

# Sejarah Penemuan Nanogenerator Triboelektrik (*TENG*): Sistem *Self-Powered* Masa Kini untuk Kebutuhan Energi Masa Depan

M Suhantoro<sup>1,2</sup>, L Handayani<sup>1</sup> dan S Linuwih<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Pendidikan Fisika Universitas Negeri Semarang, Jl. Raya Sekaran Gunungpati  
50229 Indonesia

<sup>2</sup>E-mail: fisikaunnesmeisuhantoro@gmail.com

**Abstrak.** Sejarah fisika merupakan suatu hal yang penting untuk dipelajari karena dapat memberikan berbagai pengetahuan. Salah satunya yaitu mengenai keberhasilan yang telah dicapai oleh para ilmuwan terdahulu, sehingga dapat menginspirasi orang untuk menciptakan sesuatu yang bermanfaat bagi manusia di berbagai bidang, tidak terkecuali dalam hal yang berkaitan dengan sumber energi. Perkembangan elektronika yang pesat, mengakibatkan semakin banyaknya kebutuhan akan sumber daya seluler. Hal tersebut melatar belakangi terus terjadinya perubahan tren teknologi hingga dikembangkannya sistem *self-powered*. Nanogenerator triboelektrik (*TENG*) adalah perangkat pemanen energi berbasis sistem *self-powered* yang menghasilkan energi listrik dari energi mekanik eksternal dengan menggabungkan induksi elektromagnetik dan efek triboelektrik. Makalah ini bertujuan untuk mendeskripsikan perkembangan tren teknologi dari yang semula bersumber dari energi fosil hingga ditemukannya nanogenerator triboelektrik (*TENG*). Penulisan dilakukan dengan metode studi literatur dengan memfokuskan topik pembahasan pada sejarah penemuan *TENG*, tokoh dibalik penemuan tersebut, serta cara penerapannya dalam kehidupan sehari-hari.

*Kata kunci: sistem self-powerd, sumber daya seluler, TENG*

**Abstract.** The history of physics is an important thing to learn because it can provide a variety of knowledge. One of them is about the success achieved by previous scientists, so that it can inspire people to create something that is beneficial to human in various fields, not least in matters relating to energy sources. The rapid development of electronics has resulted in increasing demand for cellular resources. This is the background to the continuing changes in technological trends to the development of self-powered systems. Triboelectric nanogenerator (*TENG*) is an energy harvester based on a self-powered system that produces electrical energy from external mechanical energy by combining electromagnetic induction and triboelectric effects. This study aims to describe the development of technological trends from what originally came from fossil energy to the discovery of triboelectric nanogenerator (*TENG*). Writing is done using the literature study method in which the topic of the discussion is focused on the history of the discovery of *TENG*, the figure behind the discovery, and the way of its applications in everyday life.

*Keywords: self-powerd system, cellular resourcess, TENG*

## 1. Pendahuluan

Sejarah fisika adalah suatu ilmu pengetahuan yang mempelajari segala peristiwa atau kejadian terkait fisika, yang telah terjadi pada masa lampau dalam kehidupan umat manusia. Pengetahuan ini sangat penting untuk dipelajari terutama dalam hubungannya dengan pembelajaran di sekolah. Sebab melalui sejarah fisika, dapat diperoleh informasi tentang berbagai pengetahuan dan ilmu. Selain itu, dapat dipelajari juga mengenai keberhasilan-keberhasilan yang telah dicapai para ilmuwan sebelumnya, bagaimana cara mencapai penemuannya, cara mengatasi hambatan, dan hal-hal lainnya. Dari keberhasilan tersebut tidak jarang tercipta keberhasilan baru, sebagai pelengkap atau penyempurnanya. Jadi selain mempelajari materi-materi tentang fisika, diperlukan pengetahuan tentang konsep-konsep yang terkandung dalam materi tersebut dengan cara mempelajari sejarah fisika. Semakin banyak mempelajari tentang

sejarah fisika, akan membuat pengetahuan bertambah luas dan memungkinkan untuk dapat menimbulkan ide-ide baru. Semua bidang fisika tentu memiliki sejarahnya masing-masing, tidak terkecuali dalam hal yang berkaitan dengan sumber energi

Saat ini telah terjadi perubahan drastis pada bidang elektronika di dunia. Selama kurang lebih dua dekade terakhir, elektronika dikembangkan ke arah teknologi yang portabel dan bersifat pribadi, akibatnya tren teknologi yang terjadi menjadi membutuhkan sumber daya seluler yang banyak sebanding dengan terjadinya peningkatan sistem elektronika. Hal tersebut melatar belakangi terus terjadinya perubahan tren teknologi hingga dikembangkannya sistem *self-powered*. Nanogenerator triboelektrik (*TENG*) adalah perangkat pemanen energi berbasis sistem *self-powered* yang menghasilkan energi listrik dari energi mekanik eksternal dengan menggabungkan induksi elektromagnetik dan efek triboelektrik. Penelitian ini bertujuan untuk mendeskripsikan perkembangan tren teknologi dari yang semula bersumber dari energi fosil hingga ditemukannya nanogenerator triboelektrik (*TENG*). Adapun fokus pembahasannya meliputi sejarah penemuan *TENG*, tokoh dibalik penemuan tersebut, serta cara penarapannya dalam kehidupan sehari-hari.

## 2. Metode

Penelitian dilakukan dengan menggunakan Metode Studi Literatur, yaitu metode pengumpulan data dengan membaca buku referensi atau dokumentasi yang berhubungan dengan penelitian tentang nanogenerator triboelektrik (*TENG*). Dalam hal ini juga dilakukan browsing untuk mencari data atau dokumentasi yang berhubungan dengan obyek yang diteliti.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1. Sejarah Penemuan *TENG*

Energi merupakan penentu kualitas hidup manusia yang tidak terpisahkan. Pada awalnya, orang-orang menggunakan energi fosil untuk memenuhi kebutuhan hidup mereka. Terbatasnya jumlah energi fosil yang ada di bumi, mengakibatkan banyak orang berlomba untuk menciptakan energi terbarukan dengan karakteristik berbiaya rendah, stabilitas tinggi, dan efisiensi tinggi. Selama kurang lebih dua dekade terakhir, elektronika dikembangkan ke arah teknologi yang portabel dan bersifat pribadi. Hal tersebut mengakibatkan tren teknologi yang terjadi membutuhkan sumber daya seluler yang banyak sebanding dengan terjadinya peningkatan sistem elektronika, misal munculnya laptop yang merupakan pengembangan dari komputer desktop. Laptop atau sering disebut notebook adalah kom-puter bergerak yang beratnya berkisar dari 1 sampai 6 kg tergantung bahan, spesifikasi, dan ukurannya. Sumber daya laptop berasal dari adaptor AC/ baterai. Daya tahan baterai dipengaruhi oleh ukuran baterai, cara pemakaian, dan spesifikasi laptop tersebut, pada umumnya dapat bertahan sekitar satu sampai 6 jam (Syafitri, 2016). Jadi, dapat dilihat bahwa penggunaan baterai merupakan pendekatan yang paling tradisional untuk mengatasi masalah mengenai kebutuhan sumber daya seluler tersebut. Meskipun demikian, ada beberapa kemungkinan konsekuensi yang harus dihadapi, yaitu:

- a. Masa pakai baterai yang terbatas.
- b. Dapat menimbulkan masalah lingkungan apabila bahan kimia yang digunakan untuk membuat baterai bocor.

Beberapa konsekuensi di ataslah yang menyebabkan baterai dinilai belum bisa menjadi solusi terbaik untuk mengatasi masalah terkait perkembangan tren elektronika.

Seiring berjalannya waktu, tren elektronika kembali mengalami perubahan, ditandai dengan munculnya sistem *self-powered*, yang mana merupakan pengembangan dari tren sebelumnya. Sistem *self-powered* ini tidak lain adalah elektronik portabel menuju daya rendah konsumsi, yang mana sumber energi dipanen dari lingkungan kerja perangkat. Nanoenergi merupakan salah satu bentuk sistem *self-powered* dengan cara menerapkan nanomaterial dan nanoteknologi dalam proses pemanenan energi guna memperkuat sistem mikro/nano.

Suatu material akan menjadi elektrik setelah dihubungkan dengan bahan yang berbeda melalui gesekan. Fenomena tersebut dikenal dengan istilah efek triboelektrik, yang tidak lain merupakan prinsip dasar dari nanoenergi. Secara umum diyakini bahwa

gesekan antar benda tersebut akan membentuk ikatan kimia (disebut adhesi). Terjadi transfer muatan untuk menyamakan elektrokimia kedua bahan yang bersentuhan. Beberapa atom berikatan memiliki kecenderungan untuk menjaga elektron ekstra, dan kecenderungan untuk mele-paskannya, inilah yang mengakibatkan triboelektrik. Dalam kehidupan sehari-hari, efek triboe-lektrik secara umum dianggap sebagai efek negatif dalam industri. Hal tersebut dikarenakan penginduksian muatan elektrostatisnya dapat menyebabkan pengapian, kerusakan die-lektrik, ledakan debu, dan lain sebagainya. Apabila dilihat dari sudut pandang energi, muatan elektrostatis tersebut adalah energi kapasitif yang mengarah pada penemuan generator elek-trostatik awal seperti mesin gesekan, dan generator *Van de Grooff* (Wang, 2014).

Nanogenerator triboelektrik (*TENG*) adalah perangkat pemanen energi yang meng-hasilkan energi listrik dari energi mekanik eksternal dengan menggabungkan induksi elektromagnetik dengan efek triboelektrik. Kelompok Prof. Zhong Lin Wang merupakan yang pertama kali menunjukkan jenis nanogenerator baru ini, tepatnya pada tahun 2012 di *Georgia Institute of Technology*. Unit pembangkit listrik ini yaitu, pada sirkuit bagian dalam, akan terjadi perpindahan muatan antara dua film anorganik/organik tipis yang menunjukkan pola-ritas tribo berlawanan sehingga muncul efek triboelektrik. Sementara itu, pada sirkuit luar, elektron didorong sehingga mengalir diantara dua elektroda. Terdapat 4 mode operasi dasar pada nanogenerator triboelektrik, yaitu mode elektroda tunggal, mode geser dalam pesawat, mode pemisahan kontak vertikal dan mode lapisan triboelektrik yang berdiri bebas. Keempatnya memiliki karakteristik yang berbeda sehingga cocok diaplikasikan pada tempat yang berbeda juga (Bera, 2016).

Sejak *TENG* dipublikasikan untuk pertama kalinya, yaitu Januari 2012, kepadatan daya outputnya telah ditingkatkan menjadi lima kali lipat hanya dalam waktu satu tahun. *TENG* memiliki efisiensi konveksi sebesar 60%, kepadatan daya area sebesar 313 w/m<sup>2</sup>, dan kepadatan volume sebesar 490 kw/m<sup>3</sup>. Teknologi energi baru ini memiliki beberapa keung-gulan yaitu biaya produksi rendah, ramah lingkungan, serta keandalan dan ketahanan yang baik. Contoh energi mekanik yang dapat dipanen yaitu seperti gerak manusia berjalan, pemicu mekanik, getaran, hembusan angin, aliran air, putaran ban, dan sebagainya.

### 3.2. Tokoh Penemu *TENG*

Penemuan Nanogenerator Triboelektrik (*TENG*) merupakan hasil jerih payah dari kelompok Wang atau sering dikenal sebagai *Wang Group*. Selain *TENG*, kelompok Wang juga menemukan *PENG* (*Nanogenerator Plezoelektrik*) dan telah menghasilkan sekitar 195 paten. Wujud keseriusan untuk mengembangkan teknologi ini kearah komersialisasi skala besar dapat terlihat dari berbagai metode yang diterapkan, seperti analisis paten, pemetaan jalan teknologi, dan bibliometrik. Sejak tahun 2012, konferensi internasional tentang nano-generator dan piezotronics (NGPT) rutin diadakan setiap dua tahun sekali. Jumlah pesertanya sebanyak 50 orang pada 2012, dan naik menjadi  $\approx 400$  pada 2018. Lokasi penyelenggaraan konferensi tersebut berpindah antara Asia, Eropa, dan Amerika Utara. Pada tahun yang sama, Prof. Z. L. Wang juga mendirikan jurnal perreview bergengsi dengan nama "*Nano Energy*". Tujuannya yaitu untuk mempromosikan pengembangan energi terkait bahan nano. Terjadi peningkatan secara eksponensial jumlah publikasi terkait *TENG* yang mana dari hanya 8 pada 2012 menjadi 400 di 2017, penulisnyapun berasal dari 40 negara lebih. Peluncuran produk komersial berbasis *TENG* seperti filter udara dan masker wajah di pasar lokal Cina, menunjukkan bahwa keinginan untuk merintis dan menuju komersialisasi skala besar telah mulai terbuka jalannya (Wu, 2019).

Banyaknya prestasi yang telah ditorehkan oleh kelompok Wang, tidak lepas dari sosok Prof. Zhong Lin Wang, yaitu ketua daripada kelompok tersebut. Pria yang kerap disapa Prof. Wang ini merupakan pendiri sekaligus kepala ilmun di *Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems*. Beliau juga merupakan *Regents' Professor* di *Georgia Tech*. Dengan segudang prestasi yang telah diraih, pantas jika Prof. Wang menduduki posisi tertinggi dalam bidang *Materials Science and Engineering*. Sosok Professor satu ini

melopori dan mengembangkan bidang nanogenerator dari yang awalnya hanya berupa prinsip sampai wujud pengaplikasiannya dalam bidang teknologi seperti saat ini. Usaha kerasnya dalam meneliti nanosystem dapat dikatakan tidak sia-sia, banyak para peneliti yang terinspirasi untuk meneliti dan mempelajari sistem energi nano-mikro. *Piezotronics* dan *piezo-phototronics* yang difungsikan sebagai semikonduktor generasi ketiga merupakan salah satu hasil ciptaannya.

Terdapat banyak prestasi yang telah diraih oleh Prof. Wang, diantaranya yaitu *ENI award in Energy Frontiers* pada tahun 2018, *The NANOSMAT Society dan Global Nanoenergy Prize* pada tahun 2017 di Inggris, *Distinguished Scientist Award from (US) Southeastern Universities Research Association* pada tahun 2016, *Thomas Router Citation Laureate in Physics* pada tahun 2015, *The James C. McGroddy Prize in New Materials from American Physical Society, Distinguished Professor Award, NANOSMAT prize (United Kingdom)* dan *World Technology Award (Materials)* pada tahun 2014, *MRS Medal from Materials Research Society* pada tahun 2011 dan masih banyak lagi.

Selain meraih berbagai penghargaan dari dunia internasional, pria keturunan tionghoa ini juga aktif mengikuti berbagai kegiatan dan organisasi, seperti menjadi anggota *European Academy of Sciences* di tahun 2002, *foreign member* di *the Chinese Academy of Sciences* tahun 2009, akademisi di *Academia of Sinica* (Taiwan) tahun 2018, *fellow* di *the World Innovation Foundation* tahun 2002, *fellow* di *American Physical Society* tahun 2005, *fellow* di AAAS tahun 2006, *fellow* di *Materials Research Society* tahun 2008, *fellow* di *Microscopy Society of America* tahun 2010, serta *fellow* di *World Technology Network* dan *Royal Society of Chemistry* tahun 2014. Prof. Wang merupakan *founding editor* sekaligus *chief editor* pada jurnal internasional yang berjudul “Nano Energy”.

Dalam melakukan penelitian, Prof. Zhong Lin Wang sering dibantu oleh orang lain, diantaranya yaitu Changsheng Wu dan Aurelia C. Wang. Changsheng Wu merupakan lulusan S1 dari ilmu teknik di *National University of Singapore* pada tahun 2003. Saat ini, dia sedang berusaha mendapatkan gelar Ph.D nya di *Georgia Institute of Technology*, tepatnya pada bidang ilmu material dan teknik. Penelitiannya lebih mengarah ke elektronik mandiri, pemanenan energi, dan aditif manufaktur, diawasi langsung oleh Prof. Zhong Lin Wang. Sementara itu, Aurelia C. Wang mendapat gelar BS dalam biokimia dari *Georgia Institute of Technology* pada tahun 2013, kemudian bekerja selama 3 tahun di Neurogenetika Medis. Setelah itu, dia menyelesaikan gelar doktoralnya di universitas yang sama. Penelitiannya mengarah ke energi berbasis polimer, nanomaterial, dan desain perangkat pintar mandiri, yang mana dibawah pengawasan Prof. Zhiquan Lin dan Prof. Zhong Lin Wang (Wang, 2019).

### 3.3. Penerapan TENG

*TENG* biasa digunakan sebagai sensor aktif mandiri. Terdapat beberapa jenis sensor berbasis *TENG*, yaitu:

#### 3.3.1. TENG Sebagai Sensor Tekanan/ Sentuhan Mandiri.

Tekanan terhadap perangkat dijadikan parameter karena kinerja output dari *TENG* sangat dipengaruhi oleh besarnya/ frekuensi rangsangan mekanik eksternal. Perealisan prototipe *proof of-concept* pertama dilakukan dengan membuat *TENG* fleksibel transparan. Permukaan plastik mikropattern ditambahkan dengan tujuan meningkatkan kepadatan muatan triboelektrik (Fan, 2012). Tekanan lembut seperti bulu yang jatuh ataupun tetesan air dapat dideteksi karena adanya sensor tekanan yang diaktifkan melalui deformasi relatif antara dua lembar polimer dengan tekanan eksternal. Untuk selanjutnya, *TENG* berbasis sensor tekanan/ sentuhan dikembangkan lebih jauh dan dikarakteristikan secara komprehensif untuk mendapatkan lebih banyak pemahaman kuantitatif tentang *TENG* jenis ini, serta mendapatkan kualitas pengindraan yang semakin baik.

Baru-baru ini telah dikembangkan *TENG* yang terintegrasi dengan resistif pasif sensor tekanan, yang mana seluruh perangkatnya merupakan struktur terjepit dengan sensitivitas tekanan sangat tinggi 204,4 kPa (Luo, 2015).

Pengaplikasian *TENG* berbasis sensot tekanan/ sentuhan diantaranya yaitu sensor anti-pencurian berbasis kertas, sensor untuk pemantauan kesehatan berbasis membran, dan sensor pendeteksi wajah yang ramah kulit.

### 3.3.2. *TENG* Sebagai Sensor Gerak/ Lintasan Mandiri

Parameter dapat berupa kecepatan, perpindahan, akselerasi, dan lain sebagainya. Dengan menggunakan berbagai jenis gerakan mekanis, seperti gerakan linier, geser, rotasi, dan bergulir, *TENG* telah dikembangkan untuk dapat menghasilkan listrik. Amplitudo dan frekuensi pada semua listrik yang berhubungan langsung dengan parameter gerak, menja-dikan *TENG* dapat memainkan peran sensor gerak aktif mandiri.

Salah satu yang mengembangkan jenis ini adalah Zhou dan kelompoknya, hasil karyanya berupa sensor perpindahan dan kecepatan satu dimensi dengan resolusi spesial tinggi, jarak deteksi yang panjang, serta besar rentang yang dinamis (Zhou, 2014). Sensor gerak ini terdiri dari 2 lapisan mikro-kisi dengan pola identik. Lapisan bawah berupa wafer silikon terukir berlapis alumunium yang difungsikan sebagai elektroda bawah, lalu ditam-bah silikon dioksida untuk menghasilkan muatan positif. Sementara itu, lapisan atas nya terdiri dari film SV-8 bermotif pada slide kaca yang dilapisi parylene film dan ITO sebagai elektroda, untuk muatan negatifnya berasal dari penambahan bahan triboelektrik selain silikon dioksida. Pemisahan berkala dari 2 bahan triboelektrik yang kemudian dibebankan melalui triboelectrication akan terjadi akibat adanya gerakan relatif antara 2 kisi. Hal tersebut akan menimbulkan induksi elektromagnetik yang menghasilkan sinyal listrik bolak balik.

### 3.3.3. *TENG* Sebagai Sensor Getaran/ Akustik yang Bekerja Sendiri

Jenis ini memanfaatkan kontak periodik hasil induksi getaran dan pemisahan 2 permukaan triboelektrik untuk memanen energi getaran, ataupun mendeteksi getaran.

Salah satu prototipe yang telah dikembangkan adalah struktur spiral 3D. Terdiri dari pegas kerucut, massa seismik yang dimuat pada pegas, dan plat akrilik yang dipasang di ba-wah massa seismik (Hu, 2013). Pada permukaan antara massa seismik dengan lempeng di dasarnya, dipasang bahan triboelektrik. Pengoperasian nya dilakukan oleh osilasi dari pegas hasil rangsangan getaran eksternal.

### 3.3.4. *TENG* Sebagai Sensor Kimia/ Lingkungan Mandiri

*TENG* dapat difungsikan sebagai bahan kimia yang bekerja sendiri dan sensor lingkungan dengan memantau perubahan kinerja outputnya. Jenis ini pada awalnya digunakan oleh Lin dan kelompoknya untuk mendeteksi ion  $Hg^{2+}$  (Lin, 2013). Selanjutnya dikembangkan sensor kimia pendeteksi katekin yang mana memanfaatkan material kontak dan Array material  $TiO_2$  sebagai probe nya (Lin, 2013). Setelah itu, Li beserta kelompoknya juga mencoba menggunakan jenis ini untuk mendeteksi fenol mandiri dan elektrokimia (Li, 2015). Saat ini penerapan praktisnya yaitu digunakan dalam bidang pengolahan air limbah, degradasi lingkungan, ekologis sanitasi, pengelolaan, pemantauan, dan keberlanjutan.

## 4. Simpulan

Tren teknologi terus mengalami perkembangan dari yang semula bersumber energi fosil hingga ditemukannya nanogenerator triboelektrik (*TENG*), yaitu perangkat pemanen energi yang menghasilkan energi listrik dari energi mekanik eksternal dengan menggabungkan induksi elektromagnetik dengan efek triboelektrik, yang mana dapat dijadikan solusi untuk memenuhi kebutuhan manusia akan sumber daya seluler yang semakin meningkat. Kelompok Wang atau yang sering disebut sebagai *Wang Group* merupakan penemu Nano-generator triboelektrik (*TENG*), diketuai oleh Prof. Zhong Lin Wang. *TENG* biasa digunakan sebagai sensor aktif mandiri. Terdapat beberapa jenis sensor berbasis *TENG*, diantaranya yaitu *TENG* sebagai Sensor Tekanan/ Sentuhan Mandiri, *TENG* sebagai Sensor

Gerak/ Lintasan Mandiri, *TENG* sebagai Sensor Getaran/ Akustik yang Bekerja Sendiri, dan *TENG* sebagai Sensor Kimia/ Lingkungan Mandiri.

### Daftar Pustaka

- Bera, B. 2016. Literature Review on Triboelectric Nanogenerator. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)*. 2(10): 1263-1271.
- Fan, F.-R., L. Lin, G. Zhu, W. Wu, R. Zhang, dan Z. L. Wang. 2012. *Nano Lett.* 12:3109-3114.
- Hu, Y., J. Yang, Q. Jing, S. Niu, W. Wu, dan Z. L. Wang. 2013. *ACS Nano*. 7:10424-10432.
- Li, Z., J. Chen, J. Yang, Y. Su, X. Fan, Y. Wu, C. Yu, dan Z. L. Wang. 2015. *Energy Environ. Sci.* 8:887-896.
- Lin, Z.-H., G. Zhu, Y. S. Zhou, Y. Yang, P. Bai, J. Chen, dan Z. L. Wang. 2013. *Angew. Chem. Int. Ed.* 52:5065-5069.
- Lin, Z.-H., Y. Xie, Y. Yang, S. Wang, G. Zhu, dan Z. L. Wang. 2013. *ACS Nano*. 7:4554-4560.
- Luo, J., F. R. Fan, T. Zhou, W. Tang, F. Xue, dan Z. L. Wang. 2015. *Extrem. Mech. Lett.* 2:28-36.
- Syafitri, N. A., Sutardi, A. P. Dewi. 2016. Penerapan Metode Weighted Product dalam Sistem Pendukung Keputusan Pemilihan Laptop Berbasis Web. *seman TIK*. 2(1):169-176.
- Wang, Z. L. 2014. Triboelectric Nanogenerators as New Energy Technology and Self-Powered Sensors - Principles, Problems, and Perspectives. *Faraday Discussions*. DOI: 10.1039/c4fd00159a.
- Wu, C., A. C. Wang, W. Ding, H. Guo, dan Z. L. Wang. 2019. Triboelectric Nanogenerator: A Foundation of the Energy for the New Era. *Advanced Energy Materials*. DOI: 10.1002/aenm.201802906.
- Zhou, Y. S., G. Zhu, S. Niu, Y. Liu, P. Bai, Q. Jing, dan Z. L. Wang. 2014. *Adv. Mater.* 26:1719-1724.