

## 4.

### Haba

Hukum dinamik Newton memberi pemerihaln kesan suatu zarah ke atas suatu lagi, menerusi konsep daya. Tertetap apa yang berlaku: diberi keadaan awal, boleh diramalkan keadaan alam selepas itu. Di mana peranan Tuhan? Newton walau meneraju falsafah tabii, seperti kebanyakan cendekiawan waktunya, merupakan seorang teis. Beliau berkata, yang boleh mengetahui segala keadaan awal itu ialah Tuhan dan hanyalah Tuhan.

Ini dan lain-lain perkembangan membawa kepada gambaran alam yang agak mekanikan. Ini tidak secocok dengan sebahagian ahli sains kurun ke18 masehi itu. Berkenaan gambaran kebendaan mekanikan ini, penyair-ahli falsafah tabii Jerman Johann Wolfgang von Goethe menulis, "Tetapi betapa berongga dan kosong yang kita rasakan di dalam masa yang melankolis, atheistik setengah malam, di mana bumi hilang dengan semua imejnya, syurga dengan semua bintangnya. Diadakan jirim yang bergerak dari dahulukala, dan dengan gerakan ini, kanan, kiri, dan setiap arah, tanpa apa-apa lagi, ia adalah untuk menghasilkan fenomena kewujudan yang tidak terhingga." Tambahan kepada gerakan mekanikan ini, dimahukan semacam ruh atau semangat.

Agak meletihkan menjejak zarah demi zarah untuk membina gambaran alam. Pemerihaln lebih makro membantu. Suhu suatu ensembel atau kelompok zarah-zarah misalnya memerihal tentang kandungan tenaga zarah-zarah terkandung, dan berkait dengan tekanan dan isipadu bagi ensembel berkenaan. Bahagian tenaga yang berbentuk terorganisasi untuk memberi kesan dalam bentuk kerja, adalah tenaga bebas, sementara tenaga yang tak terorganisasi disebut haba. Haba itu kita biasa kaitkan dengan kepanasan.



Panas - kandungan haba tinggi -  
ukuran suhu tinggi

Sejuk - kandungan haba rendah -  
ukuran suhu rendah

*Haba.*

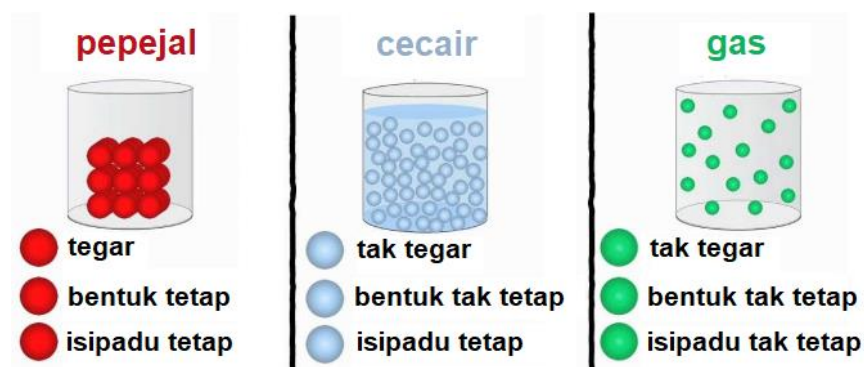
Kepanasan itu diukur oleh parameter suhu. Suhu, isipadu, tekanan dan tenaga adalah pengukur makro sesuatu sistem. Hubungan di antara parameter-parameter ini diberi oleh termodinamik.

## Termodinamik

Termodinamik merupakan kerangka sains mengenai hubungan antara haba, kerja, suhu, dan tenaga. Ia berkaitan dengan pemindahan tenaga dari satu tempat ke tempat lain dan dari satu bentuk ke bentuk yang lain. Haba dilihat sebagai satu bentuk tenaga yang sepadan dengan jumlah kerja mekanikal berunsur daripada kelainan suhu.

Suhu mengukur 'kepanasan', yang intipatinya haba. Haba mengindeks tenaga zarah-zarah yang terkandung dalam bahan. Halaju zarah-zarah ini bertabur pelbagai arah dan nilai, setelah salingtindak di antara mereka dan zarah lain, jadi tenaga kinetik jumlah, yang memerihalkan gerak yang seragam, tidak pakai untuk pemerihalan ensembel di sini. Namun haba semacam tenaga kepanasan, dan boleh dialih. Walaupun Gerakan zarah dalaman tidak seragam, secara berkesannya ia membawa kepada tekanan, yang boleh digunakan untuk menjalankan kerja mekanikan. Bagi gas, kumpulan zarah-zarah yang jauh terpisah, ada hubungan antara suhu, isipadu dan tekanan. Begitu juga bagi cecair dan pepejal, walaupun hubungannya lebih ketat dari segi perubahan isipadu.

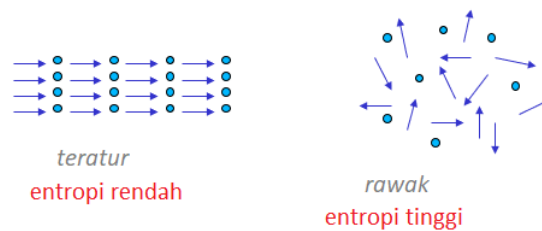
Kajian ensembel zarah menunjukkan ada tiga fasa jirim: gas, cecair dan pepejal. Telatah berlainan pada fasa berlainan. Fasa yang diduduki ditentukan oleh ciri-ciri makro seperti suhu, tekanan dan isipadu. Ini bermakna ada skala jarak yang memecahkan ketakvarianannya; jika tidak, bagaimana telatah berlainan boleh dipamerkan pada julat berlainan? Zarah ada salingtindak di antara mereka, dan skala salingtindak ini menetapkan skala untuk tiga fasa berlainan. Gas adalah fasa apabila zarah-zarah jujuk berjauhan berbanding julat salingtindak di antara mereka maka isipadunya besar namun anjal. Cecair pula fasa di mana zarah berdekatan namun tidak begitu terikat dan boleh gelongsor satu terhadap yang lain. Pepejal ialah fasa di mana zarah-zarah terikat dan membentuk struktur yang padat dan pejal. Jarak korelasi, iaitu jarak ukuran bagi struktur dalaman serupa, boleh menjadi parameter mencirikan fasa.



*Tiga fasa ensembel zarah-zarah dan sifat-sifatnya.*

Ada tiga hukum termodinamik. Hukum pertama menyatakan bahawa tenaga terabadi. Tenaga boleh berubah bentuk, namun jumlahnya tidak berubah. (Dilihat terbalik, mengangkat hukum ini memberikan cara untuk mendefinisi kuantiti sesuatu jenis tenaga itu 😊). Perubahan tenaga dalam suatu sistem itu ialah amaun haba ditambah ditolak kerja dibuat.

Hukum termodinamik yang kedua ialah berkenaan entropi. Entropi ialah ukuran kerawakan dalam sesuatu sistem. Lebih entropi, lebih haba dan kurang tenaga yang ada yang teratur yang berguna untuk kerja. Hukum kedua mengatakan bahawa untuk suatu sistem tersendiri atau tertutup, entropi sentiasa bertambah.



### *Entropi.*

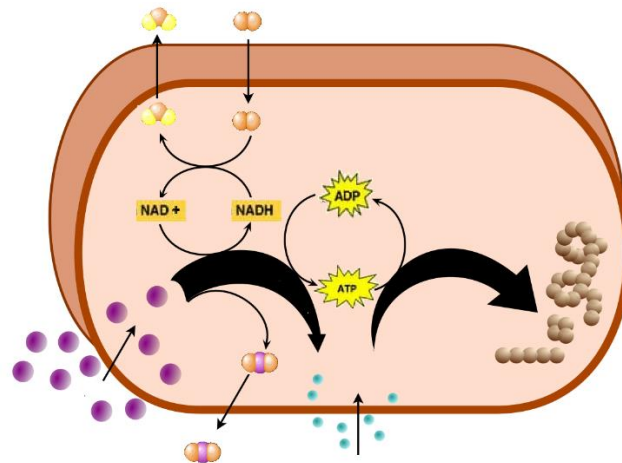
Hukum termodinamik ketiga menyatakan bagi suatu sistem dalam keseimbangan, entropi menjadi sifar bila suhu menuju sifar mutlak.

Untuk menerangkan fenomena termodinamik, fizikus telah menggunakan statistik. Penerangan fenomena sebegini dirujuk sebagai mekanik statistik. Andaian dasar ialah apa yang berlaku adalah bergantung kepada kebarangkalian. Sesuatu keadaan makro (keadaan sistem agregat) yang boleh diberikan oleh banyak keadaan mikro (banyak kombinasi keadaan-keadaan komponen sistem) banyaklah kebarangkaliannya untuk berlaku. Bilangan keadaan mikro yang ada bergantung pula kepada parameter-parameter makro seperti suhu.

Oleh kerana kita lihat sistem secara makro, kita tak boleh terbalikkan dinamik. Setelah air panas dan kopi dikacau camca dalam arah lawan jam membancuhkannya, kacauan arah lawan jam selepas itu tidak dapat menguraikan air kopi kepada air panas dan kopi yang berasingan. Untuk terbalikkan dinamik, kita perlu maklumat kedudukan dan pergerakan setiap zarah. Saling-tindak zarah-zarah yang tidak di'catat' keadaannya dengan zarah-zarah lain menjadikan ketidaktahuan kita tentang butiran kandungan ensembel bertambah. Hukum termodinamik kedua menyatakan entropi suatu sistem terasing bertambah. Ini selalu dikaitkan sebagai pemberi arah masa.

Hukum termodinamik kedua ini selalu digunakan untuk menyatakan bahawa semesta bergerak kepada keadaan yang lebih rawak. Dengan latar inilah timbulan organisasi biologian menjadi teka-teki. Bolehkah termodinamik/fizik statistik menerangkan kemunculan kehidupan? Kerana kehidupan merupakan organisasi dan keteraturan.

Termodinamik klasik mengkaji sistem dalam keseimbangan. Bagaimana dengan sistem bukan dalam keseimbangan? Proses kehidupan yang begitu kompleks dijangka sistem bukan dalam keseimbangan. Bahkan, ada gambaran bahawa kehidupan menghirup tenaga daripada proses pencarian keseimbangan untuk menghasilkan kekompleksan. Kehidupan semacam hidup daripada kecerunan tenaga.



*Metabolisme sel mengandungi proses-proses kesetimbangan.*

Ada usaha mengkaji termodinamik dan mekanik statistik sistem-sistem tak keseimbangan. Lars Onsager, yang berasal dari Oslo, Norway, melihat sistem di luar keseimbangan sebagai gabungan keadaan-keadaan keseimbangan setempat, seperti pendekatan Einstein melihat rangka memecut sebagai gabungan rangka-rangka inersiaan setempat bagi mendapatkan kerelatifan am sebelumnya, dan memperolehi hubungan timbalbalik Onsager yang menyatakan kesamaan nisbah tertentu antara aliran dan daya dalam sistem termodinamik luar daripada keseimbangan. Ada yang menyebut hubungan Onsager sebagai hukum termodinamik keempat. Beliau menerima Hadiah Nobel untuk Kimia bagi tahun 1968.

Seorang lagi ahli kimia fizik yang mengkaji termodinamik di luar keseimbangan, yang dianugerahkan Nobel Kimia pada tahun 1977 ialah Viscount Ilya Romanich Prigogine, asal Russia. Prigogine memajukan teori tentang struktur lesapan, iaitu struktur yang tenaganya melesap keluar ke persekitaran, bahawa jauh sebelum keadaan keseimbangan dicapai dalam proses takberbalik, sistem yang teratur dan stabil boleh timbul daripada sistem yang kurang teratur. Ini boleh diaplikasi di luar bidang fizik juga.

## Statistik

Termodinamik timbul memuncak dalam abad ke-19 dengan penciptaan enjin wap. Haba dan kerja mahu difahami supaya enjin wap lebih baik dapat direkabentuk. Pada waktu itu, 'sains' dan 'fizik' banyak berbentuk empirik. Ukuran parameter makro dibuat, dan hubungan di antara parameter-parameter ini dirumuskan sebagai 'hukum'.

Asas fizik yang lebih unsur dicari untuk fenomena termodinamik. Mungkin telatah makro boleh diterangkan oleh telatah mikro komponen-komponen sesuatu sistem. Usaha untuk menerangkan termodinamik didokong mekanik statistik, yang mempertimbangkan kesan dinamik mikro komponen-komponen secara statistik. Bagi jirim, haba merujuk kepada tenaga akibat gerakan atom atau molekul, namun dalam cara yang rawak. Kejahilan akibat kerawakan ini memanggil penggunaan statistik. Ya, mekanik statistik berlandaskan kejahilan kita, bukan tentang pengetahuan tambahan!

Kaedah mekanik statistik mengalatkan statistik untuk pemerihalan fizik. Keadaan-keadaan yang lebih mungkin berlaku ialah keadaan-keadaan dengan lebih banyak bilangan kombinasi mikrokeadaan yang memberikan nilai parameter makro yang sama. Kebarangkalian makrokeadaan berkenaan berkadar dengan bilangan kombinasi ini.

Contoh, tiga biji dadu dibaling. Di sini, mikrokeadaan merujuk kepada set tiga nombor diperolehi di dadu-dadu masing-masing, sementara parameter makro ialah hasil tambah nombor-nombor itu, katakan. Seperti ditunjukkan di bawah, keadaan makro paling mungkin ialah 10 dan 11, sementara yang paling tidak mungkin ialah 1 dan 18. Bahkan, boleh didapati taburan kebarangkalian untuk berlainan keadaan makro berkenaan.

makro		bilangan mikrokeadaan	kebarangkalian
3		1	1/216
4		3	3/216
5		6	6/216
6		10	10/216
7		15	15/216
8		21	21/216
9		25	25/216
10		27	27/216
11		27	27/216
12		25	25/216
13		21	21/216
14		15	15/216
15		10	10/216
16		6	6/216
17		3	3/216
18		1	1/216

*Bilangan mikrokeadaan menentukan kebarangkalian makrokeadaan – balingan 3 dadu.*

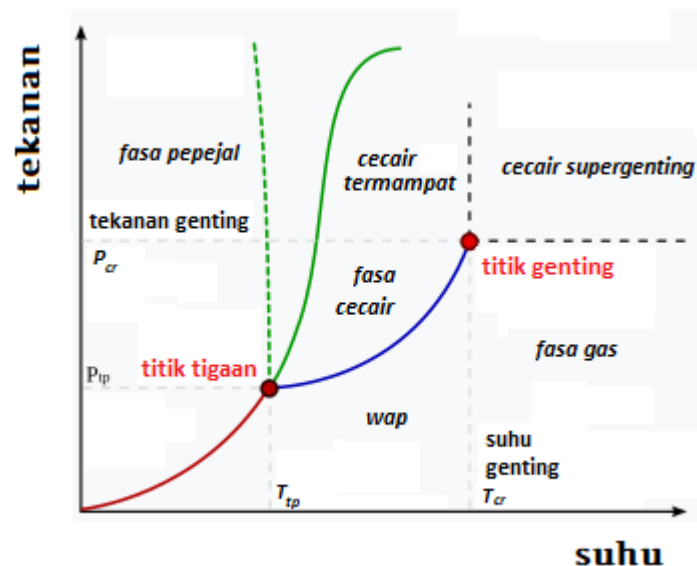
Contoh dadu ini agak terhad dengan bilangan 3 dadu sahaja, memberikan kebarangkalian-kebarangkalian yang diskret. Pendekatan mekanik statistik amat berkesan bila bilangan unsur

atau subkomponen sistem sangat besar. Ini disebut had termodinamik. Bila bilangan unsur kecil, kita mungkin dapati apa yang disebut kesan bilangan terhad.

Untuk dinamik diberikan kebarangkalian pilihan mikrokeadaan seperti ini, sistem harus dapat 'menyampel' semua pilihan-pilihan ini, dan penyampelan dilakukan secara 'adil'. Untuk penyampelan semua kombinasi mikrokeadaan, perlu di andaikan apa yang disebut keergodikan. Suatu sistem itu ergodik jika ia melalui segala keadaan yang mungkin. Bagi sistem ergodik, purata masa dan purata sampel adalah sama. Biasanya, keergodikan diandaikan untuk sesuatu sistem, supaya purata sampel dapat dinilai daripada purata masa. Bila keergodikan terpecah, sistem hanya melawat suatu subset daripada keadaan-keadaan dan dengan itu mempunyai pergantungan sejarah.

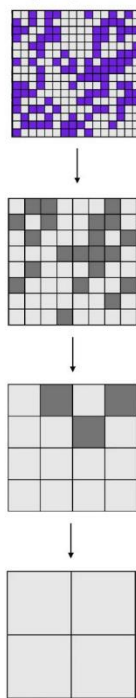
Mekanik statistik menjadi alat untuk mengkaji sistem-sistem dekat perubahan fasa, di mana teori medan min banyak digunakan. Teori medan min ialah di mana taburan statistik sesuatu parameter digantikan dengan nilai min atau puratanya, yang memudahkan perkiraan, tetapi memperkenalkan ralat daripada pencomotan parameter tersebut. Titik di hujung suatu garis perubahan fasa dalam gambarajah fasa sesuatu bahan atau sistem ialah titik genting. Di titik genting, tiada sempadan bertempat di antara fasa, dan jarak korelasi mencapah ke infiniti. Sistem genting, dalam fizik atau lainnya, mempunyai fenomenologi generik, dan sistem berlainan, walau berlainan butiran mikro, menunjukkan telatah sama pada titik genting. Ini menarik. Kesejagatan. Juga, pada keadaan genting, muncul bentuk kompleks, seperti fraktal.

Kajian sistem genting, terutama menerusi kajian teori dan simulasi komputer, menjadi suatu baris hadapan fizik ketika ini.



*Titik genting cecair-wap dalam gambarajah fasa tekanan-suhu adalah pada lampauan suhu tinggi sempadan fasa cecair-gas.*

Sistem statistik banyak terbina daripada mikrokeadaan-mikrokeadaan tertabur dalam ruang. Apakah berlainan skala pertimbangan memberikan telatah makro yang sama? Ini asas idea pernormalan semula. Pernormalan semula melihat sistem-sistem dengan banyak darjah kebebasan, seperti kelompok spin, pada skala lebih besar, atau pembintikan kasar, dengan itu mengurangkan darjah kebebasan pada tahap pertimbangan itu – seperti daripada mempertimbangkan salingtindak di antara spin-spin individu, kepada mempertimbangkan salingtindak di antara blok-blok gabungan spin. Pernormalan semula ini juga didapati berguna dalam teori medan untuk fizik zarah, dan membolehkan pengiraan usikan dibuat tanpa kacauan infiniti akibat skala kecil. Kalau jarak terlalu kecil, dan ada ukuran yang membabitkan bahagi dengan jarak ini, nombor besar ataupun infiniti boleh terhasil, dan ini boleh dielakkan dengan pernormalan semula.



*Pembintikan kasar.*

Kenneth Wilson, pelajar PhD kepada Gell-Mann, yang membawa ide kuark dalam fizik zarah, telah menemukan simetri dalam pernormalan semula. Disebut kumpulan [simetri] pernormalan semula. Seorang pensyarah di Imperial, semasa saya menghadiri kelas Mekanik Statistik pascasiswazahnya awal 1980an, telah banyak memuji-muji Wilson ini, dan mengatakan beliau akan dianugerahkan Nobel, dan ini menjadi kenyataan beberapa tahun selepas itu. Saya sempat mendengar Wilson dalam suatu forum di Pusat Fizik Teori Antarabangsa Abdus Salam ICTP, Trieste, Italy mungkin dalam tahun 1990an. Beliau juga di antara peneraju teori tolok kekisi, iaitu pendiskretan medan tolok untuk penyelesaian berangka. Beliau seorang perintis penggunaan komputer dalam penyelidikan sains, dan berperanan mengusahakan pembentukan pusat-pusat superkomputer di tanah Amerika. Pada akhir kerjayanya, beliau risau tentang pendidikan matematik dan sains dan mempromosikan kaedah penglibatan aktif dan pembelajaran menerusi penyiasatan. Demi mengejar nyalarsa Pendidikan ini, beliau berpindah dari Universiti Cornell setelah memenangi Hadiah Nobelnya, ke Universiti Negeri Ohio.



*K. G. Wilson, 1936-2013*

Kajian jirim terkondensasi, iaitu kajian bahan utamanya menggunakan fizik statistik, berkait rapat dengan kajian teori fizik zarah utamanya menggunakan teori medan. Malah, mekanisme Higgs dalam fizik zarah itu berasal daripada fenomena serupa dalam jirim terkondensasi. Dalam teori medan, zarah maya menjadi pengantara medan daya, sementara dalam jirim terkondensasi, keterujaan bersama dalam bahan seperti fonon dan elektron, diperihalkan medan. Pernormalan semula digunakan untuk menangani infiniti dalam teori medan kuantum, dan pernormalan semula digunakan untuk menguasai pencapaian skala pada keadaan genting dalam jirim terkondensasi. Ide simetri dan topologi yang serupa boleh dipakai dalam medan kuantum daya dan dalam teori medan terkondensasi.

Dalam kebanyakan penelitian fizik statistik, entropi dianggap ekstensif, atau bersifat menghassiltambah, iaitu entropi bagi sesuatu sistem ialah hasiltambah entropi subsistem bebas dalamnya. Oleh kerana entropi didefinisikan sebagai hasiltambah terma-terma logaritma kebarangkalian, berasaslah jangkaan kita bahawa entropi sistem-sistem bebas menghassiltambah, kerana kebarangkalian keadaan sistem-sistem ini mendarab. Ingat bahawa logaritma hasildarab dua nombor ialah hasiltambah logaritma-logaritma nombor berkenaan. Seorang fizikus Brazil, Constantino Tsallis, telah mencadangkan entropi yang tak ekstensif, sebagai suatu penyeluruhan kepada entropi ekstensif, pada tahun 1988. Saya sempat mendengar pembentangan oleh Tsallis di Bali pada tahun 2002, dalam persidangan ekonofizik antarabangsa.

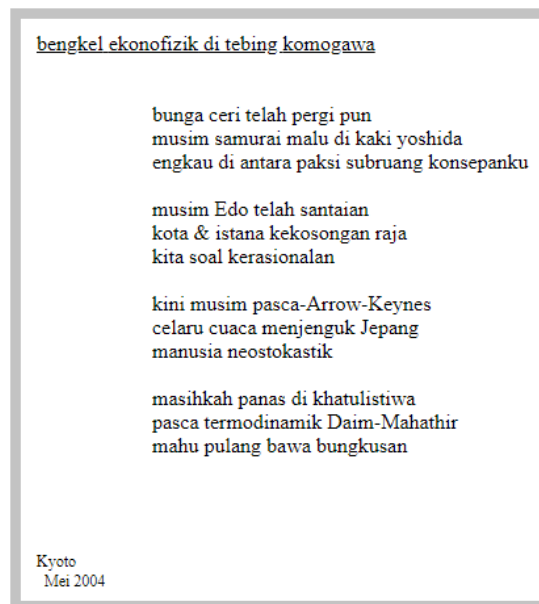


*Persidangan Ekonofizik Antarabangsa 2002, Bali, Indonesia*



Saya ke Bali bersama isteri. Saya mempersembahkan kertas tentang muncul keheterogenan dalam model ekonofizik. Ekonofizik ialah kajian sistem ekonomi menggunakan kaedah fizik. Saya baru berkenalan dengan ekonofizik waktu itu. Bali cantik. Saya berkemahuan ke Bali, terutama untuk persidangan bidang ekonofizik yang baharu muncul. Penganjur antarabangsa persidangan tersebut ialah Profesor Harry Eugene Stanley (lahir 1941) dari Universiti Boston yang banyak menyumbang kepada kajian sistem kompleks dan dianggap seorang bapa pengasas ekonofizik dan seorang yang saya kagumi, walau belum pernah jumpai. Oleh kerana tarikh akhir memohon penyertaan telah tamat, saya telah emel kepadanya terus, menanyakansamada saya masih boleh memohon. Dengan mudah beliau kata boleh, dan sila hantarkan tajuk kertas. Kertas tak perlu dinilai pun! Wah! Namun saya tidak menemuinya semasa persidangan Bali kerana pada saat akhir beliau tidak hadir kerana keadaan kesihatan isterinya.

Kertas saya berkenaan munculan atau timbulan keheterogenan dalam model fizik untuk aktiviti ekonomi. Konsep timbulan dibincang kemudian ini di bawah. Kemunculan sifat-sifat makro yang tak diramalkan jika dilihat sifat mikro sesuatu sistem itu. Menarik bagaimana ia boleh muncul tanpa diduga. Kheterogenan ialah sesuatu yang tak dijangka dalam sistem statistik. Kecenderungan sistem statistik ialah penambahan entropi dan kerawakan dan kehilangan apa-apa pola atau kelainan. Jadi timbulnya keheterogenan dalam terutamanya sistem osial dan ekonomi agak menarik. Aku berminat dalam mencari kebezaan di antara sistem statistik objek-objekhidup dan sistem statistik manusia, aku katakana dalam persembahan kertasku di persidangan ekonofizik di Jepun selepas itu. Mungkin entropinya tak ekstensif?



*Bengkel ekonofizik di Jepun, 2004.*

Nama dalam fizik statistik yang saya temui di Bali ialah David Sherrington yang terkenal dengan model kaca spin Sherrington-Kirkpatrick. Unsur-unsur spin, yang setiapnya samada spin ke atas atau spin ke bawah, bersalingtindak. Model fizik statistiknya diselesaikan. Kaitannya kepada pengkomputeran didapati. Sherrington ialah seorang fizikus, sementara Kirkpatrick berlatarkan pengkomputeran. Saya ingat waktu itu saya pelajar di Imperial, ada notis menghebohkan seminar tentang model Sherrington-Kirkpatrick tertampal dekat lif di Jabatan Fizik. Sherrington waktu itu di Imperial, tetapi kemudiannya di Oxford. Kami sebagai penyerta luar negara dijamu suatu makan malam di tepi pantai. Seorang

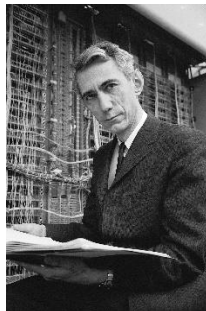
penyanyi tempatan bergitar menyanyikan lagu "Suci dalam Debu" oleh Saleem kumpulan Iklim. Lagu tayammum, dia kata.

## Maklumat

Bertentangan dengan kerawakan, yang serupa kejahilan, ialah maklumat. Seperti disebut dalam bab 2, Claude Shannon yang bekerja di Bell Laboratories, Amerika Syarikat, telah mengemukakan konsep maklumat dalam isyarat yang dihantarkan.

Dalam kurun sebelum itu, George Boole di Cork, Ireland telah memperkenalkan logik dedua, di mana nilai logik *benar* dan *palsu* diwakili nombor 1 dan 0. Bapa Boole hanya sorang pmbuat kasut di Lincoln, England, namun merupakan seorang yang berminat dalam sains dan matematik: beliau rajin mengambil bahagian dalam aktiviti Lincoln Mechanics Institute, semacam kelab sosial yang menganjurkan pembacaan, perbincangan, dan ceramah dalam sains. George Boole memperkenalkan kaedah algebra ke bidang logik.

Shannon telah merekabentuk litar ganti elektrik berdasarkan logik Boole ini, sebelum muncul dengan teori maklumat tadi. Dalam teori maklumatnya, satu digit nombor dedua boleh dianggap sebagai satu bit maklumat, bila diketahui nilainya.



*Claude Shannon (meninggal 2001). Fotograf oleh Alfred Eisenstaedt / The LIFE Picture Collection / Getty*

Shannon menggunakan nombor dedua sebagai asas bagi maklumat. Kebetulannya, ungkapan bagi maklumat oleh Shannon ialah negatif entropi. Jelaslah entropi sebagai ukuran kejahilan, sementara maklumat ialah ukuran keteraturan.

## Kekompleksan

Perlu dibezakan di antara ketidakketahuan yang membawa kepada kerawakan, dan ketidakketahuan kerana kerumitan pengiraan. Butiran unsur dalam kerawakan tidak boleh diramalkan tetapi boleh dijana (secara rawak) dengan suruhan tunggal. Bagaimana mahu dibezakan di antara yang mudah dengan yang kompleks? Seperti dibincangkan sebelum ini, satu cara ialah dengan melihat morfologi sistem itu sendiri. Kemudian yang kedua ialah cara atau kaedah yang menghasilkan struktur itu. Sesuatu morfologi mungkin kelihatan kompleks,

seperti keadaan rawak, namun boleh dihasilkan dengan cara mudah. Begitu juga sesuatu kaedah yang kompleks mungkin hanya menghasilkan morofologi yang mudah.

Kalau hanya diserahkan kepada hukum termodinamik kedua, kerawakan akan terjadi di alam. Namun kita perhatikan bagaimana hari ini alam ini berstruktur, berbentuk kompleks. Kita lihat adanya organisasi biologi. Morfologi yang kompleks. Proses yang kompleks. Dalam kimia pun ada terorganisasinya fenomena kompleks. Bahkan dalam fizik pun.



*Corak kompleks terhasil dalam tindakbalas kimia tertentu.*

Dalam wilayah fizik, morofologi kompleks boleh timbul dalam sistem taklinear. Didapati dinamik sistem taklinear ini boleh diperihalkan oleh pergerakan kepada penarik. Dinamik awal yang fana beralih kepada dinamik akhir ini. Kalau keadaan akhir ini keadaan pegun, atau keadaan gerakan malar, ia dikatakan penarik titik. Kalau keadaan akhir bersifat pergerakan kitar, maka ia ialah penarik kitar. Keadaan akhir sistem taklinear boleh berupa trajektori yang berubah-berubah, bercelaru, yang mana ia merupakan penarik aneh.



*Penarik titik, penarik kitar dan penarik aneh.*



*Pantai Penarik, Terengganu, Malaysia.*

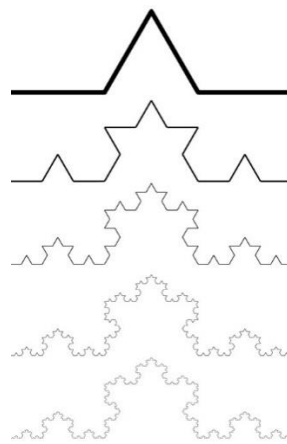
Ada beberapa perkara yang aneh mengenai penarik aneh. Trajektori dinamikinya juga bermorfologi kompleks. Fraktal. Jejak-jejak berbentuk fraktal, atau multifraktal (kumpulan fraktal dengan berlainan dimensi fraktal).

Sebelum ini, kita ada bicang pasal fraktal, sifatnya yang swaserupa, dan kebolehnya menghasilkan morfologi yang mengingatkan kita kepada morfologi biologian.

Kemunculan komputer tepat pada waktunya. Kebanyakan sistem tak linear tak dapat diselesaikan secara analisis algebra. Komputer menyediakan platform untuk mensimulasi dinamik kompleks ini. Pendiskretan masa dan ruang membolehkan pengiraan pergerakan secara berangka.

Fraktal kelihatan kompleks, namun ia boleh dihasilkan oleh algoritma yang agak mudah. Fraktal pernah menarik minatku dalam beberapa segi. Ada disebut sebelum ini.

Semasa cuti sabbatical di Swansea bersama Profesor Farzin Deravi, kenalan daripada semasa di Imperial, yang berkerja dalam bidang pemrosesan imej dalam sains komputer, kami ada ide untuk mencuba fraktal dalam pepadatan imej. Pepadatan imej ialah kajian mencari cara sesuatu imej boleh dipadatkan kepada set maklumat yang lebih kecil yang namun boleh membina semula imej berkenaan. Pepadatan imej penting dalam penghantaran mesej: lagi padat imej, lagi laju dapat ia dihantar. Kami meninjau kemungkinan imej dikod sebagai suatu fraktal atau multifraktal. Ini bermakna mencari songsang penghasilan fraktal.



*Lengkung Koch, suatu fraktal, dan bagaimana ia boleh dihasilkan menerusi operasi berulang.*

Berasaskan bentuk keswaserupaan fraktal, ia boleh dihasilkan menerusi ulangan suruhan-suruhan mudah. Misalnya, lengkung Koch terhasil dengan arahan, gantikan garis lurus ke hadapan dengan garis lurus ke hadapan, belok kiri 60°, lurus ke hadapan, belok kanan 120°, lurus, kiri 60°, lurus.

$$F \rightarrow F+F--F+F$$

*Hukum pengeluaran untuk lengkung Koch: gantikan garis lurus kehadapan (F) dengan garis lurus ke hadapan (F), belok kiri 60° (+), lurus kehadapan (F), belok kanan 120° (--), lurus (F), kiri 60° (+), lurus (F).*

Persoalannya, bolehkah kita terbitkan hukum pengeluaran fraktal daripada suatu pola fraktal yang diberikan (“analisis songsangan fraktal”)? Apakah caranya, jika boleh?

Jika boleh, kita boleh cuba menurunkan apa-apa imej (yang dipaksa dianggap sebagai fraktal atau gubahan fraktal) kepada hukum-hukum produksi yang lebih ringkas – maka kita ada cara memadamkan imej. Juga, kita boleh turunkan morfologi biologi terutama botani kepada hukum-hukum pengeluaran dan kaitkan ini dengan hukum-hukum biokimia yang terkandung dalam gen yang mengawal pembentukan morfologi tadi.

Fraktal boleh diberikan ukuran dimensi. Kalau wayar lurus iut dikatakan 1 dimensi, dan plat rata itu 2 dimensi, maka lengkung Koch punyai dimensi di antara 1 dan 2. Pengskalaan linear  $\alpha$  kali menyebabkan ‘bahan’ 1 dimensi didarab  $\alpha$ , sementara yang 2 dimensi didarab  $\alpha^2$ , dan seterusnya. Bagi kes lengkung Koch, ia swaswara dengan skala 3 kali ganda, dengan penambahan 4 segmen daripada 1. Jadi kalau dimensinya  $d$ , 4 ialah hasil daripada 3 kuasa  $d$ . Ini bermakna  $3^d = 4$ , ataupun  $d$  ialah  $\log(4)/\log(3) = 1.26$ . Jadi dimensi fraktalnya hanya lebih sedikit daripada dawai lurus satu dimensi.

Dimensi fraktal merupakan suatu ukuran bagi fraktal, namun ia tidak mencerminkan kekompleksan yang dikandunginya. Fraktal kelihatan kompleks - kekompleksan morfologi tinggi – namun ada cara mudah untuk menghasilkannya – kekompleksan algoritmaannya rendah. Adakah ini menyimpan rahsia penghasilan kekompleksan?

### **Taklinear**

Satu ialah mengukur kekompleksan; satu ialah menangani kekompleksan. Kekompleksan wujud dalam sistem-sistem taklinear. Sistem linear mudah – penyelesaian-penyelasaan boleh bercampur tanpa mencampuri – superposisi mod-mod bebas.

Apabila ada sebutan taklinear dalam ungkapan tenaga, maka selain daripada kemungkinan trajektori yang kompleks, seperti penarik aneh, juga ada kemungkinan gandingan antara mod. Misalnya, fenomena optik taklinear boleh menghasilkan gelombang mod lain daripada mod gelombang tuju yang lain frekuensi.



*Campuran mod optik – penjanaan harmonik kedua.*

Tutor akademik tahun pertama mahasiswa saya di Imperial, Profesor Geoffrey New, adalah di antara yang pertama di dunia yang melihat penjanaan harmonik kedua dalam optik taklinear. Saya diberitahu oleh kerana kecermelangan pasukannya di Belfast Ketika itu, beliau dan pasukannya dibawa ke Imperial untuk mengukuhkan kumpulan penyelidikan optik. Saya ingat sesi tutorial bersamanya, beliau selalu menyediakan kopi untuk kami pelajar-pelajar dibawah seliaannya. Sistem tutor di Imperial waktu itu ialah setiap pelajar punyai seorang tutor akademik, yang ditemui setiap minggu, untuk mengimbas semua pengajaran minggu itu, termasuk untuk menyelesaikan kertas-kertas masalah yang diberi, dan seorang tutor peribadi, yang ditemui setiap penggal, hanya untuk memastikan kesejahteraan peribadi pelajar. Tutor peribadi saya waktu itu ialah Prof Ian Halliday, ahli fizik teori.

Saya ingat Ian Halliday mengajar kursus mahasiswa fizik keadaan pepejal. Saya ingat kuliahnya gaya *cowboy*; ungkapannya seperti “*and this guy kills this guy* (dan orang ini membunuh orang ini)” apabila memerihalkan pembatalan terma dalam sesuatu persamaan. Fizik keadaan pepejal tidak menjadi minat utama saya. Rugi, kerana banyak keserupayaan dalam teori fizik keadaan pepejal dengan teori medan fizik zarah.

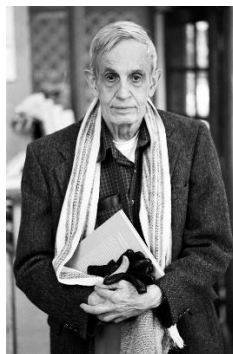
## Permainan

Sistem sosial dan seumpama membabitkan agen yang membuat pilihan, mahupun yang bijak atau yang kurang bijak. Bukan seperti unsur fizikan yang pasif, yang dengan mana salingtindak diperihalkan dengan mudah. Nod-nod saling tindak kini merupakan agen, yang ada pilihan. Keadaan optimum memang bergantung kepada keadaan nod-nod individu, dan sebaliknya, namun dengan keagenan, keadaan nod bergantung kepada pilihan nod. Begitupun, jika kita andaikan telatah tertentu bagi agen-agen ini, misalnya kerasionalan (memilih yang menguntungkan untuk diri), atau ketamakan, kita masih boleh tentukan keadaan-keadaan optimum, atau keadaan ‘keseimbangan’. Ia mungkin telatah, atau strategi permainan, yang dipelajari daripada pengalaman-pengalaman lepas.

 A berdiam diri	 1 tahun  1 tahun	 3 tahun  bebas
 A bersaksi	 bebas  3 tahun	 2 tahun  2 tahun

*Matriks pulangan bagi permainan 'dilema banduan'. Dua agen secara bebas boleh memilih antara salingtindak 'berdiam diri' atau 'bersaksi'. Pulangan diberikan mengikut pilihan-pilihan mereka.*

Ada keadaan keseimbangan yang terbaik untuk sesuatu agen, apapun pilihan agen lain. Ini dinamakan keseimbangan Nash. Keseimbangan atau optimum Pareto pula ialah keadaan terbaik bagi semua orang secara bersama, iaitu keadaan di mana perubahan daripadanya (misalnya, untuk menambahkan keuntungan untuk agen tertentu) menyebabkan kekurangan dalam keuntungan sesuatu agen.



*John Nash atau John Forbes Nash Jr. Peneraju penggunaan teori permainan dalam ekonomi. Memenangi Hadiah Peringatan Nobel dalam Sains Ekonomi 1994. Filem 'A Beautiful Mind' diasaskan atas kehidupan dan kerjayanya.*

Perihal permainan menyeluruhkan salingtindak fizikan yang pasif kepada suatu salingtindak berkeagenan. Pilihan tindakan seseorang agen mungkin bergantung kepada maklumat yang ada untuknya, dan ini membawa suatu lagi dimensi dalam pemerihal salingtindak ini. Pilihan agen menurut maklumat yang ada, dan ingatan hasil-hasil salingtindak lepas, boleh diaturkan oleh sesuatu strategi yang diambil oleh agen berkenaan.

Semasa dekad-dekad awal berkhidmat di Universiti Malaya, sebelum mendapat sokongan dan sumber untuk berkecimpung dalam eksperimen-eksperimen besar fizik zarah keunsuran, saya berminat menerokai sistem kompleks. Bersama pelajar pascasiswazah, dan pakatan pensyarah ekonomi Universiti Putra, simulasi komputer agen-agen yang bermain atas kekisi telah dijalankan. Banduan yang mengulang disimulasi untuk mencari strategi (misalnya *tit for tat* – balas balik yang pehak kedua lakukan dalam pusingan sebelumnya, dan lain-lain) yang harus digunakan. Permainan 'dilema devian' juga direka untuk memodel kenaikan pangkat

dalam academia, dan juga permainan letakan harga, untuk memodel dinamik harga di pasaran.



*Arwah Azhar Abdul Karim, professor ekonomi Universiti Putra Malaysia, juga kawan sesekolah dari Terengganu. Kami memajukan permainan Dilema Devian bagi memodel kenaikan pangkat di academia. Ahli akademik dikelaskan samada devian atau pseudo. Pseudo akan berkembang maju dalam dunia penuh pseudo, sementara devian bakatnya hanya dikenali devian. Arwah sendiri seorang devian.*

Sementara permainan meyeluruhkan konsep tindakbalas, rangkaian menyeluruhkan struktur tindakbalas.

### **Rangkaian**

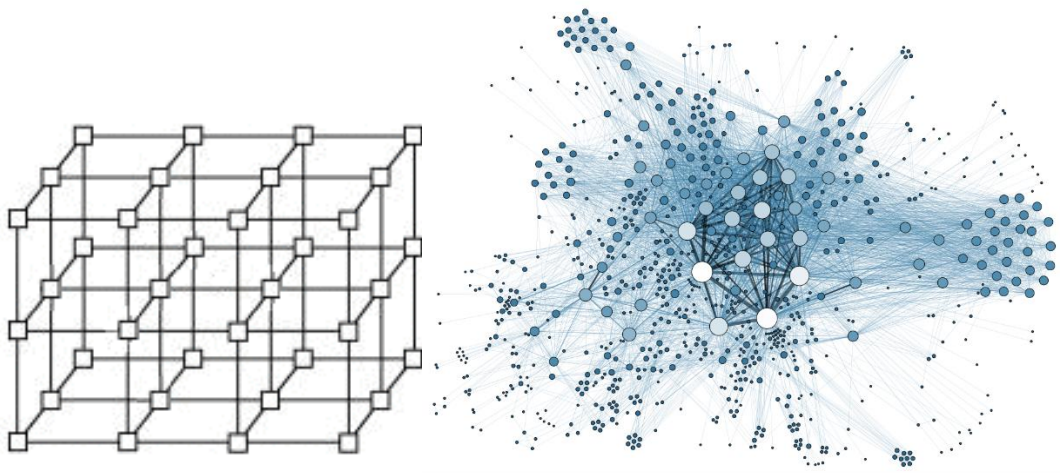
Satu lagi pendekatan kepada sistem-sistem kompleks ialah penggunaan perihalan rangkaian atau graf. Letakan agan atas nod-nod kekisi mewakili tindakbalas dalam ruang, yang bergantungkan ruang. Kalau dalam tiga dimensi setiap agen punyai 6 jiran terdekat (yang bersalingtindak dengannya). Namun secara prinsipnya, rakan salingtindak seorang agen mungkin kurang atau lebih daripada itu. Terutama dalam dunia komunikasi elektronik, 'rakan terdekat' mungkin puluhan atau ratusan. Dan kejiranan ini boleh berbeza daripada agen ke agen lain. Yakni, rangkaian dari satu segi secara prinsipnya merupakan perwakilan struktur yang berdimensi lebih tinggi. Atau berdimensi bercampur.

Jadi rangkaian ialah pemerihalan struktur salingtindak yang lebih umum. Dalam rangkaian, bukan sahaja nod-nod boleh mempunyai keadaan-keadaan berlainan, tetapi nod-nod itu sendiri mungkin jenis berlainan. Pautan-pautan rangkaian juga mungkin berlainan. Kelainan nod dan pautan bukan sahaja dari kekuatan pasif, namun mungkin juga dari segi jenisnya.

Struktur yang lebih am daripada rangkaian ialah rangkaian multilapisan, di mana ada berbilang pautan di antara pasangan nod, yang dikaitkan dengan lapisan-lapisan berlainan masing-masing. Misalnya rangkaian kenalan sosial boleh punyai satu lapisan yang memerihalkan kenalan peribadi dan satu kenalan professional.

Hiperrangkaian pula merujuk kepada rangkaian di mana sesuatu pautan itu membabitkan lebih daripada dua nod. Ini memerlukan analisis yang lebih rumit.



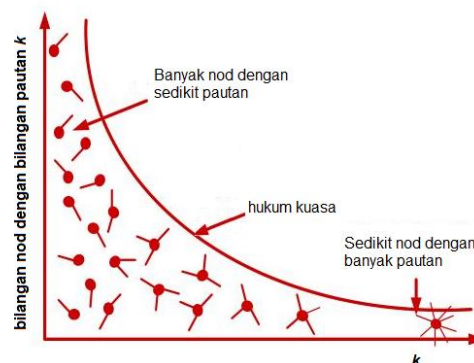


*Contoh kekisi 3 dimensi (kiri), dan contoh rangkaian yang kompleks (kanan).*

Rangkaian pelbagai bentuk dikaji untuk memahami struktur dalamnya, yang boleh mempengaruhi dinamik di atas nod-nodnya. Kajian rangkaian banyak diterajui oleh Reka Albert (Romania-Hungary) dan Albert-Lazslo Barabasi. Barabasi-Albert membawa kaedah untuk membina sejenis rangkaian, iaitu rangkaian bebas skala. Rangkaian bebas skala adalah satu di mana taburan pautan terhadap nod mengikuti hukum kuasa. Ini bermakna perubahan bilangan pautan berkadaran dengan suatu kuasa perubahan bilangan nod. Seterusnya ia bermaksud bahawa majoriti nod mempunyai pautan yang sangat sedikit, sementara beberapa nod penting (dipanggil “hub”) mempunyai bilangan pautan yang besar. Web, jaringan seantero dunia, mempunyai struktur bebas skala: ada beberapa hub seperti laman ‘facebook’, sementara yang lainnya hanya berpaut dengan bilangan kecil laman lain.

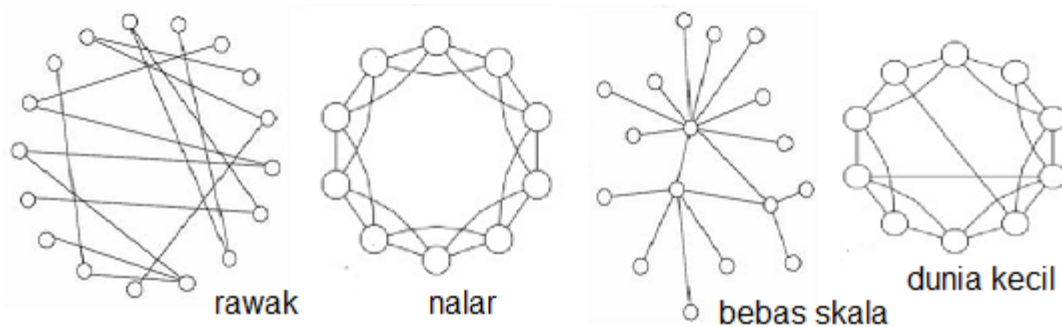


*Hantaran Twitter oleh Barabasi di atas pertemuan semula dengan Albert pada 2018 di Paris setelah 19 tahun bersama mencipta model pembentukan rangkaian bebas skala.*



*Hukum kuasa dalam rangkaian bebas skala.*

Ada pelbagai jenis rangkaian, setiapnya dengan cirinya masing-masing, yang terpakai untuk kes-kes tertentu masing-masing. Jenis rangkaian yang lazim selain daripada rangkaian bebas skala adalah rangkaian rawak, dengan sambungan rawak, rangkaian nalar dengan sambungan nalar, dan rangkaian dunia kecil. Rangkaian dunia kecil adalah rangkaian di mana kebanyakan nod bukan jiran antara satu sama lain, tetapi kebanyakan nod boleh dicapai dari setiap yang lain dengan sebilangan kecil lompatan pautan. Namanya merupakan rujukan kepada fenomena “kecilnya dunia!” terjadi banyak dalam hubungan manusia. Bahkan, teori ‘enam darjah pemisahan’ membawa ide bahawa semua orang adalah enam atau kurang hubungan sosial dari satu sama lain. Akibatnya, rantaian "kawan kepada kawan" boleh dibuat untuk menyambungkan mana-mana dua orang dalam maksimum enam langkah.



*Beberapa jenis rangkaian.*

Struktur sesuatu rangkaian menentukan bentuk dinamik di atasnya. Dinamik di atas rangkaian membabitkan pengaruh pautan di dalamnya. Yang boleh dikaji misalnya adalah dinamik pendapat dan jangkitan penyakit di atas rangkaian sosial, dinamik media sosial di atas rangkaian komunikasi internet, dan lain-lain.

Seperti dibincangkan di atas, rangkaian bisa membawa pendekatan lebih am daripada konsep ruang berdimensi. Dalam ruang 3 dimensi misalnya, sesuatu entity bersalingtindak dengan suatu entity lain biasanya bergantungkan jarak dalam 3 dimensi di antara keduanya, yang terbit daripada kedudukan masing-masing dalam ruang itu. Kalau salingtindak di antara entity diwakili menggunakan pautan rangkaian, maka kita tidak terkekang kepada ruang berdimensi. Jadi rangkaian entiti-entiti mampu mewakili entiti-entiti ini terpaut dalam dimensi yang tinggi tanpa aturan kedudukan dalam ruang berdimensi. Rangkaian juga boleh mengakibatkan swasalingtindak dan salingtindak berbalik menerusi nod lain, yang membawa kepada ketaklinearan.

Jadi rangkaian merupakan bentuk yang lebih am daripada hubungan dalam ruang berdimensi, dan permainan merupakan bentuk salingtindak yang lebih am. Untuk dapat melebihi memerihal sistem kompleks, mungkin kita perlu kaji permainan atas rangkaian. Ini suatu arah menarik untuk kajian. Mungkin kita dapat datangkan kaedah yang menyeluruh, yang dapat memerihalkan nod-nod serumit permainan, dipaut dalam struktur serumit rangkaian, bagi menganalisis sistem-sistem yang terkompleks.

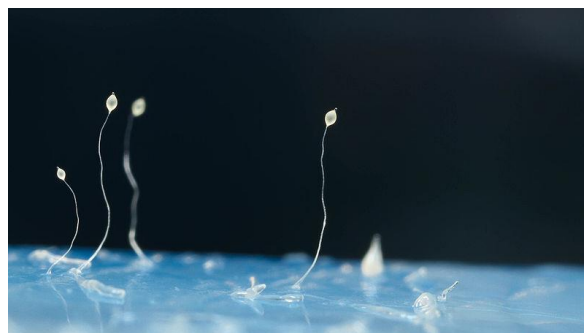
## Timbulan

Satu arah kajian semasa ialah berkenaan fenomena timbulan. Ini berkenaan dengan fenomena kumpulan yang timbul akibat kerjasama komponen-komponennya, yang tidak jelas daripada pertimbangan hanya fenomena komponen-komponen itu secara berasingan. Ungkapan yang relevan, dalam bahasa inggeris ialah, "*The whole is greater than the sum of its parts.*" Atau "Keseluruhan adalah lebih daripada hasil tambah bahagian-bahagiannya." Ini menegaskan bahawa telatah suatu sistem keseluruhan tidak dapat difahami menerusi penggabungan telatah komponen-komponennya secara mudah. Fenomena timbulan juga ada dirujuk sebagai swaorganisasi. Arah kajian timbulan ini bertentangan dengan kaedah tradisi, yang reduksionis. Kaedah analisis tradisi memecahkan sesuatu sistem dikaji itu kepada subsistem-subsistem yang membinanya, dengan harapan pemahaman subsistem-subsistem secara asing akan memberikan pemahaman sistem keseluruhan apabila pemahaman subsistem digabungkan, yang dianggap dapat dibuat dengan mudah. Fenomena timbulan menyarankan gabungan subsistem-subsistem individu boleh menyerlahkan telatah keseluruhan yang tak diramalkan secara langsung.



*Kerumunan kelompok burung sebagai fenomena timbulan hasil telatah individu ahli-ahli.*

*Dictyostelium discoideum* suatu spesies yang menarik. Ia bermula amoeba, iaitu organisme sel tunggal, yang bertelatah seperti itu. Namun dalam keadaan genting bila makanan kurang, ia berubah menjadi organisme tahap tinggi dengan bergabung. Ia membentuk semacam tumbuhan yang boleh mengeluarkan spora, yang disebarkan untuk kemandiriannya.



*Dictyostelium discoideum berorganisasi membentuk tumbuhan berspora. (Penghargaan kpd Umar Bashir menerusi lesen Attribution-Share Alike 4.0 International (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>) Creative Commons.)*

Secara hakikatnya sebenarnya, organisme tahap tinggi seperti manusia dibina daripada sel-sel tunggal berautonomi. Pengkhususan sel berbeza berkerjasama untuk maksud utama yang dikongsi. Difahami ini, makna yang lebih mendalam dapat diberikan kepada hadith yang orang mukmin itu seumpama satu tubuh...

Di zaman Yunani kuno, Demokritus menghujah bahawa semua fenomena boleh diterangkan berdasarkan bahagian-bahagiannya, digelar atom. Namun Aristotle mencatatkan kecenderungan sesuatu organisme hidup terarah kepada sesuatu sasaran. Ada sesuatu yang mengatur aktiviti organisme keseluruhan. Ada tujuan, atau fungsi.

Sistem yang hidup selalu dikaitkan dengan kesan timbulan. Dahulu kala 'kehidupan' itu dianggap sebagai suatu intipati atau sari yang menginsip dalam sistem berkenaan. Ada dulu pernah dianggap sebagai suatu jenis daya – daya 'utama'/'cergas'. Kini ide daya kehidupan ini telah lapuk.

Namun ada kecenderungan sekarang menganggap fenomena kehidupan itu sebagai suatu yang timbulan. Begitu juga fenomena lain seperti kepintaran dan kesedaran dan keswedaran. Ada juga pernah 'daya kehidupan' ini dikaitkan dengan tujuan atau fungsi. Fungsi pula, adakah ia ditentukan oleh rekabentuk sistem berkenaan, atau ia terjelma tanpa rekabentuk. Atau adakah penjelmaan itu sendiri rekabentuk?

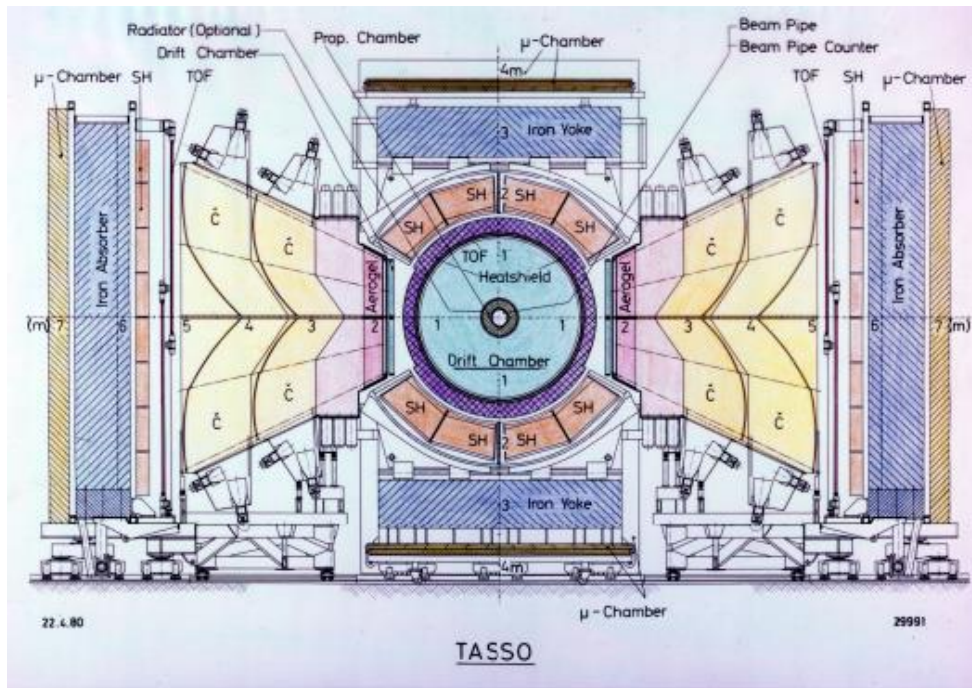


*Kehidupan, seakan tertimbul daripada suatu daya.*

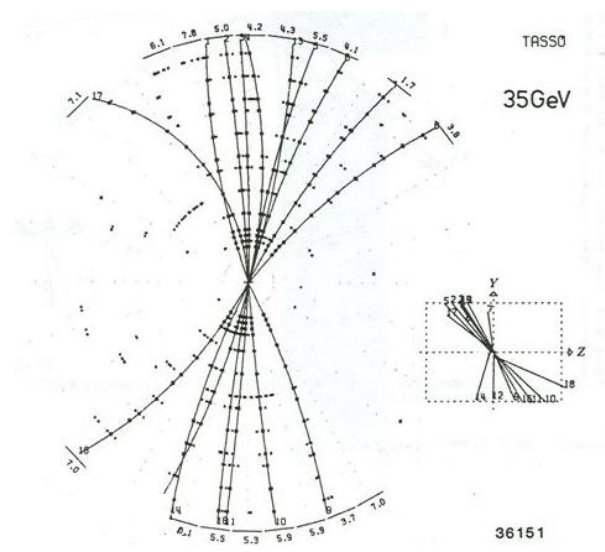
Semenjak zaman persekolahan saya berminat dalam proses kepintaran seperti takulan, dan bagaimana ia boleh dimekanikkan. Ia berterusan semasa pengajian mahasiswa dan pascaijazah saya di Imperial, semasa komputer peribadi menjadi makin murah dan makin lumrah.

Di kolej pengajian A Levels saya di King's Lynn, pengajian Sains Komputer baharu diperkenalkan, kepada kelompok pelajar selepas tahun saya. Di Imperial, ada daripada kelompok mahasisiwa fizik tahu saya yang menukar ijazah kepada Sains Komputer selepas tahun pertama. Semasa membuat PhD saya bertanggungjawab mengawasi pencarian jejak zarah bercas dalam eksperimen TASSO setelah ditambah pengesan mikroverteks. Ini merupakan kerja pencarian pola yang ada kaitan dengan kepintaran buatan. Membina jejak daripada bacaan pelbagai pengesan menimbulkan persoalan pendekatan sejagat lawan

pendekatan tempatan atau setempat. Sedikit pincang daripada pengesan verteks boleh memesongkan jejak binaan kebuk hanyutan dan kebuk perkadaran yang sedia ada. Seperti ekor menggoyangkan anjing. Oleh itu, saya menagih kaedah sejagat, yang melihat bacaan kesema pengesan secara bersama keseluruhannya. Rangkaian neuronan menawarkan suatu penyelesaian sejagat.



Pandangan rentas pengesan zarah TASSO. Zarah bercas dikesan oleh Pengesan Mikroverteks (ditambah kemudian) – terlekat kepada Paip Bin (Beam Pipe) – paling dalam, kemudian Kebuk Berkadaran (Proportional Chamber), dan dipaling luar, Kebuk Hanyutan (Drift Chamber), dengan tatarajah dan resolusi berbeza, dan mungkin dengan anjakan kedudukan di antaranya.



Contoh keratan rentas pengesanan suatu peristiwa – hentaman di wayar-wayar pengesan dengan kedudukan masing-masing untuk 3 pengesan berlapis, dan binaan jejak menerusi pilihan komputer.

Bila dipasangkan hentaman berjiranan dalam pengesan, kita perolehi segmen-segmen jejak tempatan. Bila kita gabungkan titik-titik ini, ataupun segmen-segmen ini, timbullah pola-pola jejak zarah bercas, yang mungkin lurus dan mungkin melengkung.

Maka kita telah berputar daripada memudahkan keadaan melalui pemahaman keseluruhan menerusi agregat statistik linear kepada fenomena timbulan yang lebih daripada itu.