

Definisi-ulang Satuan Sistem Internasional: Beberapa Segi Fisika, Beberapa Pertimbangan Metafisika

Aloysius Rusli

Jurusan Fisika, Fakultas Teknologi Informasi dan Sains,
Universitas Katolik Parahyangan, Jl Ciumbuleuit 94, Bandung, Indonesia 40141

arusli@unpar.ac.id

Abstrak

Pada Jumat 16 November 2018, CGPM (Konferensi Umum tentang Berat dan Ukuran) di Versailles, di tepi barat daya Paris, Perancis, yang dihadiri wakil dari 54 negara anggota, secara bulat telah menyetujui Resolusi-Putusan untuk mendefinisi-ulang satuan Sistem Internasional (S.I.). Hal ini dapat dipandang suatu langkah bersejarah, karena beberapa segi fisika, dan juga beberapa pertimbangan metafisika. Segi fisiknya adalah, bahwa selanjutnya satuan S.I. tidak lagi dikaitkan dengan benda tertentu yang ternyata tidak se-stabil harapan semula, dan tidak lagi dibatasi pada prosedur eksperimen ataupun realisasi tertentu. Maka semua pihak terbebaskan untuk bertindak kreatif dalam memilih prosedur dan cara yang makin canggih dan teliti, asalkan hasil-hasil kreasi ini tetap konsisten dengan nilai tetapan alam dan tetapan teknis yang disetujui tahun 2018 ini. Segi praktis fisika lain adalah, bahwa sekiranya suatu saat kita berjumpa dengan ilmuwan dari kecerdasan lain di jagad raya ini, yang mestinya juga sudah mengenal tetapan Planck dan beberapa tetapan lainnya itu, tetapi tentu dapat saja dengan bilangan berbeda, maka konversi data hasil pengukuran menjadi sederhana, dan komunikasi ilmiah langsung menjadi terbuka pada seluruh tataran ilmu yang terukur. Selain itu, ada konsekuensi yang bersifat metafisika, dalam arti memiliki segi atau pertimbangan yang berlandaskan kepercayaan ataupun asumsi, yang tidak dapat dituntut keterukurannya. Pertimbangan metafisika pertama adalah, bahwa disetujuinya sejumlah tetapan tersebut, didasarkan pada temuan bahwa setidaknya selama ~13,8 gigatahun usia jagad raya yang terukur, tetapan itu ditemukan tetap, sehingga diasumsikan untuk seterusnya mereka tetaplah tetap. Pertimbangan metafisika lain adalah, bahwa aturan alam yang telah ditemukan, juga akan tetap di masa depan. Kesadaran bahwa pertimbangan metafisika ini sebenarnya tidak dapat dijamin, dapat membuka pemikiran lebih lanjut ke arah ada tidaknya tujuan dalam jagad raya ini, karena ini tampaknya juga termasuk hal tak terukur. Kiranya pemikiran tentang beberapa segi dan pertimbangan ini, patut disimak guru dan dosen fisika, kalau ingin lebih siap memberi suatu jawab yang baik atas pertanyaan siswa atau mahasiswa.

Kata kunci: definisi, Sistem Internasional, metafisika

PENGANTAR

Sebelum tahun 1800, setiap desa atau wilayah yang telah mengenal perdagangan, yaitu tukar menukar barang kebutuhan dengan barang lain, bersepakat memilih satuan dalam mengukur barang tersebut. Satuan

paling awal adalah satuan bagi berat (misalnya *pound*, kati, gram), dan satuan bagi ukuran (misalnya inci, jengkal, hasta, depa, meter; tombak untuk luas tanah, liter untuk volume). Misalnya beda besar satuan “inci” di desa berbeda, memberi kesempatan kepada para ahli-perhitungan untuk memperoleh penghasilan dari menghitung konversi satuan ke satuan lainnya. Para pimpinan daerah pun berkesempatan menyalahgunakan besar satuan yang bermacam-macam itu. Karena itu, menjelang awal Revolusi Perancis tahun 1789 [1a], parlemen Perancis meminta agar Akademi Ilmu Pengetahuan Perancis menyeragamkan ~800an jenis satuan panjang (dengan definisi yang jumlahnya hampir 250 juta macam!) yang berlaku di wilayah Perancis, agar pendapatan rakyat tidak terbebani biaya konversi satuan, sehingga lalu lebih rela membayar jika pajak ingin dinaikkan.

Dibentuklah oleh Akademi tersebut pada tahun 1790, sebuah panitia 5 ahli, antara lain matematikawan Joseph-Louis Lagrange (1736-1813) dan Pierre-Simon Laplace (1749-1827) untuk menghasilkan saran tentang satuan yang seragam. Setelah mendalami masalahnya selama setahun, dihasilkan suatu saran yang antara lain memuat usul menggunakan sistem metrik yang berbasis bilangan 10 [1b], satuan panjang yang dikaitkan dengan keliling Bumi yang dikira tetap, dan satuan berat yang dikaitkan volume suatu kubus air dengan sisi suatu desimal dari satuan panjang tersebut. Saran ini disetujui Akademi pada 30 Maret 1791, dan panitia itu ditugaskan mengkonkretkan saran itu. Jadilah rumusan bagi satuan meter dan gram: Meter adalah sepersepuluh juta jarak Kutub Utara dari Khatulistiwa, pada meridian yang melewati Paris; gram adalah massa 1 sentimeter kubik air. Untuk merealisasi dua satuan itu, dibuat proyek mengukur jarak sepanjang meridian tersebut, untuk memperoleh standar yang lebih praktis bagi meter; hal ini memerlukan 6 tahun (1792-1798) karena suasana politik yang riuh rendah selama Revolusi Perancis saat itu. Untuk massa, disiapkan silinder 1 kilogram (agar lebih praktis, dan tidak sekecil 1 gram) seperti yang sudah digunakan sejak tahun 1793 oleh Antoine Lavoisier (1743-1794) berupa silinder-silinder kuningan. Pada 7 April 1795 berhasillah disetujui dan diundang-undangkan sistem pengukuran yang bersifat metrik yang bertumpu pada bilangan dasar 10, dan satuan untuk massa yaitu kilogram, dan satuan untuk ukuran yaitu meter.

Ketika Revolusi Perancis akhirnya dipimpin oleh jenderal Napoleon Bonaparte yang lalu mengangkat dirinya menjadi kaisar, tetapi lalu akhirnya kalah diperangi oleh negara-negara tetangga Perancis, para raja Eropa enggan meneruskan sistem metrik yang diciptakan oleh revolusi anti-raja itu. Baru tahun 1875 Perancis berhasil memimpin lagi upaya sistematisasi satuan itu, dan 17 negara Eropa bersedia menandatangani suatu kesepakatan “Konvensi Meter” tentang satuan berat dan ukuran itu. Dibentuklah suatu CGPM (Konferensi Umum tentang Berat dan Ukuran) beranggotakan penandatanganan Konvensi Meter itu, yang membawahi CIPM (Komite Internasional tentang Berat dan Ukuran) yang memimpin pelaksanaan putusan-putusan CGPM. CIPM didukung-teknis oleh BIPM (Biro Internasional tentang Berat dan Ukuran) yang berkantor di Sèvres, 9 kilometer di barat daya pusat Paris. Satu catatan menarik bagi kita adalah, bahwa profesor fisika Johannes Bosscha (1831-1911), pimpinan delegasi Belanda pada konferensi tahun 1875 di Paris itu, ayahanda Karel Albert Rudolf Bosscha, pemilik perkebunan teh di Jawa Barat yang menjadi pendukung finansial Institut Teknologi Bandung dan Observatorium Bosccha di Lembang, menolak ikut menjadi anggota CGPM dan Konvensi Meter itu, karena berpendapat bahwa biaya operasi BIPM terlalu mahal. Baru tahun 1929 Belanda akhirnya baru bergabung ke CGPM. Indonesia menjadi anggota CGPM pada tahun 1960. Saat ini (per 7 Agustus 2018) anggota CGPM berjumlah 60 negara [1c]. Tampak bahwa para negara merasa perlu berpartisipasi dan berperan dalam menetapkan hal ihwal satuan-satuan, karena sadar akan pentingnya itu bagi efisiennya perdagangan yang makin mengglobal, walaupun iuran yang wajib dibayar setiap tahunnya saat ini berkisar pada 12 mega euro (~180 giga rupiah) [2].

Selanjutnya akan ditinjau sejarah satuan-satuan S.I. itu, untuk dapat melihat pentingnya definisi ulang satuan yang disepakati CGPM ke 26 pada Jumat 16 November 2018 yang baru lalu di Versailles, 19 kilometer di barat daya pusat Paris. Setelah konsekuensi definisi ulang itu ditinjau, makalah ini diakhiri dengan suatu pertimbangan segi metafisika definisi ulang satuan itu, dan ditutup dengan suatu kesimpulan yang diharapkan dapat menunjuk ke arah perkembangan selanjutnya para satuan S.I. ini.

SEJARAH SINGKAT SATUAN SISTEM INTERNASIONAL (S.I.)

Berdasarkan dokumen bagi para wartawan [3] terbitan CGPM ke 26 yang diselenggarakan 13-16 November 2018 di Versailles, di tepi kota Paris itu, pada 22 Juni 1799, selesailah realisasi standar bagi satuan massa dan

ukuran yang disepakati, berupa silinder dan batang logam platina (massa jenis Pt adalah $\sim 21 \text{ g/cm}^3$) bagi kilogram dan meter [1d]. Alasan menggunakan platina yang harganya dapat 2 kali lipat emas murni, kiranya agar silinder 1 kilogram itu jangan terlalu besar ($\sim 50 \text{ cm}^3$, atau garis tengah dan tinggi silinder $\sim 4 \text{ cm}$, agar kesempatan berkarat dan tergores cukup kecil), dan karena juga langkanya logam itu, agak sulit dipalsukan. Tanggal lahirnya Sistem Metrik di dunia, biasanya mengacu pada 22 Juni 1799 ini.

Pada tahun 1832, Carl-Friedrich Gauss (1777-1855) mengusulkan suatu sistem satuan yang didasarkan pada milimeter, miligram, dan detik. Detik didefinisikan secara astronomi, sebagai $1/60$ menit, dengan $1 \text{ menit} = 1/60 \text{ jam}$, dengan $1 \text{ jam} = \text{panjang satu hari rata-rata di Bumi}$. Sistem seksagesimal 60an ini [1e] merupakan suatu sistem berhitung yang telah berusia ~ 5 kilotahun, sejak masa bangsa Sumeria di Timur Tengah. Pada tahun 1863 komité yang dibentuk BAAS (British Association for the Advancement of Science) yang beranggotakan antara lain William Thomson (1824-1907; kemudian diberi gelar Lord Kelvin), James Clerk Maxwell (1831-1870), dan James Prescott Joule (1818-1889) merumuskan konsep “sistem satuan koheren” yang mendasarkan diri pada beberapa satuan dasar saja, dengan semua satuan turunan lainnya terdefinisi dari satuan-satuan dasar itu, dengan koefisien selalu angka 1. Pada tahun 1873, komité lain BAAS yang juga beranggotakan Maxwell dan Thomson, mengusulkan sistem CGS (satuan dasar sentimeter, gram, detik) dengan satuan turunan seperti dyne untuk gaya, dan erg untuk energi.

Ketika 20 Mei 1875 disepakati Konvensi Meter tentang dua satuan yang sama itu, realisasi standar kilogram dan meter baru siap tahun 1889, dan lalu CGPM ke 1 mengesahkan “prototipe internasional bagi kilogram (IPK)” dan “prototipe internasional bagi meter”. Dua prototipe ini terbuat dari paduan logam platina-iridium dengan proporsi massa 9 : 1. Rupanya teknologi saat itu sudah mencapai kemampuan membuat paduan logam tersebut, dengan iridium digunakan untuk memperkeras (demamencegah pergoresan dan perubahan berat dan ukuran) bahan kilogram dan meter itu. Platina dan Iridium merupakan logam yang saat itu tergolong baru, sehingga dapat dikatakan bahwa para ahli masa itu cukup mutakhir dengan perkembangan ilmu dan teknologi masa itu. Setiap negara anggota Konvensi Meter diberi satu atau beberapa pasang standar kilogram dan meter itu, sebagai acuan nasional bagi berbagai alat pengukur berat dan ukuran. Dapat dicatat bahwa berbeda dengan batang platina buatan tahun 1799 yang panjang batangnya didefinisikan tepat 1 meter, batang Pt-Ir tahun 1889 ini memiliki dua goresan halus (perlu dilihat dengan mikroskop) sebagai tanda lebih teliti bagi jarak 1 meter. Di Indonesia, dua standar ini dapat dilihat di lantai bawah tanah Direktorat Metrologi, Jl Pasteur 27, Bandung 40171.

Pada tahun 1901, Giovanni Giorgi membuktikan bahwa dapat dibuat sistem koheren yang mencakup gejala kelistrikmagnetan, dengan suatu sistem MKS (meter, kilogram, detik) bukannya sistem CGS, dengan menambahkan satuan dasar bagi gejala listrik. Pada tahun 1935 J E Sears dari National Physical Laboratory Inggris mengusulkan satuan ampere untuk itu, dan jadilah sistem satuan MKSA.

Pada tahun 1921 CGPM menyepakati peluasan peran BIPM, yaitu untuk menangani semua satuan lain, dan lahirlah sejak itu istilah “metrologi” bagi ilmu dan teknologi tentang ukur-mengukur yang tentunya mensyaratkan kejelasan definisi suatu satuan dan ketepatan ukurannya. Pada tahun 1927 dibentuklah CC (Komité Konsultatif, yang menyarankan hal ihwal teknis bagi satuan-satuan) yang pertama tentang satuan listrik dan magnet (disingkat CCE), karena bidang listrik-magnet ini makin jelas peranannya dalam teknologi.

Tahun 1935 IEC (Komisi Internasional bagi Elektroteknik) menyetujui sistem satuan Giorgi yang berdasarkan satuan MKS (meter, kilogram, detik), dan tahun 1939 CCE mengusulkan kepada CGPM untuk menyetujui Sistem MKS itu. Maka tertampunglah satuan detik. Lalu terjadilah Perang Dunia II (1939-1945), dan terhentilah sementara, kegiatan tentang satuan ini.

Pada tahun 1948, CGPM ke 9 meminta CIPM untuk mengusulkan suatu sistem metrik yang praktis dan dapat disetujui secara internasional, dan tahun 1954 CGPM menyetujui menambahkan satuan ampere, kelvin, dan kandela. Pada tahun 1960, CGPM ke 11 menyetujui istilah S.I. (Sistem Internasional) bagi keenam satuan yang telah diakui, yaitu detik, meter, kilogram, ampere, kelvin, dan kandela. Tahun 1960 itu juga disetujui mengganti definisi meter dari mengacu pada batang di BIPM, menjadi mengacu pada suatu panjanggelombang garis spektrum cahaya atom Krypton-86 yang lebih tinggi ketelitiannya.

Tahun 1967 definisi detik juga dialihkan ke frekuensi gelombang mikro yang dipancarkan atom Cesium akibat transisi elektron antara dua tingkat terurai atom tersebut akibat kemagnetan inti atomnya. Frekuensi itu dapat menyediakan ketelitian yang lebih tinggi, akibat panjang gelombangnya yang mudah diresonansikan dengan kotak resonansi berukuran ~ 15 milimeter.

Tahun 1971 CGPM ke 14 menyetujui menambahkan satuan dasar ke 7, yaitu satuan mol. Dan tahun 1979 satuan kandela dikaitkan dengan radiasi monokromatik 540 terahertz yang berwarna hijau-kuning sesuai dengan sensitivitas maksimal bagi mata manusia “normal”.

Tahun 1983 CGPM menyetujui perubahan definisi meter menjadi terkait dengan satuan detik: 1 meter = jarak yang ditempuh cahaya dalam hampa, dalam jangka waktu $1/c$ detik, dengan c adalah tetapan alam hasil temuan matematika Maxwell yang besarnya ~ 300 megameter per detik. Maka sudah 2 satuan S.I. didasarkan pada sifat alam, yaitu sifat atom Sesium dan sifat tetapnya c .

Tahun 1990 IEC memelopori kesepakatan tentang standar satuan volt dan ohm, berdasarkan tetapan Josephson K_J yang secara teori besarnya $= 2e/h \sim 484 \text{ GHz/mV} \sim 0,5 \text{ THz/mV}$; dan tetapan Klitzing R_K yang secara teori besarnya $= h/e^2 \sim 25$ kiloohm. Brian Josephson (1940-kini) menemukan gejala yang kemudian disebut dengan namanya itu tahun 1962 [1f, 4], dan dianugerahi Nobel Fisika tahun 1973. Klaus von Klitzing (1943-kini) menemukan versi kuantum gejala Hall (*QHE*) tahun 1980, dan menerima Nobel Fisika tahun 1985 [1g, 5].

Tetapan Josephson ini muncul dari sifat sambungan Josephson yang ditemukan pada tahun 1962 [1f, 4] yaitu dua superkonduktor yang terpisahkan oleh lapisan tipis ~ 1 mikrometer, yang kalau disinari oleh gelombang mikro berfrekuensi $f \sim 50$ GHz, akan menghasilkan beda potensial konstan antara kedua superkonduktor itu sebesar $\Delta V = f/K_J$. Karena produksi frekuensi gelombang mikro seperti itu dapat dilakukan dengan ketelitian sampai 8 angka penting, artinya ketelitian pengukuran beda potensial juga seteliti itu, karena tetapan Planck h dan tetapan (muatan listrik) elektron e merupakan tetapan alam sejauh terukur selama ini.

Tetapan Klitzing R_K muncul dari gejala atau “efek” Hall secara Kuantum (*QHE*) yang [1g, 5] menunjukkan bahwa perbandingan tegangan Hall terhadap arus listrik yang dialirkan pada gejala Hall, pada medan magnet terpasang yang cukup besar, berperilaku seperti $\Delta V/I = R_K/n$ dengan $n = 1, 2, 3, \dots$, tergantung pada besarnya medan magnet yang terpasang. Artinya perbandingan tersebut dinyatakan oleh tetapan Klitzing yang sepenuhnya ditentukan oleh tetapan alam Planck dan muatan elektron juga. Artinya perbandingan satuan volt dan satuan ampere, yang dari teori listrik disebut satuan ohm, sepenuhnya (hanya) tergantung pada tetapan h dan e , sehingga pengukuran satuan ohm menjadi juga teramat teliti.

Definisi volt dan ohm dengan dua cara ini, ternyata masih agak kurang sinkron-koheren dengan S.I. yang bertumpu pada detik, meter, kilogram, dan ampere; tetapi perbedaannya terdapat di sekitar angka penting ke 7. Artinya bagi keperluan di pasar, toko, lab fisika dasar, definisi volt dan ohm ini sudah dapat dianggap konsisten dengan S.I. Hanya untuk penelitian tingkat canggih, yang tingkat ketelitiannya mendekati angka penting ke 8, perbedaan definisi S.I. dan definisi menurut IEC ini mulai berpengaruh.

Sementara itu, berdasarkan perbandingan prototipe kilogram dengan IPK di BIPM pada tahun 1948 dan lalu tahun 1990an, ditemukan bahwa perbedaan besar para silinder kilogram itu makin membesar sebarannya, dengan laju sebesar ~ 50 mikrogram per abad [1h]. Jika ini dibandingkan dengan besaran 1 kilogram, artinya sedang terjadi ketaktelitian yang makin besar dengan laju 10^{-8} (artinya pada angka penting ke 8!) tentang besarnya satuan kilogram. Hal ini mulai mendekati batas kemampuan mengukur peralatan manusia, sehingga mulai dapat mengganggu tingkat ketelitian satuan-satuan lain yang bertumpu pada satuan kilogram, seperti satuan joule, tesla, dsb.

Karena itu sejak tahun 2000an, mulai berkembang usulan untuk mengganti definisi kilogram dengan definisi yang lebih mantap, yang tidak ternyata sedang berubah tanpa berhasil ditemukan apa yang menjadi penyebab perubahan itu. Pada CGPM ke 23 tahun 2007, pemikiran mengaitkan satuan-satuan dengan tetapan alam mulai dibahas [1a], dilanjutkan pada CGPM ke 24 tahun 2010 dengan membahas usulan mengganti definisi kilogram [6], dengan kesimpulan bahwa para laboratorium nasional dipersilakan berusaha sesegera mungkin mengusulkan definisi pengganti bagi kilogram itu. Pada CGPM ke 25 tahun 2014 disimpulkan bahwa saatnya belum tiba untuk mengubah definisi itu, karena beberapa laboratorium nasional belum dapat sepakat tentang nilai tetapan Planck h , di tingkat ketelitian sampai angka penting ke 8. Maka saran kepada para laboratorium nasional untuk melanjutkan upayanya menetapkan nilai tetapan Planck digarisbawahi, tetapi disepakati bahwa perubahan definisi itu memang disetujui perlu dilakukan, tetapi tanpa mengikat diri pada tanggal tertentu. Ternyata dalam setahun menjelang CGPM ke 26 November 2018 yang baru lalu, para laboratorium nasional tersebut berhasil meningkatkan ketelitian pengukuran tetapan Planck dan menyimpulkan nilai tetapan Planck yang dapat konsisten dengan hasil pengukuran beberapa laboratorium nasional itu. Maka kesepakatan CGPM ke 26 secara aklamasi November 2018 itulah menjadi puncak keberhasilannya.

ASAL USUL 7 SATUAN DASAR S.I.

Ada baiknya dirangkum sejenak, asal usul ke 7 satuan dasar Sistem Internasional, yang telah disepakati sejak tahun 1971. Manfaatnya adalah, untuk menyadari peran sang manusia dalam pemilihan satuan ini, dan peran Bumi tentang itu. Pustaka yang menjadi sumber informasi ini termudahnya dapat ditemukan di Wikipedia.

Satuan detik (singkatan resminya s tegak, bukannya “det”) berasal dari [1e] panjangnya satu hari di Bumi. Satuan “hari” memang wajar terpilih, karena pengalaman manusia di Bumi adalah bahwa senantiasa akan terbit hari baru, tanpa jeda sedikitpun, selain gangguan cuaca yang dapat disimpulkan bukanlah pengaruh esensial terhadap eksistensi hari. Karena satuan “hari” agak terlalu panjang bagi kehidupan manusia, lalu disepakati satuan “jam” (“oro” dalam bahasa Yunani, “hour” dalam bahasa Inggris) sebagai $1/12$ hari rata-rata setahun, lalu “menit” sebagai bagian kecil sebesar $1/(5 \times 12) = 1/60$ jam, dan lalu “menit kedua (bahasa Latin: sekundus)” atau singkatnya “sekon” atau “detik” dalam Bahasa Indonesia.

Satuan meter (singkatannya m tegak) rupanya [1a] semula didasarkan pada panjang bandul sederhana, yang lama ayunannya dari kiri ke kanan dibuat sepanjang 1 detik; disebutnya “bandul detik, *second's pendulum*”, sebagai alat pengukur waktu dalam satuan detik. Hanya karena ditemukan bahwa satu detik oleh sebuah bandul detik itu agak terpengaruh oleh lokasi, apakah di Paris atau di London dsb, maka secara politik, definisi berdasarkan bandul detik ternyata tak bertahan terhadap rasa nasionalisme para negara seperti Inggris, Amerika Serikat, Perancis. Rupanya kemudian ditemukan bahwa melalui satuan “mil laut” yang berkaitan dengan perbedaan 1 menit-sudut bagi ketinggian maksimal Matahari setiap tengah hari, ditemukan bahwa jarak sepanjang permukaan laut, ~panjang permukaan Bumi dari khatulistiwa ke kutub Utara, cukup dekat pada bilangan bagus “10 juta meter”. Dan berhasillah disepakati bahwa satu meter adalah $1/(40 \text{ juta})$ keliling Bumi; atau sebaliknya, bahwa keliling Bumi disepakati berpanjang tepat 40 juta meter atau 40 000 kilometer atau 40 megameter.

Satuan kilogram jelas didasarkan [1h] pada sifat air, yang dikenal baik semua orang, yaitu bahwa 1 desimeter kubik air massanya tepat 1 kilogram. Aslinya memang: satu sentimeter kubik air didefinisikan bermassa 1 gram. Perbedaan antara berat dan massa memang mulai disadari oleh Isaac Newton tahun 1700an, tetapi sampai akhir abad ke 19 manusia masih bergumul dengan pilihan “berat” atau “massa” yang akan dipakai sebagai satuan dasar. Lihatlah sistem satuan Inggris, yang menggunakan satuan dasar pound (singkatannya lb, dari “libra”) bagi gaya, termasuk gaya berat.

Satuan ampere didasarkan pada gaya tarik/tolak pada kawat tipis lurus sepanjang 1 meter yang dialiri arus listrik sebesar 1 ampere itu, akibat hadirnya arus listrik dalam kawat tipis lurus sejajar yang berjarak 1 meter dari kawat pertama. Dengan definisi seperti ini, satuan ampere terkait pada satuan gaya, yang adalah kilogram meter per detik kuadrat, yang karena pentingnya, diberi nama “newton”, singkatnya “N”.

Satuan kelvin jelas berkait dengan satuan derajat Celsius, yang jelas didasarkan pada sifat air.

Satuan mol didasarkan pada temuan para kimiawan, seperti Avogadro (1776-1856) bahwa gas bertekanan, volume, dan suhu tertentu, tampaknya memuat jumlah molekul yang sama [1i]. Hipotesis ini membuat terpahaminya perilaku reaksi kimia antar gas pada abad ke 19. Istilah “mol” dalam bahasa Yunani berarti segumpalan, molekul berarti gumpalan kecil; seperti part = bagian, dan partikel = bagian yang kecil.

Satuan kandela mengukur intensitas kecerahan (*luminous intensity*) sumber cahaya [1j], menurut mata manusia yang dianggap “rata-rata” atau “normal”. Semula standar yang digunakan adalah cahaya lilin (“candle” dalam bahasa Inggris) yang terbuat dari minyak ikan dan kain sumbu tertentu. Kemudian (tahun 1948, oleh CGPM ke 9; lalu diperinci tahun 1967 oleh CGPM ke 13) digunakan kecerahan logam platina yang sedang berfasa cair tepat pada titik cairnya (1768°C atau 2,041 kilokelvin), akhirnya dengan kemajuan teknologi, definisinya sejak CGPM ke 16 tahun 1979 didasarkan pada cahaya monokromatik 540 terahertz (warnanya kuning-hijau, panjanggelombangnya 555 nanometer) dengan intensitas radiasi $1/683$ watt pada arah sudut-ruang sebesar satu steradian.

Kiranya tampak dari asal usul para satuan dasar S.I. ini, betapa manusia mencoba mendasarkan pemilihan satuan-satuan bukannya pada pilihan pribadi, melainkan seobyektif mungkin, yaitu berdasarkan sifat alam yang tampak bergulir secara teratur dan terandalkan. Juga tampak berperannya pilihan oleh para ahli melalui ilmu yang telah ditemukannya, dan jelasnya bertumpu pada keadaan di Bumi dengan airnya dan manusia yang matanya teradaptasi pada warna Matahari. Juga jelas bahwa para satuan ini dapat dikatakan masih teradaptasi pada keadaan lokal di Bumi.

DEFINISI ULANG SEJAK 20 MEI 2019

Berdasarkan kesepakatan 16 November 2018 tersebut, mulai 20 Mei 2019, ulang tahun ke 134 Konvensi Meter, definisi ke 7 satuan dasar itu menjadi berpola seragam sbb:

Detik, dengan simbol s , adalah satuan SI untuk waktu. Detik ini didefinisikan dengan menetapkan bahwa nilai frekuensi yang dipancarkan atom Sesium-133, dengan simbol $\Delta\nu_{Cs}$, yaitu frekuensi transisi hiperhalus tingkat dasar atom Cs-133 yang tak terganggu, adalah $9\,192\,631\,770$ (10 angka penting) jika dinyatakan dengan satuan hertz, yang setara dengan $/s$.

Meter, simbolnya adalah m , adalah satuan SI bagi panjang. Meter ini didefinisikan dengan menetapkan laju rambat cahaya dalam hampa c adalah $299\,792\,458$ (9 angka penting) kalau digunakan satuan m/s , di mana s didefinisikan dengan $\Delta\nu_{Cs}$.

Kilogram, dengan simbol kg , adalah satuan SI bagi massa. Kilogram ini didefinisikan dengan menetapkan bahwa tetapan Planck h adalah $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ (9 angka penting) jika dinyatakan dalam satuan $J\,s$, yang sama dengan $kg\,m^2/s$, di mana meter dan detik didefinisikan dengan c dan $\Delta\nu_{Cs}$.

Satuan ampere, dengan simbol A , adalah satuan SI untuk arus listrik. Satuan ampere ini didefinisikan dengan menetapkan nilai muatan listrik elementer/dasar yang dimiliki elektron, e , sebagai $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ (10 angka penting) jika digunakan satuan C , yang sama dengan $A\,s$, di mana detik didefinisikan dengan $\Delta\nu_{Cs}$.

Satuan kelvin, simbol K , adalah satuan SI bagi suhu termodinamik. Satuan K ini didefinisikan dengan menetapkan tetapan Boltzmann k sebagai $1,380\,649 \times 10^{-23}$ (7 angka penting) jika digunakan satuan J/K , yang sama dengan $kg\,m^2/(s^2\,K)$, di mana kilogram, meter, dan detik didefinisikan dengan h , c , dan $\Delta\nu_{Cs}$.

Satuan mol, dengan simbol mol , n , adalah satuan SI bagi jumlah entitas/partikel dasar. Satu mol adalah tepat $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ (9 angka penting) buah entitas/partikel dasar. Bilangan ini disebut bilangan Avogadro, dan adalah nilai yang tetap bagi tetapan Avogadro, N_A , yang dinyatakan dalam satuan $/mol$. Jumlah entitas/partikel dasar suatu benda/sistem, simbol n , adalah jumlah entitas dasar tertentu; entitas dasar ini perlu disebutkan, misalnya dapat berupa sebuah atom, sebuah molekul, sebuah ion, sebuah elektron, sebarang partikel lain atau sekelompok tertentu partikel.

Satuan kandela, simbol cd , adalah satuan SI bagi intensitas kecerahan dalam suatu arah. Satuan ini didefinisikan dengan menetapkan nilai efisiensi kecerahan K_{cd} , bagi cahaya berwarna kuning kehijauan berfrekuensi 540×10^{12} hertz, adalah 683 (3 angka penting) jika digunakan satuan lm/W atau lumen per watt, yang sama dengan $cd\,sr/W$, atau $cd\,sr^3/(kg\,m^2)$, dengan sr simbol bagi satuan sudut-ruang steradian, di mana kilogram, meter, dan detik didefinisikan dengan h , c , dan $\Delta\nu_{Cs}$.

Dari 7 buah definisi satuan ini, tampak sudah seragamnya pola definisinya, dan tampak bahwa realisasi pengukuran satuan tidak dibatasi, melainkan bebas dipilih, tetapi realisasinya harus sedemikian sehingga nilai tetapan alam (c , h , e) atau tetapan teknis ($\Delta\nu_{Cs}$, k , N_A , K_{cd}) yang berangka penting 3, 7, 9 atau 10 itu, harus terpenuhi. Jika tidak, itu berarti realisasi satuan yang telah digunakan masih kurang tepat.

Tetapan alam dipercaya senantiasa tetap. Tetapan teknis dibuat tetap berdasarkan pilihan manusia (jadi bukannya tetapan alam) tentang suatu gejala alam. Biasanya pilihan itu, misalnya pilihan atom Sesium, satuan kelvin, satuan mol, "manusia normal" timbul dari kemudahan dan ketelitian melakukan pengukurannya.

BEBERAPA KONSEKUENSI FISIKANYA

Seperti telah disimpulkan di akhir bagian "Definisi ulang" di atas, definisi yang mendasarkan diri pada tetapan beberapa tetapan alam ataupun tetapan teknis ini, tidak lagi mengikat ilmu pada prototipe kilogram yang akan tetap disimpan di BIPM. Enam satuan lainnya sudah terbebaskan dari ketergantungan pada batang meter di BIPM (untuk meter), dan sudah dapat ditangani sendiri oleh masing-masing negara, sejauh sempat dan berkemampuan peralatan eksperimentalnya. Setiap negara anggota Konvensi Meter menjadi bebas untuk menciptakan dan merancang eksperimen dan prosedur dalam merealisasi satuan-satuan S.I. itu. Diperkirakan bahwa dengan terus berkembangnya ilmu dan teknologi, kreativitas dan meningkatnya tingkat ketelitian ilmu

dan teknologi akan membukakan jalan menuju makin teliti, yaitu makin banyak angka penting yang mampu diukur tentang suatu satuan. Tentu saja hal ini tidak akan berpengaruh pada kebutuhan di pasar dan toko, ataupun di praktikum Fisika Dasar yang ketelitian pengukuran massanya hanya sampai ~100 mikrogram, ataupun penelitian yang terbatas tingkat ketelitiannya, tetapi akan penting dalam makin canggihnya kemampuan ilmu dan teknologi manusia. Misalnya dapat saja (dan sudah juga terjadi) digunakan atom lain yang frekuensi pancarannya dapat terukur dengan lebih teliti daripada bagi Cesium-133. Tetapi lalu peralatan canggih itu kalau diterapkan pada Cesium-133, disyaratkan harus menghasilkan bilangan bagi frekuensi gelombang radio $\Delta\nu_{Cs}$ tepat seperti terdefinisi tersebut di atas, yaitu 9 192 631 770 000 000 Jadi definisi detik sejak 20 Mei 2019 nanti akan dapat bertahan sepanjang segala jaman.

Khusus bagi prototipe internasional kilogram (IPK), selain para duplikat yang disimpan masing-masing negara anggota Konvensi Meter (di Indonesia disimpan di Direktorat Metrologi di jalan Pasteur 27, Bandung), IPK sendiri akan mulai dapat diamati bagaimana berubahnya terhadap nilai 1 kilogram yang per definisi dimilikinya pada tanggal 20 Mei 2019. Dengan demikian terbebaskanlah manusia dari definisi kilogram sejak tahun 1889, yang memperlakukan IPK sebagai benda khusus yang tidak dapat berubah massanya dari 1 kg. Hal ini akan makin tidak masuk akal sekiranya definisi kilogram tidak diubah pada 20 Mei 2019 nanti.

Jika suatu saat manusia sempat berkomunikasi dengan makhluk cerdas lain di jagad raya ini, setidaknya tetapan $\Delta\nu_{Cs}$, c , h , e , N_A , dengan mudah dapat dikonversi ke nilai yang dikenal oleh makhluk cerdas tersebut. Tetapan teknis lainnya: k , K_{cd} hanya akan mereka kenali kalau mereka mengenal air dan mata “normal” manusia.

BEBERAPA SEGI METAFISIKANYA

Istilah “metafisika” telah memperoleh beberapa macam makna di lingkungan Fisikawan, dari yang rasional sampai yang irasional. Penulis menggunakannya dalam arti yang menjunjung tinggi rasionalitas, selaras dengan sikap ilmu filsafat, dengan merelakan digunakannya hipotesis atau kesimpulan yang tidak/belum dapat diukur secara kuantitatif. Artinya, yang menggunakan metode ilmiah, dengan hanya melonggarkan syarat “harus dapat diukur”nya saja.

Sebagai bandingan, dikutip dari Wikipedia, ensiklopedia *online*-daring-“dalam jaringan” yang gratis karena dibangun bersama oleh sukarelawan-wati sedunia yang rela menyumbangkan pengetahuan ilmiahnya secara gratis:

Metafisika [1k] adalah cabang filsafat yang meneliti hakekat dasar realitas, termasuk hubungan antara pemikiran-abstrak dan materi alamiah, antara esensi-hakekat dan ciri-inderawi, dan antara kemungkinan dan kebenaran-aktualitas. Kata “metafisika” berasal dari rangkaian dua kata Yunani yang arti harfiahnya adalah, “setelah atau di balik atau di sela-sela penelitian tentang alam”. Ada dugaan bahwa istilah ini diciptakan seorang perakit tulisan abad pertama Masehi, yang menghimpun berbagai tulisan pendek Aristoteles (384-322 sM), seorang filosof termasyhur dan guru Iskandar Agung dari Makedonia, menjadi tulisan terpadu yang disebutnya “ta meta ta phusika”, “setelah Fisika”, “metafisika”. “Fisika” adalah salah satu tulisan hasil filsafati Aristoteles itu. Metafisika meneliti pertanyaan tentang syarat keberadaan sesuatu, dan keberadaan itu ada berapa banyak jenisnya. Metafisika mencoba menjawab secara abstrak dan seumum mungkin, pertanyaan “Apa saja yang dapat ada?”, “Apa saja hakekat/sifat hakikinya?” Topik yang diteliti metafisika mencakup ihwal keberadaan, obyek dan sifat-sifatnya, ruang dan waktu, sebab dan akibat, dan makna istilah “kemungkinan”.

Metaphysics is the branch of philosophy that examines the fundamental nature of reality, including the relationship between mind and matter, between substance and attribute, and between possibility and actuality.^[1] The word "metaphysics" comes from two Greek words that, together, literally mean "after or behind or among the [study of] the natural". It has been suggested that the term might have been coined by a first century CE editor who assembled various small selections of Aristotle's works into the treatise we now know by the name Metaphysics (*ta meta ta phusika*, 'after the Physics', another of Aristotle's works).^[2]

Metaphysics studies questions related to what it is for something to exist and what types of existence there are. Metaphysics seeks to answer, in an abstract and fully general manner, the questions:^[3]

What *is there*? What *is it like*? Topics of metaphysical investigation include existence, objects and their properties, space and time, cause and effect, and possibility.

Segi metafisika yang tampak tersirat dalam redefinisi satuan SI di atas adalah misalnya:

1. Tetapan alamiah c , h , e diasumsikan memang tetap, sekedar karena sejak awal jagad raya, sejauh teramati, selama usianya yang $\sim 13,8$ gigatahun, semua hasil pengamatan dan hasil penalaran ilmiah konsisten dengan asumsi tetapnya ketiga tetapan alamiah itu. Padahal sebenarnya tidak ada jaminan apapun, bahwa nilai ketiga tetapan alamiah itu memang untuk selamanya, atau setidaknya untuk misalnya satu jam, pasti tetap.

2. Selaras dengan itu, juga tersirat kepercayaan, atau asumsi, bahwa semua hukum alam yang telah ditemukan berlaku sejak awal terjadinya jagad raya ini, akan tetap berlaku seterusnya.

Hal metafisis lain, yang jelas tidak/belum dapat diukur kepastiannya, adalah apakah keteraturan jagad raya ini, dalam arti keberadaan aturan alam yang telah ditemukan atau disimpulkan oleh manusia, memuat suatu pesan atau niat, ataukah semua aturan itu hanya kebetulan muncul tanpa ada yang mengaturnya? Templeton Foundation, yang didirikan [11] oleh ahli investasi dan filantrop John Templeton (1912-2008), mendanai bagaimana menerapkan metode ilmiah untuk meneliti hal ihwal spiritual, dan juga pernah mempublikasikan "*Big Questions*" seperti "Adakah tujuan dalam jagad raya ini?" dan "Apakah Ilmu membuat konsep 'Allah' menjadi usang?" Jawab yang dihimpun Templeton Foundation itu dari ~ 12 ahli dari berbagai bidang adalah, $\sim 1/3$ berpendapat "pasti ada tujuan", $\sim 1/3$ "pasti tidak ada tujuan", dan $\sim 1/3$ lagi "mungkin saja ada". Jadi tak ada kesepakatan ke arah salah satu pendapat/hipotesis itu.

Suatu hipotesis yang ingin diajukan adalah, bahwa kalau diteliti berbagai aturan/hukum alam yang telah ditemukan manusia, suatu kesimpulan yang lebih bermakna adalah bahwa semua itu merupakan suatu rencana dan rancangan yang disusun oleh suatu kemampuan yang maha pandai, dan bukannya hanya ada begitu saja tanpa tujuan dan arah. Ini kiranya jelas suatu hipotesis metafisika, karena tidak akan pernah dapat dibuktikan kebenarannya secara kuantitatif. Akan tetapi memilih hipotesis kebalikannya, bahwa jagad raya ini hanya begitu saja ada tanpa diatur, terasa lebih hambar dan nihilis, kurang memuaskan bagi seorang manusia yang ingin tahu secara makin mendalam dan bertanya terus "mengapa?"

Suatu hipotesis metafisika yang bersambung pada hipotesis metafisika pertama di atas, "ada perancang, ada tujuan dalam jagad raya ini" adalah, "metode ilmiah yang tersirat-dibenarkan oleh perilaku jagad raya ini, merupakan metode yang dilatihkan oleh Sang Pencipta jagad raya ini, untuk mendalami hal ihwal spiritualitas atau dunia tak terukur yang membentang di balik dunia nyata jagad raya ini".

Suatu hipotesis-serta yang tersirat dalam hipotesis optimis di atas adalah, bahwa "melalui keingintahuannya mengamati, menalar, dan menguji realitas melalui metode ilmiah, manusia diajak untuk berani makin dalam bernalar dan menguji, meskipun terpaksa tanpa dapat mengukurnya sebagai kendali, menuju meraih kebenaran hakiki di balik seluruh jagad raya nyata ini.

Kiranya dapat terlihat, betapa metode ilmiah yang diperoleh melalui jagad raya ini, dapat mengarahkan diri kita untuk berpikir dan bernalar makin dalam, memberanikan diri mendekati realitas terdalam yang tampaknya terkandung dalam konsep "Allah" yang telah lama ditemukan oleh manusia. Tetapi tetaplah perlu disadari, bahwa status pernyataan-pernyataan ini adalah hipotesis, yang tidak dapat dibuktikan kebenarannya secara ilmiah.

Yang masih dapat dihipotesiskan adalah bahwa konsep "konsistensi" semoga masih terus dapat dieberlakukan.

KESIMPULAN

Melalui pertimbangan tentang satuan-satuan, yang baru saja telah ditumpukan pada kepercayaan bahwa beberapa tetapan alam seperti tetapan laju rambat cahaya dalam hampa, tetapan Planck, dan tetapnya muatan listrik dasar sebuah elektron dan sebuah proton, memang benar-benar untuk seterusnya akan tetap, penalaran dengan kata "mengapa" akan dapat menuntun pemikiran ke arah makna yang mungkin tersirat di balik keberadaan jagad raya ini. Keterbukaan dan keberanian menalar dan menguji diri kita sebagai profesional dalam Fisika, dan ilmu lain apapun, kiranya dapat menuntun kita ke pemahaman dan pemaknaan yang makin dalam tentang jagad raya ini, asalkan kita percaya bahwa Tuhan itu terlalu Maha Pandai dan Maha Bijaksana serta Maha Baik, sehingga pasti tidak akan pernah sampai terganggu apalagi tergugurkan oleh temuan-temuan metafisika manusia ciptaanNya ini. Alternatifnya adalah bahwa kita memanjakan kemalasan berpikir kritis dengan alasan "tidak mau mempertanyakan kebijaksanaan Tuhan".

Maka suatu saran yang muncul dari telaahan makalah ini adalah, untuk makin mengagumi karya besar Pencipta jagad raya ini, dengan cara mengerahkan kemampuan pengamatan dan penalaran kita semaksimalnya, sebagai suatu penghargaan akan anugerah Sang Pencipta yang sedemikian hebatnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Katolik Parahyangan, Bandung, atas dukungan finansialnya pada penelitian ini. Terima kasih juga diucapkan kepada Panitia Seminar Kontribusi Fisika (SKF) 2018, atas persetujuan dan penjadwalannya bahwa makalah ini dapat dipresentasikan di kelas paralel A sebagai presentasi pertama. Penulis juga berterima kasih kepada para penanya sesuai presentasi, yang telah membantu memperjelas rumusan dalam makalah ini.

REFERENSI

1. Wikipedia (2018). [https://en.wikipedia.org/wiki/\[kata_kuncinya\]](https://en.wikipedia.org/wiki/[kata_kuncinya]), dengan kata kunci:
 - a. History_of_the_metric_system
 - b. Metric_system
 - c. Metric_Convention
 - d. Platinum
 - e. Sexagesimal
 - f. Brian_Josephson
 - g. Klaus_von_Klitzing
 - h. Kilogram
 - i. Avogadro
 - j. Candela
 - k. Metaphysics
 - l. John_Templeton_Foundation
2. CGPM ke 26, Konvokasi (2018). Draft Resolusi D, hlm 36 (bahasa Inggris). 21 Desember 2018 <https://www.bipm.org/utils/en/pdf/CGPM/Convocation-2018.pdf>
3. CGPM ke 26 (2018). Berkas untuk para wartawan. 21 Desember 2018 <https://www.bipm.org/utils/en/pdf/CGPM-Press-Kit.pdf>
4. A Rusli, "For Science and Scientific Awareness: The Volt Unit and the Alternating Current Josephson Effect", Proceedings 3rd Jogja International Conference on Physics 2012, UGM, pp 157-161, <http://www.jipcugm.ac.id/2012/>
5. A Rusli, "Untuk Kesadaran Ilmu dan Ilmiah: Satuan Hambatan Ohm dan Efek Hall Kuantum", Prosiding Simposium Nasional Inovasi dan Pembelajaran Sains (SNIPS) 2012, ITB, hal 9-12;
A Rusli, "Demi kesadaran dan literasi sains: Berkembangnya definisi satuan ohm, yang berujung ke gejala Hall kuantum, dengan suatu segi metafisika", Prosiding Seminar Kontribusi Fisika, ITB, Bandung (2015) hal 46-53; A Rusli, "Untuk Kesadaran Ilmu dan Ilmiah: Satuan Hambatan Ohm dan Efek Hall Kuantum", Prosiding Simposium Nasional Inovasi dan Pembelajaran Sains (SNIPS) 2012, ITB, hal 9-12
6. A Rusli, "Asal usul dan rencana pengembangan Sistem Internasional (S.I.)", Prosiding Seminar Nasional Fisika (SNF) 2011, PP Fisika-LIPI, Serpong, hal 774-481