

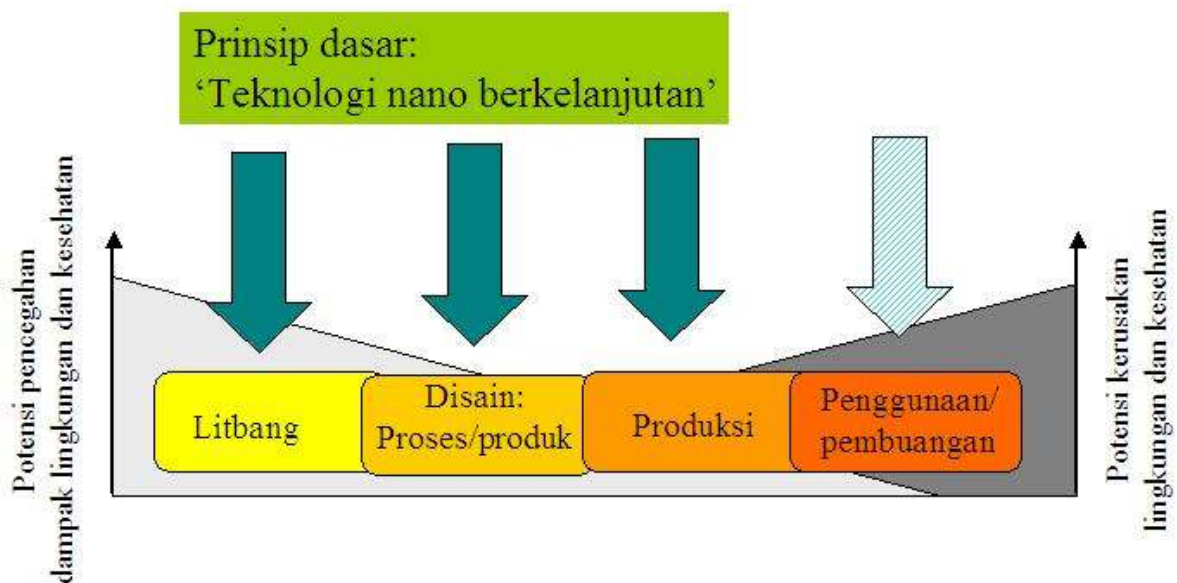
## Perlunya litbang teknologi nano yang berkelanjutan

Sri Harjanto

Teknologi nano disebut-sebut sebagai salah satu bentuk revolusi ilmu pengetahuan dan teknologi terbesar abad ke-21 ini. Perkembangan teknologi ini semakin meluas tidak hanya di negara-negara maju tapi juga negara sedang berkembang seperti Indonesia. Salah satu alasan makin meluasnya penelitian dan pengembangan teknologi ini dilakukan di seluruh dunia adalah potensi penggunaan dan komersialisasi teknologi yang sangat besar. Dalam waktu yang tidak terlalu lama lagi aplikasi teknologi nano diperkirakan sudah sampai kepada pengguna, seperti material memori komputer terbaru, teknologi penyaji (display) nir-kertas, perangkat diagnosa medis dan sensor serta material dasar perekat, cat atau pun pelumas serta masih banyak lagi.

Bersamaan dengan itu, di beberapa negara yang telah mengembangkan teknologi ini telah mulai menelaah dampak lingkungan teknologi nano. Mengingat masih belum ada kejelasan seberapa besar resiko penggunaan teknologi nano ini terhadap lingkungan maupun manusia penggunanya, meskipun diperkirakan produksi teknologi ini di dunia tidak melebihi 1 ton [1]. Tambah lagi belum ada kejelasan aturan main dan peraturan untuk mengkalkulasi dampak lingkungan teknologi nano ini.

Tulisan ini mencoba mengulas resiko paparan produk penelitian dan pengembangan teknologi nano dalam bentuk material nano khususnya terhadap manusia. Dengan memperhatikan kedua sisi teknologi nano antara manfaat dan potensi resiko, maka siapapun pelaku litbang, diharapkan akan mampu mengelola teknologi ini secara berkelanjutan dan paripurna. Gbr. 1 memperlihatkan bahwa proses pencegahan dampak lingkungan yang diakibatkan oleh teknologi selayaknya dilakukan pada tahapan yang dini, yaitu tahap litbang. Dengan penguasaan pengetahuan di tahap awal diharapkan akan memberikan arah yang lebih aman dan ramah lingkungan pada proses selanjutnya. Dengan demikian permasalahan yang berpotensi muncul pada tahap produksi, penggunaan dan pembuangan dapat ditekan.



Gbr. 1 Peluang pengarahan teknologi nano melalui siklus hidupnya [2]

## 1. Material nano

Material nano adalah material yang memiliki komponen terstruktur dengan salah satu dimensinya berukuran kurang dari 100 nm. Pengertian ini dapat dikategorikan lagi menurut bentuk akhir material tersebut. Dalam hal ini, lapisan tipis atau pelapis permukaan, kawat dan tabung nano digolongkan sebagai material nano dua dimensi. Sedangkan, presipitat, endapan dan koloid dan partikel kuantum (partikel sangat kecil semikonduktor) termasuk dalam material nano tiga dimensi.

Dengan makin kecilnya ukuran material, terdapat dua faktor yang menyebabkan sifat material nano berbeda dengan material ukuran lainnya, yaitu: peningkatan luas permukaan dan efek kuantum. Populasi atom pada permukaan dibandingkan di dalam partikel pun mengalami perubahan. Sebagai misal, sebuah partikel dengan ukuran 30 nm maka populasi atom-atom yang berada di permukaan adalah 5%, jika partikel berukuran 10 nm maka perbandingan tersebut menjadi 20% dan jika suatu partikel berukuran 3 nm maka 50% dari atom-atomnya berada di permukaan. Hal ini menggambarkan bahwa dengan makin kecilnya ukuran sebuah partikel, luas permukaan per satuan massa akan meningkat.

Mengingat pertumbuhan partikel dan reaksi kimia umumnya berada di permukaan partikel, dengan makin meningkatnya luas permukaan per satuan massa maka reaktivitas partikel tersebut juga akan bertambah besar dibandingkan partikel sejenis yang berukuran lebih besar. Efek kuantum mulai berperan besar dalam mempengaruhi sifat material seiring dengan mengecilnya ukuran partikel ke skala nano. Beberapa sifat material yang dipengaruhi efek kuantum antara lain adalah sifat optik, kelistrikan dan magnetik. Perubahan sifat dan perilaku material akibat efek kuantum ini dimanfaatkan dalam penggunaan material nano untuk semikonduktor (quantum dot) atau opto elektronika (quantum well laser).

Material nano dapat dibedakan menurut proses pembentukannya, yaitu material nano alami dan buatan manusia atau dihasilkan sebagai bagian proses yang dilakukan manusia (antropogenik), seperti diperlihatkan Tabel 1. Dari jenis material yang diperlihatkan, umumnya interaksi manusia dengan partikel nano tidak hanya didominasi penduduk kota besar. Bahkan penduduk pedesaan dan pegunungan pun bisa saja berinteraksi dengan partikel nano. Proses interaksi atau kontak antara partikel nano dengan manusia menjadi perhatian para ilmuwan saat ini dalam kaitan resiko akibat paparan partikel nano. Seperti dikemukakan pada bagian sebelumnya, reaktivitas partikel makin meningkat dengan makin kecilnya ukuran partikel pada skala nano. Dengan demikian rute paparan, potensi akumulasi partikel nano pada tubuh manusia melalui bagian tubuh yang berhubungan langsung dengan lingkungan menjadi perhatian akan potensi toksik material nano.

Seberapa besar potensi bahaya material nano dapat diukur melalui seberapa toksik atau beracunnya material tersebut. Yang tentu menjadi pertanyaan adalah apakah ukuran material pada skala nano berpengaruh terhadap tingkat toksisitasnya. Beberapa kajian menunjukkan bahwa tingkat keberacunan partikel nano ditentukan oleh beberapa faktor berikut:

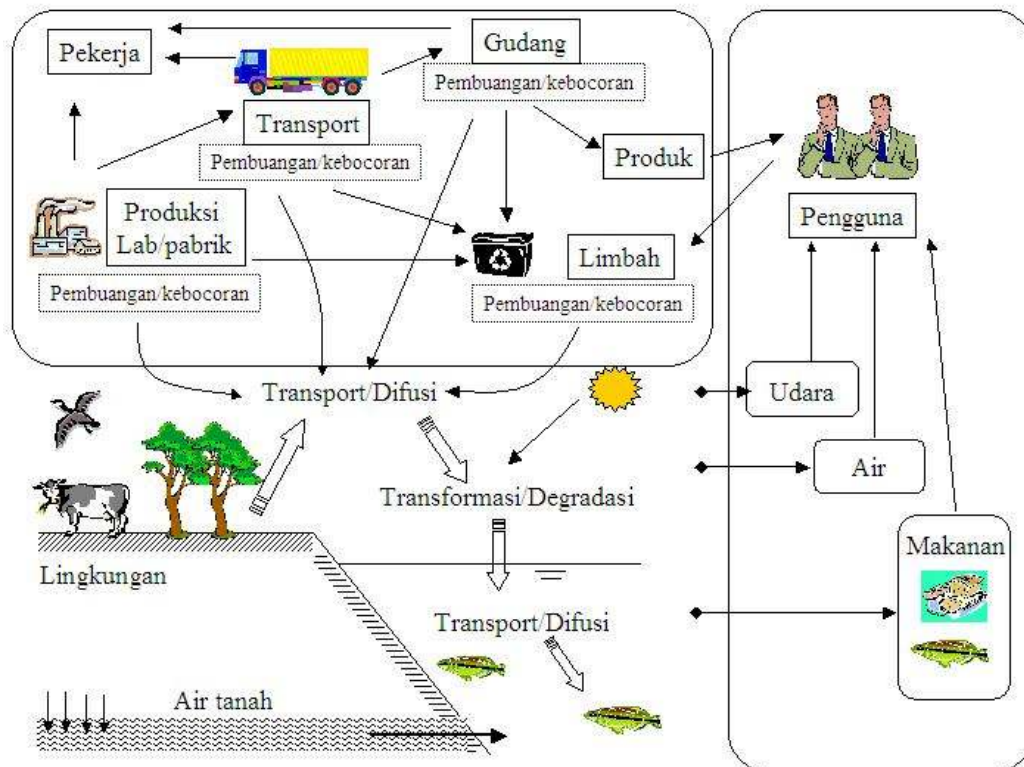
- total luas permukaan partikel terhadap organ tujuan;
- reaktivitas kimia permukaan, termasuk komponen yang terdapat di permukaan seperti logam dan pelapis serta kemampuannya terlibat dalam reaksi yang melepaskan radikal bebas;
- dimensi fisika partikel yang memungkinkan terpenetrasi dalam organ atau sel dan menyulitkan pembuangannya;
- kelarutannya, seperti garam-garaman yang mudah terlarut sebelum terjadi reaksi beracun

Tabel 1 Partikel nano di alam dan lingkungan [1]

Alami	Antropogenik (hasil aktivitas/buatan manusia)	
	Insidental	Rekayasa
Abu vulkanik	Produk pembakaran	Tabung karbon nano (carbon nanotube)
Uap air laut	Uap gorengan	Quantum dots
Bakteri magnetostatik	Sandblasting	Pigmen kosmetik tabir surya (sunscreen)
Asap kebakaran hutan	Pertambangan	Fullerene (C60)
Awan	Pengerjaan logam	Kawat semikonduktor
Komposit mineral	Produk degradasi biomaterial	Katalis logam

## 2. Paparan partikel nano hasil rekayasa

Membicarakan potensi resiko partikel nano sebenarnya mengarah pada proses paparan partikel nano sekaligus tingkat toksisitas partikel tersebut, khususnya untuk partikel nano hasil rekayasa manusia. Rute paparan material nano diperlihatkan pada Gbr. 1. Jika partikel nano sudah memasuki tahap manufaktur dan fabrikasi, paparan melalui udara merupakan rute dominan paparan pekerja litbang teknologi nano dalam berbagai tahapan proses seperti produksi, pengiriman, penyimpanan maupun pembuangan. Bukan tidak mungkin pula, material nano bisa memasuki rantai makanan baik akibat kebocoran dalam penanganan proses limbah/produksi maupun akibat penggunaan material nano yang masuk aliran air tanah, seperti material nano untuk remediasi air tanah.



Gbr. 2 Skema rute paparan partikel nano (diadaptasi dari [3])

Umumnya partikel nano tidak larut dan karenanya sangat kecil peluang untuk terkontaminasi ke dalam air tanah. Namun pandangan ini tidak sepenuhnya benar berdasarkan temuan sebuah kajian terakhir terhadap partikel nano C60 (fullerene). C60 adalah partikel nano yang bersifat hydrophobic (tidak larut dalam air). Akan tetapi tanpa perlakuan permukaan sekalipun, partikel ini ternyata dapat membentuk koloid stabil dalam air. Tingkat kematian 50% sel dicapai dengan konsentrasi fullerene larut air sebanyak 600 mg/kg. Beberapa studi toksikologi menunjukkan bahwa senyawa fullerene yang larut dalam air itu mampu merusak fungsi ginjal hewan percobaan pada dosis yang lebih rendah [4].

Selain itu, proses pembakaran juga merupakan sumber dominan partikel nano melalui udara. Pada sisi lain, paparan partikel nano dapat terjadi melalui kontak permukaan kulit, seperti melalui penggunaan bedak kosmetik. Paparan dapat pula terjadi melalui makanan. Dalam hal ini partikel nano digunakan sebagai bahan tambahan. Di masa depan, paparan partikel nano melalui obat-obatan dimungkinkan, seperti melalui injeksi ke dalam tubuh. Makhluk hidup lainnya seperti bakteri ataupun protozoa berpeluang menangkap partikel nano melalui membran selnya. Dengan demikian partikel nano berpeluang besar memasuki rantai makanan biologis.

### **3. Gerbang tubuh dan mekanisme pertahanan [3, 5]**

Pada tubuh manusia ada beberapa tempat yang memiliki kontak langsung dengan lingkungan, yaitu kulit, saluran pernafasan/paru-paru dan saluran pencernaan. Bagi partikel nano, ketiga benteng pertahanan manusia ini, ternyata masing merupakan gerbang masuk ke dalam tubuh. Paparan partikel nano terhadap tubuh bisa melalui gerbang-gerbang tersebut.

#### **3.1 Kulit**

Kulit berfungsi sebagai penghalang dan pelindung jaringan di bawahnya terhadap lingkungan. Praktis tidak ada unsur yang kontak atau berinteraksi melalui kulit kecuali vitamin D. Pada orang dewasa, luas kulit mencapai 1.5 m<sup>2</sup> dilindungi oleh lapisan tebal penahan (10 mikron) yang mampu melindungi jaringan agar terhindar dari lalu-lintas senyawa ionik atau molekul-molekul yang larut dalam air.

Di bawah kulit ari (epidermis) yang bersifat hydrophobic terdapat jaringan kulit (dermis) yang mengandung pembuluh darah. Kelenjar keringat dan saluran pengeluaran terdapat pula dalam lapisan ini. Adanya pembuluh darah pada jaringan kulit memungkinkan terjadinya upaya pemulihan sel kulit yang terluka dan penyembuhan jaringan. Pembentukan luka yang lama dan terus menerus seperti disebabkan karena zat kimia dan matahari bisa mengakibatkan kerusakan kulit atau bahkan kanker. Kulit ari umumnya tahan partikel dan jasad renik tetapi setiap saat bisa rusak atau terlubangi, seperti karena teriris atau abrasi atau akibat gigitan serangga tertentu maupun injeksi.

Paparan melalui kulit umumnya bisa terjadi melalui penggunaan kosmetik. Partikel nano titanium dioksida digunakan pada sebagian bedak tabir surya, karena sifatnya yang transparan tembus cahaya sementara partikel ini mampu menyerap dan memantulkan cahaya ultraviolet. Selain itu, besi oksida juga digunakan sebagai bahan dasar beberapa produk kosmetika, termasuk lipstick.

Berkaitan dengan titanium dioksida, selain memiliki kemampuan mengurangi resiko terbakar dan mencegah kanker kulit, partikel ini juga bersifat foto aktif. Jika partikel ini mampu

menembus kulit maka partikel ini juga memiliki potensi untuk menghasilkan radikal bebas yang dapat menyebabkan kerusakan pada DNA. Namun demikian sebuah studi menunjukkan bahwa titanium dioksida tidak bisa menembus kulit ari. Dengan demikian menurut Scientific Committee on Cosmetics and Non-Food Products (SCCNFP) titanium dioksida adalah partikel nano yang aman untuk penggunaan sebagai tabir surya, baik yang dilapis atau tidak.

### **3.2 Pernafasan**

Saluran pernafasan dan paru-paru juga merupakan bagian tubuh yang berhubungan dengan lingkungan. Pada dasarnya sistem pernafasan manusia terdiri dari dua bagian yaitu saluran udara (saluran untuk mengalirkan udara masuk atau keluar paru-paru) dan alveoli (daerah pertukaran gas). Paru-paru manusia memiliki saluran udara sepanjang 2300 km dan 300 juta alveoli. Sedangkan luas permukaan paru-paru orang dewasa bisa mencapai 140 m<sup>2</sup> atau seluas lapangan tenis. Partikel-partikel asing yang ke saluran pernafasan ditahan masuk lebih jauh ke paru-paru melalui pengendapan di dinding saluran pernafasan dan pembuangan ke daerah tenggorokan melalui pergerakan ritmis mikroskopik sel-sel dinding saluran pernafasan. Jika partikel asing itu luput dan mencapai jaringan pertukaran gas, maka sel-sel makrofage akan menyelimuti partikel tersebut. Sel-sel tersebut memindahkan partikel asing menuju saluran pernafasan atau melalui paru-paru menuju saluran kelenjar limpa dan berakhir di limpa. Kedua mekanisme itu melindungi tubuh dan memindahkan partikel dari daerah yang berpotensi menyebabkan bahaya dan menetralkan racunnya. Kelebihan dosis dapat mengakibatkan rusak dan hancurnya jaringan paru-paru seperti yang dilakukan oleh bakteri pneumonia atau penyakit paru-paru industri karena asbes.

Sebenarnya kecilnya ukuran bukanlah faktor kritis dari keberacunan partikel nano. Total jumlah partikel dalam hal ini total luas permukaan atau dosis juga penting. Meskipun partikel nano mengandung ancaman racun karena ukurannya yang kecil dan besarnya luas permukaan per satuan massa, tingkat keberacunan itu bergantung pada penyerapan ke dalam tubuh dalam jumlah besar. Untuk partikel nano dengan luas permukaan yang rendah, potensi racun pada manusia berhubungan dengan dosis dan rute paparan. Paparan melalui pernafasan dalam jumlah besar hanya mungkin terjadi di lingkungan pabrik saja.

Sampai saat ini hanya beberapa jenis partikel nano hasil rekayasa (fabrikasi) manusia seperti titanium oksida, karbon, seng oksida dan besi oksida. Jenis lainnya yang saat ini memasuki tahap skala pilot adalah CNT. Oleh karena itu, bisa diprediksi bahwa sumber paparan terbesar ada pada industri dan universitas tempat litbang partikel nano.

### **3.3 Pencernaan**

Bagian tubuh manusia lainnya yang memiliki kontak dengan lingkungan adalah saluran pencernaan. Bagian ini merupakan gerbang yang penting molekul-molekul makro memasuki tubuh manusia. Dari daerah lambung, hanya molekul-molekul kecil yang dapat berdifusi melalui usus. Tingginya keasaman daerah lambung memiliki fungsi mikrobial, pencernaan dan pelarutan beberapa partikel dan mempengaruhi racun. Usus bagian bawah berfungsi khusus sebagai bagian pembuangan dan penyerapan sari makanan yang memproduksi lendir dan enzim yang dipasok oleh pembuluh darah dan saluran limpa dalam jumlah besar, sehingga bisa menghasilkan sel-sel pelindung dan membuang jasad renik yang masuk. Sebuah penelitian tentang penyaluran obat dalam tubuh menunjukkan bahwa ada partikel nano yang ditangkap oleh saluran limpa.

### **3.4 Paparan lain (injeksi)**

Paparan lain partikel nano ke dalam tubuh manusia dalam bentuk injeksi atau penyaluran bahan aktif ke sel-sel berpenyakit saat ini masih dalam penelitian. Pada aplikasi ini, material nano yang digunakan umumnya adalah yang bisa terdegradasi secara biologis dalam tubuh. Namun demikian pengujian toksikologi dan keselamatan terhadap material tersebut ketika berinteraksi dengan sel-sel dan jaringan harus dilakukan. Sebagai contoh saat ini sedang dikembangkan partikel nano yang dapat digunakan sebagai pembawa protein, misalnya berupa antibodi.

Menimbang prinsip penggunaannya, ketika partikel nano itu sekali diinjeksikan ke dalam tubuh, maka partikel itu berpotensi dalam mempengaruhi fungsi-fungsi protein di dalam tubuh atau sel. Interaksi partikel nano ini hampir mirip dengan yang terjadi ketika partikel nano itu masuk ke dalam tubuh manusia melalui kontaminasi udara atau lainnya.

#### **4. Penutup**

Ancaman polusi partikel nano hasil rekayasa manusia memang belum sampai pada tahap yang mengkhawatirkan di Indonesia karena masih rendahnya produk penelitian dan pengembangan partikel nano ini. Akan tetapi tidak menutup kemungkinan dalam beberapa dasawarsa mendatang, produk-produk teknologi yang mengandung partikel nano membanjiri Indonesia yang memiliki potensi pasar besar barang-barang teknologi. Dengan demikian pengetahuan akan keselamatan dalam interaksi dengan partikel nano menjadi penting.

Bagi Indonesia, pemahaman terhadap potensi resiko partikel nano terhadap kesehatan diharapkan mampu mendorong pada penelitian dan pengembangan yang lebih terprogram. Pada sisi lain bisa pula membuka peluang kolaborasi penelitian antar bidang khususnya toksikologi dan ilmu dan rekayasa material.

Pengembangan penelitian dan pengembangan teknologi nano baik di negara maju maupun berkembang, sudah sepantasnya mempertimbangkan potensi resiko ketika partikel nano hasil rekayasa itu berinteraksi dengan lingkungan maupun manusia.

#### **Pustaka:**

[1] V. Colvin, "Sustainability for Nanotechnology", *The Scientist* V. 18 (16), August 30, 2004.

[2] M. Steinfeldt, U. Petschow, R. Haum, A. v. Gleich, "Nanotechnology and Sustainability", Discussion paper 65/04, Institute for Ecological Economic Research (IOEW), Berlin, October 2004.

[3] V. Colvin, "Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties", The Royal Society and The Royal Academy of Engineering, 2003 ([www.nanotec.org.uk/final/Report.htm](http://www.nanotec.org.uk/final/Report.htm))

[4] V. L. Colvin, "The potential environmental impact of engineered nanomaterials", *Nature Biotechnology*, Vol. 21 No. 10, October 2003, pp. 1166-1170.

[5] P. HM Hoet, I. Bruske-Hohlfeld and O. V. Salata, "Nanoparticles – known and unknown health risks (Review)", *J. of Nanobiotechnology* 2:12, December 2004.