

Sederhana dan Kompleks

Kapan suatu hal disebut sederhana? Dan kapan suatu hal disebut kompleks? Apa yang menjadi kriteria utama dalam membedakan keduanya?

Apa yang merupakan elemen paling sederhana di dunia ini? Nenek moyang kita merumuskan sesuatu yang saat ini pun masih kita yakini. Menurut mereka hanya ada empat unsur atau elemen yang paling sederhana dan menjadi dasar yang menyusun dunia kita. Keempat elemen itu adalah Udara (*Air*), Api (*Fire*), Air (*Water*), dan Tanah (*Earth*). Inilah *The Four Basic Elements of The World*. Nenek moyang kita percaya bahwa segala hal di dunia ini tersusun dari keempat elemen tersebut. Konsep ini begitu universal dan diterima di seluruh dunia. Tidak ada yang lebih sederhana dari keempat elemen itu. Bahkan sampai saat ini pun kita masih menganggap bahwa keempatnya merupakan elemen-elemen terpenting yang menyusun bumi ini.

Tetapi seiring dengan berjalannya waktu dan berkembangnya ilmu pengetahuan, manusia mulai menemukan bahwa keempat elemen dasar tersebut ternyata bukan merupakan elemen yang paling dasar. Manusia tetap meyakini bahwa udara, api, air, dan tanah merupakan unsur-unsur paling penting di bumi ini, tetapi kini mereka juga menyadari bahwa semua elemen dasar tersebut masih tersusun lagi dari bagian-bagian kecil yang tidak dapat dilihat mata telanjang. Partikel-partikel kecil penyusun semua elemen di dunia ini kemudian disebut atom. Sejak ditemukannya, manusia meyakini bahwa atom merupakan elemen fundamental. Ini berarti bahwa tidak ada yang lebih kecil dan lebih sederhana dari atom. Sampai tahun 1900-an manusia masih meyakini bahwa atom adalah bola-bola kecil tunggal yang tidak tersusun dari partikel-partikel lain yang lebih kecil.

Ilmu pengetahuan terus berkembang dan akhirnya menemukan fakta yang lebih mengejutkan lagi. Atom bukanlah yang terkecil! Ternyata semua atom tersusun dari inti atom yang dikelilingi oleh awan elektron. Belakangan ilmu pengetahuan yang terus berkembang pesat juga berhasil membuka rahasia inti atom yang ternyata masih tersusun lagi oleh partikel-partikel yang lebih kecil. Partikel-partikel penyusun inti atom ini adalah proton dan neutron. Penemuan

menggemparkan ini sekali lagi mengubah kepercayaan masyarakat yang sebelumnya meyakini bahwa atom merupakan partikel fundamental. Sejak itu proton dan neutron diyakini sebagai yang terkecil dan yang paling dasar yang menyusun semua materi. Tidak ada yang lebih kecil dari proton dan neutron. Benarkah ini?

Sudah berapa kali manusia menyatakan suatu elemen atau partikel sebagai yang paling dasar dan paling sederhana? Sudah berapa kali manusia membuktikan bahwa ada yang lebih kecil lagi? Setiap kali kita mulai mempercayai dan menerima konsepnya, kita justru dikejutkan lagi oleh penemuan baru yang menyatakan bahwa konsep yang sudah kita percayai itu tidak sepenuhnya benar. Ternyata setiap kali selalu ada bagian lain yang lebih kecil dan lebih sederhana lagi. Dan benar saja! Proton dan neutron bukanlah yang fundamental yang tanpa struktur. Teknologi yang semakin canggih berhasil membedah proton dan neutron dan menemukan partikel-partikel penyusunnya. Partikel-partikel penyusun proton dan neutron ini kemudian dikenal sebagai kuark (*quarks*).

Menurut teori Model Standar, dunia atau alam semesta ini tersusun dari kuark dan lepton. Ada enam macam kuark, yaitu kuark *up* (disingkat *u*), *down* (*d*), *strange* (*s*), *charm* (*c*), *beauty* (*b*) dan *top* (*t*). Ada juga enam macam lepton, yaitu elektron (*e*), muon (μ), tau (τ), neutrino-elektron (ν_e), neutrino-muon (ν_μ) dan neutrino-tau (ν_τ). Masing-masing lepton dan kuark memiliki antipartikel yang memiliki massa yang sama dengan partikelnya, tetapi memiliki muatan listrik yang berlawanan.

Keduabelas partikel ini mempunyai massa yang berbeda. Umumnya partikel-partikel ini dikelompokkan ke dalam tiga kelompok (tiga generasi). Generasi pertama merupakan kelompok partikel yang memiliki massa yang paling ringan. Generasi pertama ini terdiri dari kuark *u*, kuark *d*, neutrino-elektron, dan elektron. Partikel-partikel generasi kedua memiliki massa lebih besar dari generasi pertama. Generasi ini meliputi dari kuark *c*, kuark *s*, neutrino-muon, dan muon. Generasi ketiga merupakan kelompok yang memiliki massa yang paling besar. Partikel-partikel yang termasuk generasi ketiga adalah kuark *t*, kuark *b*, neutrino-tau, dan tau. Partikel-partikel di generasi pertama merupakan partikel-partikel

stabil. Partikel-partikel inilah yang menyusun benda-benda yang teramati. Partikel-partikel yang termasuk generasi kedua dan ketiga merupakan partikel-partikel yang tidak stabil. Partikel-partikel ini akan meluruh dalam waktu singkat dan menjadi partikel generasi pertama.

Menurut teori Model Standar kuark memiliki muatan lain selain muatan listrik. Muatan lain ini adalah yang muatan yang disebut *color*. Kuark selalu ditemukan berpasangan dalam kelompok partikel yang dinamakan meson (terdiri dari kuark dan antiquark) dan baryon (terdiri dari 3 kuark). Ini berbeda dengan lepton yang dapat berdiri sendiri atau tidak berpasangan. Muatan *color* pada kuark merupakan salah satu penyebab karakteristik ini.

Apakah penemuan kuark menandai bahwa kita sudah sampai di akhir perjalanan? Inikah partikel fundamental yang selama ini kita cari-cari? Benarkah kuark merupakan partikel yang paling kecil yang tanpa struktur? Ataukah masih ada lagi partikel lain yang lebih kecil dan menjadi penyusun kuark? Jika ya, saat ini kita masih belum menemukan partikel tersebut. Kita masih belum bisa membuktikan keberadaannya. Jadi, untuk sementara kita menerima dan meyakini konsep bahwa kuark merupakan yang paling sederhana, sampai ada yang berhasil menemukan bahwa kuark tersusun dari partikel-partikel yang lebih fundamental lagi.

Saat manusia menemukan bahwa *The Four Basic Elements* bukanlah merupakan yang paling *basic*, terjadi banyak perubahan dalam kehidupan manusia. Begitu pula saat ilmu pengetahuan berhasil menguak bagian-bagian penyusun atom. Banyak teknologi canggih yang tercipta akibat penemuan elemen-elemen kecil dan sederhana ini. Teknologi pun semakin maju dan terkesan semakin kompleks saat ditemukannya kuark. Semakin kecil partikel yang berhasil ditemukan, semakin hebat perkembangan teknologi yang bisa dicapai.

Ini berarti semakin kecil ukuran partikel semakin besar dampaknya bagi kehidupan manusia. Semakin kecil partikel semakin kompleks teknologi yang dapat dilahirkan. Segala sesuatu yang besar selalu berasal dari sesuatu yang kecil dan sederhana. Ternyata sesuatu yang begitu kecil dan sederhana ini dapat mengakibatkan efek yang besar dan dahsyat. Seperti ungkapan Kecil-kecil Cabe

Rawit, sesuatu yang berukuran mikro justru dapat memberi dampak makro. Sesuatu yang sederhana menciptakan sesuatu yang kompleks. Inilah yang menjadi konsep dasar Teori Chaos. Semua materi di dunia bisa terbentuk karena adanya Bagaimana yang kecil ini bisa menghasilkan sesuatu yang besar dan kompleks?

Kuark dan lepton berkumpul dan saling berinteraksi sehingga terbentuk proton dan neutron. Proton dan neutron ini kemudian saling tersusun lagi dengan berbagai aturan sehingga terbentuk atom-atom yang berbeda-beda. Atom-atom ini kemudian saling berinteraksi lagi sehingga terbentuk berbagai ikatan (ionik maupun kovalen) kimia yang melahirkan molekul-molekul. Molekul atau senyawa ini kemudian berkumpul dan tersusun sebagai suatu sistem campuran yang kita lihat sebagai benda-benda di sekeliling kita. Benda-benda itu saling tersusun lagi membentuk planet-planet, dan planet-planet saling berinteraksi membentuk suatu sistem tata surya. Sistem tata surya yang satu berinteraksi dengan sistem tata surya yang lain sehingga membentuk suatu galaksi. Galaksi-galaksi membentuk jagad raya. Bayangkan saja! Semua yang kompleks ini diawali oleh partikel-partikel yang (saat ini kita yakini) terkecil.

Suatu buku yang tebal tersusun dari banyak bab yang tersusun dari berbagai paragraf, yang tersusun lagi dari kalimat-kalimat yang panjang maupun pendek. Kalimat-kalimat tersebut tersusun lagi dari begitu banyak kata dalam bahasa yang kita gunakan sebagai alat komunikasi ini. Kata-kata tersebut terbentuk dari huruf-huruf yang disusun dan diatur sedemikian rupa sehingga terlihat rapi dan membentuk kata-kata indah. Huruf-huruf tersebut pun tersusun dari titik-titik (*dots*) yang saling terhubungkan satu sama lain menurut aturan-aturan tertentu. Titik-titik inilah yang bertanggung jawab dalam menghasilkan bentuk-bentuk huruf, angka, dan gambar yang terdapat dalam buku tersebut. Titik-titik inilah yang merupakan bagian fundamental atau yang paling dasar dalam sebuah buku.

Sistem yang terlihat kompleks itu sebenarnya melibatkan suatu keteraturan (*regularity*) dalam ketidakberaturan (*irregularity*). Segala hal di dunia ini mematuhi suatu aturan tertentu. Aturan-aturan inilah yang bertanggung jawab dalam membentuk sistem yang besar dan kompleks. Aturan-aturan ini melibatkan

hukum-hukum yang sederhana. Inilah yang menjadi inti dalam Fisika. Fisika selalu berusaha untuk menjelaskan segala sesuatu yang kompleks menggunakan aturan-aturan yang sederhana (*Simple Laws with Complex Behavior*). Dengan aturan-aturan dasarnya yang sederhana ini Fisika berhasil menjelaskan reaksi-reaksi kimia, aliran listrik, gaya tarik magnet, gaya tarik gravitasi, metabolisme sel-sel biologi pada makhluk hidup, cara kerja tubuh manusia dan makhluk hidup lainnya, perubahan cuaca, pola aliran fluida, kelakuan fluida yang mengalami turbulensi, meramalkan proses terbentuknya galaksi dan alam semesta, menjelajahi sistem tata surya kita yang begitu kompleks, dan bahkan menjelaskan interaksi antara partikel-partikel fundamental penyusun alam ini dalam mekanika kuantum. Semuanya berasal dari teori-teori yang membeberkan aturan-aturan sederhana yang dikemukakan oleh fisikawan-fisikawan besar dunia, seperti Newton dengan tiga hukum geraknya, Bohr dengan teori atomnya, dan Einstein dengan teori relativitasnya.

Sewaktu kita mulai memanfaatkan fisika dalam usaha memahami dunia ini, kita sebenarnya hanya menggabungkan aturan-aturan sederhana yang semuanya saling berikatan menghasilkan sistem yang kompleks. Ini sama seperti bermain Lego. Sewaktu kita bermain dengan blok-blok Lego yang kecil-kecil itu kita bisa membangun berbagai bentuk yang besar dan kompleks. Semakin kecil blok-blok lego yang kita gunakan semakin banyak variasi bentuk yang bisa kita ciptakan. Konsep inilah yang dimanfaatkan dalam teknologi yang sedang ramai dibicarakan di seluruh dunia: Nanoteknologi.

Istilah nano berasal dari kata *Nanos* (Bahasa Yunani) yang berarti 10^{-9} (satu per satu milyar). 1 nanometer (nm) sama dengan 10^{-9} meter. Nanoteknologi merupakan teknologi yang melibatkan atom dan molekul dengan ukuran lebih kecil dari 1000 nanometer. Itu berarti ukurannya bisa mencapai 100.000 kali lebih kecil dari diameter sehelai rambut manusia. Super kecil, super mungil! Karakteristik dari semua benda sangat bergantung pada susunan atom-atomnya. Atom-atom yang terdapat dalam batubara sama persis dengan atom-atom yang terdapat dalam berlian (*diamond*) yang indah. Yang berbeda adalah susunan strukturnya (yaitu aturan yang menentukan interaksi antar partikel-partikel

penyusunnya) saja. Atom-atom dalam partikel pasir sangat mirip dengan atom-atom dalam *chip* komputer yang canggih. Bahkan atom-atom penyusun air, udara, dan partikel debu sebenarnya sama dengan atom-atom dalam sebuah kentang! Sedikit saja susunan struktur atomnya diubah, karakteristik suatu benda bisa berubah drastis. Inilah konsep utama dalam nanoteknologi. Dengan nanoteknologi, batubara dan grafit dapat kita susun ulang atom-atomnya sehingga menjadi berlian yang berkilau indah! Semua yang dilakukan dalam nanoteknologi adalah mengutak-atik partikel-partikel fundamental yang sangat kecil dan sederhana tadi. Hasil utak-atik itu merupakan sistem kompleks yang sangat besar dan sangat mempengaruhi kehidupan.

Apa yang merupakan sistem paling kompleks di dunia ini? Mungkin satu hal yang sampai sekarang masih belum bisa dimengerti manusia: otak manusia. Otak manusia merupakan komputer tercanggih yang tidak mungkin bisa ditandingi oleh komputer mana pun yang dibuat oleh manusia. Mungkin selama ini kita jarang memperhatikan betapa kompleksnya otak yang menjadi penentu setiap gerak-gerik dan tindakan kita ini.

Saat kita melihat cahaya terang yang menyilaukan secara otomatis kita akan memicingkan mata. Sederhana sekali konsepnya! Sinar yang terang itu dapat menyakiti dan merusak mata kita sehingga kita harus melindungi mata kita dengan cara memicingkan mata. Saat panas terik kita sering memakai topi untuk melindungi kepala kita dari sengatan matahari yang memusingkan. Saat hujan kita langsung membuka payung untuk melindungi diri dari siraman air hujan yang bisa membuat kita sakit. Saat kita mencium bau tak sedap, kita langsung menutup hidung kita, mungkin dengan saputangan atau dengan tangan kita, untuk mengurangi terhirupnya bau tak sedap itu. Saat kita haus, kita mencari air untuk kita minum sehingga dapat mengembalikan kesegaran kita. Saat kita mengantuk kita langsung mencari tempat tidur untuk mengistirahatkan badan dan menikmati tidur lelap yang menyegarkan. Saat kita dikejutkan oleh seseorang atau suatu peristiwa, kita sering berteriak secara spontan. Saat kita sedih kita mencururkan air mata dalam tangis kita. Saat kita mendengar suatu gurauan dan lelucon yang lucu kita tertawa. Semuanya ini kejadian-kejadian yang sederhana dan selalu

terjadi setiap saat tanpa kita sadari. Kita seperti sudah diprogram untuk melakukan itu semua. Benarkah semuanya sesederhana itu?

Saat kita merasa sedih, otak kita melakukan serangkaian pekerjaan yang sangat kompleks. Di mata kita ada kelenjar air mata, yang paling besar namanya *lacrimal*, yang tugasnya memproduksi air mata. Air mata yang keluar karena sedih dan stres berbeda dengan air mata yang keluar saat mengiris bawang. Sewaktu kita sedang sedih, protein dan hormon (contohnya mangan dan *prolactin*) diproduksi 20-25% lebih banyak. Ini mengakibatkan terjadinya kepenuhan atau kelebihan protein. Kelebihan protein dan hormon itu harus dikeluarkan supaya sistem menjadi stabil kembali. Ini sama seperti membuang kotoran atau racun yang sudah menumpuk. Bagaimana cara mengeluarkannya? Ya, dengan cara menangis!

Saraf di otak mengirimkan gelombang sinyal listrik ke kelenjar air mata. Ada bukaan kecil di bagian dalam mata kita yang jadi saluran keluarnya air mata. Air mata mengucur terus sampai jumlah protein dan hormon sudah normal lagi. Sewaktu jumlah protein dan hormon ini sudah stabil kembali, kita berhenti menangis. Stres dan rasa sedih berkurang karena *prolactin* (*prolactin* ini dikenal sebagai hormon stres) sudah banyak dikeluarkan waktu menangis. Jadi, semua proses fisika-kimia yang sangat kompleks inilah yang bertanggung jawab dalam membuat kita menangis saat kita sedih. Biasanya para wanita, terutama remaja, lebih mudah menangis daripada pria. Gejala ini mungkin kita anggap sebagai suatu kebudayaan yang terlahir karena kebiasaan atau pengaruh lingkungan. Sebenarnya gejala ini merupakan hasil peristiwa fisika-kimia. Sewaktu masih kecil (masih anak-anak) kemampuan menangis antara laki-laki dan perempuan sama besarnya. Tetapi saat menginjak usia remaja atau di masa puber (sekitar 12-18 tahun) tubuh wanita memproduksi *prolactin* lebih banyak dari pria. Ini disebabkan adanya perkembangan kelenjar air susu, yang produksinya berhubungan dengan hormon *prolactin* ini. Itulah sebabnya wanita lebih sering menangis. Rata-rata wanita menangis empat kali lebih sering dibanding pria. Dan ini bukan karena mereka cengeng! Wanita memang sering mendapat reputasi negatif yaitu dianggap cengeng karena sangat mudah terpengaruh emosinya

sehingga sering menangis. Tetapi justru hal inilah yang membuat wanita lebih sehat daripada pria. Racun kimia yang terbentuk dalam tubuh dapat dibuang secara teratur melalui air mata. Pria yang susah menangis lebih banyak menyimpan racun kimia ini di dalam tubuhnya.

Seluruh sistem kompleks yang terjadi dalam tubuh manusia ini ternyata menghasilkan berbagai hal yang selalu kita lihat sebagai hal-hal yang sangat sederhana dalam kehidupan sehari-hari. Konsep ini merupakan Teori Kompleksitas yang merupakan kebalikan dari konsep Chaos. Kalau dalam konsep Chaos semua yang kecil dan sederhana dapat menghasilkan sesuatu yang kompleks, dalam Teori Kompleksitas sistem yang kompleks dapat memunculkan (*emerge*) sesuatu yang sederhana.

Teori Kompleksitas ini sangat banyak ditemui di sekitar kita, tidak hanya dalam sistem tubuh kita saja, seperti juga *Chaos Theory*. Burung-burung yang terbang di udara dengan bebasnya sering kita anggap begitu sederhana. Padahal burung-burung itu bisa terbang dengan memanfaatkan banyak aturan-aturan (hukum-hukum) fisika yang kompleks. Begitu kompleksnya sehingga sampai sekarang pun manusia tetap tidak bisa menandingi kemampuan terbang burung-burung dan binatang-binatang udara lainnya itu. Manusia hanya bisa meniru sebagian konsep yang digunakan burung untuk terbang. Manusia mengaplikasikannya dalam pesawat terbang dan berbagai alat transportasi udara lainnya. Sayap burung menjadi fokus perhatian para fisikawan yang berusaha mengembangkan dan menyempurnakan teknologi yang bisa mengatasi gravitasi bumi itu.

Sayap pesawat meniru sayap burung dalam usahanya melawan gravitasi. Ada aliran udara di atas dan di bawah sayap pesawat. Partikel-partikel udara yang mengalir di bagian bawah sayap menabrak bagian bawah sayap pesawat itu. Partikel-partikel yang menabrak ini lalu dipantulkan ke bawah (ke arah tanah). Udara yang menghujani tanah ini merupakan gaya AKSI. Nah, ini baru aksi yang disebabkan proses yang terjadi di bagian bawah sayap. Di bagian atas sayap, ada proses lain yang juga menghasilkan aksi. Hukum-hukum yang dihasilkan oleh Bernoulli dan Coanda 'bekerja sama' membentuk aksi ini. Sewaktu udara akan

mengalir di bagian atas sayap, tekanannya sebesar P_1 . Sesudah udara melewati ujung atas sayap pesawat, tekanan udara tepat di bagian atas sayap tiba-tiba turun menjadi P_2 . Karena perubahan tekanan ini terjadilah perubahan kecepatan sehingga terbentuk gradien kecepatan (perbedaan kecepatan) yang menyebabkan pesawat bergerak. Ini aturan dari Bernoulli. Buku-buku Fisika SMA yang selama ini dijadikan pegangan utama siswa di sekolah banyak mengajarkan konsep yang salah tentang aplikasi hukum Bernoulli ini. Dalam buku-buku tersebut dijelaskan bahwa bagian atas dan bawah sayap mengalami perbedaan tekanan karena adanya perbedaan kecepatan yang disebabkan perbedaan panjang lintasan yang harus dilalui. Sayap pesawat biasanya dibuat melengkung sehingga lintasan di bagian atas lebih panjang dari lintasan di bagian bawah. Padahal pada pesawat-pesawat tempur sayap-sayapnya selalu dirancang mendatar (panjang lintasan sama). Jadi ini merupakan penjelasan yang salah.

Ada satu lagi yang terjadi pada permukaan sayap pesawat. Menurut Coanda, partikel-partikel fluida yang kontak dengan permukaan padat memiliki kecenderungan untuk terus menempel di permukaan itu (dikenal sebagai Efek Coanda). Ini dibuktikan jika kita memegang sebuah gelas yang terus diisi air sampai luber dan tumpah ke luar, kita melihat aliran air menuruni permukaan gelas. Partikel-partikel air itu tidak langsung jatuh ke bawah begitu saja. Justru partikel-partikel air tetap menempel di permukaan gelas dan mengalir terus. Partikel-partikel ini kemudian berkumpul di bagian bawah sampai menjadi berat, baru kemudian airnya jatuh ke bawah. Kejadian yang sama terjadi di permukaan sayap pesawat, partikel-partikel udara (sama-sama merupakan fluida) mengalir di sepanjang permukaan atas sayap sampai mencapai ujung bawah sayap. Di ujung bawah sayap itu partikel-partikel udara bergerombol dan bertambah terus sampai akhirnya kelebihan berat dan berjatuh (*downwash*). Siraman udara atau *downwash* ini juga merupakan komponen gaya AKSI. Tanah yang menerima gaya aksi ini pasti langsung memberikan gaya REAKSI (Hukum Ketiga Newton tentang Aksi-Reaksi) yang besarnya sama dengan gaya aksi tetapi berlawanan arah. Karena gaya aksinya menuju tanah (ke arah bawah), berarti gaya reaksinya ke arah atas. Gaya reaksi inilah yang merupakan *lift* yang akhirnya bisa

mengangkat pesawat dan mengalahkan gaya berat akibat tarikan gravitasi bumi. Betapa banyaknya aturan-aturan yang berlaku saat menerbangkan pesawat! Aturan-aturan yang sama terjadi saat burung terbang dengan mulus dan indah. Semua yang begitu kompleks ternyata bisa menghasilkan sesuatu yang sangat sederhana, sesederhana burung yang terbang menjelajahi angkasa. Sederhana bagi burung, tetapi sangat kompleks bagi manusia yang berusaha menirunya.

Begitulah Teori Chaos dan Teori Kompleksitas berjalan berdampingan. Sistem yang sederhana dapat melahirkan sistem yang kompleks, dan sistem yang kompleks dapat menampilkan sesuatu yang sangat sederhana. (Yohanes Surya)