

Studi Fenomena Temperatur Negatif dan Penerapannya pada Beberapa Sistem

Widya Liana Aji^{1,a)} dan Acep Purqon^{1,b)}

Fisika Bumi dan Sistem Kompleks, FMIPA ITB

^{a)}widyalianaaji@gmail.com

^{b)}acep@fi.itb.ac.id

Abstrak

Temperatur negatif adalah fenomena yang sulit diamati namun menarik untuk dikaji. Untuk menjelaskan temperatur negatif ini diilustrasikan sekelompok partikel yang terdistribusi pada bukit dan lembah energi dimana ketinggian bukit menyatakan besarnya energi yang dimiliki oleh partikel. Dari ilustrasi tersebut, distribusi Boltzmann pada temperatur negatif menjadi terbalik ketika lebih banyak partikel yang menempati keadaan energi tinggi dibandingkan dengan partikel yang menempati keadaan energi rendah. Dalam hal ini, perubahan entropi terhadap perubahan energi bernilai negatif. Sistem temperatur negatif mempunyai lebih banyak energi dengan energi maksimum yang dimilikinya daripada sistem temperatur positif. Dalam makalah ini akan dibahas juga beberapa penerapan sistem temperatur negatif, misalnya pada sistem spin inti, eksperimen oleh Braun et.al. mengenai temperatur negatif pada sistem partikel bergerak untuk pertama kalinya, dan perilaku sistem dalam bidang Ekonofisika.

Kata-kata kunci: energi, entropi, temperatur negatif.

PENDAHULUAN

Nol mutlak Kelvin (0 Kelvin) merupakan temperatur terendah dari suatu sistem. Pada temperatur tersebut, partikel-partikel di dalam suatu sistem memiliki energi minimum. Temperatur nol Kelvin mengindikasikan semua partikel di dalam sistem tidak lagi bergerak. Tentu sangat sulit untuk membuat suatu sistem dengan temperatur serendah ini karena sampai sekarang pun tidak pernah ditemukan sistem yang dapat mencapai temperatur tersebut.

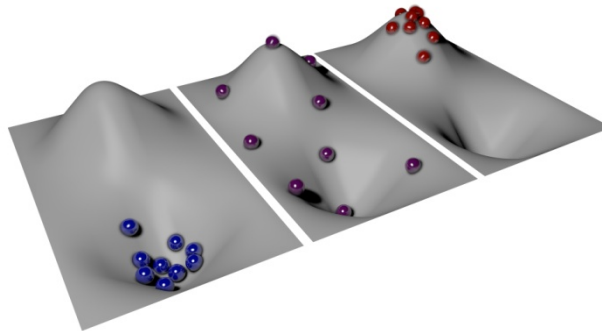
Meskipun temperatur 0 K belum pernah dicapai, bukan berarti temperatur di bawah 0 K tidak dapat dicapai. Temperatur di bawah nol mutlak Kelvin ini dinamakan temperatur negatif. Sistem dengan temperatur negatif bukan mengindikasikan lebih dingin daripada temperatur 0 K, melainkan sebaliknya, sistem bertemperatur negatif lebih panas dari semua sistem temperatur positif yang ada. Temperatur negatif ini sangat terkait erat dengan energi dan entropi yang dimiliki oleh sistem. Selain itu, sistem dengan temperatur negatif memiliki distribusi Boltzmann yang tidak dimiliki oleh sistem pada umumnya.

Temperatur negatif ini juga dapat diterapkan pada beberapa sistem, seperti pada sistem spin inti dan pada sistem partikel bergerak dengan keadaan khusus yang memungkinkannya mempunyai temperatur negatif. Konsep mengenai temperatur negatif juga dapat diterapkan dalam bidang Ekonofisika. Oleh karena itu, temperatur negatif sangat menarik untuk dipelajari.

ILUSTRASI TEMPERATUR NEGATIF

Untuk dapat memahami temperatur negatif, diilustrasikan bukit dan lembah energi seperti pada gambar di bawah. Bukit dan lembah energi menggambarkan distribusi Boltzmann (distribusi temperatur) dalam suatu

sistem yang terdiri dari sejumlah partikel. Partikel-partikel ini terdistribusi pada suatu bukit dan lembah energi dimana ketinggian bukit menyatakan besarnya energi [7], yakni energi potensial dan energi kinetik yang dimiliki oleh partikel.



Gambar 1. Sejumlah partikel menempati bukit dan lembah energi. (a) Ilustrasi temperatur positif, (b) ilustrasi temperatur tak hingga, dan (c) ilustrasi temperatur negatif [6].

Mula-mula semua partikel berada pada dasar lembah dimana energi yang dimilikinya minimum dan entropi sistem bernilai nol. Partikel-partikel tersebut memiliki energi potensial minimum dan tidak bergerak sama sekali sehingga energi kinetiknya nol. Pada kondisi ini, sistem berada pada keadaan stabil dan temperatur sistem adalah +0 K (0 K). Seperti yang sudah kita ketahui bahwa sistem dengan temperatur 0 K tidak pernah ditemukan.

Ketika energi dalam sistem meningkat, entropi sistem juga akan meningkat. Sejumlah partikel mulai bergerak dari dasar lembah untuk menempati keadaan energi yang lebih tinggi, tetapi kita akan tetap lebih sering menemukan partikel pada keadaan energi yang lebih rendah. Dengan kata lain, lebih banyak partikel yang menempati keadaan energi rendah dibandingkan dengan partikel yang menempati keadaan energi tinggi seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 1(a). Dalam hal ini, temperatur sistem bernilai positif.

Energi dalam sistem tersebut terus meningkat sehingga partikel-partikel terus bergerak menempati keadaan energi yang lebih tinggi sampai pada suatu keadaan dimana partikel-partikel tersebut tersebar secara merata baik pada lembah energi maupun bukit energi seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 1(b). Probabilitas menemukan partikel pada keadaan energi rendah dan keadaan energi tinggi menjadi sama, dan entropi sistem menjadi maksimum. Dengan demikian, sistem memiliki temperatur tak hingga.

Ketika energi dalam sistem masih terus mengalami peningkatan, partikel-partikel akan lebih banyak menempati bukit energi seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 1(c). Dalam hal ini, kita akan lebih sering menemukan partikel pada keadaan energi tinggi dibandingkan pada keadaan energi rendah. Dengan kata lain, lebih banyak partikel yang mempunyai energi tinggi dan hanya sedikit partikel yang mempunyai energi rendah. Entropi sistem cenderung menurun seiring dengan bertambahnya energi pada sistem tersebut. Inilah keadaan yang disebut dengan temperatur negatif.

Pada saat energi dalam sistem mencapai maksimum, semua partikel menempati puncak bukit energi. Partikel-partikel tersebut mempunyai energi maksimum. Meskipun semua partikel berada di puncak bukit, keadaan sistem tetap stabil. Energi potensial maksimum yang dimiliki oleh partikel-partikel tidak dapat diubah menjadi energi kinetik karena energi kinetik yang dimilikinya juga maksimum. Oleh karena itu, semua partikel tetap berada di puncak bukit dan dapat bergerak sangat cepat. Dalam hal ini, entropi sistem kembali bernilai nol dan temperaturnya menjadi -0 K.

KARAKTERISTIK TEMPERATUR NEGATIF

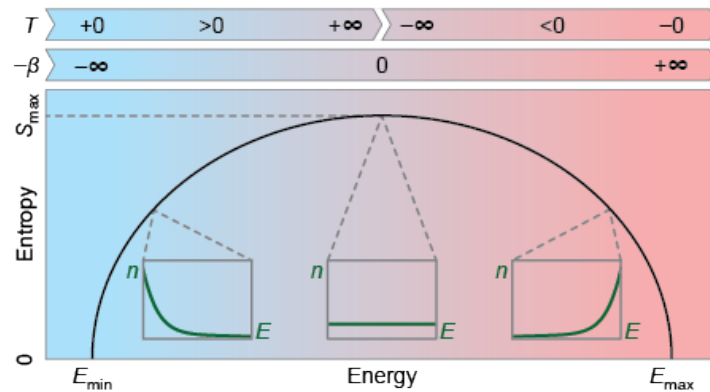
Kurva Entropi terhadap Energi

Temperatur T didefinisikan melalui entropi S dan energi dalam sistem U yang dapat dituliskan oleh persamaan berikut.

$$\frac{1}{T} = \left(\frac{\partial S}{\partial U} \right)_{N,V}, \tag{1}$$

dengan volume V dan jumlah partikel N di dalam sistem konstan. $\partial S/\partial U$ pada persamaan tersebut menggambarkan kemiringan kurva entropi terhadap energi seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2 (sisipan gambar akan dijelaskan pada bagian selanjutnya). Apabila $\partial S/\partial U$ suatu sistem bernilai positif, kemiringan

kurva menjadi positif, temperatur sistem juga akan positif. Tetapi apabila $\partial S/\partial U$ suatu sistem bernilai negatif, kemiringan kurva menjadi negatif sehingga sistem akan mempunyai temperatur negatif.



Gambar 2. Kurva entropi terhadap energi dalam sistem [7].

Pada gambar di atas, ketika energi dalam sistem minimum, entropi sistem nol, dan kemiringan kurva menjadi tak hingga. Keadaan ini mengindikasikan temperatur sistem +0 K. Apabila energi dalam sistem bertambah, entropi sistem juga bertambah besar sehingga kemiringan kurva menjadi positif. Dengan demikian, sistem tersebut memiliki temperatur positif seperti yang ditunjukkan oleh daerah berwarna biru. Ketika entropi sistem mencapai nilai maksimum, kemiringan kurva menjadi nol (datar) yang mengindikasikan temperatur tak hingga ($\pm \infty$ K) pada sistem. Kemudian seiring dengan terus bertambahnya energi dalam sistem, entropi sistem justru menurun sehingga kemiringan kurva menjadi negatif. Dalam hal ini, sistem mempunyai temperatur negatif seperti yang ditunjukkan oleh daerah berwarna merah. Ketika energi dalam sistem maksimum, entropi sistem tersebut menjadi nol, dan kemiringan kurva kembali bernilai tak hingga. Dengan demikian, temperatur sistem menjadi -0 K.

Secara fisis, temperatur +0 K dan -0 K sangat berbeda. Temperatur +0 K terkait dengan energi minimum yang dimiliki sistem, sedangkan temperatur -0 K terkait dengan energi maksimum sistem. Lain halnya dengan $\pm \infty$ K, keduanya memiliki makna fisis yang sama [7].

Pada Gambar 2 juga terlihat bahwa temperatur seakan-akan melompat dari $+\infty$ ke $-\infty$. Ini adalah konsekuensi dari definisi temperatur itu sendiri yang dinyatakan oleh persamaan (1). Untuk itu diperkenalkan parameter yang berkaitan erat dengan temperatur, yaitu parameter β . Parameter ini dapat dinyatakan oleh persamaan berikut.

$$\beta = \frac{1}{kT} \tag{2}$$

dengan k adalah konstanta Boltzmann.

Dalam mekanika statistik, parameter β ini lebih sering digunakan daripada T . $-\beta$ merupakan pilihan yang lebih baik untuk mendefinisikan temperatur. Apabila temperatur dinyatakan melalui $-\beta$, terlihat pada Gambar 2, maka urutannya akan dimulai dari $-\infty$ melalui 0 sampai $+\infty$. Hal ini tentu saja akan menghindari lompatan nilai temperatur dari $+\infty$ ke $-\infty$ yang membingungkan. Dengan demikian, temperatur dapat diurutkan menjadi $+0, \dots, +10, \dots, +\infty, -\infty, \dots, -10, \dots, -0$.

Distribusi Boltzmann Terbalik

Probabilitas menemukan partikel pada keadaan energi tertentu berkaitan erat dengan distribusi Boltzmann. Distribusi Boltzmann menyatakan probabilitas menemukan partikel pada suatu keadaan energi bervariasi secara eksponensial sebagai fungsi E_i/kT . Hubungan kesebandingan antara probabilitas menemukan partikel dengan keadaan energi yang ditematinya adalah sebagai berikut.

$$P_i \propto \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right) \tag{3}$$

dari persamaan di atas, P_i menyatakan probabilitas menemukan partikel pada keadaan energi ke- i E_i pada suatu temperatur T .



Gambar 3. Ilustrasi distribusi Boltzmann pada berbagai temperatur. (a) Pada temperatur +0 K, (b) pada temperatur positif, (c) pada temperatur $\pm \infty$ K, d) pada temperatur negatif, dan (e) pada temperatur -0 K [6].

Pada Gambar 3(a), terlihat bahwa ketika temperatur sistem +0 K semua partikel menempati keadaan energi terendah. Probabilitas menemukan partikel pada keadaan energi ini adalah yang paling besar. Ketika $T > 0$ K (temperatur sistem positif) seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3(b), probabilitas menemukan partikel menurun seiring dengan bertambahnya energi dalam sistem. Distribusi partikel seperti ini adalah distribusi Boltzmann yang sering kita jumpai. Pada Gambar 3(c), sistem mencapai temperatur $\pm \infty$ K dimana probabilitas menemukan partikel untuk semua keadaan energi adalah sama.

Pada Gambar 3(d), saat $T < 0$ K (temperatur sistem negatif), justru probabilitas menemukan partikel meningkat seiring dengan semakin tingginya tingkat energi yang ditempati oleh partikel sehingga distribusi Boltzmann menjadi terbalik, dan tentunya kita jarang menemukan sistem pada keadaan ini. Selanjutnya ketika temperatur sistem -0 K seperti yang ditunjukkan Gambar 3(e), semua partikel menempati keadaan energi maksimum sistem. Probabilitas menemukan partikel pada keadaan energi ini juga menjadi yang paling besar.

Batas Atas Energi

Baik sistem dengan temperatur positif maupun sistem dengan temperatur negatif masing-masing harus mempunyai suatu batas energi. Pada sistem temperatur positif, dibutuhkan batas bawah energi. Kembali pada Gambar 1(a), jika tidak ada dasar lembah, partikel-partikel akan terus bergerak turun tanpa pernah menyentuh dasar sehingga tidak akan pernah mencapai keadaan stabil. Oleh karena itu, dibutuhkan dasar lembah untuk meletakkan partikel-partikel tersebut. Dasar lembah menggambarkan batas bawah energi pada sistem temperatur positif. Ketika berada di batas bawah energi ini partikel-partikel tidak lagi melakukan pergerakan. Sedangkan pada sistem temperatur negatif dibutuhkan batas atas energi. Pada Gambar 1(c), terlihat bahwa semua partikel menempati puncak bukit. Puncak bukit ini pasti memiliki ketinggian tertentu. Dengan demikian, ketinggian puncak inilah yang menggambarkan batas atas energi pada sistem temperatur negatif.

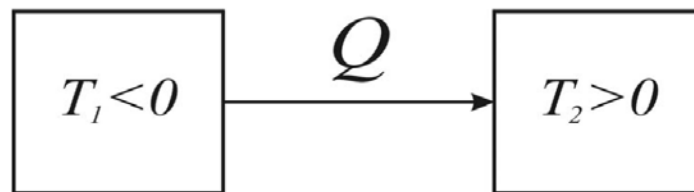
Telah kita ketahui sebelumnya bahwa sistem temperatur negatif mempunyai distribusi Boltzmann yang terbalik. Pada saat kita memasukkan nilai temperatur T yang negatif pada hubungan kesebandingan (3), maka fungsi eskponensialnya menjadi $\exp(E_i/kT)$. Dalam hal ini, probabilitas P_i menjadi divergen dan tidak terdefinisi ketika energi E_i menuju tak hingga [3]. Oleh karena itu, kita membutuhkan batas atas energi untuk sistem yang memiliki temperatur negatif.

Dalam kehidupan sehari-hari kita tidak pernah menjumpai sistem temperatur negatif. Umumnya sistem-sistem yang sering kita jumpai tidak memiliki batas atas energi, misalnya udara yang berada di sekitar kita yang merupakan salah satu sistem gas klasik. Sistem tersebut hanya terbatas pada temperatur positif sehingga tidak memiliki batas atas energi. Dalam hal ini, partikel-partikel gas bergerak sangat bebas dengan energi kinetik yang tinggi dan tidak terbatas.

Lain halnya dengan sistem temperatur negatif, partikel-partikel di dalam sistem tidak lagi dapat menerima energi dari manapun, bahkan jika di luar sistem terdapat energi dalam jumlah yang sangat banyak [7]. Dengan demikian, sangat jelas bahwa sistem temperatur negatif membutuhkan suatu batas atas energi.

Sistem Temperatur Negatif Lebih Panas dari Sistem Temperatur Positif

Sistem temperatur negatif memiliki lebih banyak energi daripada sistem temperatur positif. Seperti yang sudah dibahas pada bagian sebelumnya, sistem temperatur negatif memiliki partikel-partikel yang lebih banyak menempati keadaan energi tinggi daripada yang menempati keadaan energi rendah. Partikel-partikel tersebut memiliki energi yang lebih besar dibandingkan dengan partikel-partikel pada sistem temperatur positif. Oleh karena itu, apabila sistem temperatur negatif T_1 mengalami kontak secara termal dengan sistem temperatur positif T_2 , maka energi atau kalor Q akan berpindah dari sistem T_1 ke sistem T_2 seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4. Sistem T_1 akan melepas kalor sedangkan sistem T_2 akan menerima kalor.



Gambar 4. Kalor Q berpindah dari sistem temperatur negatif T_1 ke sistem temperatur positif T_2 [4].

Akan tetapi, jumlah partikel pada sistem temperatur negatif tidak sebanyak jumlah partikel pada sistem temperatur positif. Sebagai contoh, sistem temperatur negatif hanya memiliki sekitar 10^5 atom [3], sedangkan pada sistem temperatur positif, misalnya 1 mililiter air pada temperatur kamar memiliki sekitar 10^{23} molekul. Dengan demikian, berarti sistem temperatur negatif memiliki jumlah atom sekitar 17 kali lipat kurang dari jumlah molekul air walaupun hanya dalam 1 mililiter [7]. Jika kita menjumlahkan semua energi yang dimiliki atom-atom dalam sistem temperatur negatif, total energinya jauh sangat kecil dibandingkan dengan total energi pada molekul-molekul dalam 1 mililiter air yang bertemperatur positif. Oleh karena itu, ilustrasi di atas (Gambar 4) hanya berlaku apabila jumlah partikel dalam sistem temperatur positif sama atau jumlahnya tidak sangat jauh berbeda dengan partikel dalam sistem temperatur negatif.

Untuk jumlah partikel yang tidak sangat jauh berbeda yang digunakan sebagai perbandingan, dapat dikatakan sistem dengan temperatur -0 K merupakan sistem terpanas melebihi panas pada sistem temperatur positif dan sistem temperatur tak hingga. Hal ini dikarenakan sistem temperatur -0 K memiliki energi maksimum pada partikel-partikelnya.

PENERAPAN TEMPERATUR NEGATIF PADA BEBERAPA SISTEM

Sistem Spin Inti

Temperatur negatif pertama kali dipelajari secara teoritik pada sistem spin inti dalam medan magnet (akan sering kita sebut sistem spin), dan telah dibuktikan secara eksperimen dengan menggunakan kristal *Lithium Fluoride* murni (*LiF*) [4]. Pada eksperimen tersebut, sistem spin di dalam kristal *LiF* dipengaruhi oleh medan magnet yang sangat kuat. Dalam hal ini, sistem spin di dalam kristal dianggap sebagai sistem termodinamika yang dapat dideskripsikan oleh sebuah temperatur.

Di dalam kisi, spin-spin saling berinteraksi baik dengan spin itu sendiri maupun dengan kisi kristal. Pada interaksi antar spin, hanya ada satu derajat kebebasan yang berpengaruh dominan, yaitu *spin-flip* dimana spin dapat mengarah ke atas (*spin up*) atau ke bawah (*spin down*). Interaksi antar spin ini sangat kuat sehingga prosesnya menuju kesetimbangan termal berlangsung sangat cepat. Proses spin-spin menuju kesetimbangan termal ini sama halnya dengan proses tumbukan antar molekul gas yang saling bertukar energi untuk mencapai kesetimbangan termal. Proses spin-spin tersebut menuju kesetimbangan termal dikarakterisasi oleh *relaxation time* t_2 yang besarnya sekitar 10^{-5} s [2].

Interaksi antara sistem spin dengan kisi kristal berbeda dengan interaksi antar spin. Interaksi antara spin dengan kristal dipengaruhi beberapa derajat kebebasan dominan yang dimiliki kisi kristal seperti gerak translasi kisi, rotasi kisi, dan vibrasi kisi. Dalam hal ini, interaksi antara spin dengan kisi sangat lemah sehingga proses pertukaran energi antar keduanya terjadi cukup lama. Dengan demikian, proses untuk

menuju kesetimbangan termal antara sistem spin dengan kisi berlangsung lebih lama. Proses spin-kisi dalam menuju kesetimbangan termal ini dikarakterisasi oleh *relaxation time* t_1 yakni sekitar 5 menit [2].

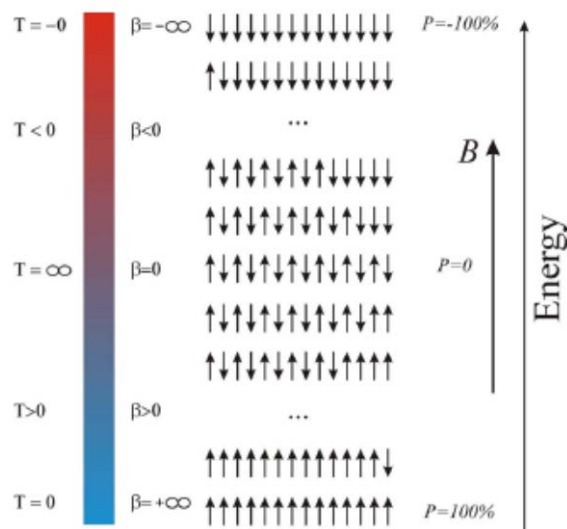
Dari *relaxation time* pada masing-masing interaksi, terlihat bahwa besar t_1 dan t_2 berbeda sangat jauh. t_1 jauh lebih kecil dibandingkan dengan t_2 yang berarti proses spin-spin dalam mencapai kesetimbangan termal hanya membutuhkan waktu sebentar saja dibandingkan dengan proses spin-kisi dalam menuju kesetimbangan termal. Oleh karena perbedaan t_1 dan t_2 yang sangat jauh ini dapat dikatakan bahwa sistem spin dan sistem kisi kristal saling terisolasi satu sama lain. Sistem spin dapat dideskripsikan oleh sebuah temperatur yang berbeda dengan temperatur sistem kisi.

Selain itu, derajat kebebasan translasi pada interaksi antara spin dengan kisi menyebabkan sistem spin-kisi tidak memiliki batas atas energi, dengan kata lain sistem tersebut tidak memiliki energi maksimum. Ini artinya temperatur sistem kisi selalu bernilai positif. Sedangkan derajat kebebasan *spin-flip* pada interaksi sistem spin dapat menyebabkan sistem spin memiliki batas atas energi sehingga temperatur sistem spin dapat bernilai negatif, dan tentu saja dapat memiliki temperatur positif. Dalam hal ini, sistem spin di dalam kisi yang dipengaruhi oleh medan magnet yang sangat kuat hanya memiliki dua keadaan energi, yaitu keadaan energi rendah dan keadaan energi tinggi. Medan magnet pada sistem spin ini selalu mengarah ke atas.

Ketika spin-spin di dalam kisi lebih banyak menempati keadaan energi rendah, akan lebih banyak spin yang mengarah ke atas. Pada keadaan ini, lebih banyak spin-spin yang searah dengan arah medan magnet daripada spin-spin yang berlawanan arah dengan arah medan magnet. Sistem spin yang seperti ini dikatakan mempunyai temperatur positif.

Seiring dengan bertambahnya energi dalam sistem spin, spin-spin dapat menempati keadaan energi tinggi dan keadaan energi rendah dengan jumlah sama. Hal tersebut mengindikasikan *spin up* dan *spin down* memiliki jumlah yang sama. Banyaknya spin yang searah dengan arah medan magnet dan yang berlawanan arah dengan arah medan magnet adalah sama. Dengan demikian, temperatur sistem spin menjadi tak hingga.

Pada saat spin-spin di dalam kisi lebih banyak menempati keadaan energi tinggi, jumlah *spin down* akan lebih banyak dari jumlah *spin up*. Spin-spin yang berlawanan arah dengan arah medan magnet akan lebih banyak daripada spin-spin yang searah dengan arah medan magnet. Inilah keadaan temperatur negatif pada sistem spin.



Gambar 5. Distribusi spin-spin pada dua keadaan energi untuk berbagai temperatur [4].

Gambar di atas menunjukkan keadaan energi sistem spin yang ditandai dengan *spin up* dan *spin down* pada berbagai temperatur baik pada temperatur positif maupun negatif. Pada temperatur 0 K semua spin mengarah ke atas searah medan magnet, sedangkan pada temperatur -0 K semua spin mengarah ke bawah berlawanan arah medan magnet.

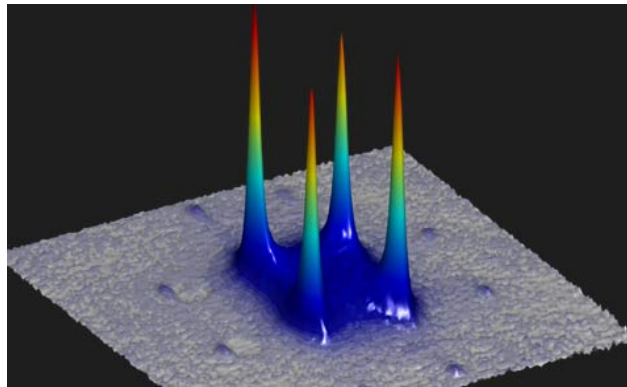
Eksperimen Temperatur Negatif untuk Sistem Partikel Bergerak oleh Braun et.al.

Pada eksperimen ini, Braun et.al. membuat sistem temperatur negatif pada partikel bergerak untuk pertama kalinya. Eksperimen tersebut dilakukan dengan menggunakan sekitar 112.000 atom Kalium *ultracold* (^{39}K) pada fase kondensat Bose-Einstein [3]. Fase ini membuat atom-atom Kalium dapat menempati keadaan energi yang sama. Keadaan energi yang ditempati oleh atom-atom ini adalah keadaan

energi yang sangat rendah. Dengan demikian, atom-atom ini mempunyai temperatur yang sangat rendah yaitu hanya beberapa nano Kelvin saja. Karena temperaturnya yang sangat rendah, kita menyebutnya atom *ultracold*.

Selanjutnya, atom-atom Kalium *ultracold* dilewatkan pada *optical dipole trap*. *Optical dipole trap* merupakan suatu perangkap optik yang terbuat dari sinar laser yang menyebabkan atom-atom terperangkap di dalamnya. Jika *optical dipole trap* dibuat dari sinar laser yang saling bersilangan dalam arah tiga dimensi, maka akan terbentuk pola interferensi terang-gelap yang disebut dengan kisi optik (*optical lattice*) yang tiga dimensi juga. Pola interferensi pada kisi optik ini membentuk potensial periodik sebagai perangkap bagi atom-atom tersebut.

Di dalam kisi optik, atom-atom Kalium tersusun menempati potensial minimum (*trapping potential*). Pada keadaan ini, atom-atom tersebut masih dapat berpindah dari satu *lattice site* ke *lattice site* yang lain melalui *quantum tunneling* tetapi energi kinetiknya menjadi terbatas. Dengan demikian, atom-atom ini memiliki batas atas energi kinetik yang ditunjukkan melalui distribusi momentum oleh Gambar 6.



Gambar 6. Distribusi momentum ketika atom-atom berada pada batas atas energi kinetik [5].

Gambar tersebut memperlihatkan distribusi momentum pada atom-atom Kalium dalam kisi optik. Momentum ini sebanding dengan energi kinetik yang dimiliki atom-atom. Puncak-puncak pada distribusi momentum menunjukkan energi kinetik maksimum atom-atom.

Temperatur tentu tidak hanya terkait dengan energi kinetik, tetapi terkait dengan energi total yang dimiliki oleh atom-atom penyusun sistem, seperti energi potensial dan energi interaksi antar atom. Dalam hal ini, Braun et.al. juga membuat batas atas energi potensial dan energi interaksi yang dimiliki oleh atom-atom.

Untuk membuat batas atas energi potensial, Braun et.al. melakukan transformasi pada perangkap optik tersebut dengan mengubah frekuensinya sedemikian rupa sehingga terbentuk *anti-trapping potential*. Transformasi ini secara sederhana dapat digambarkan seperti mengubah lembah energi menjadi bukit energi.

Di dalam kisi optik, jarak antar atom Kalium sangat dekat sehingga atom-atom tersebut cenderung mengalami interaksi yang saling tolak menolak. Oleh karena itu, digunakan medan magnet dengan kontrol yang sangat baik untuk mengatur interaksi antar atom sehingga atom-atom tersebut saling tarik-menarik. Dengan demikian, atom-atom ini memiliki batas atas untuk energi interaksinya.

Sekarang energi total pada atom-atom Kalium sudah memiliki batas atasnya masing-masing sehingga dapat mencapai keadaan temperatur negatif yang diinginkan. Secara sederhana, eksperimen ini dapat digambarkan seperti membuat keadaan sistem yang stabil pada lembah energi kemudian mengubahnya menjadi keadaan sistem yang stabil pada puncak energi untuk merealisasikan sistem temperatur negatif. Besarnya temperatur negatif yang dicapai dari eksperimen ini adalah negatif nano Kelvin [3].

Kosep Temperatur Negatif dalam Bidang Ekonofisika

Pada bidang Ekonofisika, konsep temperatur negatif berguna untuk menjelaskan distribusi perkerja pada berbagai tingkat produktivitasnya. Dalam hal ini, pekerja digambarkan sebagai partikel, sedangkan produktivitas pekerja digambarkan sebagai keadaan energi yang ditempati oleh partikel [1]. Seperti yang sudah kita ketahui sebelumnya, pada temperatur negatif probabilitas menemukan partikel bertambah seiring dengan semakin tinggi keadaan energi yang ditempatinya. Ini berarti semakin banyak jumlah pekerja semakin tinggi juga produktivitas kerja yang dimilikinya dimana pada temperatur -0 K semua pekerja berada pada produktivitas maksimum.

Konsep temperatur negatif dapat diterapkan untuk mengetahui distribusi produktivitas pekerja pada dua sektor perekonomian, yakni sektor manufaktur dan sektor non-manufaktur [1]. Sektor manufaktur adalah

suatu cabang industri yang mengolah bahan baku dengan memanfaatkan teknologi sehingga dapat menghasilkan sebuah produk, seperti industri mobil, tekstil, plastik, logam, dan lain-lain. Sedangkan sektor non-manufaktur merupakan kebalikannya. Contoh usaha di sektor ini di antaranya perusahaan asuransi dan perbankan. Kedua sektor ini saling berkaitan satu sama lain terhadap total permintaan sejumlah pekerja dan pertukaran pekerja.

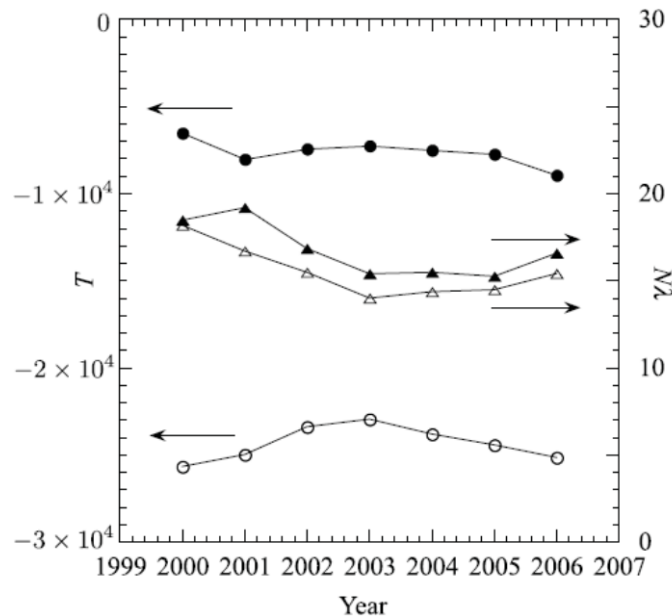
Jika temperatur ekonomi T mengukur seberapa besar total permintaan sejumlah pekerja pada sektor tertentu berkurang menjauhi nilai maksimum dan $N\lambda$ merupakan parameter yang berkaitan erat dengan pertukaran pekerja pada kedua sektor, maka kondisi setimbang terhadap perubahan permintaan sejumlah pekerja dan pertukaran pekerja antara dua sektor tersebut dapat dinyatakan oleh persamaan berikut.

$$T_A = T_B, \tag{4}$$

dan

$$N_A \lambda_A = N_B \lambda_B. \tag{5}$$

Persamaan (4) menyatakan kedua sektor berada pada kondisi setimbang terhadap pertukaran permintaan sejumlah pekerja. Sementara persamaan (5) menyatakan tidak ada perubahan jumlah pekerja pada kedua sektor dalam kondisi setimbang secara keseluruhan [1]. Jika permintaan datang dari A ke B maka $T_A > T_B$, dan berlaku sebaliknya. Jika pekerja berpindah dari A ke B maka $N_A \lambda_A > N_B \lambda_B$, dan berlaku juga untuk sebaliknya.



Gambar 7. Grafik perbandingan T dan $N\lambda$ antara sektor manufaktur dan sektor non-manufaktur [1].

Grafik di atas membandingkan seberapa besar total permintaan sejumlah pekerja pada kedua sektor jauh dari nilai maksimum dan seberapa banyak perubahan jumlah pekerja baik pada sektor manufaktur maupun pada sektor non-manufaktur di Jepang dari tahun 2000 sampai tahun 2006. Lingkaran menggambarkan temperatur ekonomi T yang bernilai negatif dan segitiga menggambarkan parameter $N\lambda$. Warna hitam menunjukkan sektor manufaktur, sedangkan warna putih menunjukkan sektor non-manufaktur.

Dari grafik tersebut dapat dilihat kedua sektor terpisah sangat jauh dari kesetimbangan pertukaran permintaan sejumlah pekerja. Ini mengindikasikan permintaan sejumlah pekerja pada sektor non-manufaktur lebih sedikit dibandingkan dengan sektor manufaktur yang ditandai dengan temperatur ekonomi yang tiga kali lebih rendah dari sektor manufaktur. Dengan demikian, dalam rangka meningkatkan produktivitas pekerja pada sektor non-manufaktur, permintaan sejumlah pekerja yang dibutuhkan pada sektor ini tidak sebanyak permintaan sejumlah pekerja pada sektor manufaktur. Akan tetapi tidak terjadi perubahan pekerja yang signifikan antara kedua sektor. Ini menandakan kedua sektor tersebut hampir dalam kondisi setimbang terhadap pertukaran pekerja.

Hasil di atas sangat dapat dimengerti karena perubahan permintaan sejumlah pekerja antara dua sektor perekonomian yang berbeda sangat sulit. Setiap permintaan sejumlah pekerja cenderung terkait erat dengan sektor tertentu. Jumlah permintaan pekerja pada suatu sektor perekonomian berbeda dengan jumlah

permintaan pekerja pada sektor perekonomian yang lain. Namun tidak demikian dengan pekerja yang dapat mengganti pekerjaan mereka dengan berpindah-pindah dari sektor perekonomian tertentu ke sektor perekonomian yang lain. Hal ini disebabkan karena kemampuan adaptasinya yang membuat kedua sektor ekonomi yang berbeda hampir setimbang terhadap pertukaran pekerja.

RINGKASAN

Temperatur negatif adalah suatu keadaan yang menunjukkan semakin berkurangnya entropi sistem seiring dengan bertambahnya energi dalam sistem tersebut. Semakin besar energi yang dimiliki sejumlah partikel di dalam sistem, entropi sistem tersebut justru semakin menurun.

Pada temperatur negatif lebih banyak partikel di dalam sistem yang menempati keadaan energi tinggi dibandingkan dengan banyaknya partikel yang menempati keadaan energi rendah. Ini menunjukkan distribusi Boltzmann terbalik untuk sistem temperatur negatif.

Sistem temperatur negatif harus mempunyai batas atas energi pada keadaan energinya. Dengan kata lain, sistem tersebut mempunyai energi maksimum tertentu melebihi besar energi pada temperatur positif. Jika dibandingkan dengan sistem temperatur positif, sistem temperatur negatif memiliki energi yang lebih besar sehingga transfer energi akan terjadi dari sistem temperatur negatif ke sistem temperatur positif.

Temperatur negatif dapat diterapkan pada beberapa sistem di antaranya seperti pada sistem spin inti dan pada sistem partikel bergerak dengan kondisi tertentu. Pada sistem spin inti, temperatur negatif ditandai dengan lebih banyaknya spin yang belawan arah dengan arah medan magnet (*spin down*) daripada spin-spin yang searah dengan arah medan magnet yang diberikan (*spin up*). Untuk sistem partikel bergerak, temperatur negatif muncul pada saat total energi atom-atom Kalium diberi batas atas melalui eksperimen oleh Braun et.al.. Pada eksperimen tersebut, ditetapkan batas atas energi pada energi kinetik, energi potensial, dan energi interaksi atom-atom.

Konsep temperatur negatif juga dapat diterapkan dalam bidang Ekonofisika. Temperatur negatif berguna untuk menjelaskan distribusi pekerja pada berbagai tingkat produktivitasnya dimana pekerja digambarkan sebagai partikel, sedangkan produktivitas pekerja digambarkan sebagai keadaan energi yang ditempati oleh partikel. Temperatur -0 K menunjukkan semua pekerja mempunyai produktivitas kerja yang maksimum.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam penulisan makalah ini.

REFERENSI

1. H. Iyetomi, *Labor Productivity Distribution with Negative Temperature*, Progress of Theoretical Physics Supplement, DOI: 10.1143/PTPS.194.135.
2. N.F. Ramsey, *Thermodynamics and Statistical Mechanics at Negative Absolute Temperature*, Phys. Rev. Lett. 1, 103 (1956).
3. S.Braun et.al, *Negative Absolute Temperature for Motional Degrees of Freedom*, Journal of Quantum Gases 52 (2013) 339, arXiv: 1211.0545 [cond-mat.quant-gas].
4. S. Vrtnik. *Spin Temperature (seminar)*. Faculty of Mathematics and Physics, University of Ljubljana (2005).
5. <http://physicscentral.com/explore/action/negative-temperature.cfm> diakses pada 14/12/15
6. <https://www.quantum-munich.de/media/negative-absolute-temperature/> diakses pada 10/12/15
7. <https://www.quantum-munich.de/research/negative-absolute-temperature/> diakses pada 10/12/15