam (*spike*) terjadi secara berkala. Torsi mengalami lonjakan besar sekitar setiap 1,2 detik sekali, dengan puncak mencapai lebih dari 460 Nmm di antara lonjakan tersebut, torsi tetap berosilasi namun dalam nilai yang lebih kecil dan stabil secara siklik. Pola ini mencerminkan perilaku beban periodik yang bekerja pada motor akibat mekanisme yang digerakkan. Motor harus mampu menyediakan torsi puncak sebesar ± 465 Nmm untuk mengatasi beban maksimum saat proses penanaman. Data ini sangat berguna untuk proses pemilihan motor, desain rangka, dan analisis ketahanan komponen dalam sistem mesin penanam padi.



Gambar 5. Grafik torsi motor

Grafik ini dapat dianalisis menggunakan pendekatan fungsi periodik + impuls sesaat. Jika kita anggap total torsi motor sebagai gabungan antara torsi dasar berosilasi dan impuls sesaat akibat lonjakan beban, maka:

$$T(t) = A \cdot \sin(2\pi ft) + n = 1 \sum NB \cdot \delta(t - nT) \tag{3}$$

Keterangan:

T(t) : Torsi motor pada waktu t (N·mm)

A : Amplitudo osilasi dasar torsi (N·mm)

F : Frekuensi osilasi dasar (Hz)

$\delta(t-nT)$: Fungsi delta Dirac (melambangkan impuls tiba-tiba pada waktu tertentu)

B : Besarnya lonjakan torsi (sekitar 465 N·mm)

- T : Periode impuls (sekitar 1.2 s)
- N : Bilangan bulat, menunjukkan ke berapa kali lonjakan terjadi

Osilasi Dasar:

$$T1(t) = A \cdot \sin(2\pi ft) \tag{4}$$

Dengan:

- A : 100 N·mm (amplitudo osilasi)
- f : 2 Hz (karena ada sekitar 12 gelombang dalam 6 detik)

Lonjakan Torsi (Gaussian Pulse):

$$T2(t) = n = 1 \sum 3B \cdot e^{-2\sigma^2(t - nT)^2} \tag{5}$$

Dengan:

- B : 365 N·mm (karena lonjakan total ≈ 465, dan osilasi dasar ≈ 100)
- T : 1.2 s (interval antar lonjakan)
- σ : 0.05 s (lebar lonjakan, kecil agar tajam seperti pada grafik)
- n : 1,2,3 (untuk lonjakan di t ≈ 1.2 s, 2.4 s, dan 3.6 s)

Persamaan Akhir:

$$T(t) = 100 \cdot \sin(4\pi t) + n = 1 \sum 3365 \cdot e^{-2(0.05)^2(t - 1.2n)^2}$$

Keterangan:

- T(t) : Total torsi motor (N·mm)
- Bagian sinus : osilasi torsi motor normal
- Bagian eksponensial: simulasi lonjakan torsi mendadak (impuls lonjakan)

Analisis dinamika memperlihatkan bahwa torsi maksimum yang dibutuhkan oleh sistem berada pada kisaran ±465 N·mm, sedangkan daya puncak berkisar antara 4–7 kW pada kecepatan sudut poros sekitar 3000 deg/s. Nilai ini relatif moderat untuk kapasitas mesin penanam padi multi-baris, sehingga memungkinkan penggunaan motor listrik atau motor bensin berdaya menengah yang tersedia di pasaran. Beban dinamis yang terukur juga menunjukkan profil yang dapat diprediksi, sehingga memudahkan proses pemilihan dan perancangan komponen transmisi daya.

3.6. Studi Energi Kinetik Rotasi Poros, Pulley, dan Roda dalam Sistem Penanaman Bibit

Berdasarkan pada Gambar 6, grafik menunjukkan nilai energi kinetik sudut (dalam satuan joule) dari komponen yang berbeda kemungkinan roda, poros, dan pulley. Sumbu X menunjukkan waktu (dalam detik), sedangkan Sumbu Y menunjukkan energi kinetik sudut. Pada grafik, kurva berbentuk garis horizontal datar tanpa fluktuasi, menunjukkan nilai energi yang konstan sepanjang waktu simulasi (0–6 detik). Energi kinetik sudut yang konstan berarti bahwa kecepatan sudut komponen tersebut juga konstan. Kestabilan energi ini merupakan indikasi efisiensi, karena tidak ada energi yang terbuang akibat percepatan/ perlambatan tak perlu. Ini juga berarti bahwa perancangan sistem transmisi bekerja dengan baik dan efisien, mampu menjaga kestabilan putaran selama proses penanaman berlangsung. Ketiga komponen yang dianalisis menunjukkan performa kinematis yang stabil hal ini menunjukkan bahwa perencanaan kecepatan putaran, massa inersia, dan torsi yang diterapkan sudah sesuai untuk menciptakan sistem tanam yang halus dan konsisten.

Energi Kinetik Rotasi (Disesuaikan dengan Grafik):

$$Ek(t) = \frac{1}{2} I \cdot \omega(t)^2 \tag{6}$$

Nilai Ek(t) tetap konstan dan ≈ 0 sepanjang waktu.

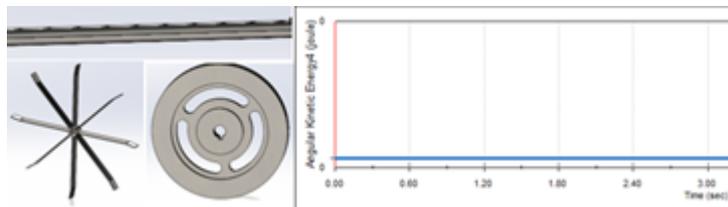
$$Ek(t) = \frac{1}{2} I \cdot (0)^2 = 0$$

Jika digambarkan sebagai fungsi waktu:

$$Ek(t) = 0, \forall t \in [0, 6 \text{ detik}]$$

Atau jika kecepatan sudut konstan dan kecil (ω_0), maka:

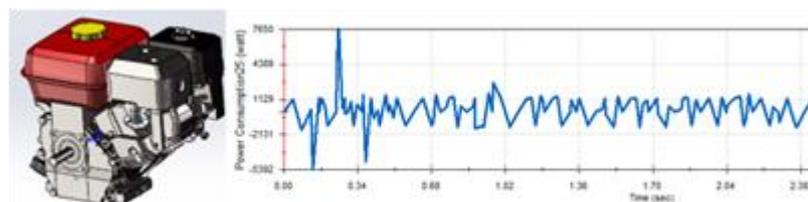
$$Ek(t) = \frac{1}{2} I \cdot \omega_0^2 (\text{nilai tetap, konstan terhadap waktu})$$



Gambar 6. Grafik Energi kinetik Sudut Poros, Pulley, dan Roda.

3.7. Analisis Perhitungan Konsumsi Energi Motor Sebagai Sumber Daya Penggerak

Berdasarkan pada Gambar 7, grafik menunjukkan hubungan antara *Power Consumption* (Watt) terhadap *Time (second)*, dan waktu total pengamatan adalah sekitar 3.4 detik. Konsumsi daya berfluktuasi secara signifikan dengan lonjakan tajam sekitar $t = 0.3 \text{ s}$ yang mencapai lebih dari 7000 Watt. Setelah lonjakan awal, grafik menunjukkan osilasi fluktuatif dengan pola yang relatif stabil, berkisar antara -2000 Watt sampai 4000 Watt. Ada fluktuasi negatif, yang bisa menunjukkan reversi energi (regeneratif braking) atau simulasi transien awal saat beban berubah drastis. Lonjakan daya awal menunjukkan momen awal beban berat masuk sistem (mungkin motor mulai memutar beban 100 kg). Setelah lonjakan, sistem masuk ke kondisi kerja osilasi reguler, kemungkinan disebabkan oleh beban periodik atau gaya inersia berulang. Nilai daya sesekali negatif menunjukkan bahwa sistem memiliki komponen regeneratif (*motor acting as generator*), atau adanya kesalahan sinyal/*noise transien* diawal simulasi.



Gambar 7. Grafik Konsumsi Daya Motor

Rumus Umum Daya Mekanis Rotasi:

$$P(t) = \tau(t) \cdot \omega(t) \tag{7}$$

Keterangan:

$P(t)$: Daya pada waktu t (Watt)

$\tau(t)$: Torsi motor (Nm)

$\omega(t)$: Kecepatan sudut (rad/s)

Karena grafik menunjukkan lonjakan awal besar (impuls daya) dan diikuti osilasi periodik maka kita bisa modelkan:

$$P(t) = A \cdot e^{-\alpha(t - t_0)} \cdot \sin(2\pi ft) + C \tag{8}$$

Keterangan:

A : Amplitudo awal lonjakan daya (misal 7500 W)

α : Koefisien redaman lonjakan awal

- t : Waktu puncak lonjakan (sekitar 0.3 s)
 f : Frekuensi osilasi daya ($\approx 6\text{--}10$ Hz tergantung jumlah gelombang dalam 3 detik)
 C : Nilai offset daya rata-rata (mungkin sekitar 500–1000 W).

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi kinematika dan dinamika, mekanisme lengan penanam pada rancangan mesin penanam padi ini mampu mempertahankan jarak tanam konsisten sebesar 0,25 m dengan pergerakan yang stabil dan torsi maksimum yang relatif moderat (± 465 N·mm). Desain ini berpotensi meningkatkan produktivitas hingga lebih dari 7 kali lipat dibandingkan metode manual, serta menawarkan efisiensi energi yang lebih baik dibandingkan sebagian besar mesin penanam konvensional. Untuk penerapan di lapangan, diperlukan pelatihan operator agar mampu mengoperasikan dan merawat mesin sesuai prosedur, termasuk penyesuaian kecepatan maju dan pengaturan kedalaman tanam sesuai kondisi lahan. Pengujian di berbagai jenis tanah dan kondisi air sawah juga penting dilakukan guna memastikan kinerja tetap optimal. Disarankan pula adanya ketersediaan suku cadang dan dukungan teknis di wilayah penggunaan untuk menjamin keberlanjutan operasional.

Pengembangan selanjutnya dapat mengarah pada integrasi sensor dan sistem kendali otomatis untuk memantau kinerja mesin secara real-time, termasuk deteksi jarak tanam dan jumlah bibit tertanam. Pemanfaatan energi terbarukan, seperti panel surya untuk mendukung sumber daya listrik, juga dapat menjadi inovasi untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Selain itu, *modularisasi desain* memungkinkan penyesuaian lebar kerja sesuai kebutuhan, sehingga mesin dapat diaplikasikan pada skala usaha tani yang berbeda. Dengan implementasi yang tepat dan pengembangan lanjutan, teknologi ini berpotensi mempercepat modernisasi proses penanaman padi, mengurangi ketergantungan pada tenaga kerja manual, serta meningkatkan efisiensi dan daya saing sektor pertanian.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Agus Wijianto, ST., MT sebagai dosen pembimbing yang telah membantu dalam proses menyelesaikan jurnal tersebut untuk penelitian dan jalur publikasi. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada seluruh dosen Teknik Mesin yang juga telah memberikan pembelajaran dan bimbingannya kepada saya, dan kepada kawan-kawan yang telah bekerja keras untuk membantu saya dalam menyelesaikan jurnal tersebut.

Daftar Pustaka

- Al-Hossain, Sayed Jaber, Muhammad Rashed Al Mamun, Md. Khalid Hasan Sowrab, Md. Janibul Alam Soeb, dan Prosenjit Saha. 2024. "Design and Fabrication of an Autonomous Rice Transplanter." *American Journal of Agricultural Science, Engineering, and Technology* 8 (2): 39–48. <https://doi.org/10.54536/ajaset.v8i2.3108>.
- Deshmukh, Bhushan, Sagar Thombare, Ankit Ejgirwar, Jitesh Kosariya, Lav Parate, Sachin Sontakke, dan Ankush Parate. 2018. "Development and Fabrication of Manual Rice Transplanting Machine." *International Journal of Research Available*. <https://edupediapublications.org/journals>.
- Hilmy, Mochamad, Hamidah Hendrarini, dan Risqi Firdaus Setiawan. 2025. "Analisis Efisiensi Penggunaan Rice Transplanter dan Konvensional pada Usahatani Padi di Desa Lasem Kecamatan Sidayu Kabupaten Gresik." *Jurnal Ilmiah Respati*. <https://ejournal.urindo.ac.id/index.php/pertanian>.
- Hu, Kai, dan Wenyi Zhang. 2018. "Design and Simulation for Driving System and Steering System of Hydraulic Chassis of Rice Transplanter." *Advances in Mechanical Engineering* 10 (10). <https://doi.org/10.1177/1687814018808901>.

- Irmayani, Meity Melani Mokoginta, Poornika Kumari Seelagama, Abdullah, Dina Aprianty Azis, Mukhlis, dan Masnur. 2024. "Strategy Analysis for Implementing Rice Transplanter Planting Machine Technology in Rice Farming Using the Interpretive Structural Modeling (ISM) Method in South Sulawesi." *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA* 10 (4): 1827–36. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v10i4.7124>.
- Pimpalgaonkar, S. M., Tushar P. Sapate, Subhash K. Baghel, Vaibhav D. Wadibhasme, Sumeet S. Thosar, dan Sachin W. Bawane. 2020. "Design and Development of Rice Transplanting Machine." *International Research Journal of Engineering and Technology*. <https://www.irjet.net>.
- Randi Saputra. 2023. "Rancang Bangun Alat Tanam Padi Semi Mekanik Tadah Benih Horizontal Metoda Rotary." *Jurnal Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat*.
- Ristiawan, Ichsan, Simon Parekke, Eko Despryanto, Muhammad Afif Zakwan, dan William Rompi. 2018. "Rancang Bangun Alat Penanam Padi dengan Sistem Penggerak Manual dan Motor Bakar." *Dinamika Jurnal Ilmiah Teknik Mesin* 10 (1).
- Rofarsyam. 2019. "Modifikasi Mesin Penanam Bibit Padi Manual dengan Transmisi Rantai Penggerak Motor Bensin 1.8 HP."
- Salam, Abdul, Yosrihard Basongan, Laode Musa, Andi Rifqih Saputra, Linda Hidayanti, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri, dan Ujung Pandang. 2024. "Pengembangan Alat Penanam Bibit Padi pada Kelompok Tani Manjalling." *Politeknik Negeri Ujung Pandang News*. <https://www.poliupg.ac.id/berita/read/2024/09/23/1195/pnup-tingkatkan-produktivitas-pertanian-melalui->
- Salam, Abdul, Rusdi Nur, Adil Adil, Fitriah Jannah, dan M. Fathur Hidayat. 2025. "Pengembangan Desain Konstruksi Mesin Penanam Bibit Padi Menggunakan Motor Listrik Inverter." *Jurnal Teknik Mesin Sinergi* 22 (2): 319–25. <https://doi.org/10.31963/sinergi.v22i2.4878>.
- Sarwoko, dan Revino. 2020. "Perancangan Alat Bantu Tanam Bibit Padi Sawah secara Ergonomis dalam Upaya Meningkatkan Efisiensi Waktu Tanam."
- Sugiarto, Hata, Rini Puji Astutik, dan Pressa Perdana Surya Saputra. 2023. "Rancang Bangun Sistem Kendali Alat Penanam Padi Otomatis Berbasis IoT Menggunakan ESP32 CAM." *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan* 8 (1): 81–90. <https://doi.org/10.33379/gtech.v8i1.3553>.
- Sulistyaningsih, Arnudin Laia. 2022. "Pemanfaatan Alat Rice Transplanter dalam Usahatani Padi Sawah (Kasus di UD Maju Jaya dan Kelompok Tani Bersatu Situbondo)." *Jurnal Pertanian Agros* 24 (3). <https://doi.org/10.20956/jppipa.v10i4.7124>.
- Susanti, Oknovia, dan Bima Sugesti Arif. 2020. "Perancangan dan Pembuatan Mesin Pemotong Padi Sederhana di Desa Pitalah Kabupaten Tanah Datar." *Jurnal Hilirisasi IPTEKS* 3.
- Yang, Jiajia, Maile Zhou, Daqing Yin, dan Jianjun Yin. 2024. "Design and Development of Rice Pot-Seedling Transplanting Machinery Based on a Non-Circular Gear Mechanism." *Applied Sciences* 14 (3). <https://doi.org/10.3390/app14031027>.
- Yantony, Didit, Simon Parekke, dan Oktavianus Risa. 2024a. "Rancang Bangun Mekanisasi Penanam Padi Organik Lima Lajur dengan Penggerak Motor DC 12 Volt." *Jurnal Vokasi Teknik Mesin dan Fabrikasi Logam* 3 (2).
- Zha, Xiantao, Guozhong Zhang, Shijie Zhang, Qunxi Hou, Yang Wang, dan Yong Zhou. 2020. "Design and Experiment of Centralized Pneumatic Deep Precision Fertilization Device for Rice Transplanter." *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 13 (6): 109–17. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201306.5479>.
- Zhong, Zhidong, Yifan Yao, Jianyu Zhu, Yufei Liu, Juan Du, dan Xiang Yin. 2025. "Automation of Rice Transplanter Using Agricultural Navigation." *Agriculture* 15 (11). <https://doi.org/10.3390/agriculture15111125>.