



PROSPEK NANOTEKNOLOGI DALAM MEMBANGUN KETAHANAN PANGAN

Hoerudin dan Bambang Irawan

PENDAHULUAN

Undang-Undang No 18 tahun 2012 tentang Pangan menyebutkan bahwa negara berkewajiban mewujudkan ketersediaan, keterjangkauan, dan pemenuhan konsumsi pangan yang cukup, aman, bermutu, dan bergizi seimbang, baik pada tingkat nasional maupun daerah hingga perseorangan secara merata di seluruh wilayah Negara Kesatuan Republik Indonesia sepanjang waktu dengan memanfaatkan sumber daya, kelembagaan, dan budaya lokal. Selanjutnya, di dalam Rencana Strategis Kementerian Pertanian (Kementan) tahun 2015-2019 disebutkan bahwa visi pembangunan pertanian Indonesia yaitu terwujudnya sistem pertanian-bioindustri berkelanjutan yang menghasilkan beragam pangan sehat dan produk bernilai tambah tinggi berbasis sumber daya lokal untuk kedaulatan pangan dan kesejahteraan petani (Kementan 2015). Pencapaian amanah undang-undang dan visi Kementan tersebut sangat ditentukan oleh kemampuan bangsa Indonesia dalam menyelesaikan permasalahan dan tantangan pembangunan pertanian yang dihadapi.

Pembangunan pertanian Indonesia saat ini dan ke depan dihadapkan pada sejumlah permasalahan, diantaranya penurunan kuantitas dan kualitas sumber daya lahan pertanian, sistem perbenihan dan perbibitan yang belum optimal, infrastruktur dan sarana yang belum memadai, keterbatasan sumber daya manusia pertanian, masih lemahnya permodalan dan kelembagaan petani, dan teknologi yang masih tradisional. Sementara itu, secara umum tantangan utama pembangunan pertanian Indonesia saat ini dan ke depan yaitu peningkatan produktivitas, efisiensi produksi, nilai tambah, dan daya saing produk pertanian. Untuk menyelesaikan permasalahan dan tantangan pembangunan pertanian tersebut diperlukan penyelesaian menyeluruh serta paradigma dan langkah visioner, diantaranya melalui berbagai terobosan teknologi mutakhir yang dapat diaplikasikan pada aspek hulu-hilir pertanian dan pangan. Nanoteknologi sebagai salah satu teknologi mutakhir menawarkan solusi pilihan bagi sejumlah permasalahan dan tantangan pembangunan pertanian tersebut.

Perkembangan nanoteknologi yang pesat merupakan tantangan dan peluang bagi suatu negara untuk ikut berperan atau berkontribusi dalam pasar dunia atau hanya akan menjadi tujuan pasar. Hasil-hasil studi sebelumnya menunjukkan bahwa untuk negara berkembang penerapan nanoteknologi pada subsektor pertanian dan pangan memiliki urgensi dan potensi dampak yang tinggi, terutama untuk peningkatan produktivitas, kualitas air, sistem penghantaran obat, pengolahan dan penyimpanan pangan, serta deteksi dan pengendalian hama beserta vektornya (Rochman 2011; Salamanca-Buentello *et al.*, 2005). Aplikasi nanoteknologi untuk pertanian dan pangan diharapkan dapat menciptakan pertanian presisi (*precision farming*) dimana input pertanian hanya diberikan sesuai kebutuhan untuk efisiensi biaya produksi sekaligus meningkatkan kuantitas dan kualitas produk pertanian dan pangan. Hal ini akan mendukung upaya pencapaian swasembada pangan dan pengembangan produk lokal yang berdaya saing tinggi.

Saat ini di banyak negara maju dan berkembang, seperti USA, Inggris, Australia, Korea, China, Thailand, Malaysia, dan Vietnam, penelitian dan pengembangan aplikasi nanoteknologi di bidang pertanian dan pangan semakin berkembang pesat. Sedangkan di Indonesia yang memiliki potensi kekayaan alam pertanian dan pangan yang melimpah, saat ini hal tersebut masih belum banyak dilakukan. Tulisan ini bertujuan untuk menelaah perkembangan nanoteknologi sebagai sebuah revolusi ilmu pengetahuan dan teknologi



terkini, status pemanfaatan dan potensi risiko, serta peluang-peluang pemanfaatannya ke depan, khususnya dalam mewujudkan kemandirian pangan di Indonesia.

PENGETERIAN DAN REVOLUSI NANOTEKNOLOGI

Dalam lima dekade terakhir telah terjadi tiga gelombang difusi penelitian dan pengembangan pertanian, khususnya terhadap negara-negara berkembang. Gelombang pertama telah diinisiasi dengan munculnya revolusi hijau (*green revolution*) yang bertujuan untuk meningkatkan produksi pangan melalui pengembangan dan penerapan teknologi pertanian, terutama varietas-varietas unggul (Pingali & Raney 2005). Di Indonesia, revolusi hijau diterapkan melalui empat pilar penting, yaitu (1) pemilihan dan penggunaan varietas unggul, (2) pemakaian pupuk kimia, (3) pengairan, dan (4) penggunaan pestisida (Sisworo 2007). Revolusi hijau telah menghantarkan Indonesia berswasembada beras dan mampu meningkatkan produksi padi nasional hampir tiga kali lipat selama 30 tahun. Akan tetapi, kemudian produksi mulai melandai ditengah menurunnya luas lahan produktif akibat alih fungsi lahan. Revolusi hijau memiliki beberapa kelemahan dan diduga telah menimbulkan sejumlah dampak negatif, diantaranya ketergantungan pada lahan irigasi, ketergantungan terhadap input agrokimia, penurunan keanekaragaman hayati, degradasi kualitas lingkungan, dan terjadinya kesenjangan kondisi sosial ekonomi (Las 2009).

Gelombang kedua difusi penelitian dan pengembangan pertanian ditandai dengan terjadinya evolusi bidang bioteknologi yang mendasari lahirnya revolusi gen (*gene revolution*) (Pingali & Raney 2005). Di bidang pertanian, revolusi gen bertujuan untuk memperbaiki sifat/karakter komoditas pertanian sehingga dapat meningkatkan produktivitas, kualitas dan produksi pangan. Salah satu teknik yang digunakan dalam rekayasa genetik yaitu dengan memindahkan sifat tertentu dari suatu individu kepada individu lainnya yang tidak harus berasal dari satu spesies (Deswina 2013; Watson *et al.*, 1996). Di dunia, komersialisasi tanaman hasil rekayasa genetik dimulai pada tahun 1996. Pada tahun 2014, tanaman hasil rekayasa genetik telah dikembangkan di 28 negara dengan total area mencapai 181,5 juta hektar, tingkat pertumbuhan 3-4% per tahun, dan nilai ekonomi mencapai USD 15,7 milyar (James 2014). Di Indonesia, teknologi berbasis bioteknologi tersebut telah dikembangkan sejak tahun 1990. Produk rekayasa genetik dari sejumlah komoditas perkebunan, hortikultura, dan pangan telah diteliti dan coba dikembangkan di Indonesia, seperti tebu yang memiliki sifat toleran terhadap kekeringan, kentang tahan penyakit hawar daun, dan padi *Bt* tahan serangga penggerek batang kuning. Akan tetapi, dalam satu dekade terakhir perkembangan revolusi gen di dunia dihadapkan pada kuatnya kontroversi penerimaan dan penolakan terhadap produk rekayasa genetik. Hal ini disebabkan munculnya sejumlah isu terkait potensi dampak negatif produk rekayasa genetik terhadap lingkungan, keanekaragaman hayati, serta kesehatan manusia dan hewan, meskipun peraturan dan regulasi terkait keamanan hayati serta kelembagaan produk rekayasa genetik telah ditetapkan (Deswina 2013).

Selanjutnya dalam dua dekade terakhir, telah berkembang suatu disiplin baru yang disebut nanoteknologi yang merupakan konvergensi dari berbagai disiplin ilmu. Sejumlah studi menyebutkan bahwa nanoteknologi diprediksi akan mendorong gelombang ketiga difusi penelitian, pengembangan dan kemajuan di sektor pertanian dan pangan, sebagai bagian yang tak terpisahkan dari revolusi nanoteknologi (*nano revolution*) di berbagai bidang (Chaudhry & Castle 2011; Chaudhry *et al.*, 2008; Rochman & Mardiyati 2010).

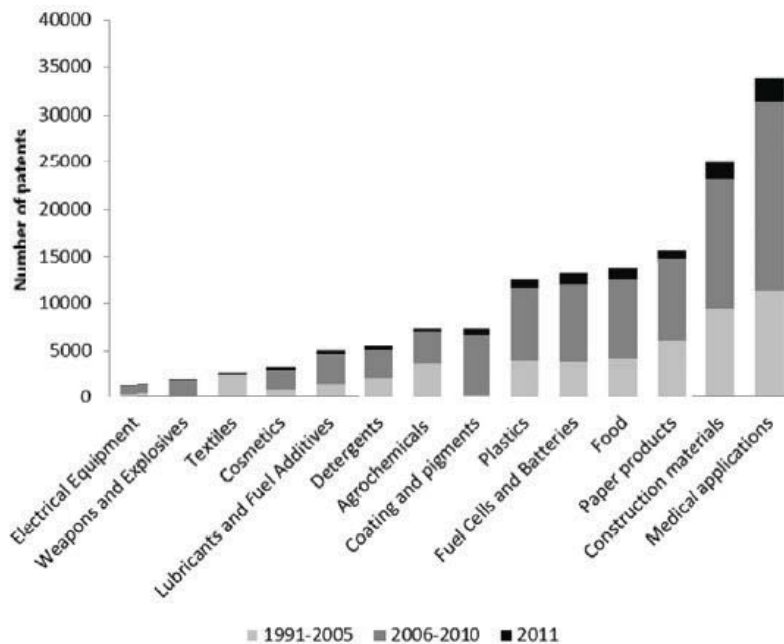
Nanoteknologi dapat didefinisikan sebagai ilmu pengetahuan dan teknologi mengenai proses, manipulasi, manufaktur dan atau aplikasi suatu bahan/struktur yang salah satu atau lebih dimensinya berukuran 1 - 100 nanometer (nm) (Chaudhry *et al.*, 2008; Garcia *et al.*, 2010; Quintanilla-Carvajal *et al.*, 2010). Secara matematis, 1 nm sama dengan 1 per



1.000.000.000 meter, sebuah ukuran yang sangat kecil. Nanoteknologi mulai berkembang pesat setelah ditemukannya *carbon nanotubes* oleh Sumio Iijima pada tahun 1991, meskipun konsep dasar nanoteknologi sudah diperkenalkan oleh Richard Feynman pada tahun 1959 (Wikipedia 2015) dan istilah "nanoteknologi" pertama kali dipublikasikan oleh Norio Taniguchi pada tahun 1974 (Bassett 2010). Disebabkan ukurannya yang sangat kecil, bahan berukuran nanometer (nanomaterial) memiliki/menghasilkan sifat fisiko-kimia baru, seperti luas permukaan, bentuk, reaktivitas dan warna, yang sangat berbeda dibandingkan material pada ukuran konvensional (Pérez-Esteve *et al.*, 2013). Sebagai contoh, senyawa seng (*zinc*) dalam jumlah/ukuran besar memiliki warna putih dan tidak tembus cahaya (*opaque*), sedangkan dalam ukuran nanometer senyawa seng berwarna transparan. Sifat baru dan unik tersebut membuka peluang yang besar bagi pengembangan aplikasi dan produk inovatif di berbagai bidang karena dapat (i) menghemat bahan baku, (ii) mempercepat dan mengefisienkan proses, dan (iii) meningkatkan presisi dan akurasi.

PERKEMBANGAN PENELITIAN DAN APLIKASI NANOTEKNOLOGI

Sebagai disiplin yang relatif baru, secara global penelitian dan aplikasi nanoteknologi berkembang sangat pesat. Hal ini dapat dilihat dari perkembangan jumlah paten, negara-negara dan industri yang terlibat, jumlah investasi, ketersediaan produk komersial dan nilai ekonomi produk nanoteknologi. Belum lama ini, studi yang dilakukan oleh Pérez-Esteve *et al.*, (2013) melaporkan perkembangan jumlah paten nanoteknologi di dunia tahun 1991 sampai dengan 2011 (Gambar 1).



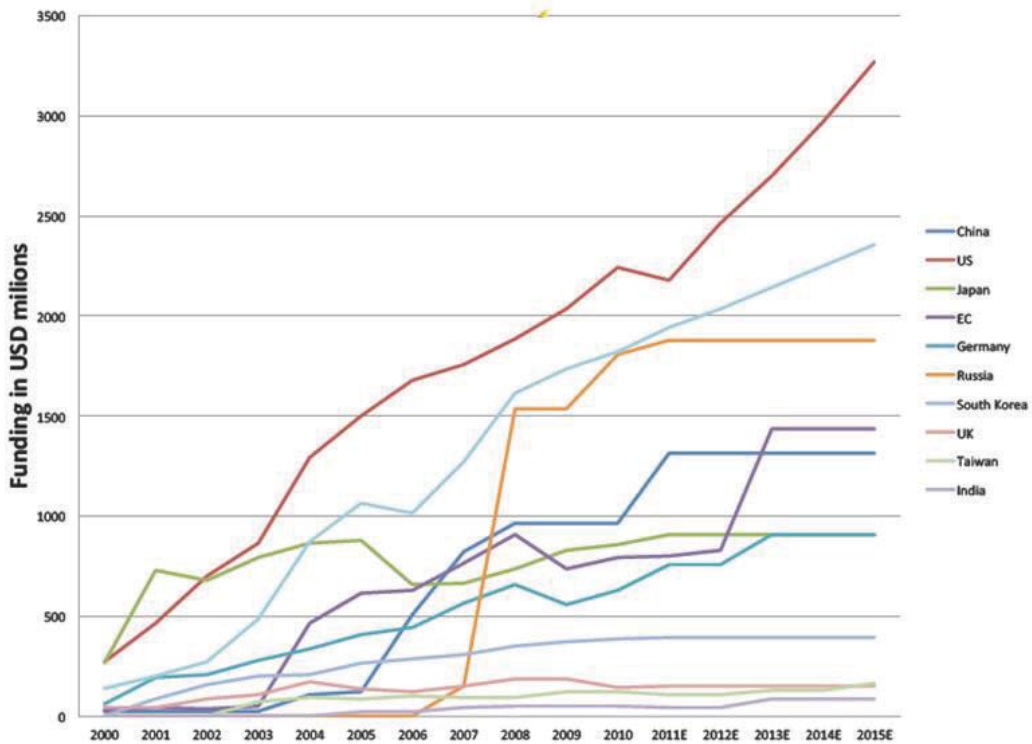
Gambar 1. Perkembangan jumlah paten nanoteknologi di dunia pada berbagai bidang tahun 1991-2011 (Pérez-Esteve *et al.*, 2013)



Gambar 1 di atas memperlihatkan bahwa kegiatan penelitian nanoteknologi telah dilakukan pada berbagai bidang dengan jumlah total paten yang cukup tinggi. Selama 20 tahun tersebut, kegiatan penelitian nanoteknologi telah dilakukan pada 14 bidang aplikasi, termasuk agrokimia dan pangan, dengan total jumlah paten sekitar 150.000 paten atau sekitar 7.500 paten per tahun. Bahkan pada tahun 2011 saja terdapat lebih dari 10.000 paten (Pérez-Esteve *et al.*, 2013). Hal ini mengindikasikan cepatnya perkembangan penelitian dan luasnya potensi aplikasi nanoteknologi. Jumlah paten nanoteknologi tertinggi terdapat pada bidang aplikasi medis dan bahan konstruksi, diikuti pada produk kertas, pangan, fuel cells dan baterai, serta plastik.

Saat ini nanoteknologi mulai menjadi sebuah revolusi industri dan banyak negara di dunia telah berinvestasi di bidang nanoteknologi untuk meningkatkan daya saingnya di pasar global. Sejak US *National Nanotechnology Initiative* dipublikasikan pada tahun 2000, banyak negara maju dan berkembang di dunia telah menginisiasi program nasionalnya (Cientifica 2011). Antara tahun 2001 hingga 2014, lebih dari 60 negara telah melaksanakan program inisiatif nanoteknologi. Negara-negara tersebut meliputi negara-negara maju di Eropa, Asia, hingga negara berkembang seperti Nepal dan Pakistan (Clunan *et al.*, 2014). Di kawasan Asia Pasifik, juga telah dibentuk Asia Nano Forum yang beranggotakan 16 negara yang telah mengembangkan program litbang nanoteknologi, yaitu Australia, Austria, Cina, Hongkong, India, Indonesia, Iran, Jepang, Korea Selatan, Malaysia, New Zealand, Singapura, Taiwan, Thailand, Uni Arab Emirate, dan Vietnam (ANF 2015).

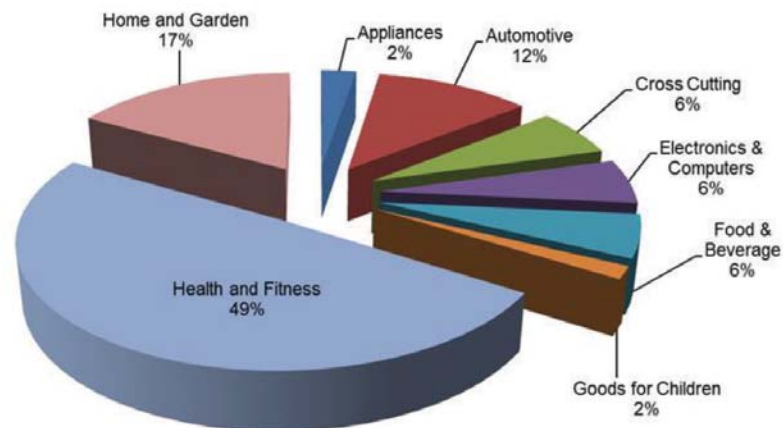
Secara keseluruhan, rata-rata anggaran kegiatan litbang nanoteknologi institusi pemerintah di dunia mencapai USD 10 milyar per tahun dan diperkirakan akan meningkat sebesar 20% dalam 3 tahun berikutnya. Pada tahun 2011, anggaran kegiatan litbang nanoteknologi institusi pemerintah di dunia mencapai USD 65 milyar dan diperkirakan mencapai USD 100 milyar pada tahun 2014. Angka tersebut diperkirakan meningkat lagi menjadi USD 250 milyar pada 2015 jika memperhitungkan anggaran litbang nanoteknologi institusi swasta (Cientifica 2011). Sebagai gambaran, anggaran litbang nanoteknologi di sejumlah negara pada tahun 2000-2015 disajikan pada Gambar 2. Amerika, Korea Selatan dan Rusia merupakan tiga negara dengan anggaran litbang nanoteknologi tertinggi.



Gambar 2. Anggaran litbang nanoteknologi di berbagai negara pada tahun 2000-2015 (data tahun 2011-2015 estimasi) (Cientifica 2011)

Di Indonesia, studi perkembangan litbang nanoteknologi (status program litbang, sumber daya fasilitas, sumber daya manusia, dan jejaring kerja) di sejumlah institusi pemerintah dan swasta telah dilaporkan oleh Irawan *et al.*, (2013). Kegiatan litbang nanoteknologi di Indonesia sudah mulai dirintis sejak awal tahun 2000-an. Setelah tahun 2005 jumlah institusi yang melaksanakan litbang nanoteknologi semakin bertambah. Di antara institusi-institusi tersebut antara lain, LIPI, BPPT, BATAN, ITB, UGM, UI, dan Badan Litbang Pertanian. Hasil studi menunjukkan bahwa program-program litbang nanoteknologi di Indonesia banyak terfokus pada pengembangan nanomaterial maju berbasis bahan inorganik. Fasilitas litbang nanoteknologi umumnya masih belum memadai dan tersebar secara sporadis di sejumlah institusi. Pada tahun 2013 Badan Litbang Pertanian telah membangun laboratorium nanoteknologi yang dilengkapi peralatan riset yang memadai dan tergolong terlengkap di Indonesia untuk bidang ilmu hayati. Kegiatan litbang nanoteknologi di Badan Litbang Pertanian difokuskan pada bidang pertanian dan pangan. Hal ini sesuai dengan hasil studi Irawan *et al.*, (2013) yang menunjukkan bahwa belum ada institusi di Indonesia yang secara khusus memfokuskan kegiatan litbang nanoteknologi untuk sektor pertanian dan pangan.

Perkembangan aplikasi nanoteknologi telah mendorong revolusi industri secara global. Dilaporkan bahwa lebih dari 400 perusahaan di dunia telah melaksanakan kegiatan litbang nanoteknologi. Di bidang pertanian dan pangan perusahaan-perusahaan tersebut antara lain BASF, Syngenta, DuPont, Bayer, Kraft, Nestle, Unilever, Keystone, Heinz, Hershey, Pepsi Co., Cargill, dan Mars (Kaya-Celiker & Mallikarjunan 2012). Jumlah perusahaan tersebut diprediksi akan semakin banyak pada masa-masa mendatang. Hal ini mengindikasikan bahwa nanoteknologi mulai bergerak cepat dari laboratorium ke lahan pertanian, rak-rak supermarket, dan akhirnya meja makan, sehingga berpotensi merevolusi sistem pertanian dan pangan (Pérez-Esteve *et al.*, 2013).



Gambar 3. Status produk nanoteknologi komersial pada akhir tahun 2014 (<http://www.nanotechproject.org/cpi>)

Produk nanoteknologi sudah mulai dikomersialisasikan pada awal tahun 2000-an. Beberapa contoh aplikasi nanoteknologi pada produk komersial antara lain nanopartikel titanium dioksida dan seng oksida pada sunscreen dan kosmetik, nanopartikel perak pada kemasan pangan, pakaian, disinfektan, dan peralatan rumah tangga, *carbon nanotubes* untuk tekstil antinoda, dan nanopartikel *cerium* oksida sebagai katalis bahan bakar (Wikipedia 2015). Kemudian, berdasarkan data *online Consumer Product Inventory* (<http://www.nanotechproject.org/cpi>), pada akhir tahun 2014 di dunia sudah ada hampir 2.000 produk nanoteknologi komersial dengan rasio pengelompokkan bidang aplikasi seperti disajikan pada Gambar 3. Jumlah tersebut sangat mungkin lebih rendah dari kenyataannya karena tidak semua produsen produk nanoteknologi komersial mendaftarkan produknya pada *online database* tersebut. Namun demikian, Gambar 3 tersebut dapat memberikan gambaran bahwa saat ini nanoteknologi banyak diaplikasikan pada produk komersial kesehatan dan kebugaran. Saat ini sejumlah produk nanoteknologi sudah beredar di pasar domestik Indonesia dan diperkirakan jumlahnya akan semakin meningkat seiring diberlakukannya pasar bebas regional dan global. Menurut Silva *et al.*, (2012), secara keseluruhan nilai ekonomi produk nanoteknologi pada tahun 2015 diperkirakan mencapai USD 1 triliun dengan menyerap sekitar dua juta pekerja.



NANOTEKNOLOGI UNTUK KETAHANAN PANGAN

Dalam Undang Undang No. 18/2012 tentang Pangan, ketahanan pangan didefinisikan sebagai *"kondisi terpenuhinya pangan bagi negara sampai dengan perseorangan, yang tercermin dari tersedianya pangan yang cukup, baik jumlah maupun mutunya, aman, beragam, bergizi, merata, dan terjangkau serta tidak bertentangan dengan agama, keyakinan, dan budaya masyarakat, untuk dapat hidup sehat, aktif, dan produktif secara berkelanjutan"*. Dalam perspektif kebutuhan pangan ke depan, permintaan pangan di Indonesia diprediksi akan terus meningkat seiring peningkatan jumlah penduduk, meskipun konsumsi per kapitanya menurun (Djauhari 2013; Oberman *et al.*, 2012). Pada tahun 2030 jumlah penduduk Indonesia diperkirakan mencapai 285 juta dan Oberman *et al.*, (2012) memprediksi diperlukan peningkatan produksi pangan sebesar 60%. Hal ini menambah seriusnya tantangan di tengah kompleksnya permasalahan pembangunan pertanian Indonesia. Pada kondisi tersebut peran iptek dan inovasi menjadi sangat kritical dan terobosan teknologi merupakan keniscayaan dalam membangun ketahanan pangan. Terobosan teknologi sangat diperlukan paling tidak dalam empat aspek teknis sistem ketahanan pangan, yaitu (i) produksi dan pengolahan, (ii) ketersediaan dan distribusi, (iii) konsumsi, dan (iv) status gizi/kesehatan. Nanoteknologi yang merupakan konvergensi dari berbagai disiplin dapat menjadi alternatif solusi teknologi dalam mengatasi permasalahan dan tantangan pembangunan pertanian sekaligus membangun ketahanan pangan.

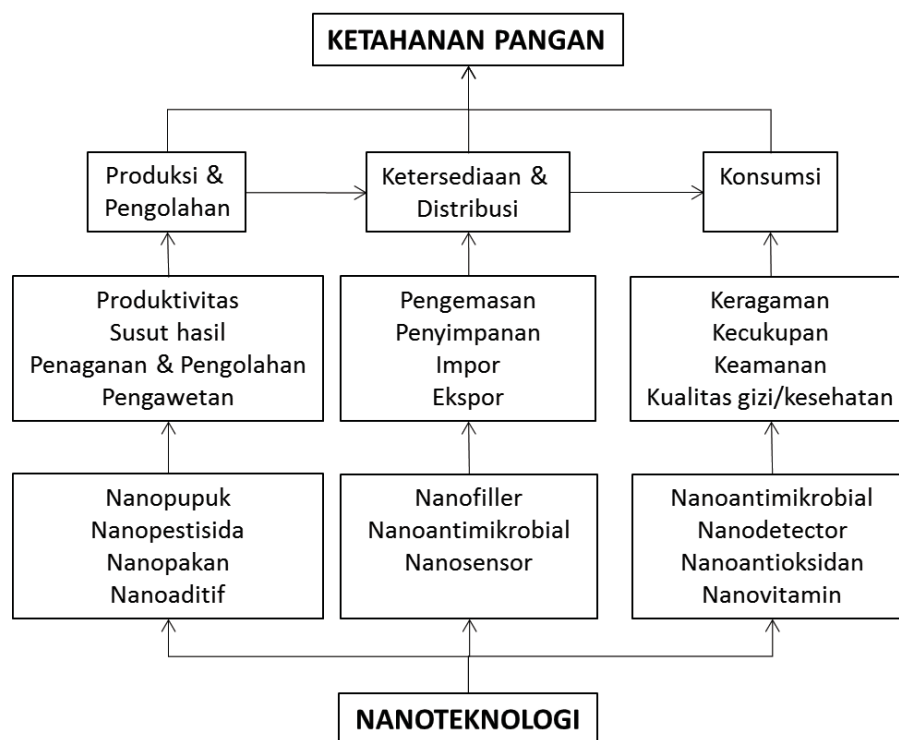
Dalam sebuah studi, Salamanca-Buentello *et al.*, (2005) melakukan survey terhadap 63 pakar nanoteknologi dunia untuk mengidentifikasi dan menetapkan urutan prioritas bidang aplikasi nanoteknologi bagi negara berkembang dalam 10 tahun ke depan. Studi mencakup enam bidang (pengelolaan air, pertanian, nutrisi, kesehatan, energi, lingkungan) dan dilakukan menggunakan modifikasi metode *Delphi*, dimana urutan prioritas dinilai berdasarkan enam kriteria, yaitu *impact, burden, appropriateness, feasibility, knowledge gap, dan indirect benefits*. Berdasarkan hasil studi tersebut empat bidang terkait sektor pertanian dan pangan termasuk dalam sepuluh urutan teratas prioritas aplikasi nanoteknologi, yaitu peningkatan produktivitas pertanian (ranking 2), pengantaran obat herbal (ranking 5), pengolahan dan penyimpanan pangan (ranking 6), serta deteksi dan pengendalian hama beserta vektornya (ranking 10) (Tabel 1).

Tabel 1. Sepuluh bidang aplikasi nanoteknologi berdasarkan urutan prioritas bagi negara berkembang (Salamanca-Buentello *et al.*, 2005)

Urutan prioritas	Bidang aplikasi	Skor
1	Penyimpanan, produksi, dan konversi energi	766
2	Peningkatan produktivitas pertanian	706
3	Pemurnian air	682
4	Diagnosis dan <i>screening</i> penyakit	606
5	Sistem penghantaran obat	558
6	Pengolahan dan penyimpanan pangan	472
7	Pemurnian udara	410
8	Konstruksi	366
9	Monitoring kesehatan	321
10	Deteksi dan pengendalian hama beserta vektornya	258



Sejalan dengan hasil studi tersebut, *Expert Meeting* FAO/WHO pada tahun 2009 menyimpulkan bahwa nanoteknologi menawarkan peluang aplikasi dan pengembangan produk inovatif di bidang pertanian/produksi pangan, pemurnian air, pengolahan, pengawetan dan pengemasan pangan. Penerapan nanoteknologi tersebut berpeluang memberikan keuntungan baik bagi petani, industri pangan, maupun konsumen (FAO/WHO 2009). Selanjutnya, FAO (2010) menegaskan bahwa banyak negara telah mengetahui potensi manfaat aplikasi nanoteknologi untuk pertanian dan pangan, sehingga mulai berinvestasi untuk kegiatan litbang nanoteknologi tersebut. Peran/prospek nanoteknologi dalam membangun ketahanan pangan secara sederhana dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 4 dan tercermin dari potensi aplikasinya pada aspek produksi dan pengolahan, ketersediaan dan distribusi, konsumsi, dan status gizi/kesehatan sebagaimana dicontohkan di bawah ini.



Gambar 4. Peran nanoteknologi dalam membangun ketahanan pangan

Produksi Pangan

Salah satu prasyarat utama ketahanan pangan yaitu tersedianya pangan dalam jumlah yang cukup. Hal ini tentu tidak lepas kaitannya dengan produksi pangan. Pada aspek produksi *on farm*, nanoteknologi dapat diaplikasikan untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas penggunaan input produksi dalam mendongkrak produktivitas hasil pertanian yang semakin sulit ditingkatkan dengan teknologi yang ada seiring meningkatnya kompleksitas permasalahan pembangunan pertanian. Berbagai studi terus dilakukan untuk mengembangkan berbagai formula/produk nano-agrokimia atau pun sistem penghantar terstruktur nano untuk penggunaan sebagai pupuk, pestisida maupun obat hewan. Penggunaan bahan aktif atau sistem penghantar terstruktur nano diharapkan dapat

memperbaiki penghantaran bahan aktif dan efikasinya, serta menghindari penggunaan berlebih bahan agrokimia yang dapat menimbulkan dampak negatif bagi lahan, lingkungan dan atau kesehatan makhluk hidup.

Nanopupuk (*nanofertilizer*) merupakan produk yang menghantarkan hara ke tanaman dalam sistem enkapsulasi nanopartikel. Enkapsulasi unsur hara tanaman atau pupuk merupakan salah satu aplikasi nanoteknologi yang dapat dilakukan dengan tiga cara yaitu (1) unsur hara disalut dalam material yang memiliki nanopori, (2) unsur hara disalut dengan lapisan/film polimer tipis, dan (3) dihantarkan sebagai partikel koloidal atau emulsi yang berukuran nanometer (Rai *et al.*, 2012). Kapsul *nanoclay* yang mengandung kombinasi bahan aktif pupuk dan pestisida telah dikembangkan dalam program kerjasama antara Pakistan dan *US Science and Technology*. Kapsul *nanoclay* tersebut diformulasi untuk menghantarkan bahan aktif secara lepas lambat sehingga pemberian pupuk dan pestisida tersebut cukup satu kali selama pertumbuhan tanaman hingga produksi (FoE 2008), sehingga dapat menghemat biaya produksi. DeRosa *et al.*, (2010) telah melaporkan bahwa inkorporasi pupuk ke dalam *cochleate nanotubes* (gulungan lapisan lemak ganda) telah mampu meningkatkan produksi tanaman. Badan Litbang Pertanian saat ini juga sedang mengembangkan pupuk majemuk NPK untuk tanaman padi dengan sistem penghantar berbasis nanozeolit alam teraktivasi (Yuliani *et al.*, 2015) yang memiliki diameter pori 6-12 nm (Hoerudin *et al.*, 2015). Disamping itu, nanopupuk dapat dikombinasikan dengan perangkat nano (*nanodevice*) untuk memonitor sekaligus mengharmonisasikan pelepasan hara seperti N, P dan K dengan serapannya oleh tanaman. Hal ini dapat mengurangi kehilangan hara ke dalam tanah, air dan udara melalui internalisasi langsung oleh tanaman. Selain itu, hal tersebut dapat menghindari interaksi yang tidak diinginkan antara unsur hara, mikroorganisme, air dan udara (DeRosa *et al.*, 2010). Dalam aplikasi nanoteknologi saat ini juga sedang dikembangkan sistem penghantar nano untuk pupuk yang dapat bereaksi dengan lingkungan. Tujuannya yaitu untuk memproduksi pupuk nano yang dapat melepaskan hara secara terkendali berdasarkan signal lingkungan, seperti panas, kelambaban, pH dan lainnya (Naderi & Danesh-Shahraki 2013).

Teknik enkapsulasi dalam material yang memiliki nanopori juga telah digunakan dalam pengembangan nanopestisida. Nanopartikel silika berpori telah dikembangkan sebagai sistem penghantar terkendali untuk pestisida larut air *validamycin*. Sistem penghantar berstruktur nano tersebut memiliki kapasitas beban (*loading capacity*) yang tinggi yaitu 36% dan dapat melepaskan bahan aktif pestisida secara bertahap (Liu *et al.*, 2006). Untuk meningkatkan kesehatan ternak, Kuzma *et al.*, (2008) telah mengembangkan nanopartikel berbasis *polystyrene*, *polyethylene glycol*, dan *mannose* yang dapat menyerap bakteri *E. coli*. Nanopartikel tersebut dicampurkan dengan pakan yang diberikan ke ternak untuk menghilangkan patogen-patogen di dalam saluran pencernaan ternak. Studi risiko, manfaat dan sosial dari produk tersebut juga telah dilakukan.

Penanganan, Pengolahan dan Gizi Pangan

Ketahanan pangan juga mensyaratkan pangan yang tersedia harus aman, beragam, bermutu baik, dan bergizi. Kondisi tersebut diantaranya ditentukan oleh cara penanganan dan pengolahan pangan. Nanoteknologi dapat diaplikasikan pada penanganan segar, pengolahan, pengawetan dan peningkatan sifat fungsional pangan. Dalam hal ini nanoteknologi dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan sifat baru atau pun memperbaiki sifat fisik, kimia dan keamanan pangan, seperti tekstur, rasa, warna, kelarutan, stabilitas, umur simpan, kandungan gizi (mengurangi kandungan lemak, gula dan garam), penyerapan dan ketersediaan biologis (*bioavailabilitas*) zat gizi/senyawa bioaktif (Hoerudin & Harimurti 2014), serta mengurangi kontaminan (Chaudhry & Castle 2011; Chaudhry *et al.*, 2008; Pérez-Estève *et al.*, 2013).

Aplikasi nanoteknologi pada penanganan produk pertanian segar ditujukan terutama untuk mempertahankan mutu fisik (termasuk kesegaran) dan mutu kimia dari produk tersebut. Akhir-akhir ini produk *nano-coating* banyak dikembangkan dan diaplikasikan pada permukaan buah segar untuk mempertahankan mutu dan umur simpannya. Hasil penelitian Nabifarkhani *et al.*, (2015) menunjukkan bahwa aplikasi aktif *nano composite coating* yang terbuat dari kitosan 1%, selulosa 1% dan mengandung minyak atsiri 1% dapat mempertahankan kandungan total padatan terlarut, antosianin dan total gula buah *cherry* dibandingkan perlakuan kontrol. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa aplikasi aktif *nano composite coating* dapat memperpanjang umur simpan, menghasilkan penampakan yang lebih baik dan mencegah pertumbuhan jamur. Dilaporkan pula bahwa aplikasi *coating* nanopartikel kitosan yang berukuran 85-112 nm pada buah stroberi dapat mempertahankan kesegaran, mutu organoleptik dan mengurangi kehilangan berat hingga 20-30 hari penyimpanan pada suhu $5\pm 1^{\circ}\text{C}$ dan kelembaban relatif $70\pm 5\%$. Sedangkan pada perlakuan tanpa *coating* (kontrol) penurunan mutu organoleptik stroberi sudah teramati sejak hari ke-2 pada kondisi penyimpanan yang sama (Hajirasouliha *et al.*, 2012).

Pada tahap pengolahan pangan, produk nanoteknologi dapat diterapkan, baik pada alat pengolahan maupun pada produk pangan yang diolah. Dilaporkan bahwa *nano-coating* antibakteri dapat diaplikasikan pada permukaan alat pengolahan untuk menjaga higienitas produk. Selanjutnya, proses nano-restrukturisasi bahan pangan alami memungkinkan produksi pangan dengan kadar lemak lebih rendah, namun tetap memiliki cita rasa yang enak seperti aslinya. Diantara contoh produknya yaitu es krim, *mayonnaise* atau *spread* (pangan olesan) dengan kadar lemak rendah, akan tetapi memiliki tekstur creamy seperti produk dengan kadar lemak tinggi. Dengan demikian, pengembangan produk tersebut menawarkan pilihan pangan sehat kepada konsumen (Chaudhry & Castle 2011). Pada tataran penelitian, Yuliani *et al.*, (2012) telah mengembangkan produk *spread* untuk roti dan biskuit yang terbuat dari nanoemulsi lemak kakao (*cocoa butter*). Dalam bentuk nanoemulsi, takaran lemak kakao yang dibutuhkan lebih rendah untuk menghasilkan *spread* dengan sifat organoleptik yang sama. Dengan demikian, penggunaan lemak kakao dalam bentuk nanoemulsi dapat menghasilkan *spread* rendah lemak (*reduced fat spread*) yang lebih sehat. Pada tataran komersial, Unilever telah menggunakan nanoemulsi untuk membuat produk es krim rendah lemak tanpa mempengaruhi cita rasanya. Demikian pula, Nestle telah mengembangkan sistem nanoemulsi air dalam minyak untuk mempercepat dan mempermudah proses pencairan/pelunakan produk pangan beku (*thawing*) (Silva *et al.*, 2012).

Definisi ketahanan pangan juga mengamanahkan bahwa pangan yang tersedia harus menjamin asupan gizi yang cukup. Banyak zat gizi dan senyawa bioaktif memiliki kelarutan dalam air yang rendah serta sensitif terhadap oksigen, cahaya, panas, dan atau pH, sehingga mudah mengalami kerusakan pada saat pengolahan, penyimpanan, transportasi dan atau pencernaan. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, sistem penghantar berstruktur nano, seperti nanoemulsi dan liposom, dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan kelarutan, stabilitas maupun penyerapan zat gizi dan senyawa bioaktif, baik melalui sistem enkapsulasi maupun ukurannya yang sangat kecil (Pérez-Estève *et al.*, 2013). Sebagai contoh, pengembangan nanoemulsi dan nanoenkapsulat vitamin A untuk bahan fortifikasi (pengayaan gizi) pangan (Yuliani *et al.*, 2014) dan pakan (Albertini *et al.*, 2010). Di samping itu, Chaudhry and Castle (2011) melaporkan bahwa nanomaterial inorganik juga dapat dimanfaatkan pada produksi pangan sehat. Beberapa contoh nanomaterial inorganik antara lain: logam transisi dan logam oksida (seperti perak, besi dan titanium dioksida), logam bumi alkali (seperti kalsium dan magnesium), serta non-logam (seperti selenium dan silikat).



Ketersediaan, Distribusi dan Konsumsi

Aspek ketersediaan, distribusi dan konsumsi sangat terkait dengan pengemasan, pelabelan, dan penyimpanan. Di bidang pangan, nanoteknologi paling banyak dan paling cepat perkembangannya aplikasinya yaitu untuk kemasan pangan. Dalam hal ini aplikasi nanoteknologi memungkinkan perbaikan sifat fisik dan mekanis kemasan, diantaranya *gas barrier*, daya serap air, kekuatan, ringan, dan dekomposisi, serta pengembangan kemasan aktif dan pintar yang dilengkapi nanoantimikroba, nanosensor dan *nano-barcodes* yang dapat mempertahankan mutu (diantaranya kesegaran) dan keamanan produk pangan, membantu *traceability* dan monitoring kondisi produk selama distribusi dan penyimpanan, serta mempermudah deteksi cemaran dan kerusakan sebelum dikonsumsi (Chaudhry & Castle 2011; Pérez-Esteve *et al.*, 2013).

Inkorporasi (penggabungan) nanomaterial ke dalam polimer plastik telah mendorong berkembangnya bahan-bahan kemasan pangan inovatif yang secara umum dapat digolongkan ke dalam empat kategori, yaitu (i) nanokomposit polimer dengan kandungan nanopartikel hingga 5% dan menghasilkan karakteristik yang lebih baik dalam hal fleksibilitas, daya tahan, stabilitas terhadap suhu dan atau kelembaban, serta perpindahan/migrasi gas, (ii) kemasan "aktif" berubahan polimer yang mengandung nanomaterial yang bersifat antimikroba, (iii) *nano-coating* "aktif" untuk menjaga higienitas permukaan bahan atau pun kontak pangan dan *nano-coating* hidrofobik sehingga permukaan bahan/kemasan memiliki daya bersih mandiri (*self-cleaning surfaces*), dan (iv) kemasan "pintar" yang didalamnya terdapat nano-(bio)sensor untuk memonitor dan melaporkan kondisi pangan dan atau kondisi atmosfer di dalam kemasan dan nano-barcodes untuk mengetahui keautentikan/ketertelusuran pangan (Chaudhry & Castle 2011; Chaudhry *et al.*, 2008).

Saat ini pengembangan kemasan pangan hasil nanoteknologi memiliki potensi manfaat yang sangat luas. Beberapa manfaat tersebut diantaranya untuk mengendalikan proses pematangan buah, mempertahankan kesegaran dan keamanan daging, deteksi kontaminan/pathogen pangan, dan deteksi kadaluarsa pangan (Chaudhry & Castle 2011; Pérez-Esteve *et al.*, 2013). Contoh aplikasi nanoteknologi pada kemasan pangan dan potensi manfaatnya disajikan pada Tabel 2. Badan Litbang Pertanian juga telah mengembangkan kemasan aktif antimikroba yang disisipi enkapsulat ekstrak bawang putih atau nanopartikel *zinc oxides* serta kemasan ramah lingkungan yang diperkuat nano-serat selulosa (Iriani *et al.*, 2015; Yuliani *et al.*, 2014).



Tabel 2. Contoh aplikasi dan manfaat nanoteknologi pada kemasan pangan

Produk Nanoteknologi	Manfaat
Nano-kalsium silikat	Nanostruktur kalsium silikat dapat menyerap etilen dan karbondioksida yang dihasilkan pada proses pematangan buah
<i>Low density polyethylene</i> + polimer olefin	Film yang memiliki kemampuan menangkap (<i>scavenger</i>) karbondioksida pada kemasan vakum untuk produk daging
Nanokristal pati	Film berlapis (<i>multi-layer</i>) dengan kemampuan mengendalikan migrasi oksigen
Peptida surfaktan	Perangkat bio-sensing untuk deteksi bau gas yang ditimbulkan dari degradasi komponen pangan, khususnya protein
<i>Carbon nanotubes</i> + antigen	Sensor untuk mendeteksi zat toksik spesifik dalam udara
Nanopartikel emas	Perangkat bio-sensing untuk deteksi allergen dan zat toksik dalam larutan
Nanopartikel magnetik	Perangkat untuk deteksi dan kuantifikasi mikroorganisme, patogen, protein dan antibodi
Komposit polimer plastik + nano-silver + nano-zinc oxide	Kemasan pangan bersifat antimikroba
Nano-(bio)sensor/ <i>nano-barcodes</i>	Untuk deteksi keautentikan/ketertelusuran produk pangan dalam sistem rantai pasok

Sumber: disarikan dari Chaudhry and Castle (2011) dan Pérez-Estève *et al.*, (2013)

TANTANGAN APLIKASI NANOTEKNOLOGI DI SEKTOR PERTANIAN DAN PANGAN

Seperti di berbagai sektor lainnya, perkembangan aplikasi nanoteknologi menawarkan banyak peluang inovasi di sektor pertanian dan pangan. Akan tetapi, perkembangan/kemajuan tersebut juga menghadapi berbagai tantangan, diantaranya terkait penguasaan ilmu pengetahuan dan teknologi (IPTEK), pengembangan/hilirisasi teknologi, keamanan produk, persepsi masyarakat terhadap keamanan produk, serta kesiapan regulasi.

Dalam hal penguasaan IPTEK, kegiatan litbang nanoteknologi membutuhkan sumber daya manusia yang memiliki kemampuan *know-how* yang memadai dari berbagai disiplin. Hal ini menjadi tantangan serius khususnya bagi negara-negara berkembang. Saat ini, kegiatan litbang nanoteknologi lebih banyak pada pemanfaatannya dalam mengatasi permasalahan dan mendorong inovasi di berbagai sektor, termasuk pertanian dan pangan. Di sisi lain, dirasakan masih kurangnya pengetahuan/pemahaman tentang perilaku dan dampak nanopartikel di dalam tubuh dan lingkungan, serta belum berkembangnya teknik deteksi dan karakterisasi nanopartikel dalam produk pertanian dan pangan. Produk nanoteknologi memiliki karakteristik yang berbeda dengan bahan asalnya. Oleh karena itu, bukan tidak mungkin metode-metode standar saat ini tidak mampu mendeteksi dan mengkaraktisasinya (Hoerudin 2015). Hal tersebut sangat penting dalam kaitannya dengan pengetahuan dan kejelasan risiko keamanan produk nanoteknologi.

Tantangan lainnya yaitu terkait dengan pengembangan/hilirisasi teknologi. Saat ini sebagian besar potensi manfaat nanoteknologi di bidang pertanian dan pangan baru sebatas invensi/hasil penelitian pada skala laboratorium dan sebagian besar belum dikembangkan secara massal/komersial. Sebagai salah satu pendekatan baru, nanoteknologi masih

memberikan kesan sebagai suatu teknologi yang mahal (membutuhkan investasi yang tinggi) dalam aplikasinya. Dengan demikian, penerapannya dianggap hanya akan terbatas pada komoditas bernilai ekonomi tinggi saja. Oleh karena itu, diantara tantangan ke depan yaitu perlu semakin ditunjukkan bahwa nanoteknologi merupakan pendekatan baru yang bersifat *cost-effective* dalam memecahkan permasalahan-permasalahan di bidang pertanian dan pangan. Dengan demikian, potensi manfaatnya benar-benar dapat diaplikasikan dan memberikan manfaat serta dampak ekonomi yang luas di masyarakat. Untuk itu, diperlukan kerjasama yang baik antara pemerintah, akademisi, industri, dan komunitas/masyarakat sejak awal dilakukannya penelitian nanoteknologi.

Saat ini terdapat sejumlah isu terkait keamanan produk nanoteknologi. Sebagai contoh, untuk kemasan hasil rekayasa nanoteknologi, selain kemungkinan migrasi nanopartikel ke dalam produk pangan dan akhirnya ke dalam tubuh manusia, potensi risiko lain yang dikhawatirkan yaitu apakah yang akan terjadi dengan nanopartikel setelah kemasan menjadi limbah. Dalam hal ini nanopartikel dari kemasan mungkin saja tidak terdegradasi, sehingga terakumulasi dan dapat berinteraksi/membahayakan komponen ekologi lainnya. Demikian pula halnya dengan produk lainnya, seperti pupuk dan pestisida.

Berdasarkan karakteristiknya, risiko keamanan pangan produk nanoteknologi dapat dibagi dalam tiga kategori, yaitu (i) risiko rendah, dimana produk pangan/kemasan pangan mengandung nanopartikel/nanostruktur (alami) yang dapat tercerna dan tidak *biopersistent* (terakumulasi di dalam tubuh), (ii) risiko sedang, dimana produk pangan/kemasan pangan mengandung bahan aktif/tambahan pangan yang disalut sistem penghantar berukuran nano yang dapat menembus saluran pencernaan serta meningkatkan penyerapan dan bioavailabilitas (dalam hal ini peningkatan penyerapan bahan aktif/bahan tambahan pangan dan bahan penyalutnya belum tentu memberikan manfaat untuk kesehatan, bahkan mungkin sebaliknya), dan (iii) risiko tinggi, dimana produk pangan/kemasan pangan mengandung nanopartikel tidak terlarut, tidak tercerna dan berpotensi *biopersistent*, seperti nanopartikel logam dan logam oksida. Pada kelompok risiko tinggi tersebut, konsumen atau lingkungan sangat berpotensi terpapar nanopartikel yang sifat toksisitasnya hingga saat ini belum banyak diketahui (Chaudhry & Castle 2011; Hoerudin 2015). Kurangnya pengetahuan mengenai hal-hal tersebut akan menimbulkan kesulitan dalam menilai tingkat asupan pangan yang aman.

Akan tetapi perlu dicatat bahwa nanopartikel juga terdapat pada pangan secara alamiah. Sebagai contoh, protein sebagai β -laktoglobulin alam memiliki ukuran sekitar 3,6 nm. Proses denaturalisasi dapat menyebabkan protein tersebut membentuk struktur yang lebih besar sehingga membentuk jejaring *gel* (Cushen *et al.*, 2012). Dalam hal ini, yogurt merupakan salah satu contoh produk akhir dari proses tersebut dan merupakan contoh pangan produk nanoteknologi yang aman dikonsumsi (Pérez-Esteve *et al.*, 2013).

Di tengah-tengah perkembangan aplikasi nanoteknologi di bidang pangan dan belum banyaknya informasi tentang keamanan produk tersebut, sangat menarik untuk mengetahui bagaimana persepsi masyarakat terhadap produk nanoteknologi. Sebuah studi di USA yang melibatkan sekitar 1.250 rumah tangga, meminta responden menilai risiko produk nanoteknologi (nanopartikel) dibandingkan 23 risiko umum lainnya terhadap kesehatan. Respon diukur berupa skor 1=hampir tidak ada risiko, 2=risiko ringan, 3=risiko sedang, dan 4=risiko tinggi. Hasil studi menunjukkan bahwa berdasarkan respon yang diterima risiko nanopartikel terhadap kesehatan berada pada posisi ke-5 terendah dengan rata-rata skor 1,94. Hasil studi ini menyimpulkan bahwa masyarakat tidak khawatir terhadap risiko kesehatan nanoteknologi dibandingkan risiko umum lainnya (Berube *et al.*, 2011). Baru-baru ini sebuah tinjauan komprehensif dilakukan oleh Frewer *et al.*, (2014) terhadap hasil-hasil studi persepsi dan sikap masyarakat terhadap nanoteknologi. Hasil tinjauan tersebut

menyimpulkan bahwa sikap masyarakat cukup positif (*moderately positive*) terhadap semua aplikasi nanoteknologi. Demikian pula, hasil studi Parisi *et al.*, (2015) menyebutkan bahwa opini publik tidak negatif terhadap nanoteknologi dan produk nanoteknologi yang sudah komersial di pasaran. Akan tetapi, perlu dicatat bahwa studi-studi persepsi masyarakat tersebut lebih banyak dilakukan di negara-negara maju, terutama USA dan di Eropa, yang lebih awal mengembangkan nanoteknologi. Sementara itu, studi-studi sejenis masih belum banyak dilakukan di negara-negara berkembang yang justru menjadi pasar potensial bagi produk-produk nanoteknologi, seperti di Indonesia. Ke depan, fakta-fakta yang membuktikan manfaat atau risiko nanoteknologi tentunya akan menentukan persepsi dan sikap masyarakat terhadap produk nanoteknologi.

Hingga saat ini perkembangan produk nanoteknologi di dunia (termasuk Indonesia) masih belum diikuti dukungan regulasinya. Hal ini ditunjukkan masih belum adanya negara yang menetapkan regulasi khusus yang mengatur nanoteknologi, termasuk aplikasinya dalam produk/kemasan pangan berdasarkan fakta-fakta ilmiah (Hoerudin 2015). Dalam hal ini, ruang lingkup regulasi yang sudah ada di berbagai wilayah yurisdiksi, seperti USA, Eropa dan Australia, dinilai masih cukup untuk mengatur aplikasi nanoteknologi di bidang pangan. Regulasi-regulasi tersebut meliputi keamanan pangan umum, bahan tambahan pangan, produk pangan baru, klaim kesehatan khusus, keamanan kimia, bahan kontak pangan, mutu air, dan regulasi khusus lainnya tentang penggunaan bahan kimia dalam produksi/proteksi pangan, seperti pestisida dan obat hewan. Demikian pula regulasi lingkungan yang ada dinilai cukup untuk mengatur aplikasi nanoteknologi (Chaudhry & Castle 2011). FAO/WHO (2013) juga menyatakan bahwa pendekatan-pendekatan penilaian risiko yang saat ini digunakan oleh FAO, WHO dan *Codex Alimentarius Commission* dianggap masih sesuai untuk menilai risiko penggunaan nanomaterial di sektor pertanian dan pangan. Akan tetapi, belum adanya dukungan regulasi khusus tersebut merupakan tantangan ke depan yang dapat menimbulkan keraguan industri/pelaku usaha dan masyarakat dalam menerapkan nanoteknologi.

PENUTUP DAN ARAH KE DEPAN

Sistem ketahanan pangan harus dibangun pada berbagai aspek melalui berbagai pendekatan. Revolusi nanoteknologi diprediksi akan terjadi di berbagai bidang, termasuk pertanian dan pangan. Revolusi nanoteknologi di bidang pertanian dan pangan dapat terjadi pada seluruh rantai pangan, mulai dari hulu (produksi bahan pangan/benih) hingga cara proses, pengemasan, penyimpanan, distribusi, ketertelusuran dan keamanan konsumsinya. Hal ini berbeda dengan revolusi hijau dan revolusi gen yang terfokus pada peningkatan produktivitas dan produksi pangan. Namun demikian, dalam implementasinya, kegiatan litbang nanoteknologi merupakan pendekatan yang bersifat komplementer/melengkapi (bukan menggantikan) terhadap teknologi-teknologi yang sudah dan sedang dikembangkan sebelumnya.

FAO/WHO (2013) menyebutkan bahwa terdapat peningkatan *trend* pemanfaatan nanoteknologi untuk menyelesaikan permasalahan-permasalahan di sektor pertanian, pangan dan kesehatan. *Trend* tersebut diprediksi akan semakin meningkat pada tahun-tahun mendatang. Berdasarkan kondisi yang ada, Badan Litbang Pertanian merupakan salah satu institusi litbang pertama di Indonesia yang telah melaksanakan kegiatan litbang nanoteknologi yang terfokus pada bidang pertanian dan pangan, serta dilengkapi fasilitas litbang nanoteknologi yang memadai. Oleh karena itu, ke depan Badan Litbang Pertanian akan memiliki peran yang penting dalam mewujudkan prospek nanoteknologi. Untuk membangun ketahanan pangan ke depan, Badan Litbang Pertanian dapat berperan dalam kegiatan litbang nanoteknologi yang dapat menghasilkan:



- o teknologi peningkatan produktivitas/produksi pangan yang lebih efisien dan aman, diantaranya pengurangan penggunaan bahan agrokimia (seperti pupuk, pestisida, obat hewan);
- o teknologi pengolahan pangan dan pakan yang lebih higienis;
- o produk pangan baru yang aman dan sehat dengan cita rasa yang enak serta mudah penyajian/mengkonsumsinya (*safe healthy tasteful convenient food products*);
- o teknologi diagnostik dan pengendalian penyakit tanaman dan hewan, serta kontaminan pangan yang lebih efektif, efisien, dan ramah lingkungan
- o produk pangan dengan umur simpan (*shelf-life*) yang lebih lama untuk mengurangi limbah pangan sekaligus meningkatkan jaminan pasokan pangan yang lebih baik;
- o kemasan dan label pangan fungsional ("aktif" dan "pintar" yang dapat mempertahankan mutu dan menginformasikan kondisi pangan), ramah lingkungan dan lebih ringan untuk meningkatkan keamanan pangan, menjamin keautentikan/ketertelusuran, mengurangi biaya penyimpanan dan distribusi serta mengurangi limbah lingkungan.

Hingga saat ini potensi risiko nanopartikel terhadap kesehatan manusia dan kelestarian lingkungan masih belum banyak diketahui. Oleh karena itu, banyak negara yang mengembangkan aplikasi nanoteknologi dan pada saat yang sama melakukan studi dampaknya. Diantara potensi risikonya yaitu melalui konsumsi pangan produk nanoteknologi konsumen dapat terpapar nanopartikel yang belum diketahui: (i) apakah peningkatan penyerapan dan bioavailabilitas yang tinggi selalu berdampak baik untuk kesehatan, (ii) apakah nanopartikel terdegradasi di dalam tubuh sehingga tidak menimbulkan sifat berbahaya, dan (iii) apakah nanopartikel dapat menyebar ke bagian tubuh lain dan menimbulkan kerusakan organ. Ke depan, melalui kegiatan-kegiatan risetnya Badan Litbang Pertanian dapat turut berperan dalam mengkonfirmasi benar tidaknya potensi risiko nanopartikel terhadap kesehatan manusia dan kelestarian lingkungan tersebut.

Nanoteknologi merupakan konvergensi dari berbagai disiplin. Hal ini merupakan kondisi strategis yang dapat mendorong lahirnya inovasi-inovasi baru di masa mendatang dalam menyelesaikan permasalahan pertanian dan pangan. Oleh karena itu, langkah-langkah ke depan yang juga perlu dilakukan, termasuk oleh Badan Litbang Pertanian, antara lain pengembangan sumber daya litbang (manusia, keuangan dan fasilitas) yang memadai. Jejaring kerjasama nasional antara pemerintah, akademisi, swasta/industri, dan masyarakat serta kerjasama internasional perlu dibangun dan dikembangkan, sehingga dapat mengatasi berbagai keterbatasan/kendala yang dihadapi.

Untuk mendukung perkembangan aplikasi, industrialisasi dan komersialisasi, serta pemanfaatan produk nanoteknologi tetap diperlukan regulasi khusus yang mengatur hal tersebut. Dalam hal ini, Badan Litbang Pertanian dapat berperan dalam berbagai hal terkait regulasi, sosialisasi dan edukasi nanoteknologi ke depan, seperti (i) penyusunan strategi dan panduan penilaian manajemen risiko yang jelas dan konsisten, (ii) harmonisasi sistem regulasi nasional dan internasional yang mengatur pemanfaatan nanoteknologi beserta produk yang dihasilkannya, serta (iii) sosialisasi dan edukasi kepada masyarakat, sehingga dapat menilai manfaat dan risiko produk nanoteknologi secara objektif.



DAFTAR PUSTAKA

- Albertini, B, Sabatino, MD, Calogerà, G, Passerini, N & Rodriguez, L 2010, 'Encapsulation of vitamin A palmitate for animal supplementation: formulation, manufacturing and stability implications', *Journal of Microencapsulation*, vol. 27, no. 2, pp. 150-61.
- ANF 2015, *Asia Nano Forum Network Organization*, Asia Nano Forum, viewed 5 Agustus 2015, <<http://asia-anf.org/ANFNetwork.php>>.
- Bassett, DR 2010, 'Taniguchi, Norio', in DH Guston (ed.), *Encyclopedia of nanoscience and society*, SAGE, London, p. 747, viewed 5 Agustus 2015, <https://books.google.co.id/books?id=vyp1AwAAQBAJ&pg=PA747&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false>.
- Berube, D, Cummings, C, Frith, J, Binder, A & Oldendick, R 2011, 'Comparing nanoparticle risk perceptions to other known EHS risks', *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 13, no. 8, pp. 3089-99.
- Chaudhry, Q & Castle, L 2011, 'Food applications of nanotechnologies: An overview of opportunities and challenges for developing countries', *Trends in Food Science & Technology*, vol. 22, no. 11, pp. 595-603.
- Chaudhry, Q, Scotter, M, Blackburn, J, Ross, B, Boxall, A, Castle, L, Aitken, R & Watkins, R 2008, 'Applications and implications of nanotechnologies for the food sector', *Food Additives and Contaminants*, vol. 25, no. 3, pp. 241-58.
- Cientifica 2011, 'Global Funding of Nanotechnologies and its impact July 2011', viewed 4 Agustus 2015, <<http://cientifica.com/wp-content/uploads/downloads/2011/07/Global-Nanotechnology-Funding-Report-2011.pdf>>.
- Clunan, AL, Rodine-Hardy, K, Hsueh, R, Kosal, ME & McManus, I 2014, *Nanotechnology in a Globalized World: Strategic Assessments of an Emerging Technology*, Project on Advanced Systems and Concepts for Countering WMD (PASCC) Report Number 2014 006, Northeastern University, the Naval Postgraduate School Center on Contemporary Conflict, and the Defense Threat Reduction Agency, Monterey, CA.
- Cushen, M, Keery, J, Morris, M, Cruz-Romero, M & Cummins, E 2012, 'Nanotechnologies in the food industry-Recent developments, risks and regulation', *Trends in Food Science & Technology*, vol. 24, pp. 30-46.
- DeRosa, MC, Monreal, C, Schnitzer, M, Walsh, R & Sultan, Y 2010, 'Nanotechnology in fertilizers', *Nat Nano*, vol. 5, no. 2, pp. 91-.
- Deswina, P 2013, 'Kebijakan penggunaan teknologi rekayasa genetik pada tanaman pertanian untuk meningkatkan ketahanan pangan nasional', *Prosiding Seminar Nasional PERIPI*, pp. 262-72.
- Djauhari, A 2013, 'Analisis Struktur Pengeluaran Rumah Tangga Mendukung Diversifikasi Konsumsi Pangan', in Mea Ariani (ed.), *Diversifikasi Pangan dan Transformasi Pembangunan Pertanian*, Badan Litbang Pertanian, Kementerian Pertanian, Jakarta.

- FAO 2010, *International Conference on Food and Agriculture: Applications of Nanotechnologies*, Report of Technical Round Table Sessions. NANOAGRI 2010, June 20-25 2010 Sao Pedro, SP, Brazil.
- FAO/WHO 2009, *FAO/WHO Expert Meeting on the Application of Nanotechnologies in the Food and Agriculture Sectors: Potential Food Safety Implications*, Meeting Report Food and Agriculture Organization of the United Nations/World Health Organization, Rome. 104pp.
- 2013, *State of the art on the initiatives and activities relevant to risk assessment and risk management of nanotechnologies in the food and agriculture sectors*, FAO/WHO Technical Paper, Rome.
- FoE 2008, 'Out of the laboratory and on to our plates. Nanotechnology in Food and Agriculture.', *A report prepared for Friends of the Earth Australia, Friends of the Earth Europe and Friends of the Earth United States and supported by Friends of the Earth Germany.*, pp. 1-63, viewed 6 Agustus 2015, <http://www.foe.org/system/storage/877/b5/4/547/Nanotechnology_in_food_and_agriculture_-_web_resolution.pdf>.
- Frewer, LJ, Gupta, N, George, S, Fischer, ARH, Giles, EL & Coles, D 2014, 'Consumer attitudes towards nanotechnologies applied to food production', *Trends in Food Science & Technology*, vol. xx, pp. 1-15.
- Garcia, M, Forbe, T & Gonzales, E 2010, 'Potential applications of nanotechnology in the agro-food sector', *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, vol. 30, no. 3, pp. 573-81.
- Hajirasouliha, M, Jannesari, M, Najafabadi, FS & Hashemi, M 2012, 'Effect of novel chitosan nano-particle coating on postharvest qualities of strawberry', in *Proceedings of the 4th International Conference on Nanostructures*, Kish Island, I.R. Iran, pp. 840-2.
- Hoerudin 2015, 'Keamanan Pangan Produk Nanoteknologi', *Food Review Indonesia*, vol. X, no. 2, pp. 40-4.
- Hoerudin & Harimurti, N 2014, 'Nanoformulations for enhancing bioavailability and biological activities of curcumin', in O Rostiana (ed.), *Proceeding of International Seminar on Spice, Medicinal and Aromatic Plants*, Jakarta.
- Hoerudin, Ismayana, A, Wismogroho, AS, Amal, MI & Widayanti, SM 2015, *Pengembangan nano-zeolit sebagai moisture dan CO₂ adsorber untuk aplikasi pada penanganan buah tropis*, Laporan Tengah Tahun Kegiatan KKP3N. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pascapanen Pertanian, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Bogor.
- Irawan, B, Rusastra, IW, Swastika, DKS, Sutoro, Talib, C, Hoerudin, Ariani, M & Hastuti, S 2013, *Keselarasan Prioritas Pengembangan SDM, Sarana/Prasarana dan Penelitian: Kasus Pada BB Biogen, BB Pascapanen, BPTP Sulawesi Selatan*, Laporan Studi, Pusat Sosial Ekonomi dan Kebijakan Pertanian, Badan Litbang Pertanian, Bogor.
- Iriani, ES, Hoerudin, Yuliani, S, Harimurti, N, Agustinisari, I, Permana, AW, Juniawati, Kamsiati, E, Suryanegara, L, Fahma, F, Mulyani, ES, Lestina, P, Irvandy, A, Triyono, M, Haerani, C & Suryadi, RI 2015, *Pemanfaatan Biomassa Pertanian untuk Kemasan Pintar*

Nano-Biodegradable, Laporan Tengah Tahun Kegiatan Penelitian DIPA, Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pascapanen Pertanian, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Bogor.

- James, C 2014, *Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2014*, International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications (ISAAA) Briefs No. 49, Ithaca, NY.
- Kaya-Celiker, H & Mallikarjunan, K 2012, 'Better nutrients and therapeutics delivery in food through nanotechnology', *Food Engineering Reviews*, vol. 4, pp. 114-23.
- Kementan 2015, *Rencana Strategis Kementerian Pertanian Tahun 2015-2019*, Kementerian Pertanian, Jakarta.
- Kuzma, J, Romanchek, J & Kokotovich, A 2008, 'Upstream oversight assessment for agrifood nanotechnology', *Risk Analysis*, vol. 28, pp. 1081-98.
- Las, I 2009, 'Revolusi hijau lestari untuk ketahanan pangan ke depan', *Sinar Tani*, 14 Januari 2009.
- Liu, F, Wen, LX, Li, ZZ, Yu, W, Sun, HY & Chen, JF 2006, 'Porous hollow silica nanoparticles as controlled delivery system for water-soluble pesticide', *Materials Research Bulletin*, vol. 41, no. 12, pp. 2268-75.
- Nabifarkhani, N, Sharifani, M, Daraei Garmakhany, A, Ganji Moghadam, E & Shakeri, A 2015, 'Effect of nano-composite and Thyme oil (*Tymus Vulgaris* L) coating on fruit quality of sweet cherry (Takdaneh Cv) during storage period', *Food Science & Nutrition*, vol. 3, no. 4, pp. 349-54.
- Naderi, MR & Danesh-Shahraki, A 2013, 'Nanofertilizers and their roles in sustainable agriculture', *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, vol. 5, no. 19, pp. 2229-32.
- Oberman, R, Dobbs, R, Budiman, A, Thompson, F & Rossé, M 2012, *The Archipelago Economy: Unleashing Indonesia's Potential*, McKinsey Global Institute, Jakarta.
- Parisi, C, Vigani, M & Rodríguez-Cerezo, E 2015, 'Agricultural Nanotechnologies: What are the current possibilities?', *Nano Today*, vol. 10, no. 2, pp. 124-7.
- Pérez-Esteve, E, Bernardos, A, Martínez-Mañez, R & Barat, JM 2013, 'Nanotechnology in the development of novel functional foods or their package. An overview based in patent analysis', *Recent Patents on Food, Nutrition & Agriculture*, vol. 5, pp. 35-43.
- Pingali, P & Raney, T 2005, 'From the green revolution to the gene revolution: How will the poor fare?', *ESA Working Paper No. 05-09. The Food and Agriculture Organization of the United Nations*.
- Quintanilla-Carvajal, M, Camacho-Díaz, B, Meraz-Torres, L, Chanona-Pérez, J, Alamilla-Beltrán, L, Jimenéz-Aparicio, A & Gutiérrez-López, G 2010, 'Nanoencapsulation: A New Trend in Food Engineering Processing', *Food Engineering Reviews*, vol. 2, no. 1, pp. 39-50.



- Rai, V, Acharya, S & Dey, N 2012, 'Implications of nanobiosensors in agriculture', *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, vol. 3, pp. 315-24.
- Rochman, NT 2011, 'Strategi pengembangan nanoteknologi dalam rangka peningkatan daya saing global agroindustri nasional', Doctor thesis, Institut Pertanian Bogor.
- Rochman, NT & Mardiyati, E 2010, *Nanoteknologi: Meningkatkan daya saing bangsa pada bidang pertanian dan pangan*, 2 edn, Nanotech Indonesia, Serpong.
- Salamanca-Buentello, F, Persad, DL, Court, EB, Martin, DK, Daar, AS & Singer, PA 2005, 'Nanotechnology and the developing world', *PLoS Medicine*, vol. 2, no. 5, pp. 383-6.
- Silva, H, Cerqueira, M & Vicente, A 2012, 'Nanoemulsions for food applications: development and characterization', *Food and Bioprocess Technology*, vol. 5, pp. 854-67.
- Sisworo, W 2007, 'Membangun kembali swasembada beras. Makalah online. Diperoleh dari <http://www.drn.go.id>, diakses tanggal 15 Februari 2008'.
- Watson, J, Gilman, M, Witkowski, J & Zoller, M 1996, *Recombinant DNA*, 2 edn, Scientific American Books. W.H Freeman and Co., New York.
- Wikipedia 2015, 'History of nanotechnology', viewed 5 Agustus 2015, <https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_nanotechnology>.
- Yuliani, S, Harimurti, N, Nurdjannah, N & Herawati, H 2012, *Teknologi nanoemulsi lemak kakao (cocoa butter) sebagai bahan spread kaya antioksidan untuk rerotian dan biskuit*, Laporan Akhir Kegiatan Penelitian Insentif Peningkatan Kemampuan Peneliti dan Perakayasa, Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pascapanen Pertanian, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Bogor.
- Yuliani, S, Hoerudin, Permana, AW, Dewandari, KT, Juniawati, Susanto, U, Abdulrahman, S, Zarwazi, LM, Rohaeni, WR, Widowati, LR, Husnain, Amal, MI, Iriani, ES, Setyawan, N, Ratnaningsih, Mulyani, ES, Haerani, C, Triyono, Danuwarsa & Suryadi, RI 2015, *Aplikasi nanoteknologi untuk pengembangan matriks pupuk nano dan ingridien pangan fungsional*, Laporan Tengah Tahun Kegiatan Penelitian APBN, Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pascapanen Pertanian, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Bogor.
- Yuliani, S, Hoerudin, Harimurti, N, Iriani, ES, Agustinisari, I, Permana, AW, Dewandari, KT, Juniawati, Munarso, SJ, Widaningrum, H, M, Hasan, ZH, Haliza, W, Suryanegara, L, Wahyudiono, Mulyani, ES, Lestina, P, Irvandy, A, Triyono, M, Haerani, C & Suryadi, RI 2014, *Pengembangan nanoteknologi untuk pangan fungsional, nutrasetikal dan kemasan*, Laporan Akhir Tahun Penelitian DIPA, Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pascapanen Pertanian, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Bogor.

