
KAJIAN PUSTAKA TENTANG GENERATOR LISTRIK BERBASIS MATERIAL PINTAR *ELECTROACTIVE POLYMER* SEBAGAI PENYEDIA DAYA LISTRIK PORTABLE

A.P. Bayuseno

Program Studi Magister Teknik Mesin, Program Pascasarjana Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Tembalang, Semarang 50255

Tel. 024-7460059; Fax 024-7460059 ext 102;

E-mail: apbayuseno@gmail.com

Abstrak

Teknologi material pintar (smart materials) sangat potensial untuk mengkonversi energi lingkungan menjadi sumber energi terbarukan (renewable energy). Metode ini sangat cocok diterapkan untuk keperluan penyedia daya listrik yang bersih dan murah karena material ini memiliki sifat ringan dan kerapatan energi (energy density, J/cc) dan kerapatan energi spesifik (specific energy density, J/g) yang tinggi. Akan tetapi penggunaan smart material sebagai teknik produksi listrik berbasis tenaga manusia belum banyak dikembangkan di Indonesia karena penguasaan teknologi yang masih terbatas. Tulisan ini bertujuan memperkenalkan sistem material pintar sebagai generator mikro dari bahan electroactive polymer (EAP) yang dapat dipasang pada sol sepatu. Untuk menghasilkan daya listrik dari konversi energi regangan mekanis, maka rancangan sol sepatu sebagai generator mikro akan dibahas dalam tulisan ini. Secara khusus dibahas rancangan model generator listrik berbasis material EAP karena memiliki banyak keunggulan dibandingkan dengan sistem material pintar lainnya, terutama dalam kemudahan dalam pembuatan (manufacture) serta pembentukan (forming). Tulisan ini juga menyajikan berbagai analisa sifat elektromekanik EAP untuk rancangan generator listrik yang digerakan oleh injakan sepatu (a-heel strike generator). Tantangan dalam pengembangan material pintar terhadap ketahanan (durability), pengendalian secara presisi, konsumsi energi (energy consumption) dan implementasinya sebagai alas kaki juga akan dibahas secara singkat.

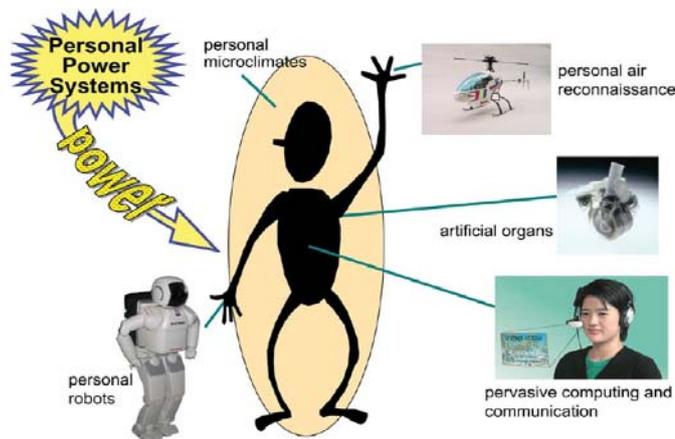
Kata kunci: *Material pintar, electroactive polymer dan daya listrik*

Pendahuluan

Perkembangan peralatan elektronika yang dapat menyesuaikan dengan mobilitas manusia seperti untuk monitoring dan komunikasi sedang berlangsung sangat cepat dewasa ini; namun disatu sisi konsumsi energi yang besar dan peningkatan mobilitas peralatan elektronik belum diimbangi dengan penyediaan sumber daya listrik (*power supply*) yang memadai untuk menggerakkan sistem ini (Dunn-Rankin dkk, 2005). Sebagai contoh beberapa peralatan elektronika dan komunikasi memiliki sifat otonom secara personal dan membutuhkan teknologi sumber penyedia daya yang kompak, efisien dan kompatibel dengan manusia. Oleh karenanya ada suatu keharusan untuk mengembangkan teknologi yang mampu menghasilkan kerapatan daya yang tinggi (*high power densities*) secara paket dan kompatibel dengan pemakaian manusia. Seperti ditunjukkan dalam Gambar 1 bahwa peralatan catu daya listrik harus mampu menyediakan/menyimpan daya listrik untuk berbagai kebutuhan peralatan elektronika dari perangkat *entertainment* sampai peralatan penyelamat kehidupan dalam bidang medis/kesehatan (*life saving medical instruments*). Untuk memenuhi persyaratan yang diinginkan maka diperlukan suatu sistem penyedia daya listrik yang memiliki unjuk kerja 10-100 kali daya terhadap berat dan harus kompatibel. Pengembangan teknologi ini akan memungkinkan pengguna melakukan tugas dengan menggunakan peralatan yang potable dan secara psikologis cukup nyaman. Sebagai gambaran bahwa peralatan elektronik harus mampu beroperasi lebih dari 10 jam penggunaan dan memerlukan hanya sedikit pengisian kembali untuk pengoperasiannya.

Dilain pihak penggunaan baterai sebagai penyediaan daya listrik peralatan elektronik portable cenderung memerlukan volume dan berat total sistem yang cukup besar. Selanjutnya penggunaan baterai yang mampu isi (*recharging*) untuk peralatan elektronik menjadi kurang nyaman; karena pengguna (*user*) harus mempersiapkan berbagai peralatan seperti penyedia daya

(chargers) dari waktu ke waktu. Oleh sebab itu pengembangan teknologi yang mampu memanfaatkan energi dari lingkungan menjadi sumber energi listrik menjadi suatu keharusan dan penting saat ini. Sebagai contoh energi matahari merupakan sumber energi yang sangat murah dan berlimpah namun demikian outputnya sering kali tidak stabil. Selanjutnya sumber energi radiasi lingkungan seperti sinar infra merah, sinar-X juga dapat ditangkap dan dikonversi menjadi energi listrik. Akan tetapi pemanfaatan sumber energi tersebut masih memerlukan investasi biaya peralatan yang sangat tinggi. Sumber energi berbasis manusia (*harvesting human energy*) merupakan energi murah dan ramah lingkungan. Energi ini dapat dikonversi dengan sistem transducer material pintar menjadi energi listrik untuk peralatan elektronika portable. Dalam hal ini energi listrik dapat dihasilkan secara sengaja oleh pengguna (*active pattern*) maupun ditimbulkan dari aktivitas sehari-hari dari pengguna (*passive pattern*) (Jia and Liu, 2009). Selain itu, sistem pembangkit ini juga mampu menyediakan daya secara konstan, tidak seperti pembangkit listrik tenaga angin atau tenaga surya.



Gambar 1 Teknologi yang memerlukan sumber daya listrik (Dunn-Rankin dkk, 2005)

Gerakan tubuh manusia telah lama dikenal sangat fleksibel dalam menghasilkan daya/energi sebagai hasil pelepasan panas, gerakan putar, penyokong berat badan, pergeseran vertikal dari pusat masa dan bahkan deformasi elastis dari otot dan pendukung lainnya. Kombinasi aktivitas dasar sehari-hari inilah atau fenomena metabolisme membuka peluang untuk mengkonversi energi menjadi sumber daya listrik dalam jangka waktu yang lama atau diisi ulang secara permanen. Gerakan jalan menghasilkan kira-kira 30 Watt daya dan secara teoretis output daya listrik 100 mW sangat feasibel tanpa berpengaruh pada gerakan si pemakai. Potensi daya ini dapat digunakan untuk berbagai peralatan daya rendah seperti pedometer untuk pelari, unit navigasi dan *self-powered emergency beacons* atau sinyal (Han dan Kaajakari, 2009). Kemudian sebuah generator listrik yang diintergrasikan dengan sepatu telah dikembangkan dengan elemen material pintar *dielectric elastomers* dan *piezoelectric ceramics* (Han dan Kaajakari, 2009). Material *elastomer* mampu menghasilkan output daya yang signifikan tetapi memerlukan pembias tegangan yang besar (2kV) dan konstruksi yang berat dan tentu saja akan berpengaruh negatif pada pengguna. Penggunaan *piezoelectric ceramic* tidak memerlukan bias tegangan. Akan tetapi material ini cukup kompleks dan daya output setelah konversi DC/DC dan regulasinya rendah ($1 < \text{mW}$). Dibandingkan dengan sumber energi material pintar lainnya seperti *piezoelectric*, generator listrik menggunakan EAP memiliki kerapatan energi (*energy density, J/cc*) dan kerapatan energi spesifik (*specific energy density, J/g*) lebih besar 10 kali lipat daripada transducer lainnya (Jia and Liu, 2009). Secara khusus EAP memiliki sifat sebagai berikut:

- Ringan (*lighter*) – massa jenis rendah (*low density*), unjuk kerja tinggi (*high performance*), dan polimer memiliki fungsi berlipat ganda (*multifunctional polymers*),
- Murah (*cheaper*) – material murah (*inexpensive materials*), komponennya kecil (*fewer parts*), tidak memerlukan permesinan yang presisi (*no precision machining*),

- Lebih halus (*quieter*) – rapat energi tinggi (*high energy density*) dan polimer yang kompak (*compliance of polymers*) menyebabkan kondisi operasi akustik cukup halus dengan sedikit komponen yang bergerak,
- Lebih lunak (*softer*) – material karet (*rubbery materials*) merupakan impedensi yang sesuai dengan gerakan yang besar (seperti gerakan manusia, mesin)
- Berdaya guna (*versatile*) – merupakan polimer yang dibuat berbagai ukuran (*scale-invariant*); sistem dapat dibuat didalam berbagai faktor bentuk (*conformal, elongated, dsb.*)

Tujuan dari penulisan ini adalah mengkaji beberapa pustaka terkini dalam kaitannya dengan sistem penyedia daya listrik didalam sistem sol sepatu dengan penggerak tenaga manusia. Secara khusus disajikan rancangan generator mikro menggunakan material piezoelektrik dan material elektroactive polymer (EAP).

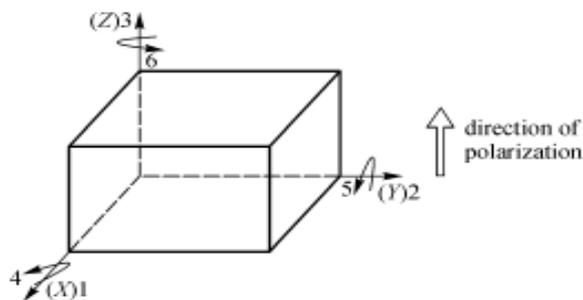
Karakteristik generator mikro listrik

Penggerak generator listrik tenaga manusia menggunakan material pintar memerlukan kajian dalam ruang lingkup tidak hanya mekanisme penghasil listrik dari perubahan energi regangan bahan tetapi juga karakteristik aktivitas manusia. Dari beberapa literatur menunjukkan bahwa energi manusia dapat timbul dari beberapa aktivitas/kegiatan sehari-hari seperti berjalan, mengayuh sepeda dan mengetik maupun aktivitas metabolisme seperti bernafas, pengeluaran panas dan aliran darah; kondisi khusus seperti mendaki, menari dan sebagainya. Energi yang berlimpah dari aktivitas manusia tersebut dapat dimanfaatkan sebagai penggerak generator mikro (*microgenerator*) berbasis transducer material pintar (Jia and Liu, 2009).

Ada dua macam generator mikro yang dapat digerakan oleh tenaga manusia yaitu kerja generator berdasarkan gaya (*force*) dan pergeseran (*displacement*). Akan tetapi didalam literatur tidak disajikan perbedaan yang jelas untuk kedua jenis generator tersebut. Meskipun prinsip produksi energi secara fisik seperti efek piezoelektrik dan induksi elektromagnetik memiliki kesamaan untuk kedua aplikasi, namun perbedaan sumber energi akan menghasilkan implementasi yang berbeda secara lengkap yang berkaitan dengan isu-isu didalam peralatan, efisiensi, material dan optimasi. Dibandingkan dengan generator berdasarkan pergeseran, energi mekanik didalam generator penggerak gaya dikonversi secara langsung untuk aplikasi tertentu bukan melalui efek kopling. Sehingga mekanisme konversi dan sistem konfigurasi dalam menghasilkan daya listrik yang akan dikaji dalam tulisan ini adalah hanya efek piezoelektrik maupun dielectric elastomer.

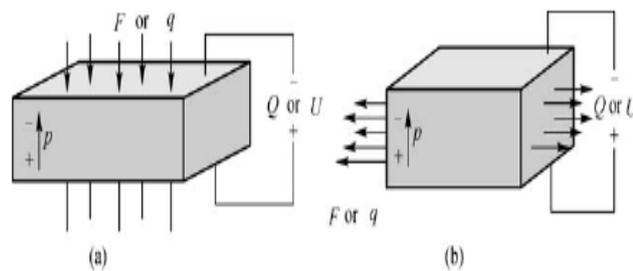
Material piezoelektrik

Material piezoelektrik memiliki stuktur sedemikian hingga jika ada potensial listrik yang dikenakan didalam material akan menghasilkan regangan mekanik. Sebaliknya jika ada input tegangan (*applied stress*) didalam material akan menghasilkan muatan listrik yang membuat material pintar ini dapat berfungsi sebagai generator mikro listrik. Secara khusus material pintar ini memiliki sifat anisotropik (Gambar 2). Beberapa konstanta dalam hubungannya dengan kedua sumbu notasi didefinisikan terhadap *benchmark* level/tingkat aktivitas dari material. Karakteristik yang relevan untuk memproduksi energi adalah konstanta regangan piezoelektrik d , koefisien kopling elektromekanik k , konstanta tegangan piezoelektrik g ; permitivity material ϵ .



Gambar 2 Notasi sumber piezoelektrik (Jia and Jiu, 2009)

Generator piezoelektrik bekerja umumnya berdasarkan pada dua model beban yaitu medan regangan (*strain field*) dan muatan listrik. Arah dari kedua medan ditunjukkan dalam Gambar 3. Kedua susunan tersebut memberikan output yang berbeda beda karena sifat anisotropik material piezoelektrik. Sel piezoelektrik dengan lebar W , panjang L dan tebal H dapat menghasilkan tegangan U_3 , muatan total Q_3 dan energi listrik W , dimana F atau q adalah gaya secara *diskrete* atau *konsentrat*, dan g_{31} , g_{33} dan d_{31} , d_{33} adalah konstanta piezoelektrik. Hubungan antara gaya dan respons berikut elemen piezoelektrik dapat disajikan dalam Tabel 1. Berbagai material piezoelektrik dapat digunakan untuk generator, namun secara umum ada dua macam yaitu: piezoceramics seperti barium titanate ($BaTiO_3$) atau lead zirconate titanate (PZT-5A, PZT-5H) dan piezopolymer seperti polyvinylidene fluoride (PVDF). Selanjutnya harga konstanta piezoelektrik disajikan dalam Tabel 2.



Gambar 3 Arah gaya piezoelektrik yang dikenakan dan muatan atau tegangan yang diperoleh didalam dua model operasi (a) kompresi karena tekanan dan (b) transversal karena tekuk (*bending*) (Jia dan Jiu, 2009).

Tabel 1 Perbandingan kapasitas output generator piezoelektrik didalam mode dua operasi

Mode operasi	U_3	Q_3	W
Mode 31 (transversal)	$g_{31} \frac{F_1}{W}$	$d_{31} \frac{F_1 L}{H}$	$\frac{1}{2} g_{31} d_{31} \frac{L}{WH} F_1^2$
Mode 33 (longitudal)	$g_{33} \frac{F_3}{WL} H$	$d_{33} F_3$	$\frac{1}{2} g_{33} d_{33} F_3^2 \frac{H}{LW}$

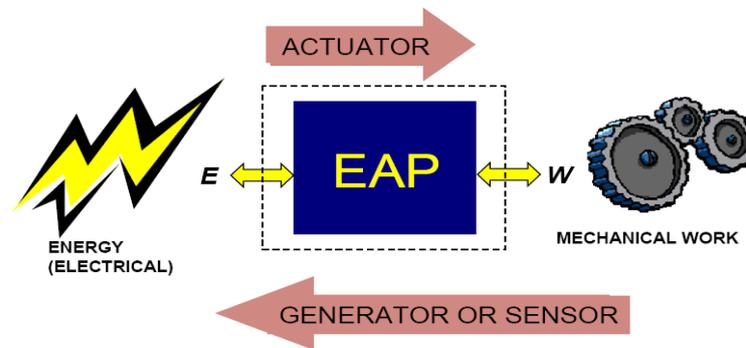
Tabel 2 Konstanta material untuk piezoelektrik

	ϵ/ϵ_0	$D_{31}/(pC.N^{-1})$	$G_{31}/(mV.m.N^{-1})$	$K_{31}/10^{-2}$	$D_{33}/(pC.N^{-1})$	$G_{33}(mV.m.N^{-1})$	$K_{33}/10^{-3}$
PVDF	12	23	216	12	-33	-330	15
PZT5H	3400	-274	-9.1	39	593	19.7	75
PZT5A	1700	-171	-11.4	34.4	374	24.8	70
$BaTiO_3$	1700	78	5	21	149	14.1	48

Sifat getas PZT sering kali membatasi penerapan dari material ini. Sebaliknya PVDF lebih fleksibel dengan kekuatan lebih karena penurunan fraksi volume. Tetapi hasil penelitian akhir menunjukkan bahwa micro-fibered piezoelectric fiber composite (PFC) terdiri serat piezoelectric (PZT atau PVDF) yang ditanam didalam matrik polimer menunjukkan sifat koefisien kopling dan kekuatan yang tinggi. Akan tetapi penting untuk dicatat bahwa piezoelektrik memiliki sifat non-linear dan bervariasi dengan umur, tegangan dan suhu. Khususnya dalam kondisi gerak yang tidak teratur, maupun *algoritma adaptive*.

Dielektrik Elastomer

Dielektrik elastomer (DE) memiliki unjuk kerja sama dengan material piezoelectric ketika mengalami akumulasi regangan. Secara khusus dielektrik elastomer jenis electroactive polymer (EAP) juga dapat berfungsi sebagai aktuator yang merubah energi listrik menjadi energi mekanik, sebaliknya juga dapat berfungsi sebagai generator atau sensor yang merubah energi mekanik menjagi energi listrik (Gambar 4).

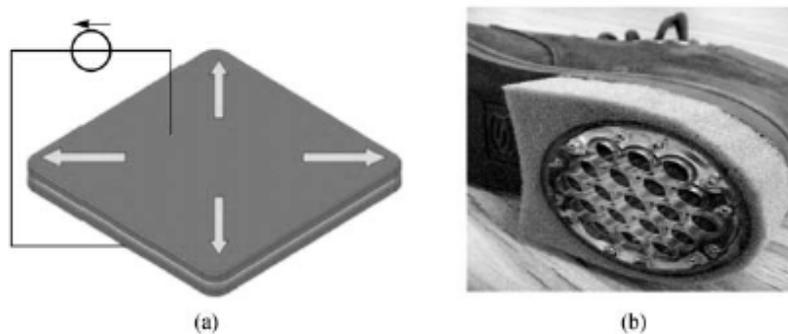


Gambar 4 Skema konversi energi menggunakan material pintar EAP) (Jia dan Jiu, 2009)

Seperti mekanisme elektrostatic, rancangan dengan material ini memerlukan suatu potensial tinggi (beberapa kilovolts) yang dikenakan pada dielectric, karena arus yang diproduksi ketika material ditekan dan kapasitannya berubah. Disini untuk mencapai kondisi daya yang efisien merupakan tantangan dalam perancangan sistem ini. Akan tetapi sistem ini dapat menghasilkan tegangan lebih tinggi dan lebih berdaya guna, sehingga material ini memiliki sifat yang bagus menyebabkan energi regangan yang disimpan dan lebih ringan. Kornbluh dkk (2002) mengembangkan generator lain berdasarkan polimer electroactive yang dipasang pada sol sepatu seperti terlihat pada gambar 5a, b. Energi yang timbul karena perubahan kapasitan ketika bahan dielektrik diregang adalah sebagai berikut:

$$-p = \epsilon * \epsilon_0 * E^2$$

Dimana p = tegangan tekan efektif; ϵ = konstanta dielektrik relatif ; ϵ_0 = permitivitas ruang hampa (konstanta); E = kekuatan medan listrik diantara dioda.



Gambar 5. Demonstrasi perilaku electroaktif polimer dan prototipe generator (a) Muatan electrostatic yang terjadi ketika strukturnya meregang; (b) prototipe sol sepatu yang dipasang generator (Pelrine dkk 1998).

Seperti terlihat pada gambar 5b, ketika sol sepatu ditekan, maka sol menekan, dan meneruskan tekanan ke membran elastomer. Selanjutnya the *membrane balloons* kedalam lubang-lubang dari rangka (*frame*) menghasilkan regangan, dan ketika tegangan dikenakan pada elektroda

maka akan menghasilkan daya. Generator sepatu ini akan mencapai output energi sebesar 0,8 Joule tiap step dengan tekanan tekan hak sepatu hanya 3 mm serta menghasilkan 800 mW daya tiap sepatu pada permukaan dua tahap per detik. Selain itu material ini akan memiliki umur paling sedikit 100000 siklus. Akan tetapi peningkatan paket dalam rancangan sepatu dapat meningkatkan umur diluar siklus 1 juta cukup untuk alas kaki komersial. Ketika sepatu lebih banyak tekanan akan lebih cocok didalam sepatu komersial agar mampu mengekstrak daya 1 W dengan menghasilkan 50 % konversi tegangan (dari beberapa kilovolt menjadi 3 V) dengan efisiensi penyimpanan yang tinggi.

Kesimpulan

Dari penjelasan diatas dapat disimpulkan adalah bahwa material EAP merupakan material yang unik dan memiliki potensi untuk mengkonversi tenaga manusia (energi regangan) menjadi energi listrik. Material EAP sebagai generator mikro telah menjadi kajian yang mendalam oleh para ahli terutama kaitannya dengan sifat ketahanan untuk beberapa siklus maupun langkah, gaya maupun umur kerjanya (*life time*), disamping tantangan yang dihadapi material ini adalah efisiensi konversi energinya.

Daftar Pustaka

- Dunn-Rankin, D., Leal, E.M., Walther, D.C. (2005). *Personal power systems*. Progress in Energy and Combustion Science 31, 422–465.
- Han, D., Kaajakari, V. (2009). *Microstructured polymer for shoe power generation*. IEEE Transducer, 1393-1396.
- JIA, D., LIU, J. (2009). *Human power-based energy harvesting strategies for mobile electronic devices*. Front. Energy Power Eng. China, 3, 27–46.
- Kornbluh, R D., Pelrine R., Pei Q. (2002). *Electroelastomers: Applications of dielectric elastomer transducers for actuation, generation, and smart structures*. In: *Smart Structures and Materials 2002*. Bellingham: SPIE, 254–270
- Paradiso, J.A. (2010). *Systems for human-powered mobile computing*. IEEE, 645-650.
- Pelrine R E, Kornbluh R D, Joseph J P. (1998). *Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation*. *Sensors and Actuators A: Physical*, , 64(1): 77–85.
- Ezzati M, Lopez A D, Rodgers A. (2002). *Comparative quantification of health risks: Global and regional burden of disease due to selected major risk factors*. *Lancet*, 360(9343): 1347–1360.