

Kekuatan Riset Multiskala dalam Membentuk Teknologi Infrastruktur Masa Depan

Ivindra Pane

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan-Institut Teknologi Bandung
 Jl. Ganesha No. 10 Bandung 40132
 E-mail: ivpane@si.itb.ac.id

Abstrak

Riset multiskala adalah bidang riset yang mengeksplorasi beragam fenomena fisika dan kimia yang terjadi pada berbagai skala observasi. Yang menjadi perhatian utama dalam riset ini adalah skala observasi berpengaruh terhadap tingkat pemahaman mengenai suatu fenomena fisika atau kimia. Pemahaman yang mendalam biasanya didapat setelah observasi pada skala yang lebih kecil (mikron- maupun nano-meter) yang dapat dilakukan pada suatu bahan/sistem buatan manusia maupun bahan/sistem di alam. Riset multiskala dikenal menghasilkan terobosan-terobosan dalam bidang iptek. Contoh yang sangat nyata adalah pelapis anti basah yang dihasilkan dari rekayasa struktur permukaan sehingga butiran cairan membentuk sudut kontak $< 90^0$ (non wetting), jenis pelapis yang tahan terhadap suhu sangat tinggi yang disebut pelapis pelindung panas (thermal barrier coating), dan semen pemakan polutan yang mengandung titanium dioksida yang dapat mempermudah proses dekomposisi polutan di udara. Contoh-contoh ini setidaknya ini dapat mengilhami kita akan potensi dari riset multiskala pada aplikasi teknologi infrastruktur. Tulisan ini menyetengahkan hasil riset multiskala terutama yang erat hubungannya dengan perkembangan teknologi infrastruktur. Diharapkan apa yang disajikan dapat dikembangkan lebih lanjut di lingkungan ITB.

Kata-kata Kunci: Multiskala, semen, smart material.

Abstract

Multiscale research is a subject that exploits various physical and chemical phenomena at different observation scales. In this research, the emphasis is that the observation scale influences our level of understanding regarding a physical or chemical phenomenon. A deeper understanding is usually acquired by making observations at smaller scales (micon- or nano-meter) that can be done towards man-made or natural materials/ sytems. Multiscale research is known to produce breakthrough inventions in science and technology. Some real examples include the non wetting coating that is developed by engineering a surface that allows for the liquid contact angle to be less than 90^0 (non wetting), the thermal barrier coating which can withstand exposures to very high temperature environment, and the pollutant consuming cement containing titanium oxide which allows for decomposition of pollutants in air. These examples can inspire the development of multiscale research for infrastructure technology. This paper highlights the results of multiscale research, especially those that is relevant to the development of infrastructure technology. It is desired that what is presented can be developed further at ITB.

Keywords: Multiscale, cement, smart material, nanotechnology.

1. Pendahuluan

Arah dan gerak langkah manusia menuju masa yang akan datang selalu bermula dari kegiatan mencari solusi permasalahan yang sedang dihadapi, dimulai dari memahami permasalahan, melakukan riset atau penelitian untuk mencari solusi yang tepat, hingga menerapkan solusi yang didapat sambil melakukan perbaikan-perbaikan. Dewasa ini kita dapat menikmati manfaat mulai dari kamera digital, *memory stick*, telepon selular, televisi atau layar *touch screen*, *laptop* hingga bahan super kuat dan ringan, lapisan anti basah, anti gores, dan anti karat. Apa yang kita nikmati sejauh ini merupakan buah dari usaha melakukan riset bertahun-tahun.

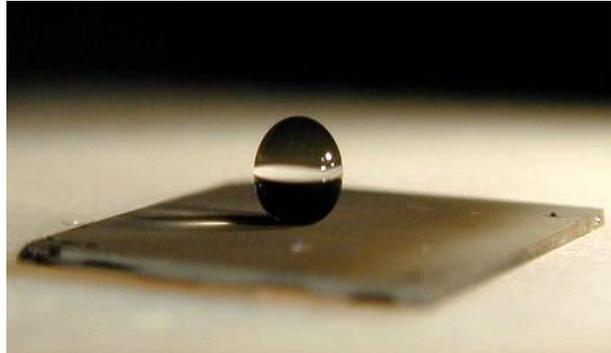
Apa sebenarnya yang memicu kita melakukan riset? Penyebabnya adalah semakin dinamisnya kebutuhan manusia dan semakin sedikitnya sumber daya alam yang kita miliki. Harus diakui bahwa sekalipun sumber daya alam ada yang dapat diperbarui, bahan-bahan seperti minyak bumi, batu bara ataupun gas alam masih belum menjadi bahan yang tergantikan (*nonrenewable*). Sumber daya alam yang tergantikan sekalipun masih membutuhkan teknologi daur ulang yang baik agar dapat tergantikan. Tuntutan atau kebutuhan hidup manusia pun semakin besar dan beragam, setidaknya akibat semakin bertambahnya populasi dan beragamnya jenis pekerjaan.

Riset multiskala dikenal menghasilkan terobosan-terobosan dalam bidang iptek. Contoh yang sangat nyata adalah pelapis anti basah (*non wetting coating*) yang dihasilkan dari rekayasa struktur permukaan sehingga butiran cairan membentuk sudut kontak $< 90^\circ$ (*non wetting*) (Feng et. al., 2002), seperti terlihat pada **Gambar 1**. Akibatnya, gaya gravitasi dari butiran cairan di atas lapisan ini pada permukaan yang miring akan selalu berhasil menggulirkan butiran sehingga tidak menempel (tidak membasahi) di permukaan. Dengan pelapis ini kaca-kaca jendela kita dapat tampak selalu jernih ketika hujan. Ada juga jenis pelapis yang tahan terhadap suhu sangat tinggi yang disebut pelapis pelindung panas (*thermal barrier coating*) (Clarke & Levi, 2003). Pelapis ini memanfaatkan porositas dari mikrostruktur dan susunan sub lapisan yang ada yang dapat dirancang sedemikian rupa sehingga efektif melindungi terhadap panas (**Gambar 2**).

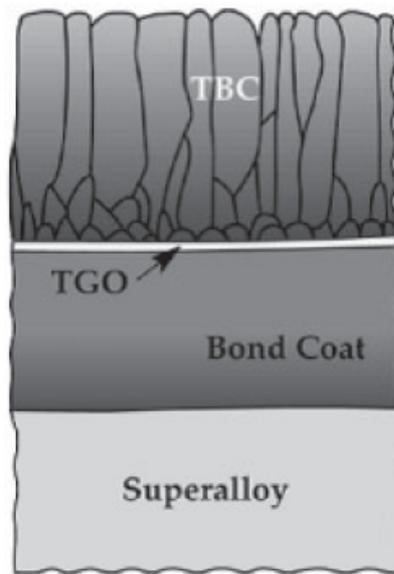
Contoh lain adalah munculnya struktur pelat lapis (*sandwich structure*) dengan bahan yang ringan tapi kuat yang terbuat dari logam ataupun keramik (**Gambar 3**). Struktur ini memiliki mikrostruktur khusus dan bersifat multifungsi, dimana ia dapat menahan beban kejut (*impact*) sekaligus dapat melindungi terhadap suhu tinggi. Sesuai dengan namanya, struktur ini memiliki lapisan kulit (*skin*) dan inti (*core*) terbuat dari bahan dan mikrostruktur yang berbeda. Kedua lapisan bekerja sinergis (Wadley et. al., 2003; Yungwirth et. al., 2008). Beban kejut akan disalurkan melalui skin yang kuat dan diredam melalui mekanisme deformasi di bagian core. Mekanisme deformasi dari core haruslah dipahami pada skala yang tepat agar didapat struktur dengan kinerja baik. Di samping itu, tingkat kepadatan core yang sangat berbeda dibanding skin menyebabkan sistem struktur ini baik untuk menghambat aliran panas.

Salah satu bidang rekayasa yang sangat didominasi riset multi skala adalah bidang elektronik. Contoh aplikasi riset multiskala dimana penulis pernah terlibat adalah perancangan perangkat kapasitor ferroelektrik pada random access memory (RAM) atau apa yang sering disebut FeRAM, seperti terlihat pada **Gambar 4** (Zhu et. al., 2007; Pane et. al., 2008a; Pane et. al., 2008b). Satu kapasitor adalah 1 Bit sel memori dengan ukuran kira-kira 250 nanometer x 250 nanometer. Anda dapat mengasalkan perangkat penyimpanan data (*memory device*) dengan densitas 16-100 Mega Bit per luas 1 mm². Generasi terbaru FeRAM bahkan dapat menghasilkan densitas 1-10 Giga Bit per mm². Cara kerja kapasitor adalah melalui pergerakan dipole yang dapat di lakukan dengan memberikan beda tegangan atau medan elektrik. Dari riset ini diketahui bahwa pergerakan dipole yang terjadi pada skala atomistik banyak dipengaruhi oleh

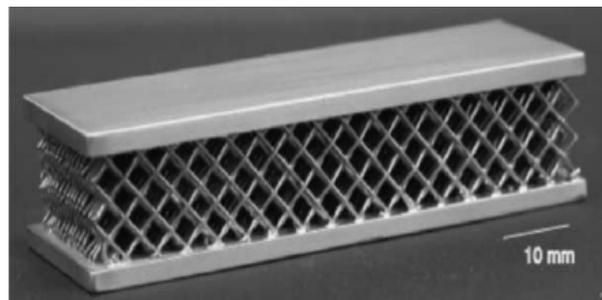
kondisi kekangan yang dipengaruhi geometri dari kapasitor. Kekangan ini berpengaruh pada kinerja dan sensitifitas sel memori. Perlu diingat bahwa temuan ini tidak dibuat oleh peneliti dari teknik elektronika tetapi oleh peneliti bidang mekanik! Jadi, riset multiskala juga bersifat multidisiplin.



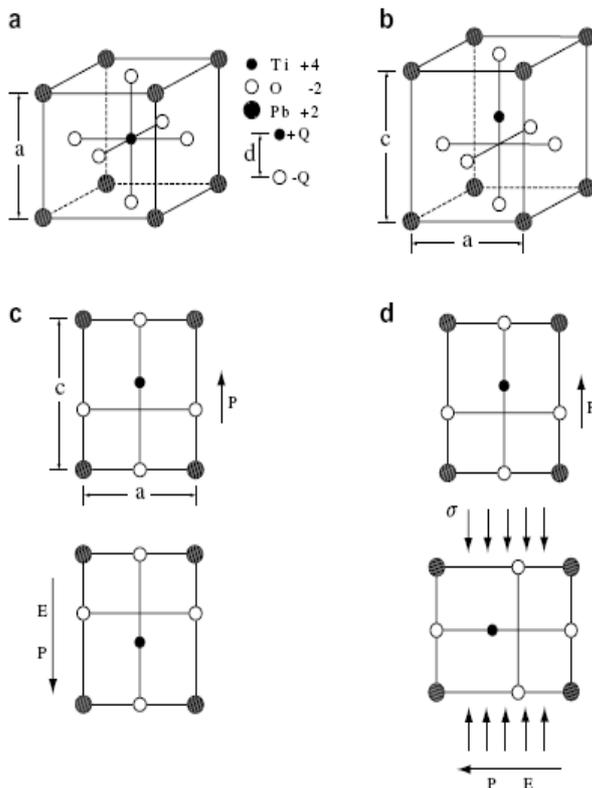
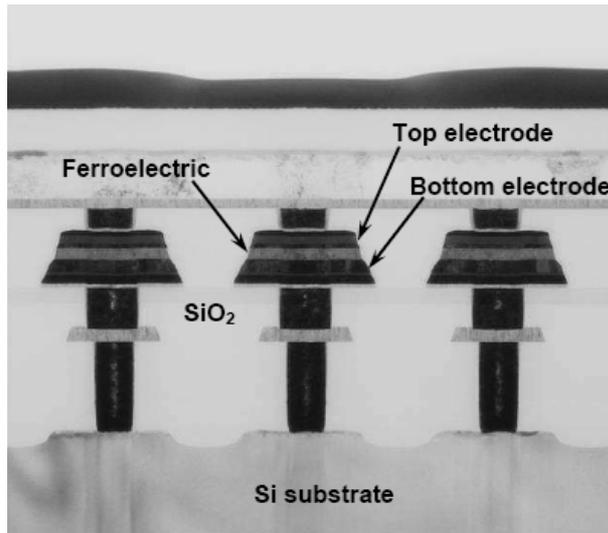
Gambar 1. Butiran air yang tidak ‘membasahi’ permukaan dengan pelapis anti basah



Gambar 2. TBC: Thermal Barrier Coating, TGO: Thermally Grown Oxide



Gambar 3. Contoh struktur sandwich dengan lattice core terbuka dari baja



Gambar 4. Kapasitor FeRAM dan prinsip kerja bahan ferroelektrik pada skala atom

Contoh di atas sudah sangat lazim diterapkan di bidang selain teknologi infrastruktur. Setidaknya ini dapat mengilhami kita akan potensi dari riset multiskala pada aplikasi teknologi infrastruktur. Dewasa ini jembatan antar pulau bukan lagi impian. Bukan tidak mungkin suatu waktu nanti kita dapat membangun terowongan bawah laut dengan memanfaatkan terobosan dari riset multiskala seperti penggunaan bahan multifungsi dan adaptif terhadap kondisi lingkungannya, seperti bahan anti karat yang ringan namun sekaligus kuat dan kedap air.

Berbicara mengenai capaian dalam riset multiskala tidak akan pernah ada habis-habisnya. Temuan-temuan baru demikian banyak dan terjadi di berbagai disiplin ilmu. Tujuan utama dari tulisan ilmiah ini adalah menyetengahkan hasil riset multiskala terutama yang erat hubungannya dengan perkembangan teknologi infrastruktur. Diharapkan apa yang akan disajikan dapat dikembangkan lebih lanjut di lingkungan ITB.

2 Riset Multiskala

2.1 Terminologi dan besaran yang relevan

Riset multiskala atau *multiscale research* adalah pengembangan di berbagai bidang keilmuan dengan mengeksplorasi beragam fenomena fisika dan kimia yang terjadi pada berbagai skala observasi. Dalam konteks ini apa yang terjadi pada skala besar, yaitu rentang ukuran meter, selalu bersumber pada apa yang terjadi pada skala lebih kecil, yaitu pada rentang ukuran mikrometer (10^{-6} m) atau nanometer (10^{-9} m).

2.1 Potensi riset multiskala

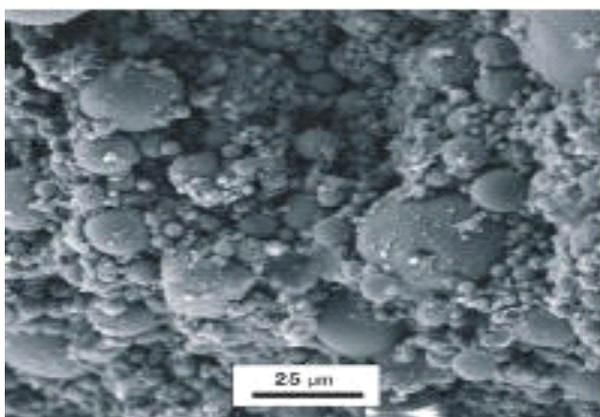
Siapa yang pernah membayangkan bahwa suatu saat akan ada pelapis anti gores bahkan anti basah, atau akan ada penyimpanan data (*memory device*) dengan densitas 1-10 Giga Bit per mm^2 . Inilah yang diharapkan dapat dihasilkan dari riset multiskala, suatu terobosan yang ekstrem dan fundamental. Terobosan ini sudah sangat dinikmati terutama di bidang elektronika, telekomunikasi, dan teknologi informasi. Sensor ataupun aktuator dewasa ini sudah sedemikian kecil (berukuran nanometer) dan terbuat dari bahan yang diproses dengan pemahaman perilaku bahan pada suatu rentang skala, dari nano hingga micronmeter. Ini berbeda dengan pendekatan konvensional yang cenderung terpaku pada satu skala observasi. Bukan hanya itu, sensor moderen tidak semata-mata memanfaatkan perilaku elektrik tetapi telah merupakan sistem kombinasi elektrik-mekanikal atau apa yang dikenal dengan *microelectromechanical/nanoelectromechanical systems* (MEMS/NEMS).

Potensi riset multiskala dalam membentuk teknologi infrastruktur di masa depan sudah mulai dapat dilihat. Dalam membahas hal ini, kita perlu memulai dari bagian mendasar dari infrastruktur. Beton adalah material infrastruktur yang paling banyak digunakan di belahan dunia manapun. Berbicara mengenai perkembangan bahan beton sangat relevan dengan perkembangan infrastruktur. Dalam konteks bahan konstruksi ini, perilaku getas beton yang membuatnya tidak berkinerja sebaik baja sudah dapat kita pahami. Dengan memodifikasi menjadi beton fiber (*fiber reinforced concrete*), bisa dihasilkan produk dengan sifat daktil dan kinerja mendekati metal atau baja (Kanda & Li, 2006). Ini tidak lepas dari usaha kita

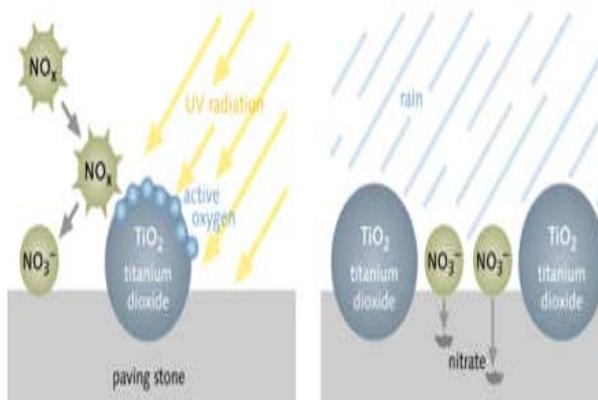
memahami pengaruh interaksi fiber dan semen dalam beton pada skala micronmeter. Bayangkan bila elemen struktur baja yang harganya kira-kira 20 kali harga beton per kilogramnya dapat digantikan sampai 20% saja maka penghematan harga bahan dapat mencapai 19%.

Selain contoh di atas, kini diketahui bahwa jenis garam yang dipakai untuk pegawet dan penambah rasa pada makanan ringan (sodium acetat, kalsium stearat, potasium asetat dan lain-lain) ternyata dapat dipakai untuk menghasilkan beton yang kedap air. Ini diketahui dari penelitian perilaku butiran garam di dalam pori beton pada skala mikron dan nanometer. Butiran garam yang dipakai ternyata dapat mengembang ketika menyerap air sehingga menyumbat pori. Riset di bidang ini kini sedang berjalan di laboratorium dimana penulis bekerja, Laboratorium Rekayasa Struktur.

Baru-baru ini grup riset yang dipimpin Prof. Ulm dari Massachusetts Institute of Technology (MIT) membuat pengumuman mengejutkan bahwa partikel penyusun semen yang sudah mengeras membentuk susunan menyerupai piramid hingga memiliki kepadatan optimal dan kekuatan yang tinggi. Ulm berpandangan bahwa jika kekuatan bahan lebih banyak dipengaruhi oleh susunan partikelnya maka semen konvensional dapat diganti bahan sejenis dengan susunan partikel yang serupa. Produksi semen konvensional yang melibatkan pembakaran pada suhu mencapai 1200°C dikenal sebagai penyumbang emisi CO_2 hingga 10% dari total emisi CO_2 di dunia. Sehingga produksi semen diupayakan dilakukan pada suhu rendah. Pilihan sementara adalah dengan memanfaatkan magnesium (Mg) sebagai pengganti calcium (Ca) yang ada pada semen konvensional (**Gambar 5**). Proses produksi semen menggunakan Mg dan MgO dikenal hemat energi dan dapat dilakukan pada suhu 600°C , dengan demikian dapat mengurangi emisi CO_2 .



Gambar 5. Semen kaya MgO



Gambar 6. Cara kerja semen TX active produksi italcemente

Produsen semen Italia Italcemente mulai memproduksi semen bernama TX Active yang dapat mendekomposisi polutan di udara. TX Active mengandung titanium dioksida (TiO_2) yang bila terkena sinar matahari berfungsi menjadi fotokatalisator (*photocatalyzer*) yang mempermudah proses dekomposisi polutan di udara (lihat pada gambar di bawah). Media massa di Eropa menyebut produk ini 'semen pemakan polutan'. Bangunan yang dibuat dengan produk ini tidak menumpuk debu di permukaannya dan selalu tampak lebih bersih dan bercahaya - suatu hal yang disukai oleh para arsitek.

Belum lama ini Prof. Chung dari Universitas Buffalo, USA mengembangkan apa yang disebut bahan *smart concrete* (Chen & Chung, 1996). Material ini adalah beton konvensional yang diberi tambahan serat karbon berukuran mikronmeter. Akibat adanya serat karbon, beton tidak saja bertambah kuat tapi juga dapat difungsikan sebagai sensor yang cukup sensitif. Sensor bekerja berdasarkan deteksi hambatan elektrik (*electrical resistance*) yang dialaminya. Chung telah menerapkan ide ini untuk mengukur besarnya beban yang melalui struktur jembatan terbuat dari *smart concrete*. Hasilnya, berat kendaraan yang lewat dapat diketahui dan dengan sendirinya jenisnya dapat diduga.

3. Prinsip Dasar Riset Multiskala

3.1 Pengamatan fenomena alam pada multiskala

Pertanyaan yang harus selalu dimunculkan dalam menjalani riset ini adalah sudahkah kita mengamati suatu fenomena fisika atau kimia pada skala yang tepat. Bila ini sudah terjawab maka tugas berikutnya adalah mengembangkan teori untuk fenomena tersebut atau melengkapi teori yang sudah ada. Banyak aplikasi bidang rekayasa bertumpu pada dua teori utama, teori/model transfer massa/energi dan keseimbangan gaya, disamping pada fenomena dasar fisika dan kimia seperti evaporasi, pembentukan

ikatan antar atom/molekul, transformasi fasa (kristalisasi, amorfisasi, solidifikasi), dan lain-lain.

Persamaan transfer massa/energi adalah persamaan differensial yang dapat ditulis sebagai gradien dari vektor flux (massa atau panas/heat):

$$q_{i,i} = 0$$

Penyelesaian masalah terapan selain menggunakan persamaan transfer massa/energi juga memerlukan, kondisi batas (*boundary conditions*) dan hubungan flux-mass/energi. Perilaku bahan tercermin dari hubungan flux-mass/energi.

Persamaan keseimbangan statis gaya (*force equilibrium*) pada zat padat adalah persamaan differensial yang dapat ditulis sebagai gradien dari tensor tegangan σ_{ij} :

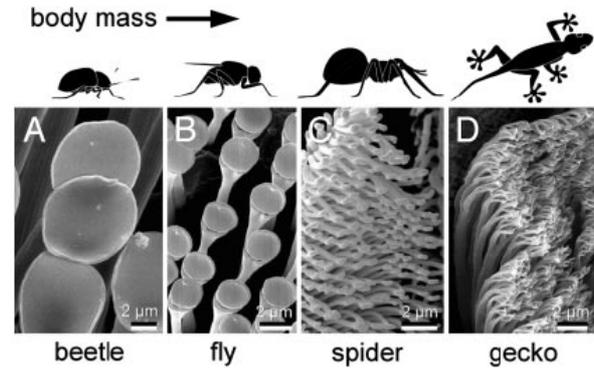
$$s_{ij,j} = 0$$

Penyelesaian masalah terapan selain menggunakan persamaan keseimbangan juga memerlukan, kondisi batas (*boundary conditions*), kondisi kompatibilitas, dan hubungan tegangan-regangan. Perilaku mekanik bahan tercermin dari hubungan tegangan-regangannya.

Teori di atas masih berlaku di berbagai skala observasi. Hanya saja, hubungan konstitusi bahan (hubungan tegangan-regangan atau flux-mass) dapat dimengerti secara berbeda di skala observasi yang berbeda. Hubungan konstitusi bahan yang terjadi pada skala yang lebih kecil (nanometer ke bawah) lebih detail dan realistis dan menampilkan fenomena seperti pergerakan dislokasi atom, *flow of defect*, kristalisasi, amorfisasi, solidifikasi, dan lain-lain. Persoalannya adalah pemodelan dari fenomena ini cukup sulit dan membutuhkan teknik eksperimen yang sulit pula. Akan tetapi, sebagai imbalannya kita mendapatkan informasi yang sangat berharga mengenai perilaku detail bahan. Riset mengenai persoalan inilah yang berpotensi meningkatkan kinerja bahan yang dengan otomatis meningkatkan kinerja sistem yang menggunakan bahan tersebut (lihat contoh-contoh di atas).

3.2 Pelajaran dari alam (*lesson from nature*)

Para peneliti biomaterial yang banyak meneliti mikrostruktur tulang manusia menemukan bahwa mineral tulang and semen/beton cukup serupa. Padahal kita tahu bahwa produksi semen harus melalui kalsinasi batu gamping/*limestone* pada 1200°C. Sedangkan tulang terbentuk pada suhu rata-rata tubuh, untuk manusia sekitar 37°C. Jadi bagaimana dua bahan dengan mikrostruktur, mineral dan perilaku yang sangat mirip dapat terjadi melalui dua suhu proses yang sangat jauh berbeda.



Gambar 7. Struktur *fibrillar* pada kaki serangga dan tokek

Baru-baru ini para peneliti menemukan cara meningkatkan kemampuan produk pelekat dan lem. Idenya terinspirasi dari cara hewan tokek atau *gecko* menempel pada dinding atau plafon dan sanggup melawan gaya gravitasi. Tokek ternyata memiliki struktur rambut fibril berskala nanometer (*fibrillar nanoscale*) pada jari-jari kakinya (Gambar 7). Pemahaman menggunakan teori mekanika kontak menjelaskan bahwa dengan struktur ini jari kaki tokek menempel dapat beradhesi sangat baik dengan permukaan padat. Struktur serupa juga dimiliki serangga yang juga mampu menempel pada dinding atau plafon. Hanya saja, berdasarkan Gambar 7 di atas tokek memiliki massa yang jauh lebih besar dibanding serangga, dengan demikian juga harus memikul beban gravitasi yang lebih besar pula. Sehingga struktur jari kaki tokek seharusnya jauh lebih optimal dibanding serangga.

Pesan dari kajian di atas cukup jelas: belajarlah dari alam! Bukan tidak mungkin pada suatu saat kita dapat menghasilkan perekat sejenis semen/mortak yang bekerja dengan prinsip lekatan kaki tokek dan dihasilkan tanpa pemanasan pada suhu tinggi.

4. Penerapan Riset Multiskala di Bidang Infrastruktur

4.1 Dasar penerapan riset multiskala

Infrastruktur modern adalah suatu sistem yang terintegrasi. Artinya, infrastruktur membutuhkan teknologi sistem informasi untuk sensor maupun aktuator, sistem struktur dengan kinerja optimal, dan bahan yang ekonomis namun kuat serta *durable* agar dapat berfungsi sempurna dalam kondisi terburuk.

Di dalam perencanaan, pembangunan maupun pengoperasian sistem infrastruktur yang massive dan kompleks seperti jembatan, pelabuhan, bandara, terowongan, maupun sistem terintegrasi seperti *Mass Rapid Transportation System* (MRT) mutlak diperlukan suatu konsep. Dewasa ini ada beberapa

konsep yang sejalan dengan potensi aplikasi riset multiskala di bidang infrastruktur yaitu konsep *smart materials* dan *smart and sustainable infrastructure*.

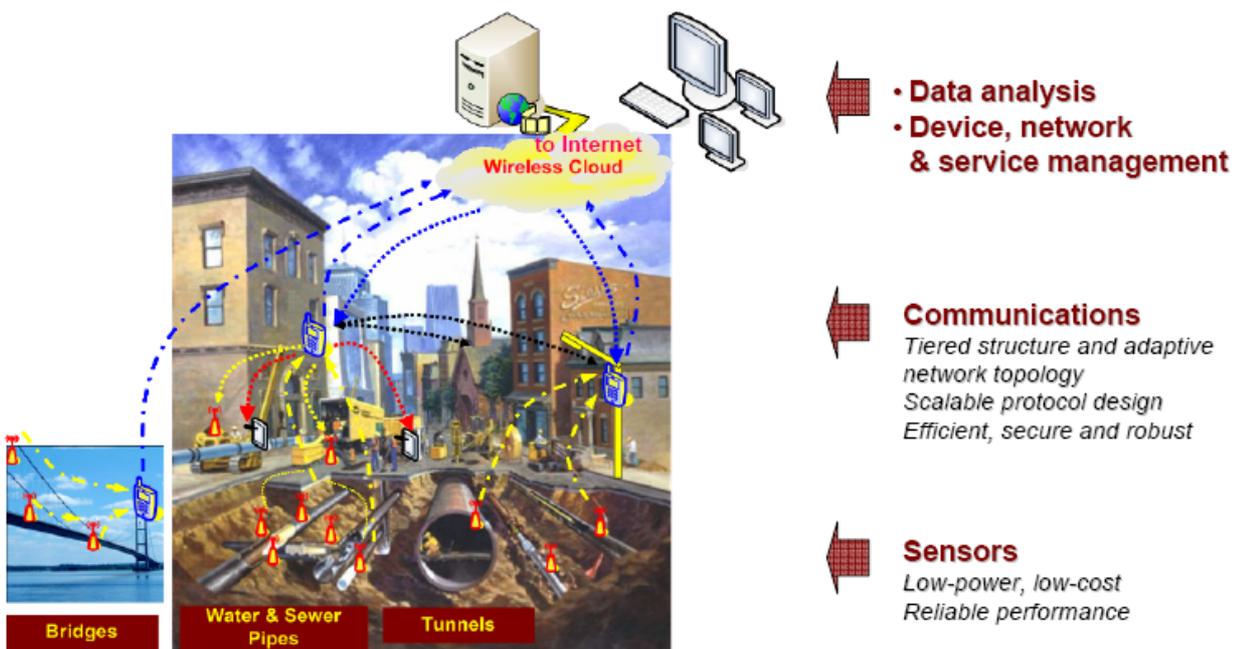
4.2 Smart materials dan smart and sustainable infrastructure

Smart materials pada dasarnya adalah bahan yang mampu beradaptasi dengan lingkungannya dan terkadang multifungsi. Dalam konteks infrastruktur produk seperti TX Active dari Italcemente, semen kedap air dengan garam pengawet makanan, semen mengandung serat karbon, *shape memory alloys* (SMA), struktur sandwich, pelapis anti karat, serat optik, dan bahan lainnya termasuk *smart materials*. Bahan-bahan ini dapat menjaga kinerja infrastruktur tetap pada kondisi baik walaupun dalam kondisi lingkungan yang ekstrem. Pembahasan mengenai *smart materials* sedikit banyak sudah diberikan sebelumnya.

Smart and sustainable infrastructure adalah infrastruktur yang mampu beradaptasi dengan kondisi lingkungannya, dan berfungsi secara ramah lingkungan serta berkelanjutan. Konsep ini diterapkan pada infrastruktur massive dan kompleks seperti jembatan antar pulau, sistem monorail atau kereta bawah tanah (*subway*), terowongan, atau pelabuhan dan melibatkan penerapan teknologi dari bidang diluar teknik sipil. Karena pengoperasian yang kompleks maka infrastruktur di atas mengandalkan teknologi informasi, sistem mekanik dan elektrikal, dan sistem penyediaan tenaga listrik yang kompleks pula.

Contoh konsep ini dapat dilihat pada terowongan transportasi bawah tanah di London atau yang dikenal dengan *London Underground/Tube*. Fasilitas ini adalah bagian dari *Mass Rapid Transportation System* kota London. Cangkang dari terowongan terbuat dari beton dengan perkuatan serat dan baja tulangan. Bahan ini tidak termasuk *smart material* tetapi memiliki kekuatan/kinerja yang sangat baik sesuai dengan hasil riset multiskala. Selain itu dari segi elektrikal dan mekanikal *London Underground* yang berada cukup jauh di bawah tanah dilengkapi dengan sistem elevator dan penyediaan tenaga listrik yang mutakhir. Berbagai macam sensor mulai dari yang berfungsi untuk mendeteksi tingkat polusi hingga untuk mendeteksi kekuatan struktur dipasang di sana. *London Underground* dilengkapi dengan sistem deteksi kerusakan menggunakan serta optik yang dapat memberi informasi mengenai kondisi struktur sepanjang terowongan. Serat optik sendiri termasuk *smart material*. Sistem monitor seperti ini tentu dijalankan agar infrastruktur dapat berfungsi berkelanjutan (*sustainable*).

Pemerintah kota London juga berkeinginan menerapkan sistem monitor nirkabel pada sarana transportasinya. Hal ini diilustrasikan pada **Gambar 8**. Ini akan menjadi terobosan terbaru dalam dari penerapan riset multiskala.



Gambar 8. Skema penerapan teknologi nirkabel pada infrastruktur jembatan dan terowongan

5. Kesimpulan

Dua intisari penting agar riset multiskala dapat berhasil dan diterapkan:

1. Telitilah fenomena fisika atau kimia pada berbagai skala atau pada suatu rentang skala. Jangan hanya terpaku pada satu skala observasi. Besar kemungkinan observasi pada skala yang lebih kecil, sekalipun kompleks dan sulit dimodelkan, dapat menjawab keterbatasan teori konvensional.
2. Belajarlah dari alam. Sebab bahan atau sistem alami dapat bertahan di alam yang terkadang ekstrem serta sudah dapat beradaptasi. Kita tinggal mencari *blue print* atau identitas natural dari bahan atau sistem tersebut untuk dipelajari dan diambil manfaatnya.

Menekuni riset multiskala dapat dilakukan dalam berbagai bentuk, dengan mengembangkan teori dan pemodelan, melakukan eksperimentasi maupun dengan melakukan penerapan dan komersialisasi hasil.

Dari contoh-contoh di atas, jelas bahwa teknologi infrastruktur masa depan bergantung dari riset multiskala di bidang-bidang sipil, elektronika, mesin, material, kimia dan fisika. Jadi riset multiskala bukanlah milik segolongan peneliti atau ilmuwan dari satu macam disiplin ilmu saja, tetapi milik berbagai disiplin ilmu. Karena itu riset multiskala harus dikembangkan secara bersama melibatkan disiplin ilmu terkait. Juga dapat disimpulkan bahwa pengaruh riset multiskala sangat kuat dalam menentukan teknologi infrastruktur kita di masa depan.

Periset ITB tahu dan mampu mengembangkan riset multiskala di Indonesia. Dengan segala keterbatasan yang ada ITB, kami akan terus menggulirkan ide-ide yang dapat dikembangkan menjadi terobosan baik di bidang infrastruktur maupun bidang lain.

Sebagai penutup, mari berkarya di ITB bersama kami, menjadi bagian dari orang-orang terpilih di negara ini untuk berperan serta dalam menentukan masa depan Indonesia khususnya dalam bidang infrastruktur, dan dalam bidang sains, teknologi, sosial-ekonomi dan budaya.

Daftar Pustaka

- Chen, P.W., and Chung, D.D.L., 1996, *Concrete as a New Strain/Stress Sensor*, Composites Part B 27B, 11-23.
- Clarke, D.R., and Levi, C.G., 2003, *Materials Design for the Next Generation Thermal Barrier Coatings*, *Annual Reviews of Materials Research* 33, 383- 417.
- Feng, L., Li, S., Li, Y., Li, H., Zhang, L., Zhai, J., Song, Y., Liu, B., Jiang, L., Zhu, D., 2002, *Super-Hydrophobic Surfaces: From Natural to Artificial*, *Advanced Materials* 14, 1857-1860.
- Kanda, T. and Li, V.C., 2006, Practical Design Criteria for Saturated Pseudo Strain Hardening Behavior in ECC, *Journal of Advanced Concrete Technology* 4 (1), 59-72.
- Pane, I., Fleck, N.A., Huber, J.E., and Chu, D.P., 2008a, Effects of Geometry Upon the Performance of thin Film Ferroelectric Memory, *International Journal Solids Structures* 45 (7-8), 2024-2041.
- Pane, I., Fleck, N.A., Chu, D.P., and Huber, J.E., 2008b, *Predicted Performance of Ferroelectric Memory Capacitors under Mechanical Constraint*, *Ferroelectrics*.
- Wadley, H.N.G., Fleck, N.A., and Evans, A.G., 2003, *Fabrication and Structural Performance of Periodic Cellular Metal Sandwich Structures*, *Composites Science and Technology* 63, 2331-2343.

