

# ANALISA IMPAK PADA DESAIN KARAKURI KAIZEN TROLLEY DAN RAK STATIK DUA TINGKAT DENGAN METODE FEA

Mohammad Azwar Amat<sup>(1\*)</sup>, Muhammad Luthfi<sup>(1)</sup>, Badruzzaman<sup>(1)</sup>  
dan Deni Hidayatulloh<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Teknik Mesin, Politeknik Negeri Indramayu

<sup>(\*)</sup>E-mail *Corresponding Author* : [azwar.amat@polindra.ac.id](mailto:azwar.amat@polindra.ac.id)

## Abstrak

*Karakuri kaizen* adalah sebuah pendekatan untuk meningkatkan efisiensi proses produksi dengan memanfaatkan mekanisme sederhana yang mengandalkan prinsip mekanika tanpa energi eksternal (seperti listrik atau pneumatik). Dalam penelitian ini analisis dampak pada bagian kritis desain *karakuri kaizen* menggunakan metode analitis dan simulasi. Metode simulasi dibagi menjadi *motion study*, *stress*, *strain*, *displacement*, dan *velocity analysis*. Simulasi *impact* pada *mechanical stopper* rak dinamis dan simulasi *impact* pada *stopper* rak statis. Hasil dari perhitungan analitis dan simulasi pada kecepatan *box* menunjukkan bahwa terdapat kemiripan nilai waktu dan kecepatan akhir *box* sebelum berhenti. Hasil dari simulasi *impact*, menunjukkan bahwa pada *mechanical stopper* lintasan (a) faktor *bolt pretension* yang masih dalam kondisi *neutralize* sehingga efeknya lebih dominan ketimbang beban pada *box*, max stress berkisar di 550-560 MPa dan strain berkisar di 0.0025-0.0029. Sedangkan *stopper* lintasan (b) terjadi osilasi dengan max stress berkisar di 270-320 MPa dan strain berkisar di 0.002-0.0026. Kecepatan *box* setelah tumbukan jauh lebih besar di bandingkan kecepatan input, akibat tidak adanya *damping system*, dan *mass multiplier* pada *stopper* yang terlalu besar.

**Kata Kunci:** *karakuri kaizen*, manufaktur *ramping*, FEA, simulasi.

## Abstract

*Karakuri kaizen* is an approach to improve the efficiency of the production process by utilizing simple mechanisms that rely on the principles of mechanics without external energy (such as electricity or pneumatics). In this study, the impact analysis on the critical part of the *karakuri kaizen* design uses analytical and simulation methods. Simulation methods are divided into *motion study*, *stress*, *strain*, *displacement*, and *velocity analysis*. Impact simulation on dynamic rack *mechanical stopper* and impact simulation on static rack *stopper*. The results of analytical calculations and simulations on the *box* speed show that there are similarities in the time value and final speed of the *box* before stopping. The results of the impact simulation show that in the *mechanical stopper* path (a) the *bolt pretension* factor is still in a *neutralized* condition so that its effect is more dominant than the load on the *box*, the max stress ranges from 550-560 MPa and the strain is at 0.0025-0.0029. While the *stopper* path (b) oscillates with a max stress ranging from 270-320 MPa and a strain is at 0.002-0.0026. The *box* speed after impact is much greater than the input speed, due to the absence of a *damping system*, and the *mass multiplier* on the *stopper* being too large.

**Keywords:** *karakuri kaizen*, lean manufacturing, FEA, simulation.

## 1 PENDAHULUAN

Karakuri adalah mekanisme otomatisasi *low cost* pada industri yang pertama kali diperkenalkan di Jepang. Karakuri bisa membantu meningkatkan produktivitas dan mengurangi biaya perusahaan [1]. Secara harfiah Karakuri berarti mekanisme yang terampil, dengan menggunakan metode karakuri, energi penggerak hanya memanfaatkan penggunaan energi mekanik yang berasal dari gravitasi, tanpa listrik, penggerak hidrolik atau pneumatik [2]. Karakuri juga efisien dan mudah dalam perawatan. Penerapan konsep *karakuri kaizen* dalam industri akan memberikan dampak

ergonomi dan produktivitas. Sehingga dapat dijadikan solusi untuk meningkatkan produktivitas proses industri sekaligus tetap mempertimbangkan faktor ergonomi yang juga tidak memerlukan biaya yang besar dengan teknik yang sederhana [3, 4].

*Material handling* adalah aktivitas apapun yang membutuhkan kekuatan yang dilakukan oleh seseorang dalam proses pengangkatan, mendorong, menarik, membawa, menurunkan, atau menahan suatu material. Karakuri merupakan sebuah konsep pemindahan barang (*material handling*) yang diterapkan di industri Jepang dengan memanfaatkan

bidang miring dan menggunakan gaya gravitasi bumi yang sering dimanfaatkan manusia dalam menjalankan aktivitasnya salah satunya sistem *karakuri kaizen* digunakan untuk mempermudah dalam proses pemindahan barang [5, 6]. *Karakuri* memungkinkan pekerjaan operator lebih singkat tanpa harus membuat mereka berpindah tempat. *Karakuri kaizen* dapat meneruskan benda atau beban kerja ke *workstation* lainnya. Sehingga memberikan solusi teknis efisien, sederhana dan juga berbiaya rendah [7]. Penggunaan *karakuri* menghemat hingga 80% dibandingkan dengan mengotomatisasi proses produksi secara komprehensif, namun memberikan tingkat efisiensi yang sama [8].

Implementasi dan aplikasi dari desain *karakuri* telah banyak digunakan di industri, contohnya adalah produksi galon air mineral [3], industri tali kawat (*wire rope industry*) [4], proses pembuatan cetakan inti *water jacket* [9], Industri Pembuatan *Seal Oli Mobil (Automobile Oil Seal Manufacturing Industry)* [10], industri pengolahan nanas (*pineapple processing*) [11], industri pengolahan tahu [12], dan masih banyak industri lainnya yang sudah menerapkan metode *lean manufacturing* dalam keberlanjutan perusahaan [13] dan *karakuri kaizen* sebagai solusi Industri 4.0 [14].

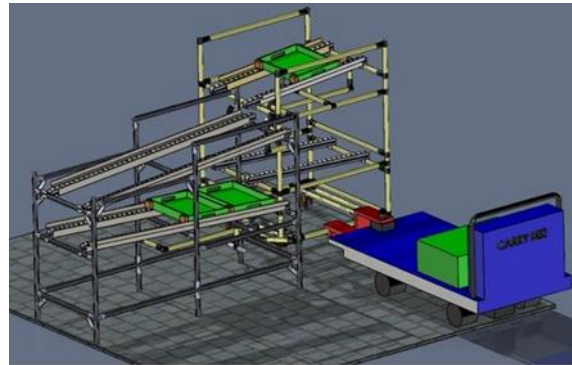
*Finite Element Analysis (FEA)* adalah teknik numerik yang digunakan untuk memecahkan masalah kompleks yang sulit atau tidak mungkin diselesaikan menggunakan metode analitik dalam berbagai bidang teknik dan sains [15]. Analisis dengan metode FEA mengevaluasi kinerja sebelum dibuat secara fisik, menghemat waktu dan biaya [16]. Jika digunakan dengan tepat, metode FEA memberikan hasil yang sangat akurat, pembagian struktur menjadi elemen-elemen kecil memungkinkan perhitungan distribusi tegangan, deformasi, atau suhu secara detail [17]. Metode FEA memungkinkan optimasi desain dengan mengevaluasi berbagai skenario dan parameter tanpa eksperimen fisik, seperti mengurangi berat komponen sambil menjaga kekuatan struktural, digunakan untuk mengidentifikasi titik lemah pada desain sehingga langkah perbaikan dapat dilakukan sebelum kegagalan terjadi [18].

Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis bagian kritis pada desain *karakuri kaizen trolley* dan rak statik dua tingkat dengan metode simulasi *finite element analysis (FEA)*. Bagian *critical part* dilakukan simulasi dampak untuk mengetahui seberapa besar *stress*, *strain*, *displacement* yang terjadi pada *critical part* desain *karakuri kaizen trolley* dan rak statik dua tingkat.

## 2 METODOLOGI

Analisis dampak menggunakan metode FEA dengan software ANSYS Workbench. Untuk menguji dampak diperlukan kecepatan awal sesaat sebelum tumbukan terjadi. Perhitungan kecepatan awal dilakukan

dengan dua metode yaitu analitik dan simulasi *motion study* dengan simplifikasi desain. Gambar 1 adalah hasil desain *Karakuri kaizen trolley* dan Rak Statik Dua Tingkat.



**Gambar 1.** Hasil Desain 3D *Karakuri* Pandangan Isometri.

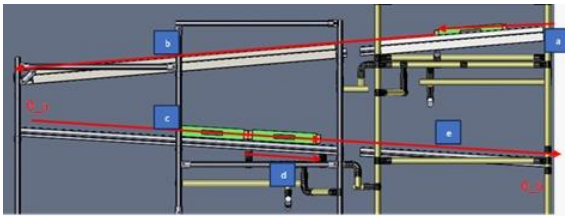
Analisis dampak dilakukan pada *mechanical stopper* yang berada di *trolley* dan *stopper* di rak statik. *Box* berwarna hijau akan meluncur dengan diberikan beban bervariasi yaitu 5, 10, dan 15 kg. Analisis *von mises stress*, *strain* dan *displacement* pada kedua part (*mechanical stopper* dan *stopper* rak statik) dengan 3 variasi beban. Gambar 2 merupakan lintasan *box* yang akan membawa beban seberat 5, 10, 15 kg. Pada penelitian ini, analisis dampak hanya dilakukan pada lintasan (a) dan lintasan (b). *Box* masuk pertama kali ke *trolley* dan diberikan kecepatan awal yaitu 0.8 m/s, *box* pada lintasan (a) akan meluncur dan menumbuk sebuah *mechanical stopper* pada *trolley*. Kemudian *trolley* berjalan dan melakukan kontak dengan rak statik, pada fase ini *box* meluncur pada lintasan (b) tanpa kecepatan awal (0 m/s) dan menumbuk *stopper* rak statik. Perhitungan kecepatan analitik dilakukan dengan menggunakan persamaan (1) dibawah ini,

$$1. \quad v = \sqrt{v_0^2 + 2 \cdot d \cdot g \cdot (\sin \theta_a - \mu_k \cos \theta_a)} \quad (1)$$

Perhitungan kecepatan akhir pada lintasan (a) dan (b) menggunakan rumus (1) dan menggunakan data parameter pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Parameter perhitungan kecepatan dampak

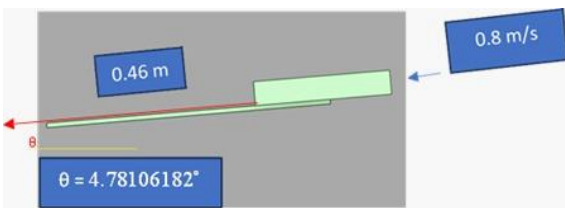
Parameter	Simbol	Nilai
Jarak lintasan (a)	$d_a$	0.46 m
Jarak lintasan (b)	$d_b$	1.97 m
Sudut lintasan (a-b)	$\theta_a$	4.78°
Gravitasi	$g$	9.81 m/s <sup>2</sup>
Koefisien gesek kinetik	$\mu_k$	0.028
Kecepatan awal (a)	$v_{0a}$	0.8 m/s
Kecepatan awal (b)	$v_{0b}$	0 m/s



**Gambar 2.** Lintasan *box* (a), (b), (c), (d), dan (e)

### 3 HASIL DAN PEMBAHASAN

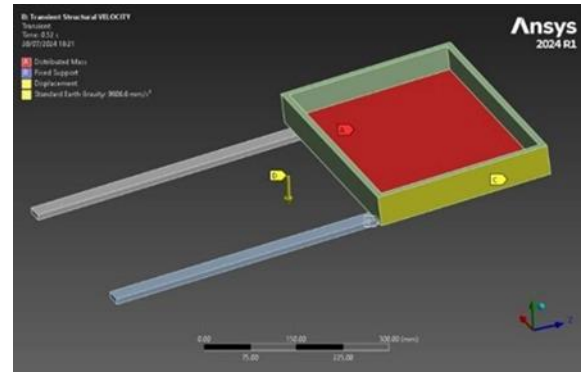
Hasil kecepatan akhir sebelum tumbukan/impak pada lintasan (a) menggunakan metode analitik dengan persamaan (1) adalah 1.07 m/s dan kecepatan akhir pada lintasan (b) adalah 1.47 m/s. Gambar 3 memperlihatkan model untuk menghitung kecepatan *box* pada lintasan (a).



**Gambar 3.** Simplifikasi geometri untuk menghitung kecepatan lintasan (a) dengan simulasi.

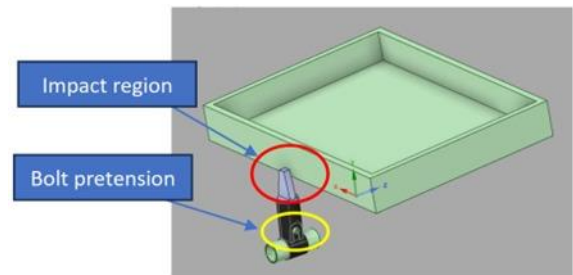
Gambar 4 memperlihatkan *boundary condition* yang diberikan. Kecepatan awal pada *box* sebesar 0.8 m/s, percepatan gravitasi pada sumbu -y, *displacement* yang berfungsi sebagai *guider box* agar tidak melenceng dari jalur, *distributed mass* dapat diabaikan karena besar massa pada simulasi kali ini tidak mempengaruhi hasil, dan *fixed support* yang diletakkan pada bagian permukaan bawah plat pengganti *roller* yang berfungsi sebagai penyangga.

Jenis kontak *frictional* dengan nilai *friction coefficient* (koefisien gesek) yang didapatkan dari Tabel 1. Menggunakan *behavior assymetric*, formulasi menggunakan *normal lagrange*. *Meshing* menggunakan *element order quadratic* dengan total *nodes mesh* 19392 dan *elements mesh* 2912. *Solver type* menggunakan *direct, auto time stepping* dengan *end time step* sebesar 0.52 detik. Hasil simulasi menunjukkan kecepatan akhir *box* sesaat sebelum lintasan *roller* nya habis (menandakan *box* sudah menyentuh permukaan *stopper*) sebesar 1.0684 m/s dengan waktu 0.4975 detik. Hasil dari kecepatan akhir ini akan digunakan untuk kecepatan inisial simulasi *impact*.

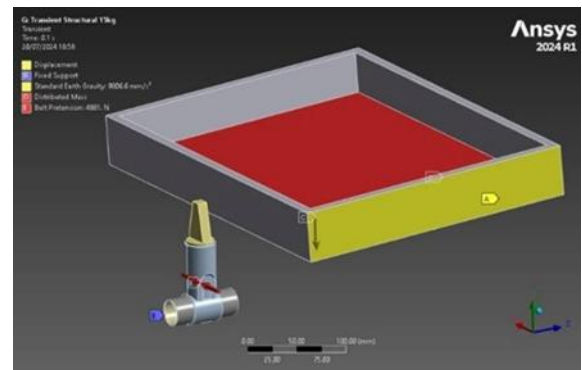


**Gambar 4.** *Boundary condition* pada lintasan (a).

Gambar 5 merupakan hasil simplifikasi geometri yang akan digunakan untuk simulasi impact antara *box* dan *mechanical stopper*. Material yang digunakan adalah *SS Austenitic AISI 302 HT Grade B* dan material *Carbon steel AISI 1015 Normalized*. Gambar 6 memperlihatkan *boundary condition* pada *box* dan *mechanical stopper*. Kecepatan awal sebesar 1.0684 m/s (analitik sebesar 1.07 m/s) pada *box* dengan variasi beban pada *box* yaitu 5, 10 dan 15 Kg. Beban ini didefinisikan sebagai *distributed mass* pada permukaan *box*.



**Gambar 5.** Skematik impact pada *mechanical stopper* dilintasan (a).



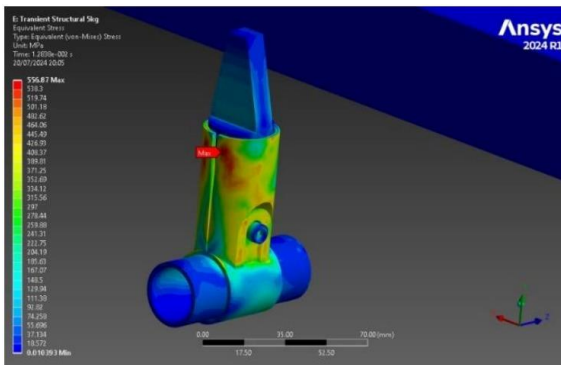
**Gambar 6.** *Bondary condition* pada *mechanical stopper* dan *box*.

Kemudian untuk pengaturan yang lain digunakan *displacement* sebagai jalur dari pergerakan *box* dengan *coordinat system* buatan yang telah disesuaikan kemiringannya dengan pergerakan *box*. Percepatan gravitasi pada sumbu -y *global coordinat system* dan *fixed support* dibagian pipa *mechanical stopper*. Dalam simulasi ini, diasumsikan bahwa keadaan *mechanical stopper* adalah *rigid* dan *fix*,

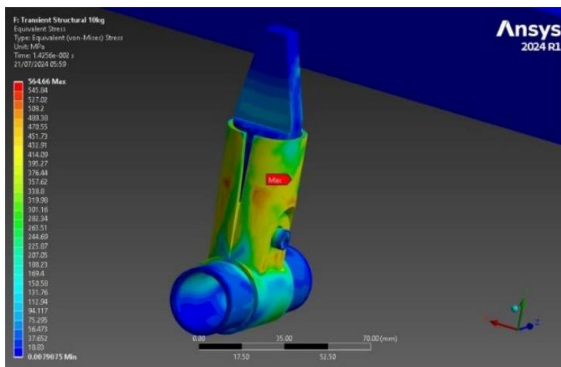


*damping* pada struktur diabaikan. Kondisi ril rangka pipa, struktur *mechanical stopper* ataupun roda rak statis yang masih bisa bergerak sedikit ketika terjadi tabrakan antara *box* dan *stopper* diabaikan. Pengaturan kontak antara *box* dan *mechanical stopper* adalah *frictional*. Terakhir adalah *bolt pretension* dimana terdapat baut dan mur yang dipasang pada *joint I-logic* yang berfungsi untuk mengencangkan dan menyambung *part stopper* dan pipa *mechanical stopper*. Nilai *force* dari *bolt pretension* ini sebesar 4881 N. Jumlah *nodes* 41071 dan *elements* 19049. *Solver type* menggunakan *direct*, *auto time stepping* dengan *end time step* sebesar 0.1 detik.

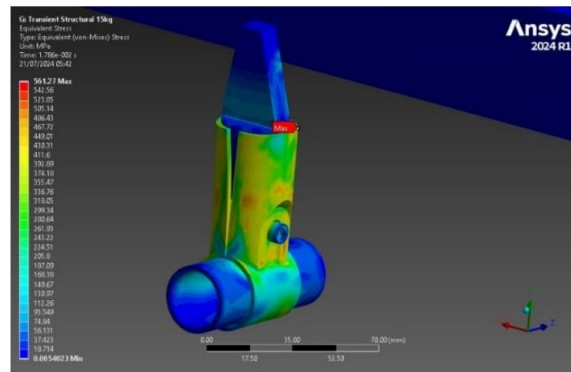
Gambar 7-10 menunjukkan hasil *von-misses stress* pada *mechanical stopper* dengan pembebanan 5, 10, dan 15 kg. Secara umum perbedaan tidak signifikan, ketiganya mencapai lebih dari 550 Mpa pada titik kritis maksimum. Dapat diketahui bahwa *stress* yang terjadi akibat *bolt pretension* dan tabrakan dari *box* bervariasi dan beban yang dibawa *box*. Akan tetapi, maksimum *stress* yang terjadi tidak terlalu jauh perbedaannya.



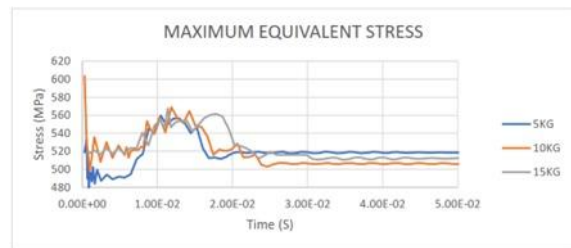
**Gambar 7.** Von Misses Stress pada *mechanical stopper* dengan beban 5 kg.



**Gambar 8.** Von Misses Stress pada *mechanical stopper* dengan beban 10 kg.

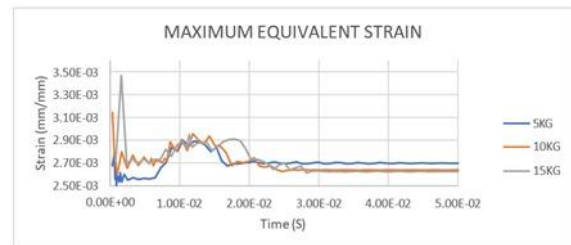


**Gambar 9.** Von Misses Stress pada *mechanical stopper* dengan beban 15 kg.



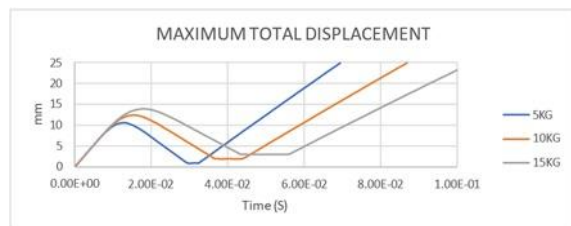
**Gambar 10.** Grafik stress pada *mechanical stopper* dengan variasi pembebanan 5, 10, 15 kg.

Dari grafik Gambar 10 dapat disimpulkan bahwa lonjakan *stress* yang terjadi secara global pada semua pembebanan hampir sama. Ini dikarenakan faktor *bolt pretension* yang masih dalam kondisi *neutralize* sehingga efeknya lebih dominan ketimbang beban di *box*.



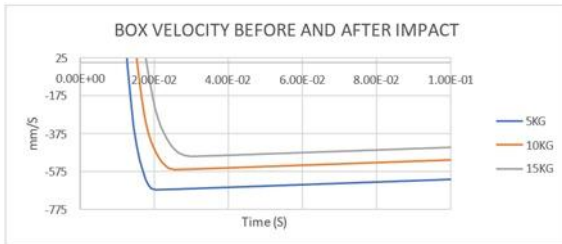
**Gambar 11.** Grafik strain pada *mechanical stopper* dengan variasi pembebanan 5, 10, 15 kg.

Pada Gambar 11 terlihat bahwa terdapat lonjakan *strain* di awal waktu. Ini merupakan proses dari *bolt pretension*. Dari grafik tersebut bahwa faktor *bolt pretension* lebih dominan pada *global stress* maupun *global strain*.



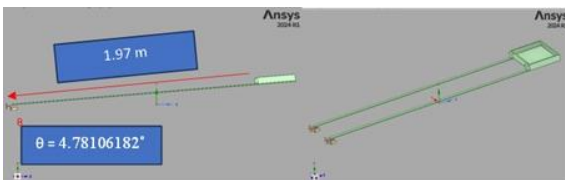
**Gambar 12.** Grafik total *displacement* pada *mechanical stopper* dengan variasi pembebanan 5, 10, 15 kg.

Gambar 12 terlihat bahwa semakin besar beban pada *box*, maka pergerakan maksimum *box* semakin besar yang ditunjukkan oleh nilai maksimum *displacement* bertambah saat dibukit pertama. Kemudian *displacement*-nya menurun ketika kecepatan *box* berkurang dan naik kembali karena adanya *feed back force* dari *stopper*. Semakin besar beban, semakin lama *displacement* untuk pergerakan *box* berlawanan arah. Hal ini berarti *stopper* akan berpindah lebih jauh sehingga total perpindahan *box* akan semakin besar pula. Setelah kembali ke titik nol, terjadi kenaikan secara linier terus menerus akibat tumbukan *box* memiliki kecepatan arah berlawanan dan kecepatan tersebut statis seperti yang terlihat pada Gambar 13.



**Gambar 13.** Grafik kecepatan *box* pada lintasan (a) sebelum dan sesudah impact.

Gambar 13 memperlihatkan semakin besar beban yang dibawa oleh *box*, maka kecepatan dari *box* akibat *force feedback* karena tabrakan akan semakin kecil. Gambar 14 merupakan hasil simplifikasi geometri yang akan digunakan untuk simulasi impact antara *box* dan *stopper* rak statis. Gambar 15 memperlihatkan *boundary condition* pada *box* dan *mechanical stopper*.

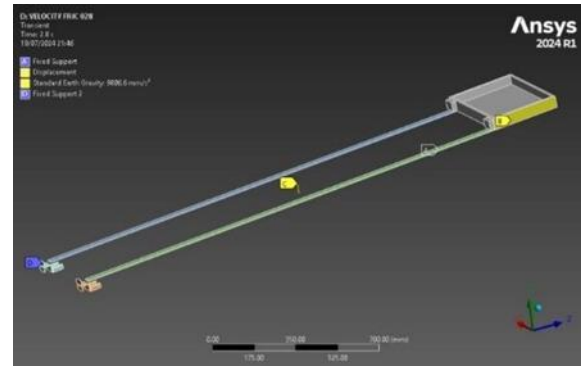


**Gambar 14.** Skematik impact pada *stopper* rak statis dilintasan (b).

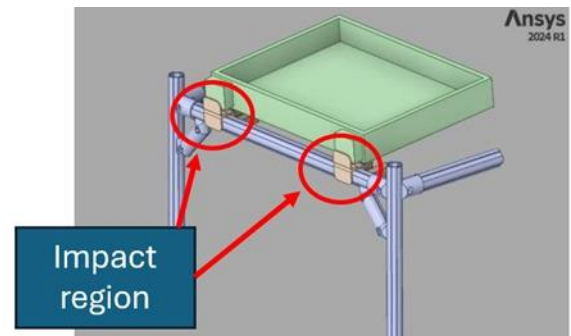
Gambar 15 memperlihatkan *boundary condition* yang diberikan. Kecepatan awal pada *box* sebesar 0 m/s, *boundary condition* secara umum sama dengan Gambar 4 pada lintasan (a). Jenis kontak *frictional* 0.028, *behavior assymetric*, *normal lagrange* kontak yang terjadi antara *box* dan *roller*. *Meshing* menggunakan *element order quadratic* dengan total *nodes mesh* 30225 dan *elements mesh* 12302. *Solver type direct*, *auto time stepping*, *end time step* sebesar 2.8 detik. Hasil simulasi menunjukkan kecepatan akhir *box* sesaat sebelum lintasan *roller* habis (menandakan *box* sudah menyentuh permukaan *stopper*) sebesar 1.465 m/s dengan waktu 2.715 detik. Hasil dari kecepatan akhir ini akan digunakan untuk kecepatan awal simulasi *impact*.

Letak dari simulasi ini adalah pada rak statis dekat dengan bagian *stopper* Gambar 16. Pada simulasi ini dibagi menjadi 3 variasi beban yang diberikan pada

*box* yaitu massa 5 Kg, 10 Kg dan 15 Kg. Material yang digunakan adalah *aluminum 319.0 sand cast T6*, *aluminum wrought 1200 H14*, dan *stainless steel austenitic AISI 302 HT Grade B*. Gambar 16 merupakan hasil simplifikasi geometri yang akan digunakan untuk simulasi impact antara *box* dan *stopper* rak statis.



**Gambar 15.** *Boundary condition* pada lintasan (b).

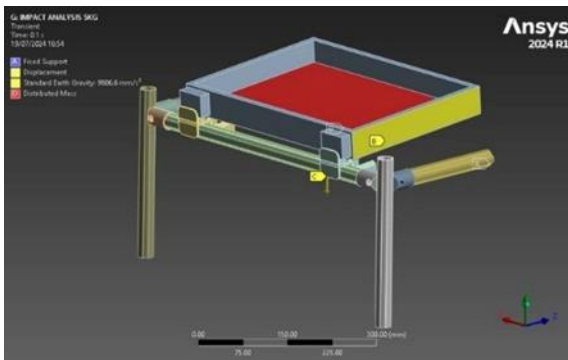


**Gambar 16.** Skematik impact pada *mechanical stopper* dilintasan (b).

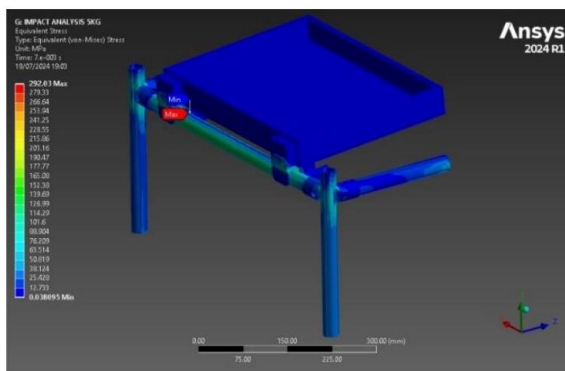
Gambar 17 memperlihatkan *boundary condition* pada *box* dan *stopper* rak statis. Kecepatan awal sebesar 1.465 m/s (tidak berbeda jauh dengan analitik sebesar 1.47 m/s) pada *box* dengan variasi beban pada *box* yaitu 5, 10 dan 15 Kg. Beban ini didefinisikan sebagai *distributed mass* pada permukaan *box*. Kemudian untuk pengaturan yang lain digunakan *displacement* sebagai jalur dari pergerakan *box* dengan *coordinat system* buatan yang telah disesuaikan kemiringannya dengan pergerakan *box*. Percepatan gravitasi pada sumbu -y *global coordinat system* dan *fixed support* dibagian pipa rak statis. Dalam simulasi ini, diasumsikan bahwa keadaan rak statis adalah *rigid* dan *fix*, *damping* pada struktur rangka pipa diabaikan. Pengaturan kontak *frictional*. Jumlah *nodes* 39517 dan *elements* 90339, *element order linear*. *Solver type direct*, *auto time stepping*, *end time step* sebesar 0.1 detik.

Gambar 18-20 menunjukkan hasil *von-misses stress* pada *stopper* rak statis dengan pembebanan 5, 10, dan 15 kg. *Stress* pada sistem disaat *box* mencapai kondisi kecepatan sama dengan 0 sebelum bergerak berlawanan arah karena tabrakan. Dari gambar tersebut, nilai maksimum *stress* secara global akan

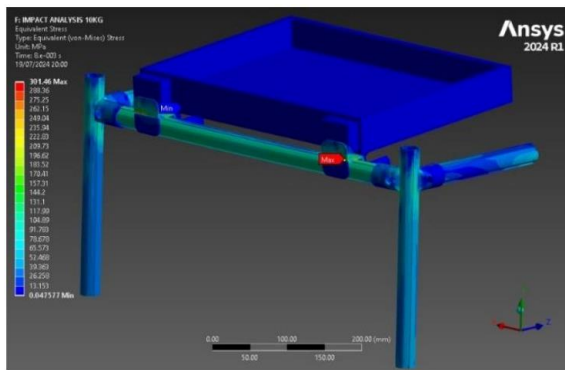
semakin besar jika beban yang dibawa *box* semakin besar juga. Nilai maksimum *stress* yang ditunjukkan pada sistem global ternyata terletak pada *stopper*.



**Gambar 17.** *Bondary condition* pada *stopper* rak statis dan *box*.

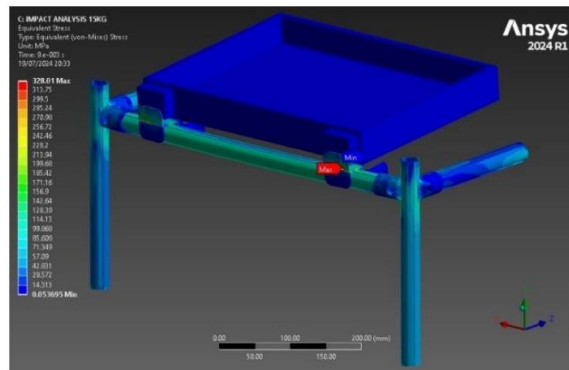


**Gambar 18.** *Von Mises Stress* pada *stopper* rak statis dengan beban 5 kg.

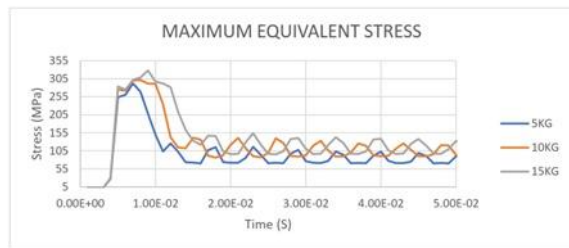


**Gambar 19.** *Von Mises Stress* pada *stopper* rak statis dengan beban 10 kg.

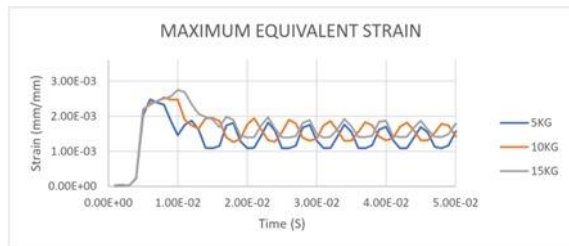
Gambar 21 memperlihatkan bahwa semakin besar beban yang dibawa oleh *box*, maka saat terjadi tabrakan *stress max* secara global akan semakin meningkat. Selain itu, setelah *box* berbalik arah, *stress* pada sistem berosilasi seperti yang ditunjukkan pada grafik. Osilasi ini terjadi akibat pipa yang terhantam oleh *box* sehingga menyerap energi dan berpindah, setelah *box* melawan arah maka pipa akan melepaskan energi ini sehingga berosilasi. Osilasi tidak berhenti dikarenakan tidak ada *damping system* untuk meredam.



**Gambar 20.** *Von Mises Stress* pada *stopper* rak statis dengan beban 15 kg.

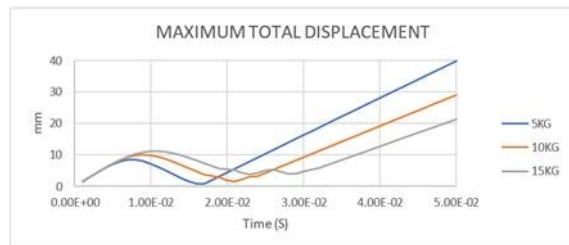


**Gambar 21.** Grafik *stress* pada *stopper* rak statis dengan variasi pembeban 5, 10, 15 kg.



**Gambar 22.** Grafik *strain* pada *stopper* rak statis dengan variasi pembeban 5, 10, 15 kg.

Gambar 22 memperlihatkan grafik *strain* pada *stopper* rak statis. Hasil terlihat sama seperti penjelasan *stress* sebelumnya akan tetapi variable yang digunakan adalah *equivalent strain von misses* untuk melihat regangan yang terjadi pada masing-masing *part*. Terlihat bahwa nilai *strain* secara global juga mirip pada semua beban dan hasilnya seperti pada pembahasan *stress*. Nilai *strain* maksimum pun sama seperti *stress* dimana akan semakin naik jika beban pada *box* semakin tinggi.

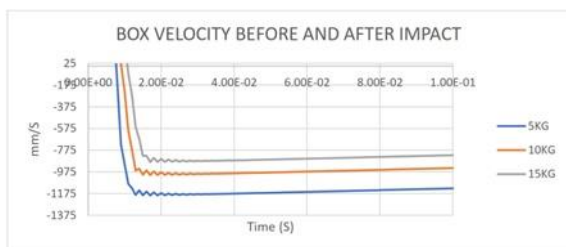


**Gambar 23.** Grafik total *displacement* pada *stopper* rak statis dengan variasi pembeban 5, 10, 15 kg.



Gambar 23 terlihat bahwa semakin besar beban pada *box*, maka pergerakan maksimum *box* semakin besar yang ditunjukkan oleh nilai maksimum *displacement* pada puncak bukit pertama. Hal ini berarti saat *box* menabrak *stopper*, semakin besar beban yang dibawa *box* maka *stopper* akan ter-*displacement* lebih besar. Dari titik nol hingga puncak bukit pertama, adalah saat *box* menabrak *stopper* kemudian *displacement*-nya menurun karena *feed back force*. Kemudian kecepatan naik kembali karena adanya *feed back force* dari *stopper* yang membuat arah laju *box* berlawanan. Semakin besar beban, semakin lama *displacement* untuk pergerakan *box* berlawanan arah.

Gambar 24 menunjukkan kecepatan setelah impact berkebalikan dengan kecepatan *input*, kecepatan balik ini terlihat kurang realistis, hal yang sama terjadi pada Gambar 13. Karena pada simulasi tidak diberikan *damping system*, kemudian massa yang di tabrak diberikan perbesaran massa (*mass multiplier effect*) sehingga momentum balik yang di terima oleh *box* jauh lebih besar dari momentum yang diberikan. Pada kondisi ini perlu ada perbaikan pada model tumbukan (*impak*) dengan memperhatikan *damping system* pada material dan keseluruhan sistem (*boundary condition*), atau menggunakan metode simulasi *dynamic explicit*.



**Gambar 24.** Grafik kecepatan *box* pada lintasan (b) sebelum dan sesudah impact.

#### 4 KESIMPULAN

Kesimpulan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dari hasil perhitungan kecepatan akhir *box* didapatkan nilai 1.07 m/s pada lintasan (a), 1.47 m/s pada lintasan (b), sedangkan hasil simulasi adalah 1.0684 m/s lintasan (a) dan 1.465 m/s lintasan (b).
2. Pada hasil simulasi *impak mechanical stopper* di lintasan (a), max stress secara umum tidak berbeda jauh berikisar 550-560 MPa. Faktor *bolt pretension* yang masih dalam kondisi *neutralize* sehingga efeknya lebih dominan ketimbang beban di *box*.
3. Nilai strain pada *mechanical stopper* berkisar 0.0025-0.0029, total *displacement* akibat impact yang terbesar dari beban 15 kg, hampir mencapai 15 mm.
4. Pada hasil simulasi impact *mechanical stopper* di lintasan (b), nilai *stress* naik dikisaran 270-

320 MPa, kemudian beresilasi 100-150 MPa pada beban 10 dan 15 kg.

5. Nilai *strain* untuk *stopper* pada rak statis pada saat *impak* terjadi 0.002-0.0026, kemudian beresilasi dikisaran 0.001-0.002.
6. Kecepatan *box* setelah tumbukan jauh lebih besar di dibandingkan kecepatan input, akibat tidak adanya *damping system*, dan *mass multiplier* yang terlalu besar.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Pusat Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (P3M), Politeknik Negeri Indramayu melalui kegiatan PUKTI SIPASTI 2024 (Kontrak No. 0839/PL42.9/AL.04/2024).

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] S.D. Nascimento, M.B. Alves, J.O. Morais, L.C. Carvalho, R.F. Lima, R.R. Alves, R.D. Calado. "Karakuri: The application of lean thinking in low-cost automation", *Lean Manufacturing: Implementation, Opportunities and Challenges*, p. 335-354, 2019.
- [2] H. Katayama, K. Sawa, R. Hwang, N. Ishiwatari, N. Hayashi. "Analysis and classification of Karakuri technologies for reinforcement of their visibility, improvement and transferability: An attempt for enhancing lean management", *PICMET 2014 - Portland International Center for Management of Engineering and Technology, Proceedings: Infrastructure and Service Integration*, p. 1895-1906, 2014.
- [3] P. Nopitasari, R.A. Anugraha, W. Juliani. "Implementasi kaizen pada proses produksi galon air mineral untuk meminimasi waste waiting menggunakan metode lean manufacturing", *e-Proceeding of Engineering*, Vol. 5, No. 3, 6644 – 6652, 2018.
- [4] I.M. Madisa, M.F.M. Taib, N.A. Reza. "Implementation of Karakuri Kaizen to improve productivity and ergonomics in wire rope industry", *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Vol. 2019, No. MAR, 2019. [5] D. Rani, A.K. Saravanan, M.R. Agrewale, B. Ashok. "Implementation of Karakuri kaizen in material handling unit", *SAE Technical Papers*, 14th Symposium on International Automotive Technology, SIAT 2015.
- [6] I. Masin, T. Riegr. "Dynamic characteristics of the karakuri transport trolley", *Proceedings of 6th International Conference on Trends in Agricultural Engineering 2016*, Vol. 2016, p. 398-403, 2016.
- [7] D. Anggrahini, Y. Prasetyawan, S.I. Diartiwi. "Increasing production efficiency using karakuri principle (a case study in small and

- medium enterprise)”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 852, No. 1, 012117, 2020.
- [8] S. Harmanto, B. Tjahjono, I. Abbiyu. “Pengaruh sudut kemiringan shutter rack karakuri terhadap waktu penurunan polly box”, Prosiding 3rd National Conference of Industry, Engineering and Technology (NCIET), Vol. 3, 2022.
- [9] D. Dewi dan A.E. Pramono. “Rancang Bangun Karakuri Mixing dan Material Handling pada Proses Pembuatan Cetakan Inti Water Jacket”, Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta, 751–760, 2019.
- [10] A.-Y. Chang, P.-Y. Lai. “Promoting the Application of Refined Lean Automation - Take the Automobile Oil Seal Manufacturing Industry as an Example”, 2023 IEEE 5th Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering, ECICE 2023, p. 948-951, 2023
- [11] Y. Prasetyawan, A.A. Agustin, D. Anggrahini. “Simple automation for pineapple processing combining with karakuri design”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 852, No. 1, 2020.
- [12] R.A. Febrianto, E. Liquiddanu, R.D. Astuti. “Design of Work Aids on Temporary Storage Stations Based on Karakuri Kaizen Principles (Case Study: Industri Tahu Sari Murni)”, AIP Conference Proceedings, Vol. 2674, 030034, 2023.
- [13] F. Bertagnolli, K. Herrmann, I. Rittmann, T. Viere. “The application of lean methods in corporate sustainability—a systematic literature review”, Sustainability (Switzerland), Vol. 13, No. 22, 12786, 2021.
- [14] M. Kostrzewski, W.J. Nowak. “Karakuri Solutions and Industry 4.0”, Handbook of Smart Materials, Technologies, and Devices: Applications of Industry 4.0: Volume 1-3, Vol. 1, p. 69-97, 2022
- [15] A.S. Baskoro, M.A. Amat, M.F. Arifardi. “Investigation Effect of ECR’s Thickness and Initial Value of Resistance Spot Welding Simulation using 2-Dimensional Thermo-Electric Coupled”, Transdisciplinary Research and Education Center for Green Technologies, Vol. 8(4), p. 821-828, 2021
- [16] M.F. Arifardi, A.S. Baskoro, M.A. Amat. “Development of 2-dimensional finite element modeling of resistance spot welding: 1st generation model electric-thermal coupled”, AIP Conference Proceedings, Vol. 2062(1), 020037, 2019
- [17] J. Fu, H. Haeri, V. Sarfarazi. “Extended finite element method simulation and experimental test on failure behavior of defects under uniaxial compression”, Mechanics of Advanced Materials and Structures, Vol. 29(27), p. 6966-6981, 2022
- [18] W.K. Liu, S. Li, H.S. Park. “Eighty Years of the Finite Element Method: Birth, Evolution, and Future”, Archives of Computational Methods in Engineering. Vol. 29, p. 4431-4453, 2022