
Untuk Penyadaran Ilmu Dan Ilmiah: Suatu Cara Memperkenalkan Konsep Entropi Berdasarkan Pernyataan Clausius, Hipotesis Boltzmann Tentang Interpretasi Molekularnya, Dan Suatu Catatan Metafisika

Aloysius Rusli

Jurusan Fisika, Fakultas Teknologi Informasi dan Sains,
Universitas Katolik Parahyangan, Bandung, Indonesia, 40141

arusli@unpar.ac.id

Abstrak

Biasanya Hukum Kedua Termodinamika diperkenalkan dalam kuliah Termodinamika, sebagai suatu pernyataan empiris-kualitatif dari Rudolf Clausius dan Lord Kelvin serta Max Planck, dan kemudian konsep Entropi diperkenalkan secara tersendiri melalui hipotesis atau teorema Clausius dengan suatu integral melingkar. Suatu cara yang lebih sederhana tapi tetap tampak sinambung adalah dengan langsung memperkenalkan konsep Entropi berdasarkan analisis pernyataan empiris-kualitatif Clausius tersebut. Manfaatnya adalah, bahwa konsep efisiensi maksimum bagi siklus mesin kalor, siklus mesin pendingin, dan siklus mesin penghangat, lalu langsung dapat diperoleh dengan sederhana. Selanjutnya interpretasi molekular dan statistik Ludwig Boltzmann dapat diperkenalkan sebagai suatu upaya memahami keterarahan perkembangan entropi total suatu sistem terisolasi. Ada baiknya kemudian perkenalan Hukum Kedua Termodinamika ini ditutup dengan suatu catatan yang bersifat asumsi yang tidak dapat dibuktikan secara ilmiah-terukur / metafisika, agar pertanyaan “mengapa begitu?” dapat memicu rasa ingin tahu mahasiswa tentang ada tidaknya suatu tujuan, dalam jagad raya ini, sambil menyadari kemetafisikaan pertanyaan itu.

Kata-kata kunci: Entropi, Hukum Kedua Termodinamika, Efisiensi, Keadaan mikro, Metafisika

PENGANTAR

Masa ini riuh rendah dengan berita sah maupun *hoax* melalui media sosial seperti *Short Message Service (SMS)*, *Facebook*, *WhatsApp*, *Instagram*, dan sebagainya. Untuk dapat menyaring segi baik dari semua informasi itu, dan belajar mengatasi segi buruknya, diperlukan langkah yang tepat. Suatu langkah yang juga patut dipilih adalah: Langkah penyadaran diri, penyadaran ilmu, penyadaran cara ilmiah, karena terbukti efektif untuk mengelola alam. Maka patutlah langkah ini diupayakan dengan pembelajaran ilmu, termasuk fisika. Pembelajaran ilmu dapat menumbuhkan penghargaan pada tindakan mengobservasi dengan teliti-cermat dan tepat-akurat, tindakan menyadari dan merenungkan asumsi-asumsi yang dipilih, untuk dapat coba memilih asumsi dengan lebih sadar tentang keterandalan asumsi itu, dan tindakan menguji kesimpulan terhadap realitas yang terukur.

Salah satu topik fisika yang kali ini hendak digunakan dalam menyadarkan diri dan seterusnya itu, adalah konsep Entropi dalam kerangka memperkenalkan Hukum Kedua Termodinamika. Kesan mistik yang terkadang menyelimuti topik ini, juga dapat diupayakan secara sadar, untuk diletakkan ke sisi-segi yang lebih sesuai, yaitu segi metafisika.

Seperti telah dilakukan saat presentasi makalah ini pada tanggal 9 Juli 2019, topik yang akan dibahas dimulai dengan mengungkapkan beberapa pernyataan empiris-kualitatif bagi Hukum Kedua Termodinamika. Lalu digunakan ciptaan Rudolf Clausius (1822-1888) sejak tahun 1850 [1][2][3], yaitu konsep Entropi yang sering disebut sebagai misterius itu. Lalu kekonsistenan dengan alam dirumuskan berupa suatu Prinsip bahwa besaran entropi ini memang condong tidak dapat berkurang; artinya condong untuk bertambah terus. Selanjutnya Prinsip Pertambahan Entropi itu digunakan untuk secara sederhana menghitung batas maksimum efisiensi bagi 3 jenis mesin [4], yaitu mesin kalor, mesin pendingin, dan mesin pemanas. Akhirnya interpretasi molekular Entropi melalui temuan teoretis Ludwig Boltzmann ditinjau. Ini dapat membantu menyadarkan diri tentang keselarasan ciri kecondongan bertambahnya entropi menuju keseimbangan termal, dengan maksimalnya peluang secara statistik. Makalah ini diakhiri dengan suatu pertimbangan metafisika, untuk menggarisbawahi bahwa fisikawan sebenarnya terbiasa bermetafisika, tetapi sering juga tanpa terlalu menyadari status metafisika yang sedang dilangkahkannya.

Semoga uraian dalam makalah ini dapat memenuhi niat yang tersebut di atas, yaitu menambah kesadaran ilmu dan kesadaran cara ilmiah, demi dapat menjalani hidup modern masa ini secara lebih mantap dan bijaksana.

BEBERAPA PERNYATAAN HUKUM KEDUA TERMODINAMIKA

Meskipun pencipta mesin uap sebenarnya Thomas Newcomen (1664-1729) pada tahun 1712 [5], masyarakat lebih sering mengenal nama James Watt (1736-1819). Memang peran Watt adalah menyempurnakan desain mesin uap itu sehingga amat meningkatkan efisiensinya [6]. Selain itu, sebenarnya Newcomen pun bertumpu pada gagasan “mesin api” Thomas Savery (1650-1715) dan desain piston-pengisap Denis Papin (1647-1713) bagi ciptaannya. Hal ini menunjukkan pola yang biasa terjadi, yaitu bahwa ilmuwan atau ahli teknik sebetulnya bukannya pencipta dari nol, melainkan seperti sudah dikatakan [7] oleh Isaac Newton (1643-1727), “jika saya telah dapat lebih dahulu melihat lebih jauh ke depan, itu adalah karena dapat berdiri di atas pundak para raksasa (ilmu/teknik) sebelumnya”. Kiranya sikap jujur dan rendah hati seperti Newton itu, patut disikapikan oleh para ahli dan manusia pada umumnya, jadi juga oleh guru serta siswanya.

Adanya mesin uap semula hanya untuk memompa air dari dalam terowongan tambang timah, batubara, dan sebagainya di Inggris, tetapi kemudian juga digunakan untuk menggerakkan roda mesin pintal dan tenun, dan kereta api, lalu kapal, dan dengan demikian lahirlah “Revolusi Industri” pertama di abad ke 19 di Inggris. Revolusi Industri kedua, ketiga, keempat, mulai disebut sebagai ditimbulkan oleh penggunaan mesin listrik dengan arus listrik kiloampere (menjelang akhir abad ke 19), kemudian mesin komputer yang didasarkan pada teknik elektronika yang berarus listrik miliampere (sejak tengah abad ke 20), dan kini revolusi industri oleh otomatisasi, kecerdasan-buatan, dan makin tersedianya megadata untuk diolah menghasilkan informasi berguna (sejak akhir abad ke 20).

Pengamatan dan upaya mengefisienkan mesin uap dipelopori oleh Sadi Carnot (1796-1832). Dia yang mulai mengenali bahwa tingginya suhu yang digunakan, berpengaruh pada tingginya efisiensi mesin; bukannya besarnya jumlah kalor/energi termal yang digunakan [8]. Lalu pengamatan teliti lebih lanjut dilakukan di Jerman oleh Clausius, yang kelahiran Köslin (dahulu Jerman, kini Polandia) lalu meneliti di Universitas Berlin. Pada tahun 1850 Clausius

menerbitkan makalah 30 halaman yang menjadikannya terkenal, dalam *Annalen der Physik*, berjudul (terjemahan Inggrisnya) “*On the Moving Force of Heat, and the Laws regarding the Nature of Heat itself which are deducible therefrom*” [2]. Pernyataan Clausius yang terkenal, dipublikasikannya tahun 1854 (dalam bahasa Jerman, dan dalam bahasa Inggris tahun 1856): “Kalor/energi termal tak mungkin mengalir dari benda yang lebih sejuk ke benda yang lebih panas, tanpa di saat yang sama, perlu terjadi suatu perubahan di lingkungan terdekatnya” [9].

Lalu pada tahun 1865 untuk pertama kali Clausius mengajukan rumusan matematis tentang konsep Entropi [3]. Nama itu diambilnya dari bahasa Yunani: $\epsilon\nu = in$ = dalam, dan $\tau\rho\omicron\pi\eta = trope$ = bentuk, transformasi; sesuai dengan makna besaran itu, “tingkat, kemampuan berubah, kemampuan bertransformasi”. Clausius juga memilih nama satuannya clausius, Cl. Akan tetapi nama satuan ini tidak bertahan lama, karena dalam Sistem Internasional sudah tersedia satuan yang memadai: joule per kelvin, J/K, dengan simbol besaran entropi S .

Di Inggris, penelitian tentang perilaku dan efisiensi mesin uap, membimbing William Thomson (1824-1907) ke pernyataan [10] yang kemudian diberi nama “Kelvin”: “Tanpa bantuan makhluk hidup, tak mungkin menggerakkan suatu benda dengan mendinginkannya ke bawah suhu terendah lingkungannya” (1851).

Pada tahun 1866 William Thomson disahkan oleh Ratu Victoria menjadi Sir William, atas jasanya memimpin proyek peletakan kabel listrik di dasar samudera Atlantik, dari Irlandia sampai ke Newfoundland di Kanada, untuk arus listrik bagi telegrafi yang menggunakan cara “digital” Samuel Finley Breese Morse (1791-1872), pulsa-pulsa arus listrik pendek dan panjang [11]. Lalu pada tahun 1892 Sir William dinobatkan menjadi Baron pertama bagi Kelvin, dengan sebutan Lord Kelvin, antara lain karena kesimpulan-kesimpulannya di bidang termodinamika.

Sungai Kelvin adalah anak sungai [12] yang bermuara di sungai besar Clyde, di tepi barat Glasgow, Skotlandia, yang mengelilingi sisi selatan-timur-utara Glasgow University tempat studi pertama Kelvin sejak usia 10 tahun. Pada masa itu, usia muda seperti itu biasa untuk masuk Universitas yang juga menyediakan pembelajaran sejak jenjang sekolah dasar bagi siswa yang cukup cerdas.

Pada tahun 1877 Max Planck (1858-1947) belajar selama [13] setahun pada fisikawan Hermann von Helmholtz (“kuliahnya selalu tanpa persiapan dan lamban, serta terus keliru perhitungannya”) dan Gustav Kirchhoff (“catatan kuliahnya rapi tetapi kuliahnya membosankan”), tetapi dia juga belajar sendiri dari tulisan-tulisan ilmiah Clausius, dengan hasil bahwa dia memilih termodinamika sebagai topik disertasinya. Disertasinya berjudul “tentang Hukum Kedua Termodinamika” dan menghasilkan gelar doktor bagi Planck pada tahun 1889, dan penelitian selanjutnya bertesis “Keadaan seimbang benda-benda isotropik pada suhu-suhu berbeda”. Pernyataannya tentang Hukum Kedua Termodinamika berbentuk: “Tak mungkin membuat mesin bersiklus, yang hanya menghasilkan terangkatnya benda sambil mendinginkan suatu tandon kalor”, dan “Setiap proses alami terjadi dengan arah yang menambah nilai entropi totalnya; hanya jika prosesnya dapat terbalikkan, reversibel, jumlah entropi dapat tetap, tidak berubah”.

Biasanya pernyataan Kelvin dan Planck digabungkan, karena isinya setara, dan keduanya tentang perilaku mesin: [13]

“Tak mungkin membuat mesin bersiklus, yang hanya perlu menyerap kalor dari satu tandon kalor, dan menghasilkan jumlah usaha yang setara”; ataupun:

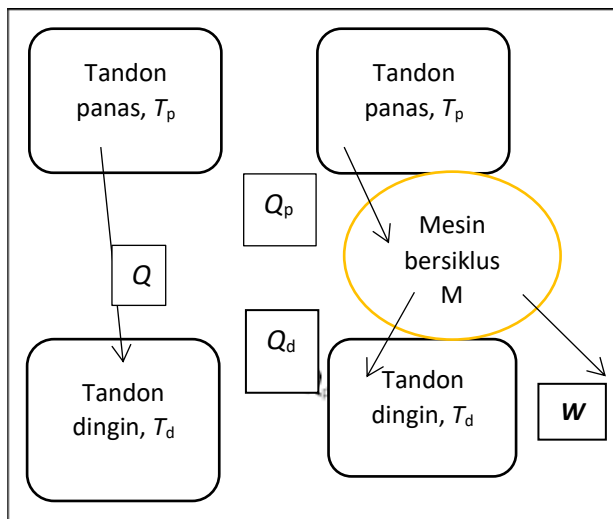
“Tak mungkin membuat mesin, yang dalam satu siklus prosesnya, hanya menghasilkan usaha (misalnya untuk mengangkat benda) dan mendinginkan hanya satu tandon kalor”; atau:

“Tak mungkin membuat mesin, yang dalam satu siklus prosesnya, hanya menyerap energi berupa kalor dari tandon kalor tunggal, dan menghasilkan usaha yang jumlahnya setara” (1897).

Satu pernyataan matematis bagi Hukum Kedua Termodinamika dipublikasikan Constantin Carathéodory (1873-1950) pada tahun 1909 dalam *Mathematische Annalen* dengan judul “Penelitian tentang dasar-dasar Termodinamika”[14]. Dapat dikatakan bahwa dengan demikian termodinamika memperoleh dasar yang kokoh berupa aksioma matematis. Karena dia mengenali bahwa entropi praktis tak dapat konstan pada proses realistik, dan proses adiabatik bermakna tak terubahnya entropi, tibalah dia pada pernyataan: Di dekat setiap keadaan seimbang termal, ada keadaan-keadaan yang tidak dapat dicapai secara proses adiabatik. Karya Carathéodory dipuji oleh Max Born (1882-1970) tetapi dikritik oleh Max Planck. Tampaklah bahwa perbedaan pendapat di lingkungan ilmuwan sering dipandang biasa-biasa saja.

KONSEP ENTROPI CLAUSIUS TAHUN 1850

Pada tahun 1850 Clausius rupanya mengenali bahwa perbandingan kalor Q yang mengalir masuk ke suatu sistem, dengan suhu T (dengan satuan kelvin) di titik masuknya kalor itu, merupakan besaran yang bermanfaat. Karena itu perbandingan itu disebutnya Entropi dengan simbol S . Karena kalor senantiasa terkait pada suatu proses, yaitu suatu perubahan keadaan, maka definisi tepatnya adalah: pertambahan S sistem (bertanda + jika kalor Q mengalir masuk ke sistem), adalah kalor Q yang masuk ke sistem, dibagi dengan suhu mutlak T di tempat masuknya kalor tersebut: $\Delta S \equiv Q/T$. Khusus dalam makalah ini, untuk memudahkan bahasa, dipilih bahwa simbol S dan Q , merupakan bilangan positif. Maka kalau proses aliran kalor dari / ke tandon kalor bersuhu tertentu, digambarkan sebagai berikut,



kalor yang mengalir ke luar dari tandon / reservoir bersuhu T_p (p = lebih panas), yang digambarkan dengan panah, haruslah ditulis “ $-Q$ ” dan “ $-Q_p$ ”, sedangkan kalor yang mengalir masuk ke tandon bersuhu T_d (d = lebih dingin), digambarkan juga dengan panah, haruslah ditulis “ $+Q$ ” dan “ $+Q_d$ ” yang tentu dapat saja ditulis juga tanpa tanda +, “ Q ” dan “ Q_d ”.

Demikian pula usaha yang mengalir ke luar dari mesin M di gambar kanan tergambar dengan panah pula, dan ditulis “ W ” atau “ $+W$ ”, sedangkan sekiranya usaha sedang mengalir masuk ke mesin M ditulislah “ $-W$ ”.

Ini terkadang disebut sebagai “konvensi atau kebiasaan teknik / fisika”, yang lebih memperhatikan usaha yang dihasilkan / diproduksi mesin. Konvensi sebaliknya disebut juga “konvensi ilmiah / kimia” yang memilih sistem sebagai pusat perhatian, sehingga usaha yang masuk ke sistem, seperti tanda bagi kalor, diberi tanda + jika masuk ke sistem. Terbaliknyanya pertandaan bagi usaha ini, sering membingungkan bagi yang kurang menyadari adanya dua konvensi yang sama-sama sah saja, tetapi sering simbol W digunakan baik untuk “usaha oleh mesin” (konvensi teknik) maupun untuk “usaha pada mesin” (konvensi ilmiah). Lebih baik jika digunakan subskrip, sehingga menjadi lebih jelas: W_{oleh} dan W_{pada} , misalnya. Tentu $W_{oleh} = -W_{pada}$.

Maka pernyataan Clausius tersebut di atas, yang juga dapat dibaca sebagai “Kalor senantiasa, dengan sendirinya, secara alamiahnya, akan mengalir dari suhu lebih panas ke suhu lebih sejuk (gambar kiri), kalau tidak ada upaya mencegahnya”, akan dapat ditulis dengan konsep S

ini sebagai: ΔS total yang terjadi dalam (seluruh) jagad raya, akibat mengalirnya kalor Q secara alamiah dari tandon T_p ke tandon T_d , adalah $= -Q/T_p + Q/T_d$ yang tentu dapat saja ditulis sebagai ΔS total $= Q (1/T_d - 1/T_p)$.

PRINSIP PERTAMBAHAN ENTROPI

Pernyataan bagi aliran kalor yang alamiah tersebut, ΔS total $= Q (1/T_d - 1/T_p)$ di atas, karena $T_p > T_d$, menyatakan bahwa pertambahan entropi jagad raya > 0 , pada proses alamiah ini. Clausius mengenali bahwa hasil ini dapat dijadikan ciri kuantitatif bagi Hukum Termodinamika Kedua ini. Walaupun mesin M melakukan usaha (pada lingkungannya), karena mesin bersiklus, yang berarti mesin setiap kali kembali ke keadaan awalnya, maka mesin tidaklah mengalami perubahan pada entropinya.

Karena pada proses di atas, gambar kiri, telah dianggap bahwa seluruh kalor yang meninggalkan tandon panas, seluruhnya masuk ke tandon dingin, proses ini dapat disebut sebagai proses adiabatik (dalam bahasa Yunani, a = tidak, diabatos = melewati; jadi adiabatik bermakna “tidak dapat dilewati kalor, tiada kalor mengalir), kalau kedua tandon itu dipandang sebagai satu sistem. Kalau hanya tandon panas saja dipandang sebagai sistem, tentu tandon itu telah mengalami proses non-adiabatik, karena ada kalor mengalir ke luar dari sistem tandon panas ini. Tampak di sini bahwa pada suatu pembahasan termodinamika, perlu ditetapkan sejak awal, bagian apa yang hendak dipandang sebagai sebuah sistem, agar lalu juga jelas apa yang dipandang sebagai lingkungan sistem.

Kesimpulan Clausius bahwa tampaknya semua proses dalam alam meningkatkan entropinya, lalu disebut sebagai Prinsip Pertambahan Entropi Clausius, atau karena Clausius seorang matematikawan, juga disebut Teorema Clausius. Memang Clausius telah menganalisis sifat entropi ini, sampai dapat menuliskannya sebagai suatu integral sepanjang lintasan / proses siklus [9], yang nilainya tidak dapat > 0 , yaitu: $\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$. Secara matematis dikatakan bahwa secercah kalor yang pindah itu bukannya suatu diferensial eksak, melainkan hanya setelah dikalikan dengan faktor integrasi $1/T$, dengan T adalah suhu Kelvin, hasilnya ternyata menjadi suatu diferensial eksak, yang lalu dapat ditulis sebagai dS , yang dapat diintegrasikan, dan dalam kasus ini, sepanjang suatu lintasan / proses yang bersifat siklus. Tanda $=$ ternyata berlaku jika prosesnya sepenuhnya “reversibel”, “dapat dibalikkan”, sedangkan tanda $<$ berlaku jika ada bagian siklus yang prosesnya irreversibel, tak-terbalikkan. Proses reversibel adalah suatu proses ideal yang hanya dapat didekati oleh proses realistik, tetapi seperti sering ditemukan, proses ideal dapat menuntun analisis matematik ke temuan baru atau wawasan baru; seperti dalam hal ini ditemukannya konsep entropi sebagai suatu fungsi yang hanya bergantung pada keadaan, bukannya tergantung pada proses seperti kalor dan usaha, merupakan hasil langsung dari proses siklus yang reversibel: $\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$ yang dapat langsung ditulis sebagai: $\oint dS = 0$ yang menunjukkan bahwa dS memang diferensial eksak dan S suatu fungsi keadaan yang sah.

Perlu disadari bahwa kata ‘total’ dalam Prinsip Clausius ini bermakna bahwa sistem + lingkungannya dianggap terisolasi, dalam arti bahwa kalor tercegah mengalir ke luar atau masuk ke sistem + lingkungan itu. Dengan kata lain, pertambahan entropi ini menyaratkan adiabatiknya proses itu.

Dalam makalah ini, Prinsip Clausius ini akan digunakan dalam bentuknya yang adiabatik itu:

$$\Delta S_{\text{total}} = \sum Q/T > 0.$$

KONSEP EFISIENSI

Sebelum menerapkan Prinsip Clausius itu, akan ditinjau konsep efisiensi terlebih dulu. Kata efisiensi dan efektivitas berasal dari [15] kata Latin *efficere* yang berarti “berhasil, berdampak”. Selanjutnya kata efektif, efektivitas memperoleh makna yang lebih menekankan keberhasilan, sedangkan efisiensi menekankan kehematan proses.

Dalam kuliah termodinamika, biasa dibahas 2 atau 3 jenis mesin, yaitu mesin kalor yang “mengkonversi” kalor menjadi usaha, mesin pendingin yang mendinginkan ruangan dengan cara mengalirkan energi termal atau kalor ke luar dari ruangan. Mesin penghangat atau *heat pipe* sebenarnya identik dengan mesin pendingin, tetapi tujuannya berbeda, yaitu hendak menghangatkan ruangan dengan memasukkan energi termal atau kalor dari luar ruangan.

Contoh mesin kalor adalah mesin bensin (dimodelkan oleh siklus Otto), mesin diesel (dimodelkan oleh siklus Diesel), yang “mengkonversi” kalor menjadi usaha memutar roda dan sebagainya. Contoh mesin pendingin adalah lemari pendingin, mesin pendingin ruangan (“AC”, *air conditioner*). Contoh mesin penghangat bukannya pemanas listrik yang sekedar kawat berhambatan listrik, yang langsung mengubah energi listrik menjadi energi termal, dengan efisiensi ~100%, melainkan mesin pendingin yang mengambil usaha dari listrik PLN, atau sumber gerak lain, untuk menyerap kalor dari udara luar yang dingin, dan mengalirkannya ke dalam ruangan demi lambat laun memanaskannya; karena itulah mesin penghangat ini disebut pipa kalor, *heat pipe*, karena tampak mengalirkan kalor dari luar ruangan ke dalam ruangan, dengan efisiensi yang dapat > 100%.

Maka perumusan efisiensi ketiga mesin ini perlu disesuaikan dengan perannya itu:

1. Mesin kalor diukur efisiensinya dengan menyatakan seberapa usaha yang dapat dihasilkannya, dari sejumlah kalor yang perlu diserapnya, yang biasanya diperoleh dengan membakar kayu atau batubara, atau minyak bensin, solar. Kayu dan sebagainya ini harus dibeli, maka perbandingan usaha yang diperoleh, terhadap energi yang harus dibeli, merupakan rumusan efisiensi yang wajar:

$$\eta_k = W / Q_p.$$

Mesin bekerja dalam suatu siklus yang kemudian sekedar diulang-ulangnya. Maka jika ingin dihitung berapa daya (*power*, dalam watt atau kilowatt atau megawatt) mesin, tinggal dihitung berapa usaha yang dihasilkan per siklus, dibagi dengan berapa periode satu siklus.

2. Mesin pendingin diukur efisiensinya, terkadang disebut dengan istilah Koefisien Kinerja, Koefisien Performansi, dengan membandingkan berapa kalor yang berhasil dikeluarkannya dari ruangan, dibandingkan dengan usaha yang perlu dikerahkan, $\eta_d = Q_d / W$.

Tentu juga dapat dihitung daya (per detik)nya, dengan mengukur lama satu siklus mesinnya.

3. Mesin penghangat diukur efisiensinya dengan membandingkan berapa kalor yang dapat disalurkan ke ruangan, dibandingkan dengan usaha yang harus dikerahkan: $\eta_p = Q_p / W$.

Dayanya juga dapat dihitung per waktu per siklus.

Tampak bahwa definisi ketiga mesin ini serupa tetapi tidaklah sama, karena disesuaikan dengan tujuannya masing-masing. Kini Prinsip Clausius akan digunakan menghitung berapa nilai maksimal efisiensi mesin-mesin tersebut.

EFISIENSI MAKSIMUM MESIN KALOR

Efisiensi ini $\equiv \eta_k = W / Q_p$, yang dari kekalnya energi, dapat ditulis $= (Q_p - Q_d) / Q_p = 1 - Q_d / Q_p$. Untuk memperoleh nilai bagi perbandingan kalor ini, dari Prinsip Entropi Clausius diperoleh (dapat dengan melihat gambar di atas),

$\Delta S_{\text{total}} = \sum Q/T = -Q_p/T_p + Q_d/T_d$ yang menurut Clausius haruslah > 0 . Maka $Q_p/T_p < Q_d/T_d$ yang dengan perkalian dan pembagian yang sesuai, dapat ditulis juga sebagai $Q_d/Q_p > T_d/T_p$. Maka efisiensi $\eta_k = 1 - Q_d/Q_p$ atau $Q_d/Q_p = 1 - \eta_k$ juga $> T_d/T_p$. Maka $\eta_k < 1 - T_d/T_p$, dan jika beda kedua suhu ditulis, $\Delta T \equiv T_p - T_d$, maka diperoleh bahwa efisiensi mesin kalor adalah $\eta_k < \Delta T/T_p$ yang juga dapat dikatakan “efisiensi maksimal mesin kalor $= \Delta T/T_p$ “. Dapatlah lalu disimpulkan bahwa efisiensi maksimum dapat diupayakan dengan memaksimalkan T_p agar efisiensi itu mendekati 1. Biasanya T_d terpaksa diakui \sim suhu udara luar, yang sulit dikendalikan. Itulah penyebab mesin mobil makin mengusahakan tingginya suhu pembakaran bensin/solar.

Dengan pola yang serupa, dapat dihitung efisiensi kedua mesin lainnya, di bawah ini.

EFISIENSI MAKSIMUM MESIN PENDINGIN

Efisiensi ini $\equiv \eta_d = Q_d / W$, dan dari kekalnya energi, dapat ditulis $\eta_d = Q_d / (Q_p - Q_d)$ atau $1/\eta_d = Q_p/Q_d - 1$. Untuk memperoleh nilai bagi perbandingan kalor Q_p/Q_d ini, dari Prinsip Entropi Clausius diperoleh (dapat dengan melihat gambar di atas),

$\Delta S_{\text{total}} = \sum Q/T = +Q_p/T_p - Q_d/T_d$ yang menurut Clausius haruslah > 0 . Maka $Q_p/T_p > Q_d/T_d$ yang dengan perkalian dan pembagian yang sesuai, dapat ditulis juga sebagai $Q_p/Q_d > T_p/T_d$. Maka efisiensi $1/\eta_d + 1 = Q_p/Q_d > T_p/T_d$, atau $1/\eta_d > T_p/T_d - 1$. Maka $\eta_d < 1/(T_p/T_d - 1) = T_d/\Delta T$. Jadi efisiensi maksimum mesin pendingin adalah $= T_d/\Delta T$. Dapatlah lalu disimpulkan bahwa efisiensi maksimum dapat diupayakan dengan mendekati T_d ke suhu udara luar yang dalam hal ini adalah T_p , yang sulit dikendalikan. Maka janganlah terlalu rendah mendinginkan ruangan, agar bukan hanya kurang nyaman, melainkan juga kurang efisien, artinya menjadi mahal, dan malah menambah kehangatan atmosfer, malah menunjang pemanasan global!

EFISIENSI MAKSIMUM MESIN PENGHANGAT (*HEAT PIPE*)

Efisiensi ini $\equiv \eta_p = Q_p / W$, dan dari kekalnya energi, dapat ditulis $\eta_p = Q_p / (Q_p - Q_d)$ atau $1/\eta_p = 1 - Q_d/Q_p$. Untuk memperoleh nilai bagi perbandingan kalor Q_d/Q_p ini, dari Prinsip Entropi Clausius diperoleh, dapat dengan melihat gambar di atas, $\Delta S_{\text{total}} = \sum Q/T = +Q_p/T_p - Q_d/T_d$ yang menurut Clausius haruslah > 0 . Maka $Q_p/T_p > Q_d/T_d$ yang dengan perkalian dan pembagian yang sesuai, dapat ditulis juga sebagai $Q_d/Q_p < T_d/T_p$. Maka efisiensi $1/\eta_p - 1 = -Q_d/Q_p > -T_d/T_p$, atau $1/\eta_p > -T_d/T_p + 1$. Maka $\eta_p < 1/(-T_d/T_p + 1) = T_p/\Delta T$. Jadi efisiensi maksimum mesin pemanas ini adalah $= T_p/\Delta T$.

Dapatlah lalu disimpulkan pula bahwa efisiensi maksimum dapat diupayakan dengan mendekati T_p ke suhu udara luar yang dalam hal ini adalah T_d , yang sulit dikendalikan. Maka janganlah terlalu tinggi menghangatkan ruangan, agar bukan hanya kurang nyaman, melainkan juga kurang efisien, artinya menjadi mahal, dan malah makin menambah dinginnya atmosfer.

PERSAMAAN ENTROPI BOLTZMANN

Ludwig Boltzmann (1844-1906) lahir di Wina, Austria [16], belasan tahun saja lebih muda dari James Clerk Maxwell (1831- 1879), tetapi sempat mencapai usia 62 tahun, belasan tahun lebih lama daripada usia Maxwell. Boltzmann mempelajari asumsi dan perhitungan statistik Maxwell tentang laju molekul dalam gas (kini biasa disebut sebagai Teori Kinetik Gas). Dia

lalu menyempurnakannya dan juga menjadi makin percaya bahwa molekul bukan sekedar konsep teoretis melainkan merupakan realitas. Kepercayaan ini tidak dianut kebanyakan fisikawan, yang menghalangi diterima-baiknya sejumlah laporan ilmiahnya yang umumnya membahas sifat statistik para molekul. Rupanya sikap tak percaya rekan fisikawannya memperparah keadaan kesehatannya yang makin mudah tenggelam dalam depresi, yang akhirnya membuatnya melakukan gantung diri di kediamannya di kota Duino, di pojok timur laut Italia, dekat kota Trieste. Salah satu kesimpulan utamanya, bahwa entropi S sebagai besaran makroskopik, berperilaku sebanding dengan logaritma jumlah ($\equiv W$; kebetulan sama dengan simbol usaha; kita pandai-pandai mengenali saja beda makna ini dari konteks bahasanya) semua keadaan molekular yang dimungkinkan bagi suatu keadaan makroskopik sistem. Hal ini disadari Boltzmann ~tahun 1872, dibahas secara ringkas oleh Max Planck tahun 1900, dan diukir di batu nisannya th 1906: $S = k \log W$. Kini kita biasa [17] menulisnya \ln (logaritma natural atau sesuai dengan penemunya, logaritma Napier) yang bilangan dasarnya $e = 2,718\dots$, dan menggunakan \log hanya kalau bilangan dasarnya 10. Berdasarkan asumsi bahwa setiap keadaan molekular sistem berpeluang sama (asumsi tersederhana), ternyata berbagai keadaan makroskopik sistem memiliki peluang yang saling berbeda. Maka sesuai dengan konsep “peluang”, yaitu perbandingan jumlah keadaan molekular terhadap totalitas keadaan molekular, keadaan makroskopik akan terus berubah menuju ke keadaan dengan jumlah keadaan molekular terbesar. Perubahan ini digambarkan oleh bertambahnya entropi S itu, menuju suatu nilai S maksimum. Setelah mencapai keadaan dengan entropi maksimum ini, sistem telah mencapai keadaan makroskopik yang berpeluang terbesar, yang berarti keadaan itu takkan lagi berubah, sehingga dapat diartikan sebagai keadaan seimbang termal. Tiba-tiba konsep keseimbangan termal dalam termodinamika, mengait pada konsep statistik “peluang maksimum”. Maka Hukum Termodinamika Kedua, yang menyatakan sesuai dengan Clausius bahwa entropi suatu sistem akan membesar menuju maksimumnya, memperoleh dukungan atau konsistensi atau membenaran secara statistik. Hal ini dapat diartikan / diinterpretasikan sebagai suatu konspirasi positif, atau suatu keterpaduan yang indah dalam alam.

SUATU PERTIMBANGAN METAFISIKA

Kalimat terakhir di atas, merupakan contoh kalimat yang tidak ilmiah, dalam arti bahwa kalimat itu tidak dapat dibuktikan benar atau keliru karena tidak dapat diukur, tidak dapat difalsifikasi [18] menurut syarat keilmiahan yang diajukan oleh Sir Karl Raimund Popper (1902-1994). Dapat dikatakan kalimat itu bersifat metafisika, bukan termasuk fisika yang mensyaratkan cara ilmiah, yang mencakup “dapat diukur” sebagai syarat membenaran. Kebanyakan ilmuwan, termasuk fisikawan, sebenarnya terbiasa bermetafisika, di ujung atau di pangkal analisis ilmiah/fisikanya, tetapi sering kurang menyadarinya. Setiap asumsi, postulat, hipotesis, sebenarnya bersifat metafisika, karena sering berupa suatu yang diyakini benar, yang dianggap otomatis jelas dan tidak lagi perlu dibuktikan. Beda dengan sikap kebanyakan agamawan, ilmuwan/fisikawan merasa dapat saja berubah kepercayaannya, jika bukti-bukti cukup mendukung. Boltzmann merupakan suatu contoh. Dia teryakinkan oleh suksesnya Maxwell menghitung sebaran laju molekul gas, bahwa konsep molekul bukanlah hanya alat matematis untuk dapat berhitung, melainkan merupakan kenyataan yang kapan-kapan dapat diukur. Seandainya dia tidak terganggu oleh saat-saat depresinya, dia mungkin dapat sempat membaca publikasi dalam *Annalen der Physik* tahun 1905 oleh Einstein (1879-1955) tentang [19] gerak Brown (1773-1858), yang membuka jalan bagi Jean-Baptiste Perrin (1870-1942) menemukan [20] cara mengukur Bilangan [21] Avogadro (1776-1856), yang membuktikan kebenaran konsep molekul dan atom.

Mengapa penyadaran metafisika ini penting? Ini penting agar kita tidak mudah menjadi radikal dan ekstremis, karena terlalu mudah yakin penuh atas suatu ucapan atau aliran atau agama. Hal yang tak terukur bukannya dinyatakan sebagai tidak ada atau tidak sah. Seperti halnya rasa kasih sayang juga tak terukur tetapi jelas nyata ada; sikap para ibu terhadap anaknya dengan jelas menunjukkan hadirnya kasih sayang ini; padahal tampaknya tidak dapat diukur selain dengan misalnya kadar feromon atau hormon tertentu; yang tentunya tidaklah memberi deskripsi kasih sayang secara lengkap. Akan tetapi ketakterukurannya juga dapat dipandang memberi peringatan kepada kita untuk lebih rendah hati dalam berkeyakinan. Justru karena ketakterukurannya, kita dapat merasa diingatkan bahwa asumsi, hipotesis, keyakinan yang tidak dapat diukur secara ilmiah, bermakna bahwa alternatifnya juga dimungkinkan teryakini dengan kuat.

Selain itu, keilmiahannya jelas menunjukkan melalui terus berkembangnya, malah dengan makin pesat, bahwa makin tampak tiadanya batas-batas atau ujungnya, dan tidak sederhananya prinsip-prinsip yang semula dikira sudah mutlak, seperti “hukum” kekekalan energi, dan sebagainya.

Suatu contoh adalah Hukum Termodinamika Kedua ini: Entropi terus bertambah; Lord Kelvin dikenal ucapannya di akhir abad ke 19, bahwa dengan demikian jagad raya akan menjadi makin acak, menurut Hukum Kedua itu, dan semua energi akan akhirnya berubah menjadi hanya energi termal (“*the heat death of the universe*”) [10], sehingga tak lagi dimungkinkan adanya konversi menjadi usaha dan energi potensial.

Ternyata kemudian pada tahun 1970an, Ilya Prigogine (1917-2003) yang lahir di Moskow tetapi kemudian bermigrasi dengan orangtuanya ke Belgia, mengembangkan konsep “struktur disipatif” [22]: Entropi S dapat diturunkan secara lokal, tetapi memang S lingkungannya terpaksa naik. Dan hal itu dapat terjadi jika sistemnya “terbuka”, dalam arti dapat mengalirkan energi melalui dirinya. Contoh jelas adalah kita manusia/makhluk hidup: Selama kita dapat bernafas, makan, dan minum, kita dapat tumbuh besar dan berkemampuan tinggi. Ketika kita berhenti mengalirkan energi ke tubuh kita, kita akan mengurai menjadi debu kembali. Makna metafisis yang dapat disimpulkan dari perkembangan ilmu seperti ini adalah, bahwa ada saja peluang perkembangan yang terjadi, walaupun semula diyakini kesimpulan kita sudah amat jelas dan “pasti”.

Satu catatan lagi yang bersifat metafisis: Alam dapat diramalkan perilakunya. Adakah tersirat suatu makna di balik kemampuan meramal itu? Apakah mungkin ada Penuntun Mahakuasa yang sedang membimbing kita, menuju suatu tujuan? Tujuan apa? Yayasan Templeton, suatu yayasan filantropis di Inggris yang memiliki tujuan meneliti kaitan ilmu dan “iman” seperti ini, pernah meneliti “*Big Questions*” seperti itu, antara lain, “adakah tujuan dalam jagad raya ini?” [23]

Sekitar 12 ahli dari berbagai bidang yang dihadapkan pada pertanyaan besar seperti itu, ternyata menjawab yang dapat dikelompokkan menjadi 3 macam yang serupa jumlahnya: yang yakin ada tujuan, yang yakin tidak ada tujuan, dan yang “mungkin saja ada tujuan”. Tampak kiranya, bahwa ilmuwan tidaklah selalu akan sependapat tentang ada tidaknya tujuan jagad raya ini. Yang jelas, jawabnya tidak dapat diukur, maka bersifat metafisika, dan kiranya sikap terbaik bagi ilmuwan, termasuk dosen dan guru adalah: Rendah hatilah dalam menapak kawasan metafisika. Karena kepastiannya tidak dapat didukung oleh pengukuran ilmiah, tanpa berarti bahwa kepastian itu tidak ada.

Kesimpulan lain kiranya adalah: Manusia perlu cerdas menghadapi berbagai pertanyaan dan tawaran; bukannya menutup mata dan hanya mau melihat ke satu arah saja. Dan kalau ditanya: demi apa? Jawabnya kiranya tidak patut dihindari, melainkan patut direnungkan, dan dikejar dengan cerdas tetapi tetap rendah hati.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Katolik Parahyangan, atas dukungan finansialnya sehingga penelitian untuk makalah ini dapat dilakukan; dan juga terima kasih atas persetujuan Panitia SNIPS 2019 untuk presentasi makalah ABS-2 ini pada 9 Juli 2019 di ITB, Bandung.

REFERENSI

1. D.S.L. Cardwell, *From Watt to Clausius: The Rise of Thermodynamics in the Early Industrial Age*, Heinemann, London, ISBN 978-0-435-54150-7 (1971); juga Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Rudolf_Clausius (22 Juli 2019)
2. Rudolf Clausius, *Ueber die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen*", *Annalen der Physik*, **79** (4): 368-397, 500-524. [Bibcode:1850AnP...155..500C](#), [doi:10.1002/andp.18501550403](#) (1850). Terjemahan Inggrisnya: [On the Moving Force of Heat, and the Laws regarding the Nature of Heat itself which are deducible therefrom](#), *Phil. Mag.* (1851), series 4, **2**, 1–21, 102–119. Juga ada di [Google Books](#).
3. Rudolf Clausius, *The Mechanical Theory of Heat – with its Applications to the Steam Engine and to Physical Properties of Bodies*, John van Voorst, London (1867) (19 Juni 2012). Memuat juga terjemahan Inggris berbagai makalahnya.
4. Thomas A Moore, 2003, *Six Ideas that Shaped Physics, Unit T*, edisi ke 2, hlm 161 & 166, McGraw-Hill, Boston (2003)
5. Eric Preston, *Thomas Newcomen of Dartmouth and the Engine that Changed the World*, Dartmouth: Dartmouth and Kingswear Society and Dartmouth History Research Group, hlm 60, ISBN 1-899011-27-7 (2012); "Newcomen, Thomas", [Dictionary of National Biography](#), London: Smith, Elder & Co, hlm 1885–1900; juga Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Newcomen (22 Juni 2019)
6. Jennifer Tann, *Watt, James (1736–1819)*. [Oxford Dictionary of National Biography](#) (edisi online 2013). Oxford University Press, [doi:10.1093/ref:odnb/28880](#) (2004); Carl Lira, [Biography of James Watt](#). [egr.msu.edu](#). (2001) (5 Juli 2010); Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/James_Watt (22 Juli 2019)
7. Isaac Newton, [Letter from Sir Isaac Newton to Robert Hooke](#). Historical Society of Pennsylvania. (7 June 2018); juga Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Isaac_Newton (22 Juli 2019)
8. Sadi Carnot, *Reflections on the motive power of fire*, Manchester University Press, Manchester UK, ISBN 0-7190-1741-6. (1824/1986); Sadi Carnot, *Reflexions on the motive power of fire*. Robert Fox (ed.), Lilian Barber Press: New York, hlm 26 (1986) ISBN 978-0-936508-16-0; "Carnot, Sadi (1796–1832)", Wolfram Research, 2007 (24 Februari 2010)
9. Rudolf Clausius, *Ueber verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie (Vorgetragen in der naturforsch. Gesellschaft zu Zürich den 24. April 1865)*, [On various useful formulations, for practical applications, of the main equations of the mechanical theory of heat (presented at the Society for Natural Sciences in Zurich on 24 April 1865); berdasarkan terjemahan Microsoft Translator] *Annalen der Physik und Chemie*, **125** (7): 353-400. [Bibcode:1865AnP...201..353C](#), [doi:10.1002/andp.18652010702](#) (1865); hlm 390: "Sucht man für Seinen bezeichnenden Namen, so könnte man, ähnlich wie von der Gröfse U gesagt ist, sie sey der Wärme- und Werkinhalt des Körpers, von der Gröfse S sagen, sie sey der Verwandlungsinhalt des Körpers. Da ich es aber für besser halte, die Namen derartiger für die Wissenschaft wichtiger Gröfßen aus den alten Sprachen zu entnehmen, damit sie unverändert in allen neuen Sprachen angewandt werden können, so schlage ich vor, die Gröfse S nach dem griechischen Worte ἡ τροπή, die Verwandlung, die Entropie des Körpers zu nennen. Das Wort Entropie habe ich absichtlich dem Worte Energie möglichst ähnlich gebildet, denn die beiden Gröfßen, welche durch diese Worte benannt werden sollen, sind ihren physikalischen

- Bedeutungen nach einander so nahe verwandt, dafs eine gewisse Gleichartigkeit in der Benennung mir zweckmäfsig zu seyn scheint.* ["Looking for a descriptive name, we could, similar to the quantity U for the heat and work content of a body, take the quantity S for the transformation content of the body. I think it better, to take the names of similar important scientific quantities from the ancient languages, to be able to use them unchanged in various modern languages. So I propose to name the quantity S according to the Greek word, ἡ τροπή, the Transformation, and call S the Entropy of the body. I intentionally take the word entropy to be as similar as possible to the word energy, because the two quantities are so closely related to each other in their physical meanings, that a certain similarity in their naming will be serving a good purpose."]; berdasarkan terjemahan Microsoft Translator] (hlm 390); juga Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Entropy> (22 Juli 2019)
10. Matthew Trainer, [Lord Kelvin, Recipient of The John Fritz Medal in 1905](#), *Physics in Perspective*, (2008) 10, 212-223; juga Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/William_Thomson,_1st_Baron_Kelvin
 11. Wikipedia, *Samuel Finley Breese Morse*, https://en.wikipedia.org/wiki/Samuel_Morse (22 Juli 2019)
 12. Wikipedia, *River Kelvin*, https://en.wikipedia.org/wiki/River_Kelvin (22 Juli 2019)
 13. Abraham Fraenkel, *Recollections of a Jewish Mathematician in Germany*, Birkhäuser, Basel, Switzerland, hlm 96. ISBN 9783319308456 (2016); juga Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Max_Planck (22 Juli 2019)
 14. Constantin Carathéodory [Untersuchungen ueber die Grundlagen der Thermodynamik](#) [*Examination of the foundations of Thermodynamics*; terjemahan D. H. Delphinich] (PDF) (1909) [Mathematische Annalen](#), 67 (3): 355–386, doi:10.1007/bf01450409 (1909); juga Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Constantin_Carath%C3%A9odory
 15. The Free Dictionary, <https://www.thefreedictionary.com/efficacious> (22 Juli 2019)
 16. Carlo Cercignani, *Ludwig Boltzmann: The Man Who Trusted Atoms*. Oxford University Press. ISBN 9780198501541 (1998); juga Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Ludwig_Boltzmann (22 Juli 2019)
 17. Julian Havil, [John Napier: life, logarithms, and legacy](#). Princeton. 13-17. ISBN 9781400852185. OCLC 889552514; Juga: Brian Rice, Enrique González-Velasco, Alexander Corrigan, *The Life and Works of John Napier*, Springer International Publishing, hlm 12, ISBN 9783319532813, (2017) (10 May 2019); juga Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/John_Napier
 18. D. Miller, *Sir Karl Raimund Popper, C. H., F. B. A., Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*. 43: 369–409. doi:10.1098/rsbm.1997.0021, (1997); juga Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Karl_Popper
 19. Hans-Josef Kuepper, [List of Scientific Publications of Albert Einstein](#). Situs Einstein-website.de (3 April 2011); juga Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Albert_Einstein (2 Juli 2019)
 20. J.S. Townsend, *Jean Baptiste Perrin. 1870-1942, Obituary Notices of Fellows of the Royal Society*, 4 (12): 301-326. doi:10.1098/rsbm.1943.0004 (1943); R.A. Kyle, *Jean Baptiste Perrin*, *Journal of the American Medical Association (JAMA)*, 242 (8): 744 (1979), doi:10.1001/jama.242.8.744; juga Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Jean_Baptiste_Perrin (22 Juli 2019)
 21. C.N. Hinshelwood & L. Pauling, (1956), *Amedeo Avogadro*, *Science* 124 (3225), 708-713, Bibcode:1956Sci...124..708H, doi:10.1126/science.124.3225.708, PMID 17757602 (1956); juga Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Amedeo_Avogadro (22 Juli 2019)
 22. Michel Louette, *Obituary: Alexandre Prigogine (1913–1991)*. *Ibis*. 134: 89–90. doi:10.1111/j.1474-919X.1992.tb07238.x (1992); juga Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Ilya_Prigogine (22 Juli 2019)
 23. Sarah Pulliam Bailey, [John Templeton Jr., president of multi-billion dollar foundation invested in science and religion, has died](#), *The Washington Post*, 19 Mei (2015); "[John Templeton Foundation](#)", *ProPublica* (19 March 2018); juga Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/John_Templeton_Foundation (22 Juli 2019)