

REDIFINISI BESARAN KERJA, DAYA, DAN ENERGI SEBAGAI BESARAN VEKTOR

Karuniadi Satrijo Utomo

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang (UNNES)
Kampus Unnes Gd E4, Sekaran, Gunungpati, Semarang 50229, email: utomo_unnes@yahoo.com

Abstract: *Until now, work, power, and energy were defined as physical and engineering quantities that only to be use as scalar quantities. Actually, they were vector quantities. That condition could potentially brought to some miss-understood and miss-applicable in using those theories as well as all of their related theories. This article was describing briefly about that problems and giving some related simple deductions and empirical facts in order to clarify the new concept for emphasizing and treating the work, power, and energy as vector quantities. It is hope that with this new concept, the work, power, and energy theories will be more useful for scienceties and practices.*

Keywords : *vector, energy, work, power*

Abstrak: Hingga sekarang, besaran kerja, daya, dan energi merupakan besaran-besaran yang hanya didefinisikan dalam fisika dan teknik sebagai besaran skalar. Kenyataannya, ketiganya merupakan besaran vektor. Kondisi itu berpotensi membawa kecenderungan pada kesalahan dalam pemahaman dan penerapan terhadap teori-teori tersebut dan semua teori-teori lainnya yang berkaitan. Artikel ini memuat deskripsi singkat tentang masalah tersebut dan menyajikan beberapa deduksi dan bukti empiris sederhana terkait dalam upaya mengklarifikasikan suatu konsep baru untuk menekankan dan menggunakan besaran kerja, daya, dan energi sebagai besaran vektor. Diharapkan dengan konsep baru ini, teori kerja, daya, dan energi akan makin berguna bagi ilmuwan dan praktisi ahli.

Kata kunci : vektor, energi, kerja, daya

PENDAHULUAN

Sejalan dengan perkembangan ilmu dan teknologi hingga awal abad ke-22 ini, teori kerja, daya, dan energi telah banyak dimanfaatkan untuk pengembangan berbagai teori lanjut dalam bidang fisika dan teknik. Khususnya di bidang teknik sipil, 3 teori tersebut telah banyak juga dimanfaatkan untuk penciptaan berbagai sarana dan prasarana guna mempermudah dalam pelaksanaan berbagai aktivitas sehari-hari.

Pada pustaka-pustaka, artikel-artikel ilmiah, dan materi-materi kursus yang digunakan tutor selaku nara sumber, hingga kini besaran kerja, daya, dan energi dipahami, dipakai, dan disajikan dalam persamaan-persamaan matematis sebagai besaran skalar. Karena banyaknya pustaka dan artikel demikian maka sulit disebutkan di sini satu

persatu, misalnya dipersilakan membaca kembali pustaka dalam daftar pustaka artikel ini.

Artikel ini disajikan untuk mengupas secara singkat ketidaktepatan pemakaian besaran skalar untuk besaran kerja, daya, dan energi, sekaligus menjabarkan konsep baru bahwa besaran kerja, daya, dan energi adalah besaran vektor.

Konsep tersebut secara konsisten merubah jangkauan aplikasi 3 besaran tersebut menjadi makin luas. Hal demikian karena penerapan besaran vektor jauh lebih luas daripada besaran skalar.

Konsep tersebut perlu juga disertai upaya konsisten dalam pemakaian dan penyajiannya melalui persamaan-persamaan terkait dalam pustaka, artikel, maupun berbagai sarana publikasi ilmiah di masa datang.

Hasil pemikiran dalam artikel ini diharapkan dapat dipakai untuk meningkatkan produk para praktisi ahli dalam menerapkan teori-teori tersebut beserta teori-teori lain terkait di masa datang.

Tujuan

Tujuan artikel ini: (1) mengungkapkan fakta-fakta ketidaktepatan pemakaian besaran skalar untuk kerja, daya, dan energi; (2) mengungkapkan fakta-fakta ketepatan penggunaan besaran vektor untuk besaran kerja, daya, dan energi; (3) mengeliminasi beberapa kesalahan operasi matematis dalam teori kerja, daya, dan energi yang mungkin berdampak menghambat perkembangan teori-teori lanjut dalam fisika maupun teknologi; (4) memicu koreksi atas kesalahan-kesalahan pengaplikasian teori kerja, daya, dan energi baik dalam lingkup eksperimental maupun lapangan, khususnya di kalangan civitas akademik dan praktisi ahli.

Konsep pemikiran dalam artikel ini adalah *“menyatakan bahwa besaran kerja, daya, dan energi dalam konteks bidang fisika dan teknik merupakan besaran vektor, bukan skalar.”* Konsep tersebut dapat juga dimaknai *“merubah esensi dan aplikasi besaran kerja, daya, dan energi dalam konteks bidang fisika dan teknik yang hingga kini diyakini sebagai besaran skalar menjadi besaran vektor.”*

Oleh karena merupakan besaran vektor bukan skalar, pemakaian ketiga besaran secara konsisten perlu diluruskan sesuai dengan kaidah aljabar dan kalkulus vektor bukan aljabar biasa.

Konsep tersebut secara konsisten harus disertai dengan pembenahan pemahaman makna 3 besaran tersebut dan penyajiannya

dalam persamaan matematis untuk referensi-referensi terkait di masa datang.

Pada bagian ini disampaikan teori kerja, daya, dan energi dalam notasi vektor, sebagai landasan konsep yang disampaikan.

Kerja

Kerja (*work*) didefinisikan sebagai perkalian gaya yang bekerja pada suatu benda dengan gerak partikel/ benda oleh gaya tersebut. Kerja merupakan besaran vektor, arah kerja sesuai dengan arah gaya, secara matematik diformulasikan:

$$\vec{W} = \vec{F} \times \vec{S} \quad \dots\dots\dots (1)$$

Dengan \vec{W} adalah kerja (J), \vec{F} adalah gaya (N), dan \vec{S} adalah gerak partikel/ benda (m).

Daya

Daya (*power*) didefinisikan sebagai kerja per satuan waktu. Daya merupakan besaran vektor dengan arah sesuai dengan arah kerja dan gaya, secara matematis diformulasikan:

$$\vec{P} = \frac{\vec{W}}{t} \quad \dots\dots\dots (2)$$

Dengan \vec{P} adalah daya (J/s atau W), \vec{W} adalah kerja oleh gaya \vec{F} (J), dan t adalah selang waktu kerja (s).

Energi

Dalam teori kerja-energi (*work-energy theory*) yang dijabarkan dari hukum-hukum gerak oleh Newton dinyatakan bahwa kerja oleh gaya terhadap benda sama dengan perubahan energi kinetik benda. Secara matematis, dinyatakan dengan persamaan:

$$\vec{W} = \vec{E}_k - \vec{E}_{k0} = \Delta\vec{E}_k \dots (3)$$

dengan \vec{W} adalah kerja oleh gaya (atau resultan), \vec{E}_{k0} adalah energi kinetik mula-mula benda, dan \vec{E}_k adalah energi kinetik benda dalam keadaan gerak. Ketiga besaran dinyatakan dalam satuan joule.

Pada fenomena gerak partikel/ benda dengan massa m kg dan kecepatan \vec{v} m/s, partikel dikatakan memiliki energi kinetik (\vec{E}_k , kinetic energy) sebesar:

$$\vec{E}_k = \frac{1}{2}m\vec{v}^2 \dots (4)$$

Energi kinetik merupakan besaran vektor dengan arah sesuai arah kerja. Satuan dan dimensi energi kinetik sama dengan satuan dan dimensi kerja.

Energi potensial (\vec{E}_p , potential energy) merupakan energi pada partikel/ benda karena posisinya. \vec{E}_p adalah besaran vektor dengan arah sesuai elevasi benda terhadap referensi tinggi. \vec{E}_p didefinisikan sebagai perkalian antara massa, percepatan gravitasi, dan tinggi benda terhadap referensi tertentu, dinyatakan secara matematis:

$$\vec{E}_p = m\vec{g}\vec{h} \dots (5)$$

dengan \vec{E}_p adalah energi potensial (J), m adalah massa partikel/ benda (kg), \vec{g} adalah percepatan gravitasi (m/s^2), dan \vec{h} elevasi partikel terhadap referensi tertentu (m).

Besar \vec{E}_p dipengaruhi oleh perubahan susunan (konfigurasi) sistem gaya konservatif, mencakup partikel/ benda dan lingkungannya. Perubahan energi potensial didefinisikan sebagai nilai negatif dari kerja yang dilakukan

gaya pada benda. Untuk kasus 1-Dimensi arah sumbu-x dinyatakan dengan persamaan:

$$\Delta\vec{E}_p = -\vec{W} = \int_{x_0}^{x_1} F(x) dx \dots (6)$$

dengan \vec{E}_p adalah energi potensial (J), \vec{W} adalah kerja oleh gaya \vec{F} (J), dan $\vec{F}(x)$ adalah proyeksi gaya pada sumbu-x.

Prinsip kekekalan energi pada sistem dapat diperluas ke bentuk yang lebih lengkap dalam pengertian kekekalan energi relativistik (*conservation of relativity energy*). Konsep relativitas energi diperkenalkan dalam bentuk postulat oleh Thomas A. Einstein dengan istilah energi diam $\vec{E}_0 = m_0 c^2$ dengan m_0 massa benda dalam keadaan diam dan c adalah cepat rambat cahaya pada vakum.

$$\Delta\vec{E}_m = \Delta\vec{E}_k + \Delta\vec{E}_p - \Delta\vec{E}_{pf} + \dots + m_0 c^2 = 0 \dots (7)$$

Pada persamaan (7), \vec{E}_m adalah energi mekanis (*mechanical energy*) yaitu jumlah energi kinetik dan energi potensial, sedangkan \vec{E}_{pf} merupakan potensial energi gesekan (*potential friction-energy*) yaitu rasio energi oleh gaya gesek terhadap energi potensial benda. Pemakaian nilai ratio ditujukan untuk memudahkan hitungan besar energi gesekan.

Gaya gesek adalah gaya reaksi atau perlawanan terhadap gaya aksi pada benda, dapat berupa gaya gesek internal (\vec{F}_s , shear force) dalam benda atau gaya gesek eksternal (\vec{F}_f , friction force) di luar benda. Gaya gesek bekerja mereduksi energi mekanis benda.

Ketentuan arah vektor

Sesuai dengan konsep yang dibahas, sebagai besaran vektor, besaran kerja, daya, dan

energi perlu ditetapkan memiliki arah, disamping memiliki besar. Untuk itu, arah besaran-besaran tersebut harus ditetapkan mengacu kesepakatan para ahli dan hukum-hukum gaya dalam Hukum Newton. Sesuai Hukum I Newton, arah gaya berat yang memiliki arah kebawah (\downarrow) adalah negatif (\sim). Sesuai Hukum III Newton, arah gaya reaksi dan gaya gesek terhadap gaya berat yang memiliki arah keatas (\uparrow) adalah positif (+).

Sesuai dengan ketentuan arah gaya tersebut, maka arah gerak benda kebawah (\downarrow) dinyatakan memiliki arah negatif (\sim), sehingga arah untuk kecepatan, percepatan, kerja, daya, energi kinetik, energi potensial, dan energi mekanis kebawah (\downarrow) harus dinyatakan memiliki nilai negatif (\sim). Sebaliknya, untuk arah gerak, kecepatan, percepatan, kerja, daya, energi kinetik, energi potensial, dan energi mekanis keatas (\uparrow) secara konsisten harus juga dinyatakan memiliki nilai positif (+).

Gaya dan Energi Elastis Pegas

Kasus empirik sederhana yang dipakai sebagai bukti diambil berdasarkan aplikasi Hukum Hooke pada pegas. Dalam Hukum tersebut, gaya pegas (\vec{F} , *spring force*) adalah gaya reaksi terhadap gaya aksi \vec{F}_{Aksi} , lihat Gambar 1(b). Gaya pegas diformulasikan:

$$\vec{F} = k\vec{x} \quad \dots\dots (8)$$

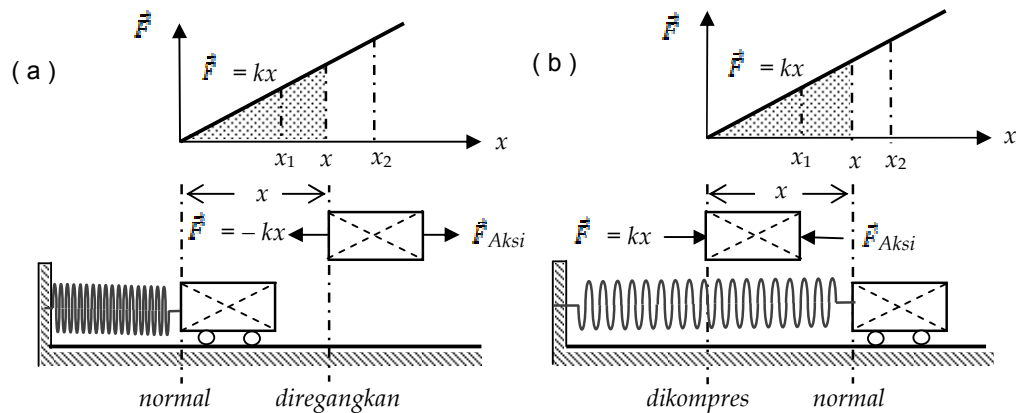
Dengan \vec{F} adalah gaya pegas (N), k adalah konstanta pegas (N/m), dan \vec{x} adalah gerak peregangan pegas (m).

Tampak dalam Gambar 1, arah gaya reaksi yang berlawanan dengan gaya aksi dapat menimbulkan tanda berlawanan pada gaya pegas, $\vec{F} = \sim kx$. Namun, tanda berlawanan itu tidak merubah grafik persamaan, sehingga tanda tersebut tidak menunjukkan arah gaya pegas melainkan kondisi pegas oleh pengaruh gaya aksi. Untuk gaya pegas \vec{F} bernilai positif, pasangan gaya aksi \vec{F}_{Aksi} dan gaya pegas \vec{F} menunjukkan kondisi pegas dikompres, lihat Gambar 1(b). Sebaliknya, untuk gaya pegas \vec{F} bernilai negatif, pasangan gaya aksi \vec{F}_{Aksi} dan gaya pegas \vec{F} menunjukkan kondisi pegas diregangkan, lihat Gambar 1(a).

Energi kinetik pegas yang mengalami peregangan atau kompresi diformulasikan berdasar luasan diagram gaya, sesuai dengan luasan segitiga yang diarsir dalam Gambar 1. Energi kinetik pegas diformulasikan:

$$\vec{E}_k = k\vec{x}^2 \quad \dots\dots (9)$$

dengan \vec{E}_k adalah energi kinetik pegas (J atau kgm^2/s^2), k adalah konstanta pegas (N/m), dan \vec{x} adalah gerak peregangan pegas (m).



Gambar 1 . Hukum Hooke tentang Pegas

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian awal pembahasan perlu ditegaskan 3 pokok penting yang diperhatikan dalam kajian konsep yang telah disampaikan pada subbab terdahulu sebagai berikut:

1. *Konsep yang dinyatakan dalam artikel ini tidak dimaksudkan untuk mengganti seluruh bagian teori kerja, daya, maupun energi dengan teori baru, tetapi dimaksudkan untuk membenahi bagian esensial pada teori tersebut.* Hal demikian mengingat pentingnya 3 teori tersebut.

Pembenahan teori kerja, daya, dan energi khususnya dikaitkan lingkup ranah studi mekanika klasik dalam konteks aplikasi maupun pengembangan teori lanjut.

Teori kerja, daya, dan energi amat penting dalam fisika dan teknologi, di mana teori-teori tersebut diimplementasikan. Dalam fisika, 3 teori tersebut tidak hanya dipakai sebagai fundamen dalam pengembangan ilmu atau teori-teori lanjut terkait, tetapi juga efektif digunakan untuk mengungkapkan berbagai fenomena alam di jagad raya. Sedangkan dalam teknologi, tiga teori tersebut efektif juga digunakan untuk

penciptaan berbagai produk pesawat yang bermanfaat dalam kehidupan. Di antara produk teknologi, antara lain mikroskop, loop, teropong, dan teodolith, digunakan sebagai alat untuk mengkaji lebih lanjut kebenaran teori-teori yang telah ada dan menggapai pengembangan teori-teori lanjut yang benar-benar baru.

2. *Teori kerja, daya, dan energi dikaji secara bersamaan dalam artikel ini karena saling berkaitan sangat erat.*

Kerja yang dilakukan oleh gaya berkaitan erat dengan besar energi yang diperlukan untuk melakukan kerja tersebut. Kerja berkaitan pula dengan besar energi yang dialihragamkan/ ditransformasikan melalui kerja tersebut, sesuai kandungan teorema kerja-energi (*work-energy theory*).

Daya merupakan laju kerja tiap satuan waktu, sehingga erat kaitannya dengan besar laju energi yang dialihragamkan/ ditransformasikan. Daya sering digunakan sebagai batas minimal untuk pelaksanaan suatu kerja maka berkaitan erat dengan besar energi minimal yang harus tersedia sebelum kerja tersebut dilakukan.

Dengan demikian, baik kerja maupun daya berkaitan erat dengan energi, baik dalam pernyataan energi kinetik, energi potensial, energi mekanis, energi gesekan, energi diam, dan efisiensi transformasi energi.

3. *Sejalan perkembangan teori dalam ranah matematika, sebagai alat deduksi yang efektif dalam fisika dan teknik, besaran vektor dan skalar merupakan 2 besaran yang digunakan secara bertalian.* Besaran skalar yang hanya memiliki besar dipakai sesuai dengan kaidah aljabar (aljabar biasa). Sedangkan besaran vektor memiliki besar dan arah digunakan sesuai kaidah aljabar vektor dalam kalkulus.

Pada bagian konsep dan landasan teori, term untuk besaran kerja, daya, dan energi dinyatakan dalam notasi vektor sebagai upaya koreksi terhadap notasi untuk term besaran-besaran tersebut yang dimuat dalam pustaka-pustaka atau artikel-artikel ilmiah terdahulu. Untuk itu, notasi untuk term besaran-besaran tersebut dapat dibandingkan dengan term lain dalam pustaka-pustaka maupun artikel-artikel ilmiah yang telah ada, baca acuan dalam bagian daftar pustaka artikel ini.

Fakta-fakta Deduktif

Sesuai tujuan artikel ini untuk menunjukkan fakta-fakta kebenaran deduktif dan empirik ketepatan pemakaian besaran vektor daripada skalar untuk besaran kerja, daya, dan energi, disampaikan fakta-fakta sebagai berikut:

1. Sesuai definisi pada persamaan (1), besaran kerja \vec{W} merupakan produk suatu gaya dan memiliki arah sesuai dengan arah gaya (atau resultan). Hal demikian mudah dipahami dengan meninjau suatu sistem dengan banyak gaya yang tidak searah atau

berlawanan arah, maka kerja yang dihasilkan oleh masing-masing gaya akan tidak searah atau berlawanan arah sesuai dengan arah gaya bersangkutan.

Sebagai misal kerja oleh gaya gesek memiliki arah sesuai dengan arah gaya gesek dan berlawanan dengan arah gaya penggerak maupun arah gerak benda. Kerja oleh gaya gesek memiliki arah negatif.

Contoh lain adalah dalam konteks kerja oleh gaya reaksi (\vec{R} , *reaction*) dengan fungsi menjaga stabilitas benda untuk tetap dalam keadaan tegar, rigid atau flexibel, kerja diartikan sebagai suatu hasil yang dilakukan oleh gaya reaksi dalam melawan gaya aksi, yang bekerja merubah posisi partikel dalam ruang dan waktu. Untuk itu kerja oleh gaya reaksi berarah negatif pada sistem yang ditinjau.

2. Sesuai definisi pada persamaan (2), besaran daya \vec{P} adalah laju kerja tiap satuan waktu. Sebagai suatu laju atau kecepatan, daya harus dinyatakan dalam besaran vektor sebagaimana laju atau kecepatan (*rate or speed*) pada umumnya.
3. Substitusi persamaan (1) ke persamaan (2) dan $\vec{v} = \vec{s}/t$ ke dalam persamaan yang dihasilkan maka diperoleh persamaan baru sebagai berikut:

$$\vec{P} = \frac{\vec{F} \times \vec{s}}{t} \text{ sehingga}$$

$$\vec{P} = \vec{F} \times \vec{v} \dots \dots \dots (10)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa daya \vec{P} merupakan produk dari 2 vektor. Mencermati pokok pada nomor 2 bahwa daya adalah besaran vektor, maka operasi

perkalian dalam persamaan (10) tersebut harus dinyatakan dalam operasi perkalian vektor agar menghasilkan besaran vektor. Hal tersebut menegaskan bahwa daya lebih tepat dinyatakan dalam besaran vektor daripada skalar.

Sebagai misal, gaya gerak lempeng tektotik sebesar 0,5 ton dengan sudut $0,5^\circ$ yang menggerakkan lempeng tektonik dengan kecepatan gerak 2 cm/tahun memproduksi atau memiliki daya sebesar 0,999996 J/s.

4. Sesuai definisi persamaan (4), energi kinetik \vec{E}_k merupakan produk kerja yang dihasilkan oleh gaya dinamik, yang dipresentasikan pada massa dan kecepatan benda. Energi kinetik memiliki arah sesuai dengan arah kerja, daya, dan gaya penyebabnya sehingga energi kinetik harus dinyatakan dalam besaran vektor.

Sebagai misal, energi kinetik suatu mobil dengan massa 2 ton yang bergerak dengan kecepatan 2 m/s dapat berkurang besarnya ketika kecepatan diperkecil dengan rem. Gaya gesek yang ditimbulkan rem memproduksi energi kinetik dengan arah berlawanan terhadap gerak mobil maupun gaya penggerak mobil sehingga mereduksi energi kinetik mobil tersebut.

5. Sesuai definisi dalam persamaan (5), energi potensial \vec{E}_p dipengaruhi oleh elevasi benda yang dipresentasikan oleh beda tinggi h benda terhadap referensi tinggi yang ditetapkan. Energi potensial memiliki arah negatif jika benda berada di bawah elevasi referensi sehingga bekerja negatif terhadap benda pada elevasi posisi referensi. Karena itu, energi potensial harus dinyatakan dengan besaran vektor dengan posisi/ lokasi benda

\vec{h} harus juga dinyatakan dalam nilai elevasi bukan tinggi h .

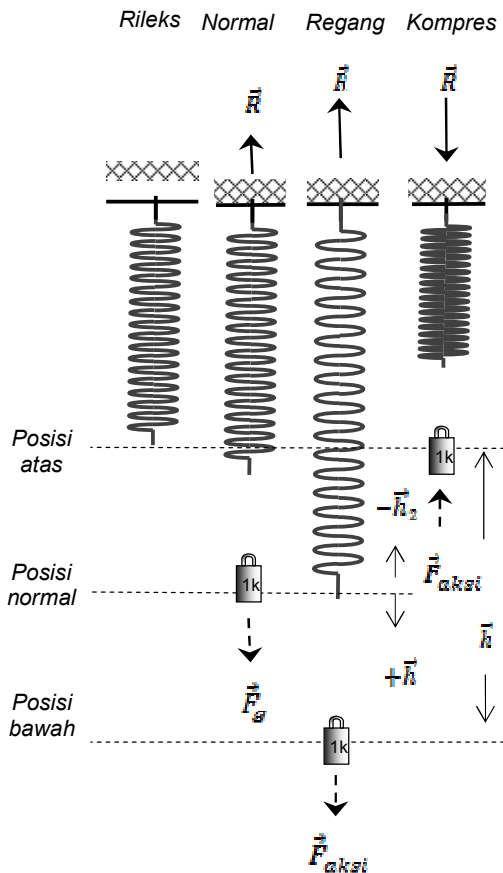
Sebagai misal, energi potensial air dalam suatu kolam ikan dengan massa air total 20 ton dan elevasi permukaan air -20 m dari suatu referensi (datum) memiliki energi potensial sebesar -400 J .

6. Potensial energi gesekan \vec{E}_{pf} dalam persamaan (7) memiliki arah berlawanan dengan energi mekanis \vec{E}_m sehingga mereduksi energi mekanis benda dan harus dinyatakan dengan tanda negatif dalam persamaan tersebut.

Sebagai misal, gaya gesek antar molekul fluida dan antara molekul cairan dan dinding saluran mereduksi energi mekanis aliran fluida.

Fakta-fakta Empirik

Hasil pengujian sebuah model pegas dengan ujung atas dipasang tetap dengan tumpuan bertipe jepit dan ujung bawah diberi beban 1 kg(f) divisualisasikan dalam Gambar 1 dibahas pada bagian ini sebagai kasus empirik sederhana untuk membuktikan besaran kerja, daya, dan energi adalah besaran vektor, bukan skalar. Pegas terpakai memiliki panjang 40 cm, diameter $\frac{1}{2}$ " , dan konstanta pegas 0,005 N/m. Gaya penggerak (*driven force*) 0,2 N.



Gambar 1 . Gaya, Kerja, Daya, dan Energi Pegas

Model pegas dapat berada dalam 3 kondisi, yaitu kondisi normal, regang, atau kompres. Kondisi tersebut diuraikan sebagai berikut.

1. Pegas dalam keadaan rileks tanpa beban diujung bawah. Pegas dan tumpuannya tidak memberikan gaya reaksi. Kondisi ini tidak diakomodasikan dalam model.

$$\text{Beban: } \vec{F}_g = m\vec{g} = 0$$

$$\text{Gaya pegas: } \vec{F} = k\vec{h} = 0$$

$$\text{Gaya reaksi: } \vec{R} = -\vec{F}_g = 0$$

2. Pegas dalam keadaan rileks, dapat disebut dengan kondisi normal atau setimbang, posisi horizontal titik berat beban digunakan sebagai elevasi posisi normal. Gaya-gaya pada model:

$$\text{Beban: } \vec{F}_g = m\vec{g} (\downarrow)$$

$$\text{Gaya pegas: } \vec{F} = k\vec{h} (\leftarrow \rightarrow)$$

$$\text{Gaya penggerak: } \vec{F}_a (\downarrow)$$

$$\text{Gaya aksi: } \vec{F}_{aksi} = \vec{F} + \vec{F}_a + \vec{F}_g (\downarrow)$$

$$\text{Gaya reaksi: } \vec{R} = -\vec{F}_a (\uparrow)$$

3. Pegas dalam keadaan regang dengan posisi horizontal titik berat beban digunakan sebagai elevasi posisi bawah. Gaya-gaya pada model dinyatakan dengan persamaan-persamaan matematis sama dengan gaya-gaya pada keadaan rileks:

$$\text{Beban: } \vec{F}_g = m\vec{g} (\downarrow)$$

$$\text{Gaya pegas: } \vec{F} = k\vec{h} (\leftarrow \rightarrow)$$

$$\text{Gaya penggerak: } \vec{F}_a (\downarrow)$$

$$\text{Gaya aksi: } \vec{F}_{aksi} = \vec{F} + \vec{F}_a + \vec{F}_g (\downarrow)$$

$$\text{Gaya reaksi: } \vec{R} = -\vec{F}_a (\uparrow)$$

Dibandingkan dengan gaya-gaya pada kondisi rileks, gaya-gaya pada kondisi regang memiliki besar (magnitudo) lebih besar, namun arah gaya-gaya tersebut sama.

Gaya beban dan penggerak terserap dalam pegas bersama dengan gaya pegas dan dipresentasikan oleh gaya aksi.

4. Pegas dalam keadaan kompres dengan posisi horizontal titik berat beban digunakan sebagai elevasi posisi atas. Gaya-gaya pada model dinyatakan dengan persamaan-persamaan:

$$\text{Beban: } \vec{F}_g = m\vec{g} (\downarrow)$$

$$\text{Gaya pegas: } \vec{F} = k\vec{h} (\rightarrow \leftarrow)$$

$$\text{Gaya penggerak: } \vec{F}_a (\uparrow)$$

$$\text{Gaya aksi: } \vec{F}_{aksi} = \vec{F} + \vec{F}_a + \vec{F}_g (\uparrow)$$

$$\text{Gaya reaksi: } \vec{R} = -\vec{F}_a (\downarrow)$$

Model pegas dapat bergerak naik dan turun sebagaimana gerak osilasi, namun demikian untuk pembuktian konsep yang disampaikan tidak diperlukan seluruh gerak osilasi pegas. Bagian gerak osilasi pegas yang perlu dikaji dapat difokuskan pada gerak pegas pada periode pertama setelah pegas tersebut mencapai posisi tinggi (kompresi) pertama kali. Dengan demikian, gerak pegas mula-mula setelah diregangkan dan dilepaskan dengan gaya penggerak hingga mencapai posisi tinggi (kompresi) pertama kali dapat diabaikan. Demikian juga gerak turun beban pada periode ke-2, ketika beban di ujung pegas mulai bergerak turun setelah beban tersebut mencapai posisi tinggi (kompresi) ke-2 kali dan seterusnya hingga terhenti juga diabaikan.

Hasil simulasi model pegas ditampilkan dalam Gambar 1, 2, dan 3. Hasil itu diperoleh dari hitungan yang dimuat dalam Tabel 1 dan 2. Data terpakai dipetik di antara 124 kali periode pegas bergerak naik turun dengan periode makin kecil dan beda posisi atas dan bawah makin kecil.

Dalam Gambar 2 ditampilkan gerak osilasi pegas dalam hubungan antara \vec{h} dan t . Dalam konsep baru yang disampaikan ini digunakan referensi normal (lihat Gambar 1) dan besaran elevasi \vec{h} pada umumnya:

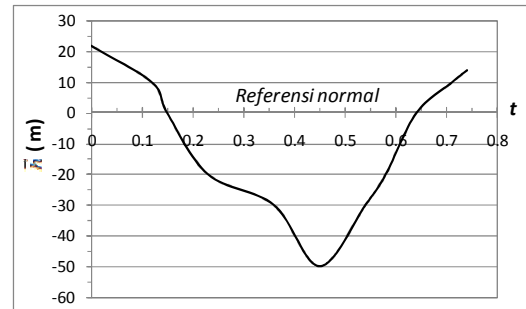
$$h_{\min} < \vec{h} < h_{\max}$$

dengan:

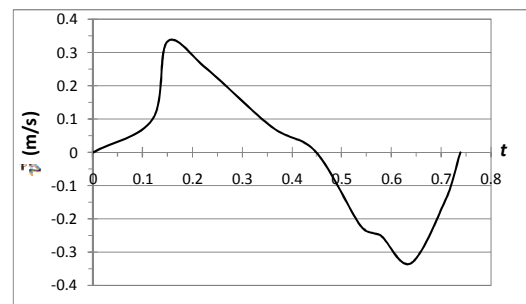
$$h_{\min} < h_{\max}, h_{\min} \in R, h_{\max} \in R$$

Hal tersebut tampak sederhana namun penting dalam konteks perhitungan energi potensial dan mekanis, mengingat term di kanan tanda sama dengan ("=") dalam persamaan (5) dan (7) umum diterapkan dalam konsep energi yang selalu bernilai positif dengan $0 < h < h_{\max}$.

Pokok ini dikaji pula dalam pokok ke-5 kajian deduktif.

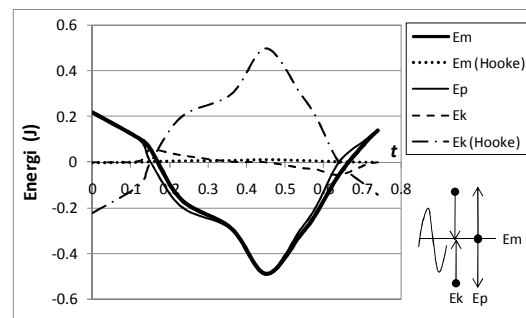


Gambar 2 . Hubungan antara \vec{h} dan t



Gambar 3 . Hubungan antara \vec{v} dan t

Kecepatan Gerak Elastis Pegas ditampilkan dalam Gambar 3. Kecepatan gerak pegas mudah dipahami sebagai besaran vektor. Pada setengah periode gerak pegas pertama kecepatan bernilai positif dan pada setengah periode berikutnya kecepatan bernilai negatif.



Gambar 4 . Energi Gerak Elastis Pegas

Energi pegas ditampilkan dalam Gambar 4, meliputi energi kinetik, energi potensial, dan energi mekanis yang dihasilkan oleh kerja dengan daya

tertentu yang dilakukan oleh gaya aksi pada pegas.

Energi potensial pegas dihitung memakai persamaan (5) tampak bernilai positif dan negatif. Energi potensial bernilai positif menunjukkan bahwa bagian massa pegas di atas referensi elevasi membebani bagian massa pegas di bawah referensi elevasi, yang berada di bawah bagian massa pegas di atas referensi elevasi. Dapat diartikan energi potensial massa di atas referensi elevasi memiliki arah positif terhadap massa pada dan di bawah referensi elevasi. Sebaliknya, energi potensial bernilai negatif menunjukkan bagian massa pegas di bawah referensi elevasi membebani secara menarik atau mengisap bagian massa pegas di atas referensi elevasi. Hal ini diartikan energi potensial massa di bawah elevasi referensi memiliki arah negatif terhadap massa pada dan di atas referensi elevasi. Karena memiliki arah disamping nilai/ besar, energi potensial merupakan besaran vektor.

Energi kinetik pegas dihitung memakai persamaan (4), di samping persamaan (8). Hitungan energi kinetik memakai persamaan (4), di mana energi kinetik merupakan hasil integrasi gaya dalam selang gerak tertentu, menunjukkan hasil yang realistik:

1. Energi kinetik bernilai nol saat beban yang diamati pada posisi atas (kompresi) dan bawah (regang) ketika kecepatan sesaat v bernilai nol.
2. Energi kinetik bernilai maksimal saat beban yang diamati pada posisi normal ketika kecepatan sesaat v bernilai maksimal.
3. Arah energi kinetik sesuai ketentuan vektor.

Namun, nilai energi kinetik menunjukkan terlalu kecil dibandingkan energi potensial hingga energi mekanis pegas sangat didominasi energi potensial. Hal itu dapat disebabkan data masukan

massa pegas (m) yang sulit dilakukan dengan teliti. Hal itu lebih lanjut menunjukkan hitungan energi kinetik dengan persamaan (4) kurang sesuai untuk menyelesaikan permasalahan pada pegas. Untuk masalah pegas, hitungan energi kinetik dilakukan juga memakai persamaan (8). Karena gaya beban dan penggerak terserap dalam pegas bersama gaya pegas dan dipresentasikan oleh gaya aksi pada pegas, maka hitungan dilakukan memakai masukan gaya aksi dengan didahului mensubstitusikan persamaan (8) ke dalam persamaan (9).

Dapat dicermati pada Gambar 4, energi kinetik pegas bernilai positif jika pegas meregang dari referensi elevasi normal menuju regangan maksimal, hingga mencapai referensi elevasi normal kembali. Arah energi kinetik dari elevasi referensi bawah hingga referensi normal. Sebaliknya, energi kinetik bekerja negatif jika pegas terkompres dari referensi elevasi normal, kompresi maksimal, hingga mencapai referensi elevasi normal kembali. Arah energi kinetik dari elevasi referensi atas hingga referensi normal.

Pada Gambar 4 tampak juga, sebagai jumlah energi potensial dan energi kinetik, energi mekanik pegas berada pada kisaran referensi normal yang menunjukkan energi mekanis pada gerak osilasi berada di sekitar referensi normal.

Dalam Tabel 1 dan 2 ditampilkan hitungan gaya, kerja, daya, dan energi model pegas oleh gaya aksi dan reaksi. Baik posisi, kecepatan, gaya, kerja, daya, energi kinetik, energi potensial, dan energi mekanis pada sistem memiliki besar dan arah yang menunjukkan sebagai besaran vektor, bukan skalar.

Gaya aksi memproduksi kerja, daya, dan energi, baik energi kinetik, potensial, dan mekanis. Sedangkan gaya reaksi hanya memproduksi kerja, daya, dan energi kinetik sesuai dengan gaya aksi.

Simpangan pegas yang besarnya makin kecil sejalan pertambahan waktu menunjukkan adanya reduksi gaya aksi sejalan pertambahan waktu,

namun hal tersebut tidak dikaji lebih lanjut karena berada di luar tujuan artikel ini.

Tabel 1 . Hitungan Gaya, Kerja, dan Daya oleh Gaya Reaksi

\vec{h} (mm)	t (s)	Δt	$\vec{v} = \vec{h} / \Delta t$ (m/s)	$\vec{F} = k\vec{h}$ (mN)	$\vec{F}_{aksi} = \vec{F} + \vec{F}_a + \vec{F}_p$ (N)	$\vec{R} = -\vec{F}_a$ (N)	$\vec{W} = \vec{R} \times \vec{h}$ (J)	$\vec{P} = \vec{W} / t$ (W)	$\vec{E}_k = \vec{R} \times \vec{h}$ (J)
22	0	-	0	0.0198	-10.0099802	10.00998	0.220219564	-	0.220220
10	0.12	0.12	0.1	0.009	-10.009991	10.00999	0.10009991	0.83417	0.100100
0	0.15	0.03	0.333	0	-10.01	10.01	0	0	0
-20	0.23	0.08	0.25	-0.018	-10.010018	10.010018	-0.20020036	-2.50250	-0.20020
-30	0.36	0.13	0.077	-0.027	-10.010027	10.010027	-0.30030081	-2.31001	-0.30030
-50	0.45	0.09	0	-0.045	-10.010045	10.010045	-0.50050225	-5.56114	-0.50050
-30	0.54	0.09	-0.22	-0.027	-10.010027	10.010027	-0.30030081	-3.33668	-0.30030
-20	0.58	0.04	-0.25	-0.018	-10.010018	10.010018	-0.20020036	-5.00501	-0.20020
0	0.64	0.06	-0.33	0	-10.01	10.01	0	0	0
10	0.71	0.07	-0.14	0.009	-10.009991	10.009991	0.10009991	1.4300	0.100100
14	0.74	0.03	0	0.0126	-10.0099874	10.00999	0.140139824	4.6713	0.140140

Tabel 2 . Hitungan Gaya, Kerja, dan Daya oleh Gaya Aksi

\vec{h} (mm)	t (s)	$\vec{W} = \vec{F}_{aksi} \times \vec{h}$ (J)	$\vec{P} = \vec{W} / t$ (W)	\vec{E}_k $\vec{W} = \vec{F}_{aksi} \times \vec{h}$ (J)	$\vec{E}_k = \frac{1}{2} m \vec{v}^2$ (J)	$\vec{W} = \vec{E}_k - \vec{E}_{ko}$ $\vec{W} = \vec{F}_{aksi} \times (\vec{h}_2 - \vec{h}_1)$ (J)	$\vec{W} = \frac{1}{2} m (\vec{v}_2^2 - \vec{v}_1^2)$ (J)	$\vec{E}_p = mgh$ (J)	$\vec{E}_m = \vec{E}_p + \vec{E}_k$ (J)	$\vec{E}_m = \vec{E}_p + \vec{F}_{aksi} \cdot \vec{h}$ (J)	$\vec{E}_m = \vec{E}_p + \frac{1}{2} m \vec{v}^2$ (J)	$\Delta \vec{E}_p$ (J)
22	0	-0.22021956	-	-0.22022	0	-0.120120	-	0.21582	-0.004400	0.21582	0.11772	0.11772
10	0.12	-0.10009991	-0.83417	-0.10010	0.005	-0.100100	0.005000	0.0981	-0.002000	0.1031	0.0981	0.0981
0	0.15	0	0	0	0.055555556	0	0.050556	0	0	0.055555556	0	0
-20	0.23	0.20020036	2.50250	0.200200	0.03125	0.200200	-0.024306	-0.1962	0.004000	-0.16495	-0.1962	-0.1962
-30	0.36	0.30030081	2.31001	0.300301	0.00295858	0.100100	-0.028291	-0.2943	0.006001	-0.29134142	-0.0981	-0.0981
-50	0.45	0.50050225	5.56114	0.500502	0	0.200201	-0.002959	-0.4905	0.010002	-0.4905	-0.1962	-0.1962
-30	0.54	0.30030081	3.33668	0.300301	-0.02469136	0.100100	-0.024691	-0.2943	0.006001	-0.318991358	-0.0981	-0.0981
-20	0.58	0.20020036	5.00501	0.200200	-0.03125	0.200200	-0.006559	-0.1962	0.004000	-0.22745	-0.1962	-0.1962
0	0.64	0	0	0	-0.055555556	0	-0.024306	0	0	-0.055555556	0	0
10	0.71	-0.10009991	-1.4300	-0.10010	-0.01020408	-0.100100	0.045351	0.0981	-0.002000	0.087895918	0.0981	0.0981
14	0.74	-0.14013982	-4.6713	-0.14014	0	-0.040040	-	0.13734	-0.002800	0.13734	0.03924	0.03924

Eliminasi Kesalahan-kesalahan Pemakaian Teori Kerja, Daya, dan Energi

Beberapa kesalahan pada aplikasi teori energi, kerja, dan daya baik dalam lingkup kajian dan pengembangan teori, eksperimental maupun lapangan antara lain:

1. Kesalahan pemakaian persamaan dasar dalam penyelesaian permasalahan yang sederhana, dan
2. Kesalahan pemakaian persamaan yang dikembangkan dari persamaan dasar pada

penyelesaian permasalahan yang relatif kompleks,

3. Keterbatasan perangkat tulis, cetak, dan hitung untuk penyajian, pendokumentasian, dan pemakaian persamaan-persamaan dalam perhitungan.

Beberapa upaya yang perlu dilakukan untuk mengeliminasi kesalahan-kesalahan pada aplikasi teori kerja, daya, dan energi yang dijabarkan terdahulu antara lain:

1. Mengaplikasikan persamaan-persamaan dasar dengan terminologi baru memakai besaran vektor untuk besaran kerja, daya, dan energi yang telah disampaikan dalam artikel ini.
2. Mengevaluasi persamaan-persamaan yang dikembangkan dari persamaan dasar untuk besaran kerja, daya, dan energi dalam pustaka-pustaka maupun artikel-artikel ilmiah yang telah ada.

KESIMPULAN

Berdasar pada hasil pembahasan dapat diambil simpulan sebagai berikut: (1) Besaran kerja, daya, dan energi merupakan besaran vektor, bukan besaran skalar. (2) Diperlukan upaya evaluasi persamaan-persamaan yang dikembangkan dari persamaan dasar untuk besaran kerja, daya, dan energi dalam pustaka-pustaka maupun artikel-artikel ilmiah yang telah ada.

Konsep besaran vektor untuk besaran kerja, daya, dan energi dalam artikel ini perlu dikembangkan lebih lanjut, tidak hanya untuk dapat memicu munculnya teori-teori lanjut tetapi juga evaluasi terhadap pemakaian teori-teori lanjut terkait yang telah dikembangkan. Bilamana perlu, konsep yang disampaikan diharapkan dapat juga memicu upaya koreksi dalam pemakaian teori-teori tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Catchillar, Gerry C., dan Malenab, Ryan G. 2003. *Fundamental Physics*. Singapore: National Bookstore.
- Giancoli, Douglas C. 1998. *Physics for scientists and Engineers with Modern Physics*. 2nd Ed. USA: Prentice – Hall.

Giancoli, Douglas C. 1998. *Physics: Principles with Applications*, 5th Ed. London: Prentice Hall International Inc.

Halliday, D., Robert Resnick, dan Walker, James S. 1997. *Fundamentals of Physics*. 5th Ed. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Halliday, David, Robert Resnick, dan Kenneth S. Krane. 2002. *Physics, Vol.II Extended*, 5th Ed. New York: John Wiley & Sons Inc.

Hewitt, Paul G. 1997. *Conceptual Physics, USA*: Addison-Wesley Publishing Company.

René, Dugas. 1955. *A History of Mechanics*. Translated from French in to English by J. Maddox. London: Routledge & Kegan Paul Ltd.

Park, David Allen. 2005. *Introduction to the Quantum Theory*. 3rd Ed. New York: Dover Publications.