

Perancangan *Shaking Rig Simulator Irregularities* Sarana dan Prasarana Kereta Api

^{1*)}Paresya Arva Seta, ²⁾Agustinus Winarno, ³⁾Budi Basuki,
⁴⁾Ignatius Aris Hendaryanto

^{1,2,3,4)}Program Studi Teknologi Rekasaya Mesin, Departemen Teknik Mesin, Sekolah Vokasi,
Universitas Gadjah Mada

Bulaksumur Caturtunggal, Depok, Sleman, Yogyakarta, Indonesia

*Email: winarno_agustinus@mail.ugm.ac.id

Diterima: 14.10.2024, Disetujui: 08.12.2024, Diterbitkan: 09.12.2024

ABSTRACT

The train is one of the main modes of transportation used in various countries in the world, including Indonesia. The existence of an efficient railway network can support the mobility of people and goods. The safety and comfort of train travel is highly dependent on the condition of the railway facilities and infrastructure. The condition of facilities and infrastructure that meet standards will make the journey smoother and reduce the risk of accidents. With human mobility, the development of public transportation using trains in Indonesia also continues to increase. Damage to train tracks can cause disruption to comfort and endanger safety caused by excessive vibration during train travel, so regular maintenance and repair of the rails is required using a system called the Intelligent Railway Vibration Monitoring System (IRV-MS). The IRV-MS system still needs to be tested because the resulting vibration readings still require validation. The design of this shaking rig simulator is expected to be a solution in terms of vibration testing. This shaking rig can move in a vertical or horizontal linear direction with a linear motor as a driver and produce oscillatory movements. The design of this shaking rig simulator tool uses Solidworks software with 500 mm x 423 mm x 380 mm of dimension and later vibration animation will be simulated in the motion study feature in the software with input parameters of 3-10 Hz with a maximum stroke of 20 mm.

Keywords: Shaking Rig, Vibration Testing, Train, Accelerometer.

INTISARI

Kereta api merupakan salah satu moda transportasi utama yang digunakan di berbagai negara di dunia, termasuk Indonesia. Keberadaan jaringan kereta api yang efisien dapat mendukung mobilitas penduduk dan barang. Keamanan dan kenyamanan perjalanan kereta api sangat tergantung pada kondisi dari sarana maupun prasarana kereta api. Kondisi sarana maupun prasarana yang sesuai dengan standar akan membuat perjalanan menjadi lebih lancar dan mengurangi risiko kecelakaan. Dengan adanya mobilitas manusia, perkembangan transportasi umum menggunakan kereta api di Indonesia juga terus meningkat. Kerusakan pada rel kereta dapat menyebabkan gangguan pada kenyamanan dan membahayakan keselamatan yang disebabkan oleh getaran berlebih saat perjalanan kereta, sehingga diperlukan perawatan dan perbaikan rel secara teratur menggunakan sistem bernama *Intelligent Railway Vibration Monitoring System* (IRV-MS). Sistem IRV-MS masih perlu dilakukan pengujian karena pembacaan getaran yang dihasilkan masih membutuhkan validasi. Perancangan *shaking rig simulator* ini diharapkan mampu menjadi solusi dalam hal pengujian getaran. *Shaking rig* ini bisa bergerak ke arah linear vertikal maupun horizontal dengan linear motor sebagai penggerak dan menghasilkan gerakan osilasi. Material pada *frame* ini menggunakan baja karbon rendah dengan ketebalan 4 mm. Perancangan alat *shaking rig simulator* ini menggunakan *software solidworks* dengan dimensi 500 mm x 423 mm x 380 mm dan akan disimulasikan animasi getaran pada fitur *motion study* yang ada pada *software* dengan input parameter 3-10 hz dengan maksimum *stroke* 20 mm.

Kata Kunci: Shaking Rig, Vibration Testing, Kereta Api, Akselerometer.

I. Pendahuluan

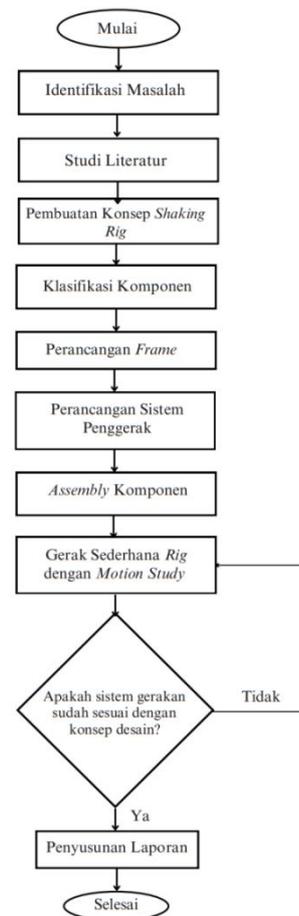
Kereta api merupakan salah satu moda transportasi utama yang digunakan di berbagai negara di dunia, termasuk Indonesia. Keberadaan jaringan kereta api yang efisien dapat mendukung mobilitas penduduk dan barang. Keamanan dan kenyamanan perjalanan kereta api sangat tergantung pada kondisi dari sarana maupun prasarana kereta api. Kondisi sarana maupun prasarana yang sesuai dengan standar akan membuat perjalanan menjadi lebih lancar dan mengurangi risiko kecelakaan. Berdasarkan data perjalanan kereta tahun 2023, kecepatan kereta api saat ini mencapai 120 km/jam dari yang sebelumnya pada kecepatan 80 km/jam. Perencanaan penambahan kecepatan kereta api hingga kecepatan 160 km/jam ini juga akan didukung dengan peningkatan sarana dan prasarana kereta api. Tantangan peningkatan kecepatan ini juga dialami oleh kereta api seperti meningkatkan risiko bahaya yang lebih tinggi serta indikasi kerusakan sarana dan prasarana.

Salah satu indikator kerusakan pada rel kereta adalah adanya getaran. Kerusakan pada *bogie*, keausan dan keretakan pada rel akan menyebabkan getaran. Apabila getaran ini tidak terdeteksi dan diatasi dengan baik maka kerusakan dapat berkembang menjadi lebih parah dan menyebabkan penurunan performa operasional.

Berbagai metode dan alat telah dikembangkan untuk mendeteksi getaran dan menghasilkan data getaran guna mengidentifikasi kerusakan pada rel kereta. Teknologi pendeteksi getaran pada rel kereta yang dikembangkan dalam beberapa tahun terakhir salah satunya adalah *Intelligent railway vibration monitoring system (IRV-MS)* (Charisma, 2021). Namun, masih terdapat tantangan yang harus dihadapi seperti sulitnya pengambilan data di lapangan dan waktu dalam pengambilan data. Sehingga diperlukan simulasi getaran untuk memberikan nilai numerik berbagai jenis kerusakan. Selanjutnya, hasil simulasi tersebut perlu untuk digunakan untuk menggerakkan *shaker* dimana *accelerometer* ditempatkan padanya. Pentingnya penelitian ini tidak hanya terletak pada peningkatan aspek teknis dan operasional kereta api, tetapi juga pada kontribusi terhadap keselamatan publik.

II. Metode Penelitian

Flowchart adalah diagram yang mewakili sebuah proses dalam perancangan. Penelitian perancangan *shaking rig simulator* ini melalui beberapa tahapan yang dijelaskan melalui *flowchart* sebagai berikut.



Gambar 1. Flowchart penelitian

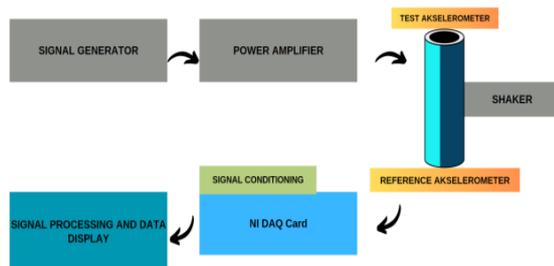
Metode ini dilakukan dengan pengumpulan informasi beserta sumber dari penelitian terdahulu serta jurnal yang berkaitan dengan perancangan desain *shaking rig* terkait pengujian getaran. Metode pengumpulan informasi yang relevan dalam penelitian salah satunya metode pengembangan. Metode tersebut adalah metode sistematis untuk mengembangkan dan mengevaluasi produk maupun prototype. Metode ini mencakup peninjauan literatur terkait alat pengujian getaran melalui buku, jurnal ilmiah, artikel, dan sumber informasi terpercaya lainnya, serta pemahaman yang mendalam tentang aspek teknis yang berhubungan, seperti peralatan yang digunakan dan cara penggunaannya.

Selain itu, aspek non-teknis seperti kerusakan pada sarana dan prasarana kereta api juga turut diperhatikan.

Perancangan adalah suatu proses yang digunakan untuk menciptakan suatu rencana atau desain dengan tujuan untuk mencapai suatu hasil atau menyelesaikan masalah tertentu. Perancangan ini menggunakan *software CAD (Computer Aided Design)*.

Shaking rig merupakan suatu sistem yang digunakan untuk menguji getaran searah sumbu x dan z yang bergerak berdasarkan input dari sebuah parameter dari *function generator*. *Shaking rig* membantu dalam menentukan tingkat akurasi pada getaran yang cukup baik. Alat ini dapat digunakan untuk mendekati nilai akurasi yang sesuai dengan kebutuhan sistem IRV-MS. Sistem *shaking rig* akan mengalami gerakan ke arah sumbu x dan z dengan gerakan sinusoidal yang digerakkan oleh linear motor.

Proses getaran alat *shaking rig* ini dihasilkan oleh penggerak yaitu 2 linear motor dengan axis yang berbeda. Linear motor tersebut memiliki spesifikasi yang bisa menggerakkan beban dengan *continuous force (Fe max)* 20,6 N. Sementara itu, massa dari IRV-MS yaitu 1200 gr. Gambar 2 merupakan mekanisme *shaking rig*.



Gambar 2. Mekanisme sistem *Shaking Rig*

Komponen *shaking rig* diklasifikasikan berdasarkan karakteristik dan fungsi. Hal ini bertujuan untuk mengidentifikasi hubungan antar komponen-komponen. Klasifikasi juga membantu dalam merancang desain yang efisien dan optimal. Dalam klasifikasi grup komponen, perhitungan dan kondisi di lapangan menjadi faktor kunci yang harus dipertimbangkan. Berikut ini adalah klasifikasi komponen untuk perancangan *shaking rig simulator*:

a. Rangka atau *frame*

Rangka atau *frame* pada alat *shaking rig* merupakan komponen utama yang berfungsi membentuk struktur dasar alat ini. Perancangan *frame* terbuat dari material JIS SKD 11 yang terdiri dari dua bagian

penting, yaitu *base frame* dan *side frame*. Rangka memberikan kekuatan dan kestabilan pada mesin uji getar. *Frame* juga digunakan sebagai tempat pengujian dan berperan dalam mendistribusikan serta menyalurkan getaran yang dihasilkan oleh alat ini. Dengan adanya *frame* yang sesuai dengan spesifikasi meliputi ukuran dan jenis material, maka alat *shaking rig simulator* dapat beroperasi dengan optimal.

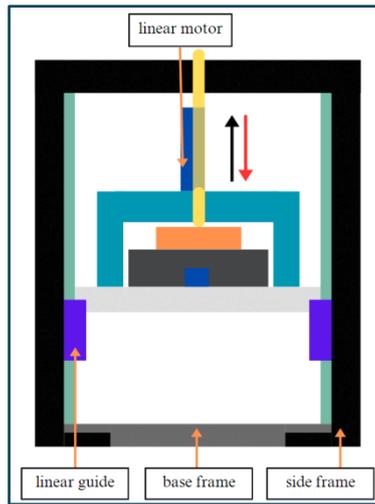
b. Penggerak

Penggerak pada *shaking rig* berfungsi sebagai komponen utama yang menggerakkan meja pengujian. Komponen ini menjadi sumber energi yang menciptakan gerakan vibrasi pada alat, menghasilkan gerakan sinusoidal yang diperlukan dalam proses pengujian getaran. Penggerak harus dirancang dengan mempertimbangkan akselerasi, maksimum *stroke*, *continuous force*, kekuatan, daya tahan, dan kestabilan agar mampu memberikan gerakan yang konsisten dan akurat.

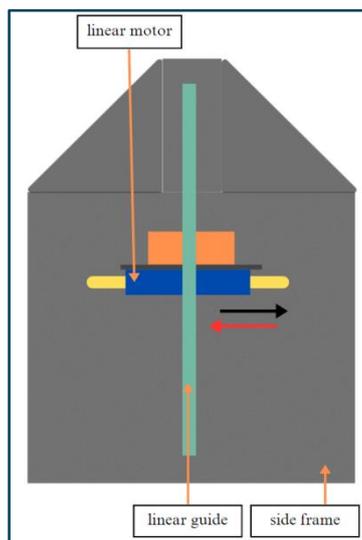
c. Komponen tambahan

Komponen tambahan pada *shaking rig* berfungsi sebagai pelengkap yang mendukung komponen utama dalam proses perakitan alat secara keseluruhan. Komponen tambahan terdiri dari *bracket akselerometer*, *linear holder bracket*, baut *tee hammer head*, *mdf board*, *Holder alumunium*, *alumunium handle aktuator*, *rod support*, *rod alumunium*, dan *base akselerometer*.

Konsep desain menjadi pondasi dalam perancangan alat *shaking rig simulator*. Garis besar perancangan ini mencakup fungsi, deskripsi, tujuan, serta komponen-komponen yang diperlukan dalam desain *shaking rig*. Penggerak pada perancangan ini menggunakan linear motor yang bisa menggerakkan *shaker* dengan arah sumbu x langsung tanpa bantuan alat pengubah gerakan rotasi menjadi linear. Hal ini dikarenakan jenis linear motor ini bisa langsung bergerak ke arah linear dengan menggunakan *rod* yang dipasangkan dengan *rod support* yang terhubung dengan meja. Gerakan sumbu z menggunakan *rod support* yang terhubung dengan *rod* dan gerakan linear ke atas dan bawah. Linear motor dikendalikan oleh sinyal input *motion controllers* dengan series MC 3603 S, kemudian *shaking rig* ini dapat bergerak dengan 2 sumbu yaitu di sumbu x dan z.



Gambar 3. Konsep pergerakan sumbu z



Gambar 4. Konsep pergerakan sumbu x
 tampang samping

Alat dan bahan untuk perancangan *shaking rig* didesain menggunakan *software CAD*. Komponen yang didesain hanya meliputi komponen mekanis. Alat dan bahan untuk penelitian ini menggunakan *software Solidworks 2022* dan Laptop Asus TUF 2018.

Proses desain akan dilakukan berdasarkan desain visual yang telah dibuat dengan beberapa referensi terkait alat *shaking rig* dengan menggunakan peralatan mekanis dan komponen tambahan serta bahan yang akan didesain menggunakan *software CAD*. Desain komponen akan dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut :

1. Pengukuran

Tahap pengukuran dilakukan dengan cara mengukur beberapa komponen mekanis berdasarkan referensi, kondisi lapangan yang sudah sesuai dengan spesifikasi.

2. Pembuatan Part 3D

Pembuatan desain berdasarkan dimensi secara aktual terhadap komponen-komponen mekanis beserta *part* pendukung. Pada tahap ini desain *part* akan disesuaikan kemudian akan dilakukan finalisasi desain.

3. Assembly

Pada tahap *assembly* dan desain akhir dilakukan penyusunan komponen mekanis sesuai desain yang telah dirancang menggunakan *software CAD*.

III. Hasil dan Pembahasan

Penentuan jenis penggerak pada suatu alat *shaking rig simulator* merupakan langkah penting dalam proses desain dan perancangan. Jenis penggerak yang dipilih sangat mempengaruhi performa, efisiensi, biaya, dan keandalan alat tersebut. Faktor-faktor yang harus dipertimbangkan saat menentukan jenis penggerak, di antaranya kecepatan dan torsi yang dibutuhkan, *continuous force*, akselerasi, maksimum *stroke*, kontrol dan presisi, serta keandalan dan power dari suatu penggerak sangat menentukan dalam proses mekanisme pada alat *shaking rig simulator* ini. Berikut merupakan tabel klasifikasi jenis penggerak:

Tabel 1. Klasifikasi Penggerak (Anto, 2017)

Motor DC	Motor Stepper	Motor Servo	Linear Motor
<ul style="list-style-type: none"> • Respon kecepatan dan akselerasi tinggi • Kontrol kecepatan sulit dan tidak presisi • Diperlukan mekanisme pengubah gerakan linier 	<ul style="list-style-type: none"> • Respon dan kecepatan sedang • Kontrol kecepatan presisi • Diperlukan mekanisme pengubah gerakan linier 	<ul style="list-style-type: none"> • Respon dan kecepatan tinggi • Kontrol kecepatan presisi • Diperlukan mekanisme pengubah gerakan linier 	<ul style="list-style-type: none"> • Respon dan kecepatan tinggi • Kontrol kecepatan presisi • Pergerakan sudah linear
●	●	●	●
▲	▲	▲	▲
×	×	×	×
○	○	○	○

● OK ▲ MID × NO

Berdasarkan tabel 1 pada klasifikasi penggerak, penentuan jenis penggerak berada pada jenis linear motor karena beberapa faktor. Pertama, linear motor memiliki respon dan kecepatan yang tinggi kemudian kontrol kecepatan dalam penerapan di linear motor bisa sangat presisi. Terakhir, faktor dari sistem mekanisme pergerakan yang sudah linear. Pada linear motor, sistem pergerakan linear menjadi faktor yang sangat menentukan untuk pergerakan ke arah sumbu x dan juga sumbu z pada perancangan alat *shaking rig simulator* ini.

Pemilihan jenis linear motor pada suatu alat atau mesin sangat tergantung pada kebutuhan aplikasi, performa yang diinginkan, dan kondisi operasional. Jenis linear motor yang umum digunakan dan pemilihannya harus mempertimbangkan beberapa faktor seperti

maksimum *stroke*, *continous force*, *peak force*, panjang *rod*, serta akselerasi dari linear motor. Berdasarkan parameter tersebut, ada beberapa macam linear motor salah satunya adalah tipe Linear DC-Servo Motor yang memiliki keseluruhan parameter yang dibutuhkan oleh alat *shaking rig simulator* ini. Berikut merupakan jenis-jenis linear motor dan spesifikasinya:

Tabel 2. Spesifikasi Linear Motor (Faulhaber, 2024)

Parameter	DC-Servo Linear Motor Series 1247-20-11	DC-Servo Linear Motor Series 1483-20-11	DC-Servo Linear Motor Series 2070-20-11
Maksimum Akselerasi	187,6 m/s ²	158 m/s ²	83,7 m/s ²
Maksimum Stroke	20 mm	20 mm	20 mm dan 40 mm
Continous Force	3,6 N	9,2 N	20,6 N
Panjang Rod	- 80 mm - 160 mm	- 160 mm - 260 mm	- 180 mm - 260 mm - 360 mm

Berdasarkan tabel 2, dari ketiga jenis linear motor tersebut memiliki fungsi dan cara kerja yang sama, tetapi yang membedakan dan menjadi faktor utama dalam pemilihan ketiga jenis linear motor tersebut yaitu maksimum *stroke* pada *shaking rig simulator* adalah 20 mm sehingga semua tipe linear motor masuk dalam spesifikasi, kemudian faktor pemilihan kedua adalah panjang dari batang (*rod*) serta *continous force* ($F_{e\ max}$) yang paling tinggi yaitu tipe linear motor *series* 2070-20-11 di mana arti dari kode tersebut yaitu, 20 pertama merupakan lebar motor (dalam mm), 70 merupakan panjang motor (dalam mm), 20 merupakan maksimum *stroke*, dan angka 11 adalah tipe linear dari kode produk tersebut. Berikut merupakan parameter yang dibutuhkan pada alat *shaking rig simulator*:

1. *Continous Force* ($F_{e\ max}$) = 18,4 N
2. *Stroke length* (S_{max}) = 20 mm
3. Akselerasi ($a_{e\ max}$) = 10 m/s²
4. *Rod length* = 180,254 mm

Tabel 3. Spesifikasi Linear Motor 2070-20-11 (Faulhaber, 2024)

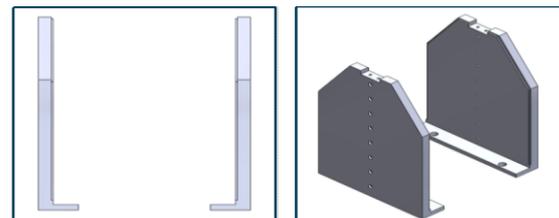
Continuous force	$F_{e\ max}$	20,06	N
Peak force	$F_{p\ max}$	27,6	N
Continuous current	$I_{e\ max}$	1,09	A
Peak current	$I_{p\ max}$	2,4	A
Back-EMF constant	k_e	9,5	V/m/s
Force constant	k_f	18,9	N/A

Tabel 4. Spesifikasi Linear Motor 2070-20-11 (Faulhaber, 2024)

Stroke length	S_{max}	20	mm
Repeatability	σ_r	60	μ m
Accuracy	σ_a	200	μ m
Acceleration	$a_{e\ max}$	83,7	m/s ²
Speed	$V_{e\ max}$	1,8	m/s
Rod length	$L1$	180, 254	mm

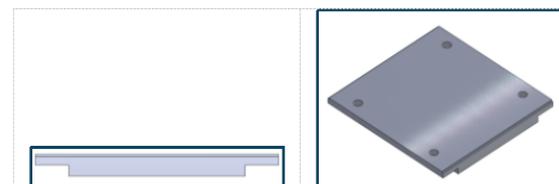
Berdasarkan tabel 3 dan 4, spesifikasi dan parameter yang dibutuhkan oleh alat *shaking rig simulator*, linear motor tipe 2070-20-11 memenuhi syarat dari parameter yang dibutuhkan, sehingga pemilihan penggerak pada perancangan alat ini menggunakan tipe motor linear 2070-20-11 dengan *continous force* sebesar 20,06 N, maksimum *stroke* 20 mm, dan akselerasi sebesar 83,7 m/s².

Perancangan *frame* pada suatu alat sangat penting karena *frame* berfungsi untuk mendukung keseluruhan struktur, menahan beban, dan menjaga kestabilan alat selama alat beroperasi. *Frame* harus dirancang untuk memberikan kekuatan, kekakuan, dan ketahanan terhadap berbagai jenis gaya yang terjadi selama penggunaan alat *shaking rig simulator* ini. Langkah-langkah dan pertimbangan utama dalam perancangan *frame* pada alat, yaitu pertama terkait dengan pemilihan material. Pemilihan material sangat penting untuk dalam memastikan kekuatan, daya tahan serta biaya produksi. Kedua, pertimbangan desain struktur yang dapat mendistribusikan beban secara efektif.



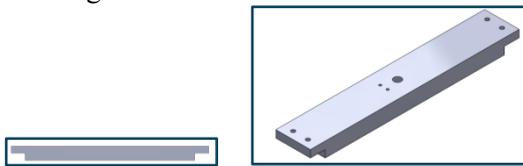
Gambar 5. Side frame

Gambar 5 merupakan *side frame* sebagai *frame* utama dari alat. Material dari alat *shaking rig simulator* menggunakan JIS SKD11 yang merupakan baja dengan karbon dan kromium tinggi, kandungan karbon 1,4 sampai 1,9. Dimensi alat 500×423×380 mm.

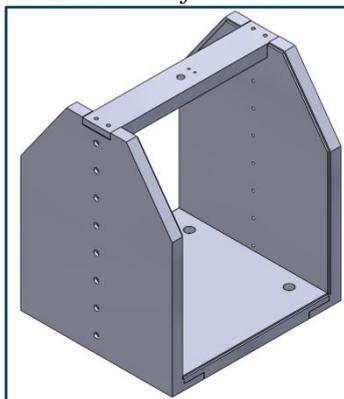


Gambar 6. Base frame

Pada perancangan kedua, seperti pada gambar 6, *base frame* disambungkan menggunakan mur dan baut dengan ukuran diameter lubang 22 mm, serta akan diperkuat *front frame* yang akan disambungkan menggunakan *dowel pin* dengan diameter lubang 8 mm.



Gambar 7. *frame atas*



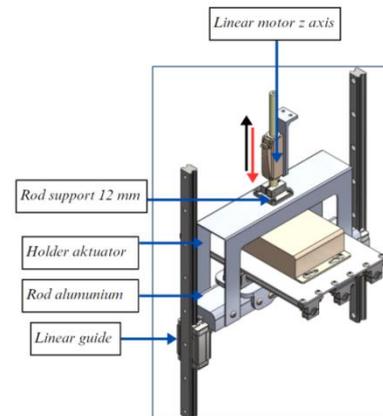
Gambar 8. *frame shaking rig*

Gambar 8 merupakan hasil perancangan dari rangka *shaking rig simulator*. Terdapat 8 lubang yang berada di sisi kanan dan kiri *frame* yang berfungsi sebagai sarana untuk penyambungan *linear guide* dengan mur dan baut dengan diameter 6 mm. Yang terakhir adalah 4 lubang *base frame* dengan diameter 22 mm sebagai penyambung antara *base frame* dan juga *side frame*, di mana nantinya akan dipasangkan *damping vibration* di lubang tersebut.

Perancangan sistem penggerak di sumbu z diawali dari linear motor yang disambungkan oleh *rod support* dengan diameter 12 mm, di mana *rod* pada linear motor tersebut mampu mengangkat sejumlah beban seperti *holder aktuator*, *rod aluminium*, meja akrilik pada IRV-MS, dan juga linear motor *rod support* yang ada dibawah *base x axis* yang berada pada jalur *linear guide* di samping kanan dan kiri dari *frame*. Dengan spesifikasi dan parameter yang telah ditentukan, linear motor mampu bergerak dan menghasilkan getaran ke arah linear sumbu z (atas-bawah).

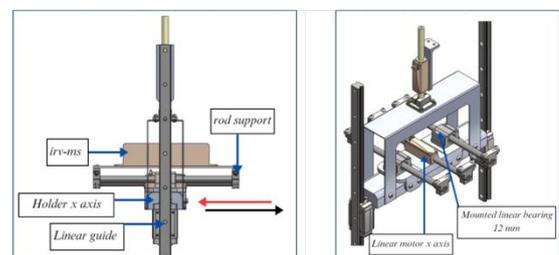
Perancangan sistem penggerak pada sumbu x dimulai dari linear motor yang menghadap pada arah linear ke sumbu x yang disambungkan dengan *rod support* untuk menopang meja akrilik dari IRV-MS. Selain *rod*

pada linear motor, terdapat perancangan 2 *rod* lain sebagai penguat yang dipasangkan dengan komponen *mounted linear bearing* dengan ukuran diameter *shaft* 12 mm dan juga menjaga keseimbangan pada *base x axis* yang menopang IRV-MS. Linear motor menghasilkan getaran ke arah sumbu z dan menghasilkan gerakan osilasi sepanjang 20 mm sesuai dengan parameter *stroke* maksimum yang telah ditentukan.



Gambar 9. *Sistem penggerak z axis*

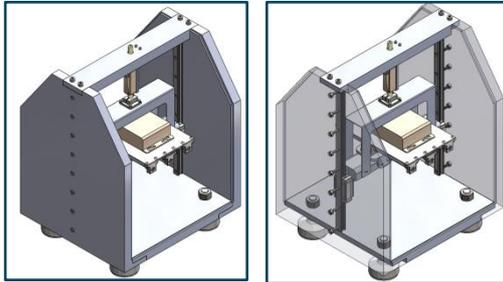
Setelah menyelesaikan tahapan penentuan penggerak, jenis linear motor, perancangan rangka, perancangan sistem penggerak dan komponen pendukung lainnya, langkah berikutnya adalah proses *assembly* dari semua komponen. *Shaking rig simulator* dirancang dengan tujuan untuk menghasilkan getaran yang dihasilkan oleh gerakan linear ke arah sumbu x dan sumbu z secara bersamaan dengan 2 linear motor.



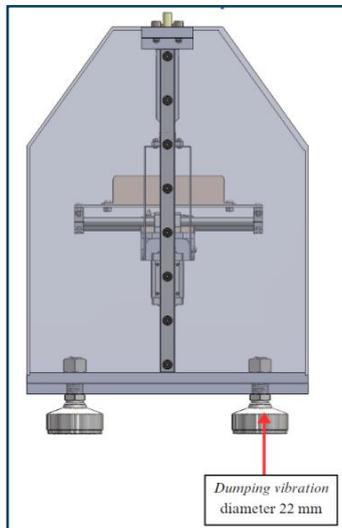
Gambar 10. *Sistem penggerak x axis*

Mekanisme tersebut melibatkan penggunaan linear motor yang disambungkan dengan *rod support* di bagian sumbu z, kemudian menghasilkan gerakan osilasi naik-turun searah sumbu z dengan berada pada jalur *linear guide* yang tersambung oleh *aluminium rod*. Pada mekanisme sumbu x, linear motor disambungkan oleh *rod support* yang menopang meja akrilik dan juga IRV-MS dan

bergerak osilasi dengan arah linear ke arah sumbu x. Sensor dan kontroler terintegrasi untuk mengatur kecepatan, akselerasi, maksimum *stroke*, dan arah gerakan sesuai dengan perintah atau program yang telah ditentukan. Hal ini memungkinkan *base x axis* untuk bergerak ke arah sumbu x dan sumbu z secara bersamaan dan menghasilkan suatu getaran.



Gambar 11. Hasil assembly pandangan isometrik



Gambar 12. Hasil assembly tampak samping

Pada umumnya, perhitungan beban atau *load calculation* digunakan dalam bidang mekanis terutama pada sebuah perancangan alat untuk memastikan bahwa sebuah struktur atau sistem dapat menahan beban yang diterapkan. Dalam tahap ini, perlu mengetahui beberapa parameter yang telah ditentukan seperti *continuous force* ($F_{e\ max}$), percepatan (a), total massa (g), dan maksimum *stroke* (S_{max}).

Berdasarkan parameter tersebut, maka dilakukan sebuah perhitungan seperti berikut, keterangan pada tabel 4.3 pada spesifikasi *datasheet* diketahui konstanta gaya pada linear motor (K_f) sebesar 18,9 N/A, dan arus kontinu (I_e) sebesar 1,09 A.

$$F_{e\ max} = K_f \times I_e \quad (1)$$

$$F_{e\ max} = 18,9\ \text{N/A} \times 1,09\ \text{A}$$

$$F_{e\ max} = 20,6\ \text{N}$$

Keterangan :

$$F_{e\ max} = \text{continuous force (N)}$$

$$K_f = \text{konstanta gaya linear motor (N/A)}$$

$$I_e = \text{arus kontinu (A)}$$

Berdasarkan perhitungan tersebut, *continuous force* pada linear motor sebesar 20,6 N, artinya linear motor tersebut dapat menghasilkan gaya dorong dan gaya tarik secara konstan dan kontinu tanpa mengalami *overheating* dan penurunan kinerja selama pengoperasian. Perhitungan beban maksimum yang diterima oleh linear motor dengan akselerasi 10 m/s² dengan *continuous force* sebesar 20,6 N adalah sebagai berikut.

$$F_{e\ max} = m \times a \quad (2)$$

$$20,6\ \text{N} = m \times 10\ \text{m/s}^2$$

$$m = \frac{20,6\ \text{N}}{10\ \text{m/s}^2}$$

$$m = 2,06\ \text{kg}$$

Keterangan :

$$F_{e\ max} = \text{continuous force (N)}$$

$$a = \text{akselerasi (m/s}^2\text{)}$$

$$m = \text{massa (kg)}$$

Tabel 5. Massa Komponen

NO	Nama Komponen	Berat Komponen
1.	IRV-MS	1200 g
2.	Aluminium Handle Aktuator	125 g
3.	Meja Akrilik	50 g
4.	Aluminium Handle 30 cm	160 g
5.	Aluminium flange mounted rod support	156 g
6.	Linear motor base mounted rod support	190 g
	<i>Total load</i>	1881 g = 1,881 kg

Berdasarkan tabel 5 terdapat beberapa komponen yang harus diangkat oleh suatu sistem linear motor yang bergerak di sumbu z, di mana total komponen dengan massa total 1,88 kg harus digerakkan dengan arah vertikal, maka diperlukan perhitungan gaya berat.

$$W = m \times g \quad (3)$$

$$W = 1,881\ \text{kg} \times 9,8\ \text{m/s}^2$$

$$W = 18,43\ \text{N}$$

Keterangan :

$$W = \text{gaya berat (N)}$$

$$m = \text{massa (kg)}$$

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

Total gaya berat sebesar 18,43 N, artinya linear motor dengan *continuous force* ($F_{e\ max}$) sebesar 20,6 N bisa menggerakkan total gaya berat sebesar 18,43 N secara berkelanjutan dan konstan tanpa mengalami suatu permasalahan suhu dan kinerja.

Perhitungan frekuensi getaran yang dihasilkan dari gerakan osilasi dari *rod* linear motor dihitung dengan mengetahui beberapa parameter, seperti maksimum *stroke*, akselerasi, *continuous force*, dan kecepatan awal. Langkah pertama yaitu menghitung kecepatan akhir dengan persamaan kinematika.

$$V_f^2 = V_i^2 + 2ad \quad (4)$$

$$V_f = 0 + \sqrt{2 \times 10 \times 0.02}$$

$$V_f = \sqrt{0.4}$$

$$V_f = 0.632 \text{ m/s}$$

Keterangan :

V_f = kecepatan akhir (m/s)

V_i = 0 m/s (kecepatan awal)

a = 10 m/s^2 (akselerasi)

d = 20 mm = 0.02 m (*stroke max*)

Langkah berikutnya yaitu perhitungan waktu akselerasi, di mana durasi yang dibutuhkan oleh sebuah benda untuk berubah kecepatannya ketika mengalami percepatan. Dalam konteks kinematika, waktu akselerasi dapat dihitung menggunakan persamaan kinematika dasar jika kita mengetahui percepatan, kecepatan awal, dan kecepatan akhir.

$$t_a = \frac{V_f}{a} \quad (5)$$

$$t_a = \frac{0,632 \text{ m/s}}{10 \text{ m/s}^2}$$

Keterangan:

t_a = waktu akselerasi

Perhitungan waktu total siklus pada sebuah linear motor yang beroperasi dalam gerakan bolak-balik perlu mempertimbangkan karakteristik gerakan seperti *stroke* (jarak tempuh maksimum), waktu akselerasi dan kecepatan. Waktu untuk satu siklus yaitu bergerak dari ujung *stroke* ke ujung lainnya kemudian kembali lagi ke posisi awal adalah dua kali waktu akselerasi.

$$t_{cycle} = 2 \times t_a \quad (6)$$

$$t_{cycle} = 2 \times 0,0632 \text{ s}$$

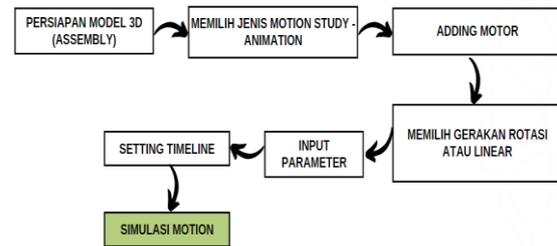
$$t_{cycle} = 0,1264 \text{ s}$$

Keterangan :

- t_{cycle} = waktu untuk menempuh 1 siklus

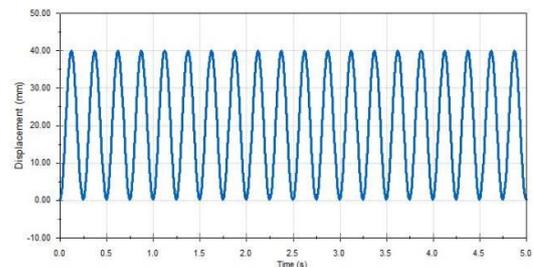
Frekuensi getaran didapatkan ketika sudah mengetahui waktu 1 siklus yaitu gerakan osilasi dari linear motor dengan waktu 0,126 s. t_{cycle} bisa juga disebut sebagai 1 periode (T)

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,126 \text{ s}} = 7,1 \text{ Hz}$$



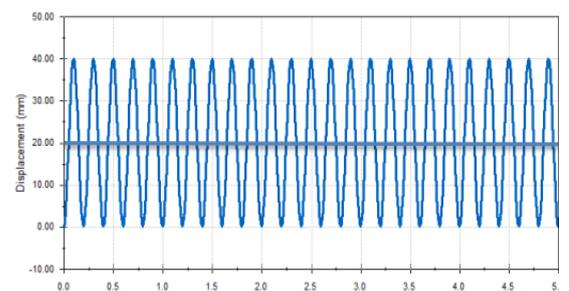
Gambar 13. Mekanisme motion study

Hasil simulasi *animation* pada *motion study solidworks* adalah visualisasi gerakan dari model 3D tanpa melibatkan perhitungan fisika seperti gaya, torsi, gravitasi, atau gesekan. Pada gambar 13, mekanisme *Animation* digunakan terutama untuk membuat presentasi atau animasi gerakan komponen mekanis secara visual. Terdapat *output* dari *motion* berupa grafik hubungan *displacement* terhadap waktu. *Input* parameter frekuensi 3-10 Hz dan maksimum *stroke* pada *rod linear* motor 20 mm. Pada gambar 14, hasil input frekuensi 4 Hz pada simulasi *motion study* menghasilkan gerakan osilasi sebanyak 4 kali dalam 1 waktu (s).



Gambar 14. Hasil input parameter 4 Hz

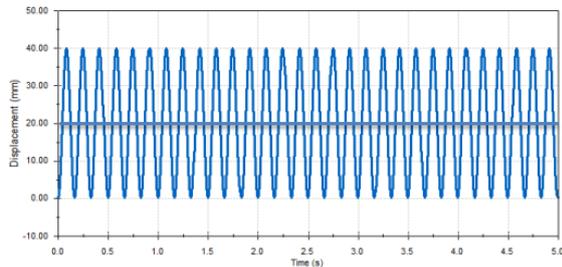
Pada gambar 15, hasil input frekuensi 5 Hz pada simulasi *motion study* menghasilkan gerakan osilasi sebanyak 5 kali dalam 1 waktu(s).



Gambar 15. Hasil input parameter 5 Hz

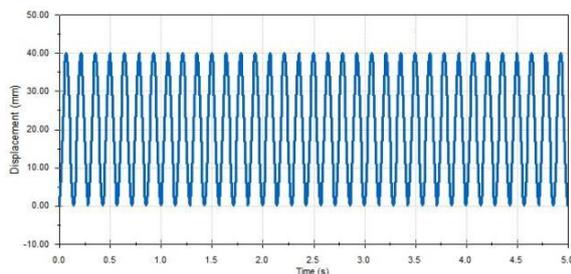
Daftar Pustaka

Pada gambar 16, hasil input frekuensi 6 Hz pada simulasi *motion study* menghasilkan gerakan osilasi sebanyak 6 kali dalam 1 waktu(s).



Gambar 16. Hasil input parameter 6 Hz

Pada gambar 17, hasil input frekuensi 7 Hz pada simulasi *motion study* menghasilkan gerakan osilasi sebanyak 7 kali dalam 1 waktu(s).



Gambar 17. Hasil input parameter 7 Hz

IV. Kesimpulan

Berdasarkan proses perancangan alat yang dilakukan melalui penentuan konsep, pemilihan komponen dan pemilihan penggerak, dapat disimpulkan sebagai berikut.

Shaking rig dapat merealisasikan getaran hasil simulasi sehingga dapat dideteksi menggunakan akselerometer dengan penggunaan penggerak yang sesuai dengan parameter serta spesifikasi yang dibutuhkan. *Shaking rig* dapat mensimulasikan getaran gabungan 2 arah dari resultan dengan 2 gaya. *Shaking rig* dapat bergerak dan menghasilkan getaran berdasarkan *input* parameter telah berhasil dikembangkan hingga tahapan desain 3D dengan dimensi 500 mm × 423 mm × 380 mm dengan akselerasi 10 m/s² dan frekuensi 3-10 Hz.

Alavudeen, A., & Venkateshwaran, N. (2018). *Computer Aided Design and Manufacturing*. New Delhi: Laxmi Publications.

Badri, A. (2019). *Performance Improvement of MEMS Accelerometers in Vibration Based Diagnosis*. The University of Manchester (United Kingdom).

Charisma, G.E., (2021). Pengembangan *Instrumented Railway Vehicle (IRV)* Berbasis Pengukuran Getaran Menggunakan Sensor *Accelerometer* (*Bachelor dissertation*, Universitas Gadjah Mada).

Claus, W. Schiehlen (2018). *Modeling and simulation of railway bogie structural vibrations, Vehicle System Dynamics*, 28 (2018) 538-552.

Costrada, A. N., & Harmadi, H. (2019). Rancang Bangun Sistem Peringatan Dini Pada Perlintasan Kereta Api Berbasis Sensor Serat Optik dan Transceiver nRF24L01+. *Jurnal Fisika Unand*, 8(3), 234-239.

Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG. (2024). *Series LM 1247 ... II*. [online] <https://www.faulhaber.com/en/product/series/lm-124711/> [Accessed 18 Sep. 2024].

Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG. (2024). *Series LM 1483 ... II*. [online] <https://www.faulhaber.com/en/product/s/series/lm-148311/> [Accessed 20 Sep. 2024].

Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG. (2024). *Series LM 2070 ... II*. [online] <https://www.faulhaber.com/en/product/series/lm-207011/> [Accessed 20 Sep. 2024].

Dumitru, M., Gheți, M.A. (2015). *Evaluation of The Ride Quality and Ride Comfort in Railway Vehicles Based on the Index Wz*. *ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering*

- Tome XIII, 3, 123-132. Diakses dari <https://researchgate.net>
- Era, Yulisaputro., (2021) Perancangan Sistem Transmisi Pada Alat Uji Bearing Kereta Api Pasca Perawatan Berbasis Pengukuran Getaran (*Bachelor Dissertation*, Universitas Gadjah Mada)
- Hamid, A. (2018). Praktikal vibrasi mekanik: Teori dan praktik(1). Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Ihlas, A. (2017). Analisis kerusakan rel kereta api angkutan batubara. *Jurnal Teknologi Bahan dan Barang Teknik*, 7(1), 7-16.
- Inven Sense. (2016). MPU-6000 and MPU-6050 product *specification revision 3.4*. CA : Inven Sense Inc. Diakses dari <https://invensense.tdk.com/>
- Khan, S. (2019). *Analysis of Linear Motion in Mechanics. International Journal of Scientific and Engineering Research*, 10(5), 1672-1676.
- Kusuma, D.T. (2021). *Fast fourier transform (fft) dalam transformasi sinyal frekuensi suara sebagai upaya perolehan average energy (ae) musik. Jurnal Pengkajian dan Penerapan Teknik Informatika*.
- Liu, Z., Lin, W., Yu, X., Rodríguez-Andina, J. J., & Gao, H. (2023). *Approximation-Free Robust Synchronization Control for Dual-Linear-Motors-Driven Systems with Uncertainties and Disturbances. IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
- Mario, RW. (2024). *Pembuatan Vibration Testing Rig Untuk Pengujian IRV-MS. (Bachelor dissertation, Universitas Gadjah Mada)*.
- Nishitani, K., Kondo, M., (2019). *Application of a condition monitoring system through vibration to railway vehicles in operation. Japanese Railway*.
- Pahl and W. Beitz, (2016). *Engineering Design : A Systematic Approach*.
- Rusianto, T., Susastriawan, A.A.P., (2021). *Getaran pada Kereta*.
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2018). *Physics for Scientists and Engineers. Cengage Learning*.
- Simmons, C. H., & Maguire, D. E. (2019) *Manual of Engineering Drawing: Technical Product Specification and Documentation to British and International Standards. Amsterdam: Elsevier*.
- Solidworks.com. (2021). *Introduction to Motion Studies - SOLIDWORKSHelp*.
- Teng, F., Zhu, R., Zhou, Y., Chi, M., Zhang, H., (2021). *A lightweight model of wheel-rail force inversion for railway vehicles, in: Concurrency Computation.* <https://doi.org/10.1002/cpe.6443>
- Wang, J., & Zhang, C. (2017). *Dynamics of Mechanical Systems. Journal of Applied Mechanics*, 84(6), 061013.