

Untuk Penyadaran Ilmu dan Cara Ilmiah: Jenis Energi Terbarukan Berupa Sel Listrik Americium-242m

Aloysius Rusli

Jurusan Fisika, FTI S, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung 40141

arusli@unpar.ac.id

Sebagai suatu alternatif tambahan bagi jenis sumber energi terbarukan, makalah ilmiah tahun 2012 dalam jurnal Complexity, oleh Eric Shinn dkk, dari University of Illinois at Urbana-Champaign, dirujuk sebagai gagasan yang menarik, walaupun masih ada sejumlah masalah teknis yang perlu diatasi. Konsep yang digunakan, yang tampaknya agak diilhami oleh penelitian Henry Moseley (1887-1915), fisikawan Inggris yang mengukuhkan konsep “nomor atom”, adalah mengkonversi energi kinetik 5,6 MeV pancaran partikel alfa dari isotop radioaktif sintetis Americium-242, menjadi energi potensial listrik. Hal itu dilakukan dengan melewatkan partikel alfa itu pada susunan seri kapasitor-nano, yang terbuat dari tumpukan 5 600 lembaran monoatomik grafena, dengan tebal total 2,8 milimeter, yang diberi medan listrik 1 GV/m untuk menghentikan partikel alfa tersebut. Hasilnya adalah bahwa partikel alfa itu mengambil elektron dari grafena, dan menjadi gas atom Helium yang netral. Kekurangan elektron yang terjadi dalam rangkaian listrik berkapasitor-nano itu, lalu dapat menimbulkan arus listrik. Hasil perhitungannya meramalkan dapat dihasilkannya daya listrik 34 mW jika Americiumnya berjumlah 1 curie (= 37 gigabecquerel). Dalam makalah ini hendak ditunjukkan bagaimana gagasan ini dapat dipahami dengan beberapa konsep Fisika Dasar, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai ilustrasi yang mengaitkan hasil penelitian dengan materi kuliah Fisika Dasar. Hal ini dipandang bermanfaat untuk lebih mendekatkan dunia penelitian fisika dengan dunia pendidikan fisika dasar, dan membina semangat kreativitas dan sikap memecahkan masalah, kekhasan manusia dalam menanggapi kecerdasan buatan robotik.

Kata kunci: energi terbarukan, radioaktivitas, sel listrik

PENDAHULUAN

Ketika sedang mendalami ihwal energi baru dan terbarukan, yang akhir-akhir ini agak banyak dilaporkan di koran, ditemukan rujukan tentang energi terbarukan dari gejala nuklir, yang disebut juga sebagai sel listrik nuklir, *nuclear electric cell*. Rujukan pertama itu adalah makalah ilmiah yang hanya 4 halaman, tulisan Eric Shinn dan 5 kawannya yang mencakup profesornya, semuanya beralamat di Department of Physics, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois 61801. Makalah itu terpublikasi pada tahun 2012, yang setahun kemudian terpublikasi pula di *online library* Wiley [1]. Gagasan yang diuraikan dalam abstraknya, menimbulkan niat untuk melaporkan isinya sebagai suatu ilustrasi bagi kuliah Fisika Dasar. Ketika kemudian dapat diperoleh makalah lengkapnya dari penulis pertama makalah ilmiah itu, melalui penelusuran melalui www.google.com dan www.scholar.google.com, niat itu makin terkukuhkan untuk mengontribusikan gagasan ini bagi pembelajaran Fisika di kuliah Fisika Dasar.

Hal ini dipandang penting, untuk menunjang motivasi pada peserta kuliah untuk membaca makalah ilmiah, dan menyadari bagaimana penggunaan konsep fisika oleh peneliti Fisika. Selain ini diharapkan menambah kesadaran tentang makna yang tersirat dalam berbagai aturan Fisika yang ditemukan, juga diharapkan ini akan meningkatkan kesadaran tentang cara menggunakan cara ilmiah dalam hidup sehari-hari. Hal terakhir ini diharapkan akan menjadi perbedaan yang makin esensial antara sebuah robot atau kecerdasan artifisial, dengan seorang manusia.

Kemudian sebagai suatu catatan akhir, dikemukakan suatu pendalaman atau renungan tentang konsep energi versus konsep gaya oleh muatan listrik, selain juga suatu renungan tentang bagaimana peran seorang manusia, dalam hal ini Henry Moseley [2], dapat berdampak luas asalkan kehidupannya tidak diakhiri terlalu cepat.

SEL LISTRIK NUKLIR

Penelusuran rujukan tentang sel listrik nuklir ini menunjukkan peran berkepanjangan profesor Yigal Ronen dari *Department of Nuclear Engineering*, Ben-Gurion University di Beer-Sheva, Israel. Laporan pertamanya ditemukan dalam Prosiding pertemuan himpunan profesi *Israel Nuclear Society* pada 21-22 Desember 1987, yang diselenggarakan tidak lama setelah musibah nuklir di Chernobyl, Ukraina, 26 April 1986. Laporan Ronen ini [3], melaporkan pentingnya unsur radioaktif sintesis Americium-242m (tanda m ini menunjukkan sifat metastabil, artinya tingkat energinya berwaktu-luruh cukup panjang sebelum turun ke tingkat energi dasar/selanjutnya). Radioaktivitas ini dapat menghasilkan energi listrik. Akan tetapi konversi energi yang dibahas masih terbatas pada cara termal, yaitu mengonversi energi kinetik produk fisi menjadi energi kinetik molekular ataupun energi termal (*thermal energy*), yang dirasakan sebagai peningkatan suhu. Tingginya suhu yang dapat diraih, lalu digunakan menghasilkan uap air, yang ditiupkan menggerakkan turbin generator listrik. Penggunaan suhu ini menjadikannya terkendala oleh aturan yang ditemukan sejak abad ke 19 oleh Kelvin, Planck, Clausius berupa Hukum Kedua Termodinamika, yang membatasi efisiensi mesin kalor (dan mesin pendingin serta pompa kalor), menjadi bergantung pada beda suhu yang digunakan. Baru ketika Ronen melaporkannya lagi tahun 2007, ~30 tahun kemudian [4], mulai terbaca uraiannya tentang “cara langsung, konversi langsung, *direct charging, direct conversion*”, mengonversi energi kinetik produk fisi langsung menjadi energi potensial listrik, tanpa tahap antara berupa energi termal, sehingga dapat menghindari pembatasan oleh Hukum II Termodinamika.

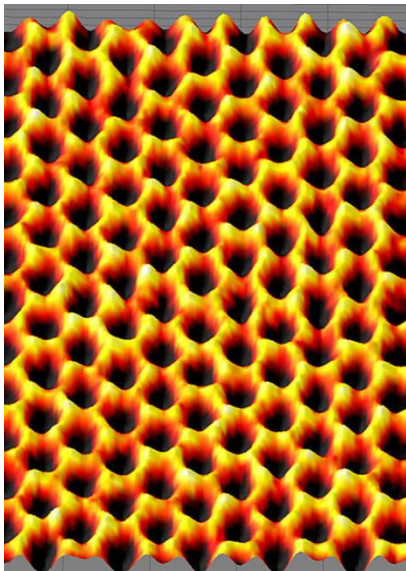
KONSEP KONVERSI ENERGINYA

Sederhananya konsep konversi langsung tersebut, membuka peluang menggunakan cara “langsung” ini sebagai ilustrasi dalam kuliah Fisika Dasar dan sebagainya. Produk fisi berupa partikel alfa oleh bahan radioaktif, berenergi kinetik tinggi, Americium -242 menghasilkan 80% berenergi kinetik 5,16 MeV (~800 femtojoule; femto = $f = 10^{-15}$) per partikel alfa, yang dapat dikonversi menjadi energi potensial listrik, sekedar dengan melewati partikel alfa itu dalam suatu medan listrik berarah berlawanan, antara dua keping kapasitor. Setelah partikel menjelang tiba di keping bermuatan listrik positif, partikel ini dapat dengan mudah dinetralkan dengan menyerap elektron yang tersedia di keping kapasitor itu. Kekosongan elektron yang diakibatkan, lalu menimbulkan gerak mengalirnya arus elektron dalam kawat konduktor rangkaian listrik yang mencakup kapasitor itu. Gagasan ini sebenarnya sudah disadari oleh Henry Moseley (1887-1915) di Universitas Manchester dan Oxford pada tahun 1913 [2]. Moseley sempat memperoleh beasiswa untuk dididik dalam *public school* elit Eton, meraih gelar Bachelor of Science nya di Universitas Oxford, lalu melamar ke Manchester ke bawah bimbingan Ernest Rutherford (1871-1937). Rutherford ketika itu belum terlalu terkenal dengan kesimpulannya pada tahun 1911 bahwa dari sebaran terpentalnya partikel alfa pada selaput emas, dapat dihitung bahwa mestinya di tengah atom terkumpul muatan listrik positif yang cukup kuat, ada suatu “inti atom positif”. Yang lebih membuatnya dikenal adalah, temuan bahwa partikel alfa yang dikumpulkannya ke dalam botol kosong, ternyata kemudian lenyap tetapi tergantikan oleh gas Helium yang netral akibat merebut dua elektron per partikel alfa dari atom-atom kaca botol! Untuk temuan ini Rutherford dianugerahi Hadiah Nobel bagi ilmu Kimia pada tahun 1908, yang menghasilkan komentar Rutherford, “saya kurang paham ilmu kimia, tapi diberi Hadiah Nobel untuk ilmu kimia!”. Moseley diberi tugas menjadi semacam asisten responsi (*teaching assistant*) oleh Rutherford, sambil ikut membantu penelitian Rutherford tentang partikel alfa itu. Yang terlapor pada tahun 1913 oleh Moseley [2], yang dibacakan oleh Rutherford dalam pertemuan *Royal Society* di London (karena Moseley bukan anggota himpunan elit berbagai orang ahli itu), dalam upayanya menghentikan partikel beta dengan mempertahankan potensial listrik positif yang ditinggalkan partikel beta yang bermuatan listrik negatif itu, adalah bahwa potensial 150 kilovolt yang dicapainya, belum mampu menghentikan partikel beta. Selain itu Moseley juga menyadari bahwa dia selain telah berhasil memperoleh suatu beda potensial listrik sebesar 150 kV, untuk ukuran bola kaca ~cm, juga bahwa partikel beta itu bagaikan suatu arus listrik, sehingga dapat disimpulkan bahwa telah dihasilkan suatu daya listrik oleh beda potensial listrik yang tinggi, meskipun arus listriknya relatif kecil. Temuan ini kemudian disadari dapat dimanfaatkan. Setelah Moseley juga menemukan melalui penggunaan sinar Röntgen atau sinar X (karena tak dikenali asal usul sinar itu) pada

keping-keping logam, bahwa konsep “nomor atom” lebih esensial daripada konsep nomor massa, untuk mengurutkan para unsur, Moseley menolak diperpanjang tugasnya, untuk kembali ke Oxford meneruskan pendalaman penelitiannya tentang atom. Maka gagasan tersedianya daya listrik, harus menanti sadarnya Ronen akhirnya, dengan pelaporannya pada tahun 2007 itu. Eric Shinn tampaknya kemudian memanfaatkan temuan baru tentang grafena untuk sel listrik nuklir itu.

GRAFENA

Grafena ini sebenarnya sudah dikenal sebagai selaput-selaput bertebal satu atom karbon, yang dalam grafit membentuk lapisan-lapisan yang bertumpuk-tumpuk, yang sebagai isi pensil tergesek dan tertinggal di atas



kertas saat grafit dipakai untuk menulis di atas kertas [5]. Yang tidak diduga adalah, bahwa mengelupaskan sebuah selaput-setebal-satu-atom karbon, yang kemudian disebut “grafena” tidak terlalu sulit. Untuk temuan pengelupasan menjadi selaput-selaput individual grafena itu pada tahun 2004, dua penemunya, Sir Andre Konstantin Geim (1958-kini) dan Sir Konstantin Sergeevich Novoselov (1974-kini), memperoleh Hadiah Nobel Fisika pada tahun 2010 “untuk terobosan-awal eksperimental tentang material dimensi-dua grafena”. Geim semula lulus taraf PhD di Rusia, akhirnya menemukan grafena dalam penelitiannya di University of Manchester, lalu menjadi seorang Royal Society Research Professor; Novoselov lahir di Rusia, memperoleh PhD di Belanda di bawah bimbingan Geim, mengikutinya ke Manchester, kini di *Centre for Advanced 2D Materials*, National University of Singapore sejak 2019.

Grafena bertebal 1 atom karbon $\sim 0,335$ nm; jarak antar atom C bersusun heksagonal dalam selaput dimensi-2 itu $\sim 0,142$ nm. Suatu foto dengan cara SPM (*Scanning Probe Microscopy*) mudah diperoleh, misalnya di

<https://www.flickr.com/photos/armymaterielcommand/6795812766>, 29 Februari 2012.

Lalu ditemukan bahwa kapasitor dengan keping-keping berupa selaput grafena, mampu menanggung medan listrik sampai setinggi 1 gigavolt per meter, jauh di atas temuan Moseley [2] bahwa vakum saja hanya dapat menanggung medan listrik ~ 150 kV per cm atau ~ 15 MV/m; kesimpulannya: “Vakum “bocor” pada ~ 150 kV, untuk jarak \sim cm; dan energi kinetik partikel β ternyata amatlah besar karena tetap dapat lolos dari nilai potensial setinggi itu”.

KAPASITOR-NANO GRAFENA

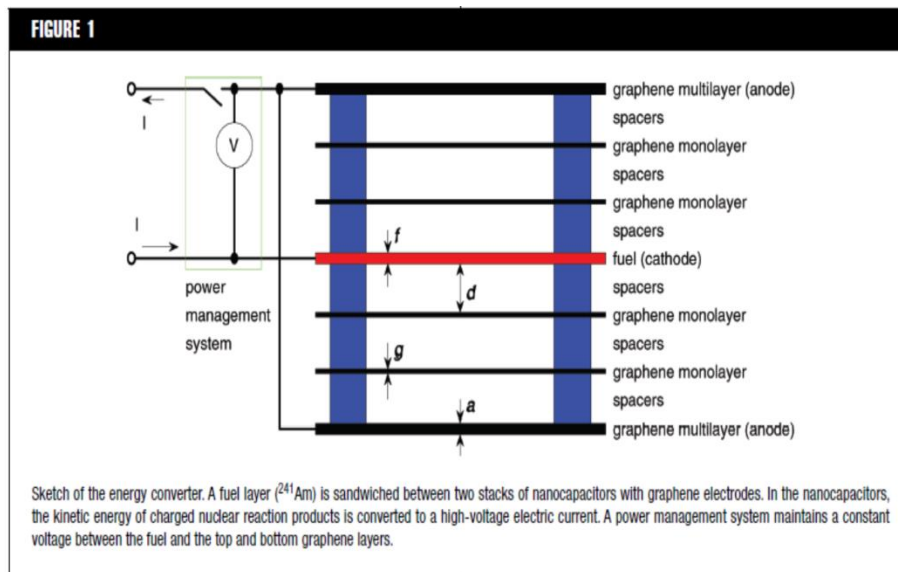
Rupanya sempitnya celah antara dua selaput grafena, $\sim 0,3$ nm, dapat mencegah terjadinya efek berantai lepasnya elektron yang lalu berantai menghasilkan ionisasi atom-atom yang terdapat antara kedua selaput grafena itu. Penyadaran tentang kekuatan dielectric grafena inilah yang menimbulkan gagasan menggunakan grafena sebagai susunan kapasitor seri yang terdiri atas 5 000an kapasitor-nano, untuk menghentikan partikel alfa itu, tanpa menimbulkan “bocor”nya vakum antar selaput grafena. Lahirlah konsep “sel listrik nuklir (*nuclear electric cell*)” untuk konversi “langsung” energi kinetik partikel alfa, menjadi energi potensial listrik, yang disertai arus listrik, sehingga tersedianya daya listrik untuk mengalir rangkaian listrik, tanpa perlu memutar turbin raksasa lagi, seperti pada reaktor nuklir-termal konvensional.

Kapasitor-nano ini juga memiliki permitivitas relatif $\sim 6,9$, menunjukkan kapasitas menampung muatan listrik yang besar. Shinn menyimpulkan bahwa suatu rangkaian seri kapasitor-nano setebal @ 500 nm, sebanyak $2,8$ mm/ $0,5$ μ m = 5 600 buah akan memadai bagi suatu sel listrik nuklir.

GAGASAN KONVERSI LANGSUNG ENERGI KINETIK

Gagasan konversi langsung energi kinetik Shinn ini digambarkannya sebagai berikut [1]:

Diperlukan selapis tipis, $\sim 1 \mu\text{m}$, bahan Americium-242m ($Z = 95$; Shinn mengandaikan penggunaan Americium-241), sebagai sumber energinya, “bahan bakar”nya, yang menghasilkan pancaran partikel alfa ke



atas dan ke bawah berenergi kinetik $\sim 5,6 \text{ MeV}$. Ketipisan ini perlu, agar partikel alfa itu jangan terlalu banyak kehilangan energi kinetik sebelum sempat ke luar dari selaput tipis itu.

Lalu dipasang di atas maupun di bawah selaput bahan bakar itu sebanyak $\sim 5\,600$ ribuan selaput grafena bertebal $g \sim 0,3 \text{ nm}$ itu, sebagai kapasitor-nano yang dipasang seri, dengan celah antar grafena $d \sim 500$

nm. Sekat antar selaput grafena ini menggunakan bahan silicon yang cukup besar resistivitas listriknya. Jadi ketebalan grafena ke atas dan ke bawah $\sim 2,8 \text{ mm}$, totalnya $\sim 5,6 \text{ mm}$. Tampaknya celah selebar itu masih dapat menghasilkan kuat dielektrik $\sim 1 \text{ GV/m}$. Bandingkan ini dengan kuat dielektrik vakum bertekanan 100 mPa sampai 100 nPa (disebut “High Vacuum”) yang kuat dielektriknya $\sim 20\text{-}40 \text{ MV/m}$ [6], dan kuat dielektrik intan (2 GV/m) [7].

Sebagai elektroda positif (anoda) rangkaian kapasitor itu, di atas dan di bawah susunan tersebut dipasang grafena berlapis ~ 10 selaput, untuk dapat menahan gerak sisa partikel alfa setelah menembus tumpukan kapasitor nano itu. Dua anoda itu dihubungkan dengan beda potensial listrik konstan $\sim 2 \text{ MV}$. Dalam anoda ini, partikel alfa dapat merebut dua elektron dari grafena untuk menjadi atom Helium netral, yang lalu mengalir pergi berupa gas Helium. Kekosongan dua elektron itu kemudian dapat diisi elektron lain dari rangkaian listrik melalui sumber beda potensial listrik tersebut, menjadikan suatu arus listrik konstan.

Jadi energi kinetik partikel alfa saat ke luar dari selaput bahan bakar di tengah yang berperan sebagai katoda, terubah menjadi energi potensial listrik ketika partikel alfa itu tiba di anoda, sambil berupa suatu arus listrik konvensional yang mengalir dari katoda ke anoda. Arus listrik ini kemudian dibawakan oleh aliran elektron tersebut di atas, dalam rangkaian yang melalui sumber beda potensial listrik $\sim 2 \text{ MV}$ itu, di luar grafena ini. Sebuah partikel alfa berenergi kinetik $5,6 \text{ MeV}$, karena bermuatan listrik $2e$, akan memerlukan $2,8 \text{ MV}$ untuk menghentikannya, sambil memperoleh energi potensial listrik $5,6 \text{ MeV}$.

Selanjutnya, agar kuat dielektrik $\sim 1 \text{ GV/m}$ jangan terlampaui, beda potensial $2,8 \text{ MV}$ itu perlu merentang sejauh $2,8 \text{ MV} / 1 \text{ GV/m}$ menjadi jarak $2,8 \text{ mm}$. Inilah alasan mengapa ketebalan tersebut di atas perlu setebal $\sim 2,8 \text{ mm}$. Maka dapat disimpulkan bahwa sel listrik nuklir ini memerlukan beda potensial $2,8 \text{ MV}$ tersebut.

HAL ARUS DAN DAYA LISTRIK DARI PARTIKEL ALFA

Untuk menghitung arus listrik yang mengalir dari katoda ke anoda tersebut di atas, dapat dicatat bahwa Shinn mengandaikan bahwa sel bahan bakar Americium yang memancarkan partikel alfa dengan energi kinetik sebesar $5,6 \text{ MeV}$ itu, memancarkan 1 curie (radio)aktivitas, artinya dalam satuan Sistem Internasional (S.I.) = 37 gigabecquerel (GBq , $= /s$), artinya Americium ini memancarkan 37 partikel alfa per detik. Karena satu partikel alfa bermuatan listrik $2e = 3,2 \times 10^{-19} \text{ C}$, artinya 1 Ci bahan Americium ini memancarkan arus listrik $37 \times 10^9 \times 3,2 \times 10^{-19} \text{ ampere} = 12 \text{ nanoampere}$ (nA).

Maka daya listrik yang dihasilkan oleh 1 curie radioaktivitas Americium adalah, $= I \Delta V = 12 \text{ nA} \times 2,8 \text{ MV} = 33,6 \text{ mW}$ atau lebih realistis $\sim 34 \text{ mW}$.

Menembus setiap selaput grafena ternyata dari rujukan yang digunakan Shinn [1] menyusutkan energi kinetik (disebut “stopping power”) $\sim 150 \text{ eV/nm}$, khusus untuk rentang energi kinetik $\sim 5,6 \text{ MeV}$ itu.

Maka 5 600 selaput grafena menyusutkan energi kinetik itu sebanyak $\sim 5\,600 \times 0,3 \text{ nm} \times 150 \text{ eV} \sim 252 \text{ keV}$ $\sim 5\%$ energi kinetik partikel alfa itu. Karena itu, jumlah selaput grafena perlu dibatasi, tetap sambil tetap menjaga ketinggian kuat dielektrik $\sim 1 \text{ GV/m}$ tersebut.

SUMBER RADIOAKTIF AMERICIUM

Selanjutnya dicatat sedikit ihwal Americium ini. Unsur ini merupakan hasil / "sampah" radioaktif dari reaktor nuklir konvensional. Unsur Uranium yang menghasilkan neutron cepat, U-238 jika menyerap neutron, akan meluruh dengan memancarkan partikel beta, selain memancarkan sinar gamma untuk menurunkan tingkat energi nuklirnya, menjadi plutonium Pu-239. Peluruhan dengan cara sama, akan mengubah Plutonium ini menjadi Americium Am-241, yang berwaktu-paruh 432,2 tahun. Selanjutnya 10% proses peluruhan dengan cara sama, selanjutnya menghasilkan isotop metastabil Am-242m yang berwaktu-paruh 141 tahun. Isotop terakhir inilah yang oleh Y. Ronen [3, 4] disebut sebagai calon sel bakar sel listrik nuklir yang penting. Peluruhan selanjutnya akan menghasilkan Neptunium Np-238 (0,459%), yang lalu meluruh menjadi Plutonium Pu-238 yang lalu meluruh menjadi Uranium U-234. Akhirnya memang peluruhan ini berhenti pada timbal Pb. Yang menjadi salah satu masalah bagi Americium ini adalah biayanya, akibat proses pemisahan-pemurniannya memerlukan reaksi kimia dan fisika yang kompleks.

Sejak awal ~ 1962 , harga Am-241 $\sim 1,5 \text{ kiloUS\$}$ ($\sim 21 \text{ MRp}$) per gram, karena proses isolasi kompleks ini. Selanjutnya 10% akan menjadi Am-242m yang lebih kuat pancaran partikel alfa tersebut.

KONSEP ENERGI VERSUS KONSEP GAYA OLEH MUATAN LISTRIK

Dari uraian di atas, kiranya tampak bahwa kalau digunakan konsep "gaya" untuk membahas gerak partikel alfa, dapat disimpulkan bahwa setelah mengalami gaya hambat konservatif oleh medan listrik $\sim 1 \text{ GV/m}$ yang berlawanan arah dengan gerak partikel alfa ini, tiba-tiba partikel alfa ini menjadi atom Helium yang netral, dan gaya-hambat itu lenyap. Dapat timbul pertanyaan, ke mana energi potensial listrik partikel alfa itu berpindah.

Sebaliknya, jika konsep energi digunakan untuk membahas peristiwa sel listrik nuklir ini, dapat ditunjukkan konversi energi kinetik menjadi energi potensial listrik, yang dapat dikatakan tersimpan dalam ruang antar-elektroda, yang lalu menggerakkan para elektron mengalir dalam rangkaian listrik.

Hal ini dapat mengkontraskan perbedaan antara pembahasan yang membatasi diri pada gaya dan medan listrik saja, dengan pembahasan yang bertumpu pada konsep energi. Masing-masing cara memiliki manfaatnya sendiri, dan fleksibilitas dalam beralih dari cara yang satu ke cara yang lain dapat dijadikan bahan renungan yang kiranya akan bermakna dan bermanfaat dalam memahami Fisika.

SEGI HUMANITAS HENRY MOSELEY

Satu segi kemanusiaan yang juga dapat disentuh adalah riwayat hidup Henry Moseley. Sebagian sudah dikemukakan di atas, dan di sini dapat ditinjau sambungannya, yaitu setelah penolakan Moseley untuk tetap berkarya di bawah Ernest Rutherford, karena rupanya lebih ingin kembali ke Alma Maternya di Universitas Oxford, untuk lebih berfokus pada penelitian tentang sifat atom dan inti atomnya serta sinar X nya.

Akan tetapi lalu dimulainya Perang Dunia Pertama tahun 1914, membuat Moseley meninggalkan niatnya itu, untuk memenuhi panggilan berkarya sebagai tentara Inggris yang ditujukan kepada semua pria muda yang bertubuh fisik memadai. Dia ditugaskan dalam satuan teknik, dan pasukannya dikirim ke daerah Gallipoli di perbatasan wilayah Turki dengan Eropah. Di situ ternyata dia terakhir hidupnya saat bertelepon dalam rangka tugasnya, tertembak di kepala oleh tentara lawannya.

Kematiannya ini disesalkan oleh banyak ahli fisika, termasuk Ernest Rutherford dan Isaac Asimov, yang mengatakan bahwa satu kerugian terbesar yang dihasilkan Perang Dunia I itu adalah terhentinya karya fisika Moseley. Satu hasil positif yang diperoleh adalah, bahwa Inggris lalu mengubah aturan perekrutannya, dengan menambahkan pertimbangan keahlian untuk memberi dispensasi bertempur pada pria muda.

Satu spekulasi lain adalah, mengapa Hadiah Nobel Fisika (dan Kimia) pada tahun 1916 dinyatakan tidak ada. Padahal Hadiah Nobel Fisika di tahun sebelum dan sesudah 1916, diberikan kepada Max von Laue (1914) untuk temuan difraksi sinar X, dan ayah & putera Bragg (William Henry, sang ayah; dan William Lawrence, sang putera) bagi temuan cara pemanfaatan sinar X untuk mempelajari susunan atom dalam kristal padatan, dan Charles Barkla (1917) untuk karya menemukan frekuensi-khas sinar X para unsur, terutama logam-logam.

Tampaknya karya manusia dapat mencapai kedalaman yang mengesankan serta bermanfaat, sesuatu yang dapat dipandang berkaitan dengan tingginya martabat seorang manusia. Maka patutlah kehidupan manusia dihargai dan jangan dibiarkan terhenti oleh kegiatan destruktif seperti perang dan sejenisnya.

KESIMPULAN

Gagasan konversi energi kinetik partikel alfa langsung ke energi potensial listrik, dapat menunjukkan peningkatan efisiensi prosesnya, dibandingkan dengan proses melalui energi termal yang dikendalikan oleh Hukum Kedua Termodinamika. Tumbukan inelastik dalam selaput grafena ~ 150 eV/nm memang tetap terjadi, dan mengkonversi $\sim 5\%$ energi menjadi energi termal, akibat Hukum Kedua Termodinamika itu juga. Juga ada kompetisi antara pengurangan jumlah selaput grafena demi menghemat energi termal itu, dengan adanya kuat dielektrik besar dalam kapasitor-nano grafena itu, yang memerlukan kedekatan antar selaput grafena untuk mencegah terjadinya proses berantai menimbulkan konduktivitas dalam bahan dielektrik.

Masalah yang sampai kini tampak masih mempersulit realisasi sel listrik nuklir ini, adalah pengendalian keteraturan posisi selaput berturutan grafena, dan jarak antar-selaput kapasitor-nano itu. Faktor sulitnya pemurnian bahan Americium pun cukup mahal, meninggikan harga bahan itu secara komersial.

Dalam makalah ini juga hendak ditunjukkan bagaimana gagasan energi terbarukan ini dapat dipahami dengan beberapa konsep Fisika Dasar, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai ilustrasi yang mengaitkan hasil penelitian dengan materi kuliah Fisika Dasar.

Hal ini dipandang bermanfaat untuk lebih mendekatkan dunia penelitian fisika dengan dunia pendidikan fisika dasar. Selain itu, hal ini juga membina semangat kreativitas dan sikap memecahkan masalah, yang menggarisbawahi kekhasan manusia, dibandingkan dengan kecerdasan buatan serta mesin robotik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas kesempatan dapat menyajikan makalah ini, kepada Jurusan Fisika dan Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Katolik Parahyangan, dan Panitia Seminar Kontribusi Fisika 2019 ITB ini, untuk persetujuannya mengikutsertakan makalah ini untuk dipresentasikan dalam kegiatan ilmiah ini.

REFERENSI

1. Eric Shinn, Alfred Hübler, Dave Lyon, Matthias Grosse Perdekamp, Alexey Bezryadin & Andrey Belkin (2012): *Nuclear energy conversion with stacks of graphene nanocapacitors*, Complexity 18:3 (22 October) 24-27. DOI 10.1002/cplx.21427. Wiley Online Library (<http://wileyonlinelibrary.com>).
2. Henry G. J. Moseley (1913): *The attainment of high potentials by the use of radium*, Proceedings of the Royal Society 88 (605) 471-476. DOI 10.1098/rspa.1913.0045 (<https://doi.org/10.1098/rspa.1913.0045>)
3. Yigal Ronen & Melvin J. Leibson, *An example for the potential applications of Americium-242m as a nuclear fuel*, Transactions of the nuclear societies of Israel, di Technion, Israel Institute of Technology, Haifa, 12-22 Desember 1987, hlm V-42 sd 44.
4. Y. Ronen, M. Kurtzhand, L. Droizman, & E. Schwageraus (2007): *Conceptual design of Americium nuclear battery for space power applications*, Journal of Propulsion and Power 23:4 (July-August) 874.
5. University of Manchester (2014), *"The Story of Graphene"*. www.graphene.manchester.ac.uk. 10 September 2014. Diunggah ke Wikipedia 9 Oktober 2014. <https://www.graphene.manchester.ac.uk/learn/discovery-of-graphene> (5 Desember 2019); Wikipedia (2019), Graphene, <https://en.wikipedia.org/wiki/Graphene> (5 Desember 2019)
6. Stefan Giere, Michael Kurrat, & Ulf Schümann (2002), *HV dielectric strength of shielding electrodes in vacuum circuit-breakers*, 20th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Tours, Perancis, 30 Juni – 5 Juli, 1-4.
7. Wikipedia (2019), *Dielectric Strength*, https://en.wikipedia.org/wiki/Dielectric_strength (5 Desember 2019)