

PROSPEK PENERAPAN TEKNOLOGI NANO DALAM PERTANIAN DAN PENGOLAHAN PANGAN DI INDONESIA

Prospects of Nanotechnology Application in Agriculture and Food Processing in Indonesia

Ening Ariningsih*

*Pusat Sosial Ekonomi dan Kebijakan Pertanian
Jln. A. Yani 70, Bogor 16161, Jawa Barat, Indonesia
Korespondensi penulis. E-mail: ening.ariningsih@yahoo.com

Naskah diterima: 22 Maret 2016

Direvisi: 16 Mei 2016

Disetujui terbit: 1 Juli 2016

ABSTRACT

The fast growing research in the field of nanotechnology in the last decade is a challenge as well as an opportunity for Indonesia to participate in the world market. This paper aimed to assess the prospects of nanotechnology application in Indonesia, especially in agriculture and food processing. The study was conducted through a literature review. Nanotechnology has a promising prospect to be applied in Indonesia. However, the research, development, and application of nanotechnology in Indonesia grow slowly and are more focused on areas other than agriculture and food processing, such as electronics, energy, medicine, pharmacy, etc. Barriers to the development of nanotechnology in Indonesia among others are (1) inadequate nanotechnology facilities and dispersed sporadically in a number of institutions, (2) lack of synergism among research institutions working on nanotechnology, (3) less supporting human resources, and (4) limited budget. A number of studies reveal that nanotechnology application in agriculture and food processing in Indonesia includes fertilizers, antioxidants, preservatives, fortification, functional foods, nutraceuticals, smart packaging, etc. In order to support nanotechnology application in national agro-industry, some policies to implement are (a) developing nanotechnology research network at national level, (b) socialization of nanotechnology and its potential utilization in agriculture, (c) strengthening human resource capacity in nanotechnology, (d) developing nanotechnology research synergy, (e) developing the governance of nanotechnology research at IAARD, (f) setting research priorities of nanotechnology, and (g) developing collaboration with private parties.

Keywords: *agriculture, food processing, nanotechnology*

ABSTRAK

Penelitian di bidang teknologi nano yang berkembang pesat dalam dekade terakhir merupakan tantangan dan peluang bagi Indonesia untuk ikut berperan dalam pasar dunia. Tulisan ini bertujuan untuk mengkaji prospek penerapan teknologi nano, khususnya pada bidang pertanian dan pengolahan pangan. Kajian dilakukan melalui studi pustaka yang relevan dengan penelitian, pengembangan, dan penerapan teknologi nano, khususnya pada bidang pertanian dan pengolahan pangan di Indonesia. Hasil pengkajian menunjukkan teknologi nano mempunyai prospek yang cerah untuk diterapkan di Indonesia, namun penelitian, pengembangan, dan penerapannya di Indonesia berkembang lambat dan lebih terfokus pada bidang selain pertanian dan pengolahan pangan, seperti elektronik, energi, kedokteran, dan farmasi. Hambatan perkembangan teknologi nano di Indonesia antara lain (1) fasilitas (sarana dan prasarana) teknologi nano yang kurang memadai dan tersebar di sejumlah institusi; (2) kurangnya sinergisme antarlembaga riset teknologi nano; (3) sumber daya manusia (SDM) yang kurang mendukung; dan (4) anggaran yang kurang memadai. Sejumlah studi mengungkapkan penerapan teknologi nano pada bidang pertanian dan pengolahan pangan di Indonesia, seperti pupuk, antioksidan, pengawet makanan, fortifikasi, pangan fungsional, nutrasetikal, dan kemasan pintar. Dalam rangka mendorong penerapan teknologi nano pada agroindustri nasional maka peningkatan penguasaan teknologi nano di bidang pertanian perlu terus diupayakan dan dapat ditempuh melalui (a) membangun jaringan riset teknologi nano pada lingkup nasional, (b) sosialisasi teknologi nano dan potensi pemanfaatannya di bidang pertanian, (c) memperkuat SDM teknologi nano, (d) mengembangkan sinergi penelitian teknologi nano, (e) mengembangkan tata kelola penelitian teknologi nano pada lingkup Badan Litbang Pertanian, (f) menetapkan prioritas penelitian teknologi nano, dan (g) mengembangkan kerja sama dengan pihak swasta.

Kata kunci: *pengolahan pangan, pertanian, teknologi nano*

PENDAHULUAN

Penelitian dan penerapan di bidang teknologi nano telah berkembang pesat dalam dekade terakhir (Duncan 2011). Teknologi terbaru tersebut sudah merambah ke berbagai sektor kehidupan, seperti tekstil, pangan, komestik, kesehatan, kemasan pangan, dan berbagai produk konsumen lainnya (Wardana 2014). Menurut Hoerudin dan Irawan (2015) perkembangan teknologi nano yang pesat merupakan tantangan dan peluang bagi suatu negara untuk ikut berperan dalam pasar dunia atau hanya akan menjadi tujuan pasar.

Saat ini di banyak negara maju, seperti Amerika Serikat, Inggris, dan Australia, penelitian dan pengembangan penerapan teknologi nano di bidang pertanian dan pengolahan pangan semakin berkembang pesat. Irawan et al. (2014) melaporkan bahwa sejumlah negara telah membangun riset teknologi nano nasionalnya dengan serius, misalnya Amerika Serikat yang mendirikan National Nanotechnology Initiative (NNI). Selain pengembangan penelitian di tingkat nasional, jaringan penelitian teknologi nano antarnegara dan kawasan juga berkembang pesat. Dua organisasi besar dunia, yaitu Food and Agriculture Organization (FAO) dan World Health Organization (WHO) (2009) meyakini bahwa teknologi nano sangat potensial untuk pengembangan produk inovatif pertanian, perlakuan air, produksi pangan, pengolahan, pengawetan, dan pengemasan, sehingga berpotensi meningkatkan nilai tambah dan daya saing produk, serta keuntungan bagi petani, industri pangan, dan konsumen. Dalam hal ini, teknologi nano merupakan suatu pendekatan teknologi mutakhir yang sangat memberi harapan bagi kemajuan di berbagai bidang, termasuk pertanian dan pengolahan pangan. Namun, teknologi ini juga menimbulkan berbagai pertanyaan menyangkut dampaknya terhadap lingkungan, kesehatan, keamanan pangan, etika, serta isu kebijakan dan pengaturan.

Tidak hanya di negara-negara maju, di beberapa negara berkembang seperti Korea, Cina, Thailand, Malaysia, dan Vietnam, teknologi nano juga berkembang dengan pesat. Hasil-hasil studi sebelumnya menunjukkan bahwa untuk negara berkembang penerapan teknologi nano pada subsektor pertanian dan pengolahan pangan memiliki urgensi dan potensi dampak yang tinggi, terutama untuk peningkatan produktivitas, kualitas air, sistem penghantar obat, pengolahan dan penyimpanan pangan, serta deteksi dan pengendalian hama

beserta vektornya (Rochman 2011; Salamanca-Buentello et al. 2005). Lebih lanjut dikatakan bahwa penerapan teknologi nano untuk pertanian dan pengolahan pangan diharapkan dapat menciptakan pertanian presisi (*precision farming*) di mana input pertanian hanya diberikan sesuai kebutuhan tanaman atau ternak untuk efisiensi biaya produksi sekaligus meningkatkan kuantitas dan kualitas produk pertanian dan pengolahan pangan.

Dibandingkan dengan di negara-negara maju, sampai saat ini penelitian dan pengembangan teknologi nano di Indonesia masih belum banyak dilakukan, khususnya dalam bidang pertanian dan pengolahan pangan, padahal penerapan teknologi nano akan mendukung upaya pencapaian swasembada pangan dan pengembangan produk lokal yang berdaya saing tinggi (Hoerudin dan Irawan 2015). Potensi pengembangan teknologi nano di Indonesia didukung oleh ketersediaan material nano yang sangat besar potensinya untuk industri besar berbasis teknologi nano yang memiliki daya saing tinggi dengan memanfaatkan kekayaan alam yang dimiliki, termasuk potensi kekayaan alam pertanian dan pangan yang melimpah.

Tulisan ini bertujuan untuk mengkaji perkembangan penelitian dan pengembangan, serta penerapan teknologi nano, khususnya dalam bidang pertanian dan pengolahan pangan. Secara khusus juga akan dibahas bagaimana peran Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian, dalam penelitian dan pengembangan, serta penerapan teknologi nano pada bidang pertanian dan pengolahan pangan di Indonesia. Kajian dilakukan melalui studi literatur yang relevan dengan penelitian dan pengembangan, serta penerapan teknologi nano, khususnya dalam bidang pertanian dan pengolahan pangan. Hasil studi ini diharapkan dapat berguna sebagai bahan pertimbangan dalam menyusun program pengembangan teknologi nano di bidang pertanian dan pengolahan pangan ke depan.

DEFINISI DAN CAKUPAN TEKNOLOGI NANO

Ide dan konsep ilmu dan teknologi nano pertama kali diperkenalkan oleh Dr. Richard Feynman pada sebuah pertemuan ilmiah yang diselenggarakan oleh American Physical Society di California Institute of Technology (Caltech), 29 Desember 1959, dengan judul "*There's plenty of room at the bottom*", jauh sebelum istilah teknologi nano digunakan (NNI

[tanpa tahun]). Oleh karenanya, Dr. Richard Feynman dijuluki sebagai "*the father of nanotechnology*". Richard Feynman adalah seorang ahli fisika yang pada tahun 1965 memenangkan hadiah Nobel dalam bidang fisika. Dalam pidatonya, Feynman menggambarkan suatu proses di mana ilmuwan akan dapat memanipulasi dan mengontrol individu atom dan molekul.

Istilah teknologi nano pertama kali diresmikan oleh Prof. Norio Taniguchi, seorang ahli fisika dari Tokyo Science University, tahun 1974 dalam makalahnya yang berjudul "*On the basic concept of 'nano-technology'*" (Taniguchi 1974). Pada tahun 1980-an istilah teknologi nano dieksplorasi lebih jauh lagi oleh Dr. K. Eric Drexler, seorang ahli di bidang teknologi nano molekuler, melalui bukunya yang berjudul "*Engines of creation: the coming era of nanotechnology*" (Drexler 1986). Dalam buku tersebut disebutkan bahwa istilah "teknologi nano" dan "teknologi molekuler" dapat digunakan secara bergantian untuk menggambarkan teknologi baru yang menangani atom dan molekul individu dengan kontrol dan ketepatan.

Teknologi nano didefinisikan oleh US Environmental Protection Agency (2007) sebagai "*the science of understanding and control of matter at dimensions of roughly 1–100 nm, where unique physical properties make novel applications possible.*" Sementara, the US National Nanotechnology Initiative (NNI [tanpa tahun]) mendefinisikan teknologi nano sebagai "*science, engineering, and technology conducted at the nanoscale, which is about 1 to 100 nanometers.*" Definisi lain dari teknologi nano dikemukakan oleh Institute of Technology di Inggris, yang mendefinisikan teknologi nano sebagai "*science and technology where dimensions and tolerances in the range of 0.1 nanometer (nm) to 100 nm play a critical role*" (WhatIs.com 2011). Nano merupakan satuan panjang sebesar sepermiliar meter ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Nano sendiri berasal dari kata Yunani yang berarti kerdil, kemudian diturunkan menjadi kata nanometer. Jadi, teknologi nano adalah teknologi pada skala nanometer.

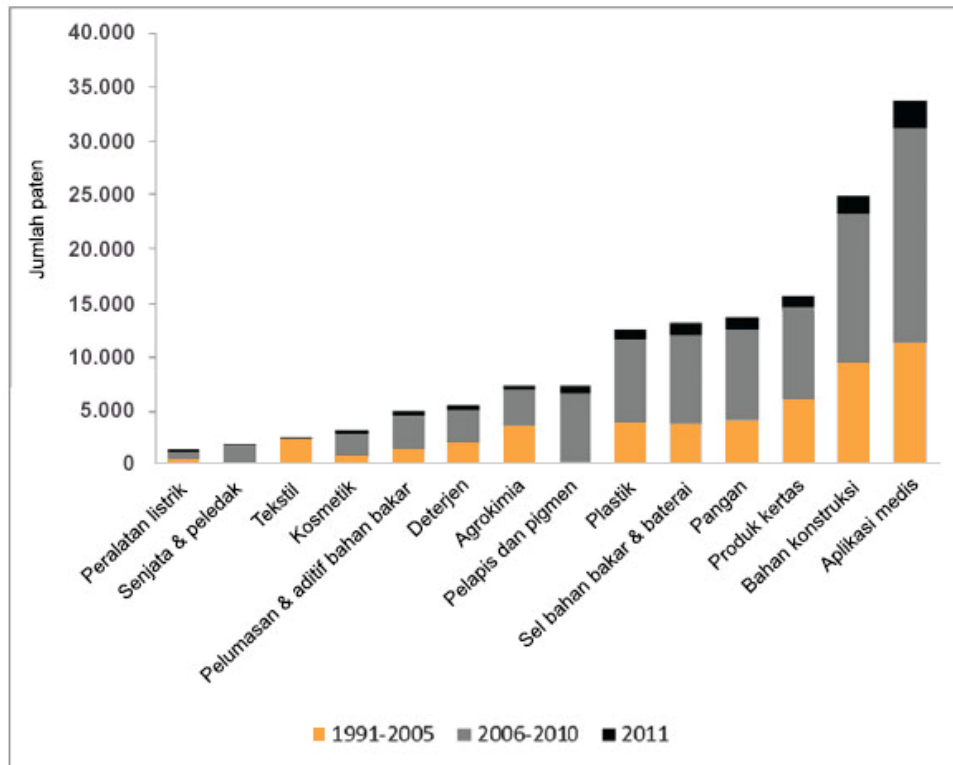
Pada dasarnya, teknologi nano merupakan ilmu interdisiplin dari ilmu fisika, kimia, biologi, ilmu pengetahuan bahan, dan keteknikan yang di dalamnya tidak hanya berupa proses pengecilan ukuran bahan/materi (*top-down*) menjadi bentuk nanometer (10^{-9} m), namun juga menyusunnya (*assembly/bottom-up*) menjadi ukuran nano dengan struktur yang diatur sedemikian rupa sehingga produk yang dihasilkan memiliki sifat "unik" yang disesuaikan dengan tujuan sifat produk yang diinginkan (NNI

[tanpa tahun]). Menurut Duncan (2011), teknologi nano meliputi karakterisasi, fabrikasi, dan/atau manipulasi struktur, perangkat atau bahan yang memiliki setidaknya satu dimensi (atau mengandung komponen dengan setidaknya satu dimensi) yang kira-kira panjangnya 1–100 nm. Hal yang kritis adalah ketika ukuran partikel berkurang di bawah ambang batas ini, materi yang dihasilkan menunjukkan sifa-sifat fisik dan kimia yang secara nyata berbeda dari sifat bahan berskala makro yang terdiri dari substansi yang sama. Perbedaan itu meliputi kekuatan fisik, reaksi kimia, daya rambat listrik, daya magnetis, dan daya optikal (Rhodes 2014). Salah satu contoh penerapan teknologi nano adalah *carbon nanotube* (CNT) yang sangat ringan dan memiliki kekuatan 100 kali lebih kuat dari baja.

Hasil akhir riset bidang material nano adalah mengubah teknologi yang ada sekarang yang pada umumnya berbasis material berskala mikrometer menjadi teknologi berbasis material berskala nanometer. Hal ini didasari keyakinan bahwa material berukuran nanometer memiliki sifat fisika dan kimia yang lebih unggul dari material ukuran besar (*bulk*). Sifat tersebut dapat diubah melalui pengontrolan ukuran material, pengaturan komposisi kimiawi, modifikasi permukaan, dan pengontrolan interaksi antarpartikel. Teknologi nano memiliki wilayah dan dampak penerapan yang luas mulai dari bidang material maju, transportasi, ruang angkasa, kedokteran, kosmetik, elektronik, pertanian dan pengolahan pangan, lingkungan, IT, sampai energi.

Dua konsep yang berlaku dalam teknologi nano antara lain adalah perakitan posisi (*positional assembly*) dan replikasi diri (*self-replication*) (WhatIs.com 2011). Perakitan posisi berkaitan dengan mekanika potongan molekul yang bergerak ke tempat relasional yang tepat dan menjaga potongan-potongan molekul tersebut tetap di sana, sedangkan replikasi diri berkaitan dengan masalah menggandakan pengaturan posisi secara otomatis, baik dalam membangun perangkat manufaktur maupun dalam membangun produk yang diproduksi.

Secara umum, sintesis partikel nano terbagi dalam dua pendekatan (Wardana 2014). Pendekatan pertama adalah memecah partikel berukuran besar menjadi partikel berukuran nanometer. Pendekatan ini disebut pendekatan *top-down*. Pendekatan kedua adalah memulai dari atom-atom atau molekul-molekul yang membentuk partikel berukuran nanometer yang dikehendaki. Pendekatan ini disebut *bottom-up*. Kedua pendekatan tersebut berperan sangat penting dalam teknologi nano.



Sumber: Pérez-Esteve (2013)

Gambar 1. Jumlah paten terkait teknologi nano di berbagai bidang menurut klasifikasi *Ludlow's Nanotechnology Families*

Keunggulan pendekatan *top-down* adalah kemampuannya untuk menghasilkan sifat/kesatuan pada suatu lokasi yang tepat. Akan tetapi, pendekatan tersebut mempunyai kekurangan/kelemahan, yaitu menyebabkan terjadinya tekanan internal, di samping kerusakan permukaan dan kontaminasi. Sebaliknya, pendekatan *bottom-up* menjanjikan kesempatan yang lebih baik untuk memperoleh struktur nano dengan cacat lebih sedikit dan komposisi kimia yang lebih homogen.

PENERAPAN TEKNOLOGI NANO DALAM PERTANIAN DAN PENGOLAHAN PANGAN DI DUNIA

Perkembangan Penelitian dan Penerapan Teknologi Nano di Dunia

Pada abad 21 telah terjadi revolusi dunia ilmiah dan industri sebagai konsekuensi dari perkembangan suatu disiplin baru, yaitu teknologi nano, di mana bahan/material didesain, difabrikasi, diukur dan/atau dimanipulasi pada skala nanometer. Pada ukuran nanometer, bahan/material akan memiliki/menghasilkan sifat fisik dan kimia, seperti bentuk, luas, dan sifat permukaan, komposisi

dan aktivitas yang berbeda dibandingkan bahan asalnya (Pérez-Esteve 2013). Oleh karena itu, penelitian dan penerapan/pemanfaatan teknologi nano berkembang pesat di berbagai bidang, seperti kesehatan, tekstil, kosmetika, energi, pertanian, pangan, lingkungan, bahan konstruksi, elektronika, kertas, informatika, dan transportasi.

Pesatnya perkembangan penelitian dan aplikasi teknologi nano tersebut dapat dilihat dari sejumlah aspek, seperti anggaran riset, jumlah paten, jumlah produk komersial, nilai ekonomi pasar, dan jumlah tenaga kerja yang terlibat (Irawan et al. 2014). Sebagai contoh, anggaran the American National Nanotechnology Initiative telah meningkat hampir empat kali lipat dari US\$464 juta pada tahun 2001 menjadi sekitar US\$2,1 miliar pada tahun 2012 (Meyer-Plath dan Schweinberger 2014). Menurut Roco et al. (2010), pada tahun 2008 teknologi nano menghabiskan anggaran lebih dari US\$15 miliar pada penelitian dan pengembangan di seluruh dunia (publik dan swasta) dan mempekerjakan lebih dari 400 ribu peneliti di seluruh dunia.

Pada sisi ekonomi, penelitian dan aplikasi teknologi nano diperkirakan akan membuka pasar industri bernilai multimiliar dolar dan

diperkirakan mencapai US\$1 triliun pada tahun 2015 dengan serapan 2 juta pekerja (Chaudhry et al. 2008; Silva et al. 2012). Sementara itu, Roco et al. (2010) mengungkapkan bahwa teknologi nano diproyeksikan berdampak minimal US\$3 triliun terhadap seluruh ekonomi global pada tahun 2020, dan industri teknologi nano di seluruh dunia mungkin memerlukan setidaknya 6 juta pekerja untuk mendukungnya pada akhir dekade ini.

Hasil studi Pérez-Esteve (2013) menunjukkan bahwa dalam kurun waktu 20 tahun (1991–2011) sudah terdapat lebih dari 100 ribu paten yang berkaitan dengan teknologi nano di 14 bidang berbeda, termasuk pertanian dan pengolahan pangan. Jumlah paten teknologi nano tertinggi terdapat di bidang medis yang mencapai sekitar 34 ribu paten, sementara jumlah paten teknologi nano di bidang pangan hanya sekitar 13 ribu dan agrokimia hanya sekitar 7 ribu paten (Gambar 1).

Walaupun penerapan teknologi nano tergolong baru, jumlah produk komersial berbasis teknologi nano yang beredar di pasaran dunia sudah cukup banyak. Berdasarkan data *Consumer Products Inventory* (Vance et al. 2015), pada awal 2015 di dunia diperkirakan terdapat 1.814 produk teknologi nano komersial, yang berasal dari 622 perusahaan yang berlokasi di 32 negara. Jumlah tersebut meningkat 30 kali lipat dari tahun 2005 yang hanya tercatat 54 produk. Namun, hal tersebut tidak merepresentasikan secara penuh pertumbuhan pasar produk ini karena metodologi yang digunakan berevolusi dari waktu ke waktu. Demikian pula, jumlah tersebut

boleh jadi lebih rendah dari yang sesungguhnya karena belum tentu semuanya dipublikasikan dan diperkirakan ke depan jumlahnya akan semakin banyak.

Data terbaru yang dirilis *Nanotechnology Products Database* menunjukkan bahwa pada bulan Januari 2016 jumlah produk nano yang dipasarkan di pasar dunia mencapai 6.415 produk, yang dihasilkan 913 perusahaan dari 49 negara (Statnano.com 2016). Produk teknologi nano terbanyak dihasilkan oleh perusahaan-perusahaan di negara Amerika Serikat, jauh melampaui produk-produk teknologi nano yang dihasilkan negara-negara lainnya. Sementara itu, belum tercatat produk teknologi nano yang dihasilkan oleh perusahaan di Indonesia. Produk teknologi nano terbanyak berupa sensor nano. Tabel 1 menunjukkan bahwa produk-produk teknologi nano di bidang pertanian dan pengolahan pangan relatif rendah dibandingkan produk-produk teknologi nano di bidang-bidang lain, terutama di bidang elektronik dan minyak bumi (*petroleum*).

Perkembangan ilmu dan teknologi nano yang pesat merupakan tantangan dan peluang bagi suatu negara untuk ikut berperan atau berkontribusi dalam pasar dunia atau hanya akan menjadi tujuan pasar. Salamanca-Buentello et al. (2005) telah melakukan survei terhadap 63 pakar teknologi nano dunia untuk mengidentifikasi dan menetapkan urutan prioritas bidang penerapan teknologi nano bagi negara berkembang dalam 10 tahun ke depan. Studi mencakup enam bidang (pengelolaan air, pertanian, nutrisi, kesehatan, energi, lingkungan) dan dilakukan menggunakan modifikasi

Tabel 1. Jumlah produk teknologi nano, perusahaan, dan negaranya, 2016

No.	Bidang	Produk	Perusahaan	Negara
1.	Pertanian	208	28	13
2.	Otomotif	487	74	23
3.	Konstruksi	682	155	28
4.	Kosmetik	340	91	19
5.	Elektronik	1.889	53	13
6.	Lingkungan	487	148	28
7.	Pangan	340	91	19
8.	Peralatan rumah tangga	197	45	14
9.	Obat-obatan	365	62	15
10.	Minyak bumi	2.112	51	16
11.	<i>Sports & fitness</i>	387	21	12
12.	Tekstil	499	156	27
Jumlah		6.415	913	49

Sumber: Statnano.com (2016)

Tabel 2. Sepuluh prioritas penerapan teknologi nano untuk negara berkembang, 2005

Urutan prioritas	Bidang penerapan	Skor
1	Penyimpanan, produksi, dan konversi energi	766
2	Peningkatan produktivitas pertanian	706
3	Pemurnian air	682
4	Diagnosis dan <i>screening</i> penyakit (manusia)	606
5	Sistem penghantar 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

Sumber: Salamanca-Buentello et al. (2005)

metode Delphi, di mana urutan prioritas dinilai berdasarkan enam kriteria, yaitu dampak (*impact*), beban (*burden*), kesesuaian (*appropriateness*), kelayakan (*feasibility*), senjang pengetahuan (*knowledge gap*), dan manfaat tidak langsung (*indirect benefits*). Berdasarkan hasil studi tersebut empat bidang terkait sektor pertanian dan pengolahan pangan termasuk dalam sepuluh urutan teratas prioritas penerapan teknologi nano, yaitu peningkatan produktivitas pertanian (prioritas 2), penghantaran obat herbal (prioritas 5), pengolahan dan penyimpanan pangan (prioritas 6), serta deteksi dan pengendalian hama beserta vektornya (prioritas 10), seperti terlihat pada Tabel 2. Hasil studi tersebut sejalan dengan pendapat Kelompok Kerja FAO/WHO (2009) yang menyimpulkan bahwa teknologi nano sangat potensial untuk pengembangan produk inovatif pertanian, perlakuan air, produksi pangan, pengolahan, pengawetan, dan pengemasan, sehingga berpotensi meningkatkan nilai tambah dan daya saing produk serta keuntungan bagi petani, industri pangan, dan konsumen.

Duncan (2011) memaparkan bahwa ilmuwan dan *stakeholder* industri telah mengidentifikasi potensi penggunaan teknologi nano dalam setiap penghantar vaksin, deteksi hewan dan tanaman patogen, rekayasa genetika, pengolahan pangan (misalnya, enkapsulasi penguat flavor atau bau, perbaikan tekstur atau peningkatan kualitas pangan, zat gelasi atau pengental yang baru), kemasan pangan (misalnya, patogen, sensor gas, perangkat antipemalsuan, proteksi ultraviolet, dan lapisan polimer yang lebih kedap dan lebih kuat), hingga suplemen gizi (misalnya, nutrasetikal [pangan yang mengandung aditif pemberi-kesehatan dan mempunyai manfaat pengobatan] dengan

stabilitas dan bioavailabilitas lebih tinggi). Akan tetapi, area paling aktif dari penelitian dan pengembangan ilmu nano pangan adalah kemasan. Pasar kemasan nano (*nano-enabled*) makanan dan minuman dunia adalah sebesar US\$6,5 miliar pada tahun 2013 dan diperkirakan akan tumbuh 12,70% per tahun antara 2014 dan 2020 dan mencapai US\$15 miliar pada akhir tahun 2020 (Persistence 2016). Hal ini mungkin terkait dengan hasil studi yang menunjukkan bahwa masyarakat lebih menerima penerapan teknologi nano pada "selain pangan" dibanding penerapan teknologi nano secara langsung pada pangan (Siegrist 2007, 2008; MARS 2011). Hal ini disebabkan karena sampai saat ini risiko penerapan teknologi nano terhadap pangan masih belum banyak diketahui.

Penerapan Teknologi Nano di Bidang Pertanian dan Pengolahan Pangan di Dunia

Penerapan Teknologi Nano di Bidang Pertanian

Upaya penerapan teknologi nano di bidang pertanian dimulai seiring dengan tumbuhnya kesadaran bahwa teknologi pertanian konvensional tidak dapat meningkatkan produktivitas lebih lanjut ataupun memulihkan kerusakan ekosistem karena efek jangka panjang pertanian revolusi hijau (Mukhopadhyay 2014). Menurut Lu dan Bowles (2013), teknologi nano merupakan solusi yang mempunyai potensi besar dalam rantai pasok pertanian. Teknologi nano telah diterapkan pada manajemen rantai pasok yang terkait dengan kualitas, penanganan, pengemasan, dan keamanan pangan. Dalam bidang rantai pasok pertanian, teknologi nano membawa manfaat yang potensial bagi petani, industri pangan, dan konsumen, melalui produksi,

pengolahan, pengawetan, dan pengemasan (FAO/WHO 2010).

Pada bidang pertanian, teknologi nano digunakan untuk meningkatkan produktivitas tanaman, kualitas produk, penerimaan konsumen; dan efisiensi penggunaan sumber daya. Dengan demikian, penerapan teknologi nano akan membantu mengurangi biaya pertanian, meningkatkan produktivitas, meningkatkan nilai produksi, dan meningkatkan pendapatan pertanian, di samping mendukung konservasi dan meningkatkan kualitas sumber daya alam dalam sistem produksi pertanian. Pérez-de-Luque dan Hermosín (2013) membagi penerapan teknologi nano dalam bidang pertanian menjadi tiga: (1) formulasi nano agrokimia untuk penerapan pestisida dan pupuk pada tanaman dengan menggunakan tiga tipe material nano, yaitu polimer organik, senyawa inorganik, dan material hibrid (komposit nano); (2) potensi pengembangan perangkat nano (*nanodevices*) untuk manipulasi genetik tanaman; dan (3) penerapan sensor nano dalam produksi tanaman untuk identifikasi penyakit dan residu agrokimia.

Rhodes (2014) mengemukakan bahwa teknologi nano diterapkan dalam sistem pertanian presisi (*precision farming*) untuk memaksimalkan output/hasil tanaman, seraya meminimalkan input (benih, pupuk, pestisida, herbisida, air, dll.). Sistem pertanian presisi terkait dengan sistem penghantaran pintar (*smart delivery system*), di mana bahan kimia seperti pupuk, pestisida, dan herbisida dihantarkan secara tertarget dan terkontrol. Selain itu, teknologi nano juga diterapkan dalam (1) identifikasi sistem untuk melacak bahan/hasil ternak dan tanaman dari bahan asal hingga konsumsi; (2) sistem terintegrasi untuk penginderaan, monitoring, dan intervensi respons aktif untuk produksi tanaman dan ternak; (3) sistem lapang pintar (*smart field systems*) untuk mendeteksi, mengetahui lokasi, melaporkan, dan pemberian air secara langsung; dan (4) pengembangan tanaman yang resisten terhadap kekeringan dan toleran terhadap salinitas dan kelembaban.

Terkait dengan penggunaan pestisida, fungisida, dan herbisida, Mousavi dan Rezael (2011) menyebutkan bahwa teknologi nano membantu mengurangi polusi lingkungan dengan menghasilkan pestisida dan pupuk kimia menggunakan partikel nano dan kapsul nano yang mempunyai kemampuan untuk mengendalikan dan menunda penghantaran, absorpsi, serta lebih efektif dan ramah lingkungan; selain juga produksi kristal nano untuk meningkatkan efisiensi pestisida untuk

penerapan pestisida dengan dosis yang lebih rendah. Lebih lanjut, disebutkan pula bahwa teknologi nano mempunyai potensi dan kemampuan dalam memberikan solusi untuk menyediakan bahan pangan, perawatan veteriner, serta obat dan vaksin untuk ternak. Dalam perawatan veteriner, partikel nano perak merupakan antiseptik yang kuat (antibakteri dan antimikroba), dan digunakan secara luas sebagai desinfektan dalam peternakan hewan besar/kecil maupun unggas.

Holden et al. (2012) juga melaporkan potensi penerapan teknologi nano dalam penanganan limbah pertanian, khususnya dalam industri kapas. Sebagian selulosa atau serat yang timbul ketika kapas diproses menjadi kain yang biasanya dibuang sebagai limbah atau hanya diolah menjadi produk bernilai rendah, ketika diproses dengan menggunakan metode *electrospinning*, akan menghasilkan serat kapas berdiameter 100 nm, yang mampu menyerap pupuk atau pestisida secara sangat efektif, sehingga memungkinkan penerapannya dalam pertanian.

Penerapan Teknologi Nano dalam Pengolahan Pangan

Di bidang pengolahan pangan, teknologi nano paling banyak dan paling cepat perkembangannya untuk kemasan pangan. Dalam hal ini penerapan teknologi nano memungkinkan perbaikan sifat fisik dan mekanis kemasan, di antaranya *gas barrier*, daya serap air, kekuatan, ringan, dan dekomposisi, serta pengembangan kemasan aktif dan pintar yang dilengkapi antimikroba nano, sensor nano, dan *nano-barcodes* yang dapat mempertahankan mutu (di antaranya kesegaran) dan keamanan produk pangan, membantu keterlacakan, dan monitoring kondisi produk selama distribusi dan penyimpanan, serta mempermudah deteksi cemaran dan kerusakan sebelum dikonsumsi (Arora dan Padua 2010; Chaudhry dan Castle 2011; de Azeredo et al. 2011; Mousavi dan Rezael 2011; Pérez-Esteve et al. 2013; Wardana 2014). Oleh karenanya, kemasan nano dapat meningkatkan daya tahan produk (*shelf life*).

Penggabungan material nano ke dalam polimer plastik telah mendorong berkembangnya bahan-bahan kemasan pangan inovatif yang secara umum dapat digolongkan ke dalam empat kategori, yaitu (1) komposit polimer nano dengan kandungan partikel nano hingga 5% dan menghasilkan karakteristik yang lebih baik dalam hal fleksibilitas, daya tahan, stabilitas terhadap suhu, dan atau kelembaban, serta perpindahan/migrasi gas; (2) kemasan "aktif"

berbahan polimer yang mengandung material nano dan bersifat antimikroba; (3) *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 (4) kemasan "pintar" yang di dalamnya terdapat (bio)sensor nano untuk memonitor dan melaporkan kondisi pangan dan atau kondisi atmosfer di dalam kemasan dan *nano-barcode*s untuk mengetahui keautentikan/ketertelusuran pangan (Chaudhry et al. 2008; Chaudhry dan Castle 2011; Lu dan Bowles 2013). Menurut Lu dan Bowles (2013), dari keempat kategori tersebut, penelitian dan penerapan komposit polimer nano, kemasan antimikroba, dan *nanocoated film* lebih maju dibanding penelitian dan penerapan teknologi nano dalam kemasan pangan lainnya.

Wardana (2014) menyebutkan bahwa tren kemasan masa depan adalah *bio-degradable* (dapat terurai secara biologis) dan memiliki kemampuan antimikroba. Lebih lanjut disebutkan pula bahwa kemasan nano yang dapat diterapkan untuk produk-produk hortikultura di antaranya adalah *nanoedible coating*, *nanoedible film*, anti-mikroba, dan lain-lain. *Edible coating* adalah lapisan tipis yang dapat dikonsumsi yang digunakan pada makanan dengan cara pembungkusan, pencelupan, penyikatan, atau penyemprotan untuk memberikan penahan yang selektif terhadap perpindahan gas, uap air, dan bahan terlarut serta perlindungan terhadap kerusakan mekanis. Adapun *edible film* adalah suatu lapisan tipis yang dibuat dari bahan yang dapat dimakan, dibentuk untuk melapisi makanan atau dilekatkan di antara komponen makanan (*film*) yang berfungsi sebagai penghalang terhadap perpindahan massa (misalnya kelembaban, oksigen, cahaya, lipid, zat terlarut) dan atau sebagai pembawa aditif serta untuk meningkatkan penanganan suatu makanan. Menurut Predicala (2009) *nano-coating* dapat digunakan untuk melapisi produk hortikultura, khususnya buah, secara sempurna sehingga mencegah susut berat dan buah berkerut.

Kedua jenis kemasan *biodegradable* tersebut (*nanoedible coating* dan *nanoedible film*) dapat dimodifikasi dengan penambahan zat antimikroba berbasis nano seperti ZnO (seng oksida) nano, TiO₂ (titanium dioksida) nano, dan Ag (perak) nano. Akan tetapi, untuk saat ini penelitian-penelitian berbasis nanopartikel lebih mengarah ke ZnO nano, karena selain perak dan TiO₂ nano efek kesehatannya masih diperdebatkan, ZnO nano juga sekaligus berfungsi sebagai suplemen Zinc. Hal ini

menjadi penting karena sebagian besar masyarakat Indonesia saat ini banyak yang mengalami defisiensi mineral tersebut.

Plantic Technologies Ltd., Altona, Australia telah memproduksi dan menjual kemasan bioplastik yang dapat terdegradasi secara biologis (*biodegradable*) dan sepenuhnya dapat dibuat menjadi kompos (*compostable*) (Taylor dan Thyer 2006). Kemasan semacam ini dibuat dari pati jagung organik menggunakan teknologi nano (Neethirajan dan Jayas 2011). Bionanokomposit *biodegradable* yang dibuat dari biopolimer alami seperti pati dan protein mempunyai keunggulan sebagai bahan kemasan pangan karena karakteristik organoleptiknya, seperti penampilan, bau, dan rasa yang baik (Zhao et al. 2008). Keuntungan unik dari kemasan biopolimer alam termasuk kemampuan mereka untuk bertindak sebagai pembawa (*carriers*) untuk zat yang aktif secara fungsional dan menyediakan suplemen gizi (Rhim dan Ng 2007).

Dalam pengolahan pangan juga telah dikembangkan kapsul nano dan partikel nano yang ditambahkan pada pangan sehingga zat-zat gizi diserap secara lebih efektif. Rhodes (2014) melaporkan beberapa produk teknologi nano yang diterapkan dalam pengolahan pangan dan telah diproduksi secara komersial. Sebagai contoh, di bagian barat Australia, kapsul nano berisi minyak ikan tuna (sumber asam lemak omega-3) ditambahkan pada roti. Dengan menggunakan kapsul nano, minyak ikan tuna tersebut dilepaskan hanya ketika sudah berada di dalam lambung, sehingga rasa minyak ikan, yang bagi sebagian orang tidak menyenangkan, dapat dihindari.

Produk teknologi nano lain, dalam bentuk *nano-sized self-assembled liquid structures* (NSSL), memungkinkan zat-zat gizi dan nutrasetikal, yang meliputi likopen, betakaroten, lutein, fitosterol, CoQ10, dan DHA/EPA, untuk memasuki aliran darah dari usus halus dengan lebih mudah. Produk yang dipasarkan dengan nama Nutralease tersebut dipasarkan Shemen Industries untuk menghantarkan minyak Canola Activa yang diklaim dapat mereduksi kolesterol tubuh sebesar 14%.

Partikel nano lain yang disebut nanokelat telah dikembangkan oleh Bidelivery Sciences International untuk meningkatkan penghantaran nutrisi seperti vitamin, likopen, dan asam lemak omega, tanpa memengaruhi warna dan rasa makanan. Selain itu, produk baru bernama NanoCeuticals, yang merupakan koloid (atau emulsi) partikel-partikel berdiameter kurang dari 5 nm telah diproduksi oleh Royal Body Care,

yang mengklaim bahwa produk tersebut akan menangkap radikal bebas, meningkatkan hidrasi, dan menyeimbangkan pH tubuh.

Selain produk-produk teknologi nano tersebut, juga telah diproduksi keramik nano yang dipasarkan oleh Oilfresh Corporation (Amerika Serikat), yang dapat mencegah oksidasi dan aglomerasi lemak dalam penggorengan (*deep fat fryers*), sehingga memperpanjang masa pakai (*life span*) minyak. Sebagai hasilnya, volume minyak yang digunakan di restoran dan toko cepat saji berkurang separuhnya; dan karena minyak lebih cepat menjadi panas, energi yang digunakan untuk memasak juga bisa dihemat (Joseph dan Morrison 2006).

STATUS PENERAPAN TEKNOLOGI NANO DALAM PERTANIAN DAN PENGOLAHAN PANGAN DI INDONESIA

Perkembangan Penelitian dan Penerapan Teknologi Nano di Indonesia

Perkembangan teknologi nano di Indonesia baru dimulai sejak tahun 2000-an dengan riset yang lebih banyak terfokus pada material maju terutama untuk penerapan pada elektronik (*devices*), sedangkan riset untuk produk pertanian dan pengolahan pangan masih sangat terbatas. Walaupun demikian, hingga saat ini perkembangan teknologi nano di Indonesia bisa dikatakan masih dalam tahap pengembangan dan penerapannya masih belum sebanyak negara-negara maju. Kondisi ini tidak jauh berbeda dengan negara-negara ASEAN lain pada umumnya.

Rochman (2012) mengemukakan bahwa penelitian mengenai teknologi nano di Indonesia telah dilakukan oleh beberapa lembaga penelitian seperti Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), Badan Tenaga Nuklir Nasional (Batan), Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (Lapan), Muria Research Center (MRC) Indonesia, dan lain-lain; serta oleh universitas seperti Institut Teknologi Bandung (ITB), Universitas Indonesia (UI), Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Universitas Padjadjaran (Unpad), Universitas Gadjah Mada (UGM), dan Badan Litbang Pertanian. Akan tetapi, pengembangan teknologi nano di Indonesia masih belum terpadu, baik dalam hal perencanaan, pelaksanaan, topik kajian, maupun koordinasinya. Perguruan tinggi dan lembaga penelitian seperti BPPT, LIPI, dan Badan Litbang Pertanian menjalankan pene-

litannya masing-masing tanpa sinergi yang jelas.

Berbagai penelitian ilmu dan teknologi nano yang dilakukan lembaga-lembaga penelitian seperti LIPI, Batan, BPPT, Lapan, dan lain-lain pada umumnya terfokus pada bidang selain pertanian dan pengolahan pangan. Sebagai contoh, LIPI telah berhasil mengembangkan alat pemecah partikel yang bisa mempercepat penguraian partikel sehingga menjadi nano. Jika biasanya peneliti membutuhkan waktu dua sampai tiga pekan untuk penguraian, dengan alat tersebut, peneliti hanya butuh waktu dua hari. Tidak hanya itu, harga jual teknologi tersebut pun lebih murah ketimbang di negara lain. LIPI menggunakan alat tersebut dalam bidang biofarmasi, yaitu untuk pengobatan kanker, dan pembuatan pigmen tinta.

Beberapa penelitian teknologi nano yang dilakukan Batan meliputi bidang bahan, farmasi, lingkungan, dan energi. Di bidang energi, Batan telah berhasil menguasai teknologi baterai padat litium yang merupakan salah satu alat penyimpan energi tercanggih saat ini. Berbagai penelitian teknologi nano juga telah dilakukan BPPT dengan fokus penelitian di antaranya produk farmasi, kesehatan, dan energi. BPPT telah berhasil mengembangkan sel bahan bakar (*fuel cell*) berbasis teknologi nano. Sementara itu, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian (Balitbangtan) telah melakukan berbagai penelitian dan pengembangan teknologi nano di bidang pertanian dan pengolahan pangan, yang akan diuraikan secara khusus pada subbahasan selanjutnya.

Institut Teknologi Bandung (ITB) telah memiliki Pusat Penelitian Nanosains dan Nanoteknologi yang merupakan salah satu pusat unggulan iptek yang terdapat di ITB. Fokus penelitian ilmu dan teknologi nano di ITB selama sepuluh tahun ini (2010–2020) adalah di bidang teknologi nano dan kuantum yang merupakan iptek masa depan. Penelitian di bidang sains dan teknologi nano di ITS tersebut merupakan penelitian dasar, bukan berupa penelitian aplikasi, dan juga merupakan penelitian antardisiplin (LPPM-ITB c2016). Saat ini sedang dibangun Center for Advanced Sciences (CAS) yang akan diresmikan pada bulan Agustus 2016. Institusi tersebut ditujukan untuk pengembangan teknologi nano dan fasilitas penelitian teknologi nano di gedung CAS terhitung paling lengkap di Indonesia, mulai menyiapkan sampel hingga penelitian objeknya.

Hingga saat ini puluhan hasil penelitian di bidang sains dan teknologi nano telah dihasilkan

ITB, dengan potensi penerapan di antaranya terfokus di bidang kedokteran/kesehatan, farmasi, energi, elektronik, serta berbagai industri lainnya. Akan tetapi, hasil penelusuran literatur sejauh ini menunjukkan bahwa hanya sedikit penelitian yang dilakukan ITB yang mempunyai potensi penerapan di bidang pertanian dan pengolahan pangan, di antaranya seperti yang dilakukan oleh Agusta et al. (2013), yang hasil penelitiannya dapat diterapkan pada teknologi pengontrolan pematangan buah-buahan.

Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) telah memiliki Pusat Studi Material dan Nanoteknologi di mana penelitian di laboratoriumnya terfokus pada empat bidang, yaitu energi, pertanian dan pengolahan pangan, biomedis, serta kesehatan. Produk yang dihasilkan dalam skala laboratorium, yaitu baterai litium, baterai metal, dan yang masih dalam pengembangan material antiradar yang digunakan untuk kapal selam, serta berbagai bentuk katalis. Selain itu, juga dikembangkan *drug delivery sys*, yaitu obat yang dikeluarkan secara perlahan di dalam tubuh sehingga tidak perlu lagi minum obat berkali-kali dan membuat obat lebih tahan lama. Jurusan terbanyak yang bekerja sama melakukan riset di ITS adalah Jurusan Teknik Kimia, Material dan Metalurgi, Fisika, Teknik Fisika, dan Kimia (ITS 2016).

Universitas Padjadjaran (Unpad) memiliki Pusat Riset Institusi Nanoteknologi dan Grafen. Penelitian teknologi nano yang dilakukan difokuskan pada pemanfaatan teknologi nano untuk mengatasi masalah krisis energi. Hal tersebut didasari pemikiran bahwa teknologi nano dapat diterapkan pada seluruh sektor rantai super energi, antara lain sumber energi, konversi energi, distribusi energi, penyimpanan energi, dan pemanfaatan energi. Pemanfaatan teknologi nano pada sektor energi cukup banyak, di antaranya superkonduktor untuk motor, *dye solar cells*, dan *polymer solar cells*. Selain itu, dengan menggunakan teknologi nano dapat meningkatkan atau membuat kinerja sebuah alat menjadi lebih optimal sehingga dapat dilakukan efisiensi energi. Salah satu penelitian unggulannya adalah grafen yang dikembangkan dari grafit, salah satu mineral alam di Indonesia, yang dapat diterapkan ke dalam berbagai bidang energi, seperti baterai fosfor dan lampu hemat energi. Dalam mengembangkan riset ini, pihaknya bekerja sama dengan beberapa industri di Indonesia, di antaranya PT Grafindo Nusantara.

Berbeda dengan ITB, ITS, dan Unpad, UGM tidak memiliki pusat studi khusus yang

menangani sains atau teknologi nano. Namun demikian, UGM telah melakukan berbagai studi terkait sains dan teknologi nano. Pusat Studi Energi UGM, misalnya, saat ini tengah secara intensif mempelajari zeolit, hidrotalsit, dan tanah liat (*clay*), yang merupakan material nano yang dapat dimanfaatkan dalam bidang energi. Selain itu, juga tengah dikembangkan masker antipolusi asap dengan membran nano yang dapat mencegah partikel asap masuk ke paru-paru; juga pengembangan bioteknologi nano dan penerapan teknologi nano di bidang farmasi dan kesehatan.

Sama halnya dengan UGM, Institut Pertanian Bogor (IPB) juga tidak memiliki pusat studi khusus yang menangani sains dan teknologi nano. Beberapa penelitian terkait teknologi nano merupakan hasil penelitian beberapa fakultas atau program studi tertentu di IPB, di antaranya generator nano piezoelektrik yang dihasilkan oleh tiga mahasiswa Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (MIPA). Generator nano piezoelektrik merupakan sumber energi mandiri bagi molekul nano.

Data mengenai produk-produk teknologi nano yang telah diproduksi secara komersial di Indonesia beserta perusahaan produsennya sulit diperoleh informasinya. Akan tetapi, Rochman (PI LIPI 2014) menyebutkan bahwa pada tahun 2008, secara masif kementerian-kementerian melakukan survei industri-industri nasional di Indonesia yang sudah menggunakan teknologi nano. Hasil survei tersebut mengungkapkan bahwa 35% industri di Indonesia sudah menerapkan teknologi nano. Mengingat pesatnya perkembangan teknologi nano, diperkirakan jumlah industri yang sudah menerapkan teknologi nano di Indonesia semakin meningkat.

Penelitian dan Penerapan Teknologi Nano di Bidang Pertanian dan Pengolahan Pangan di Indonesia

Rochman (2011) telah mengidentifikasi sepuluh agroindustri yang berpotensi menerapkan teknologi nano di Indonesia dengan menggunakan analisis SWOT (*strengths, weaknesses, opportunities, and threats*). Kesepuluh agroindustri tersebut adalah (1) pembibitan/benih tanaman; (2) pembibitan hewan; (3) industri pupuk; (4) industri pestisida, herbisida, fungisida; (5) alat dan mesin pertanian (alsintan); (6) pakan ternak; (7) obat hewan; (8) pangan; (9) obat herbal; dan (10) kemasan pangan (Tabel 3).

Tabel 3. Potensi penerapan teknologi nano pada sepuluh agroindustri di Indonesia

Agroindustri	Contoh penerapan teknologi nano
Pembibitan/benih tanaman	<ul style="list-style-type: none"> ○ Penggunaan <i>carbon nanotube</i> untuk mempercepat perkecambahan dan pertumbuhan bibit tanaman ○ Penggunaan nano TiO₂ (<i>titanium oxide</i>) untuk meningkatkan laju fotosintesis dan indeks vigor ○ Penggunaan teknologi nanoenkapsulasi untuk memproduksi benih pintar (<i>smart seeds</i>) yang dapat beradaptasi dengan lingkungan ekstrem ○ Rekayasa genetik untuk memperoleh bibit tanaman unggul
Pembibitan hewan	<ul style="list-style-type: none"> ○ Penggunaan <i>nanofluidics</i> untuk mempermudah proses fertilisasi melalui proses seleksi sperma dan telur ○ Rekayasa genetik untuk memperoleh bibit hewan unggul
Industri pupuk	<ul style="list-style-type: none"> ○ Penggunaan teknologi nanoenkapsulasi untuk mengendalikan pelepasan hara pupuk sehingga meningkatkan efisiensi ○ Penggunaan <i>carbon nanotube</i> untuk mempercepat pertumbuhan tanaman
Industri pestisida, herbisida, fungisida	<ul style="list-style-type: none"> ○ Pengembangan pestisida, herbisida, fungisida dalam bentuk emulsi nano dan kapsul nano untuk meningkatkan kelarutan, stabilitas, dan efektivitas
Alat dan mesin pertanian (alsintan)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Pengembangan sensor nano untuk (i) deteksi mutu benih, (ii) memantau kondisi tanah dan pertumbuhan tanaman, (iii) memantau mutu hasil panen, (iv) deteksi kontaminan dan masa kedaluwarsa produk pertanian ○ Pengembangan alsintan berbahan material maju berbasis nano untuk meningkatkan umur dan kemudahan pemakaian ○ Pengembangan <i>dye-sensitized nanosolar cells</i> pada alsintan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan energi
Pakan	<ul style="list-style-type: none"> ○ Penggunaan partikel besi nano untuk meningkatkan laju pertumbuhan ternak ○ Penggunaan teknologi nanoenkapsulasi untuk meningkatkan efisiensi penghantaran nutrisi pakan ○ Penggunaan partikel nano untuk regenerasi sel ternak dan mengikat patogen-patogen berbahaya bagi manusia
Obat hewan	<ul style="list-style-type: none"> ○ Pengembangan sistem penghantar obat hewan berbasis nano (<i>nano-drug delivery systems</i>) untuk meningkatkan solubilitas, stabilitas, dan efektivitas bahan aktif obat hewan ○ Penggunaan selenium nano untuk membasmi virus pada ternak
Pangan	<ul style="list-style-type: none"> ○ Pengembangan biopreservatif nano untuk mempertahankan mutu produk pangan ○ Pengembangan produk emulsi nano dan kapsul nano untuk meningkatkan kelarutan, stabilitas, penyerapan dan aktivitas biologis zat gizi (fortifikan) dan senyawa aktif ○ Penggunaan partikel nano pada produk pangan untuk menghambat penyerapan lemak dan gula ○ Nanostrukturisasi pangan untuk memperpanjang rasa kenyang ○ Imobilisasi perisa, enzim atau pewarna alami dalam partikel nano untuk meningkatkan cita rasa, sifat fungsional, dan penampilan pangan
Obat herbal	<ul style="list-style-type: none"> ○ Pengembangan sistem penghantar obat herbal berbasis nano (<i>nano-drug delivery systems</i>) untuk meningkatkan kelarutan, stabilitas, penyerapan, dan aktivitas farmakologi bahan aktif
Kemasan pangan	<ul style="list-style-type: none"> ○ Penggunaan nanopartikel sebagai <i>filler</i> untuk memperbaiki sifat mekanis dan permeabilitas kemasan pangan ○ Penggunaan nanokapsul antimikroba pada kemasan pangan untuk mempertahankan mutu ○ Penggunaan sensor nano untuk deteksi kontaminan dan masa kedaluwarsa pangan

Sumber: Rochman (2011)

Posisi daya saing dan prioritas agroindustri nasional yang berpotensi menerapkan teknologi nano dianalisis menggunakan metode SWOT-AHP (*analytic hierarchy process*), sementara strategi penerapan teknologi nano untuk peningkatan daya saing global agroindustri nasional dianalisis menggunakan metode SWOT-ANP (*analytic network process*) dalam perspektif BOCR (*benefit, opportunity, cost, risk*). Disimpulkan bahwa penerapan teknologi nano dapat meningkatkan daya saing kesepuluh agroindustri Indonesia tersebut sehingga memiliki potensi yang sangat strategis. Hasil studi juga menunjukkan bahwa industri pangan dan bahan obat alam (herbal) menempati prioritas pertama untuk penerapan teknologi nano, disusul oleh industri pupuk, pestisida, dan kemasan.

Hasil studi tersebut dapat memberikan arah fokus prioritas penerapan teknologi nano untuk sektor pertanian dan pengolahan pangan, walaupun dalam pelaksanaannya dapat dilakukan penyesuaian-penyesuaian berdasarkan kebijakan prioritas komoditas yang telah ditetapkan oleh Kementerian Pertanian, kesiapan SDM, dan ketersediaan fasilitas. Penerapan teknologi nano untuk pertanian dan pengolahan pangan diharapkan dapat menciptakan pertanian yang presisi (*precision farming*) untuk menekan biaya produksi sekaligus meningkatkan hasil sehingga mendukung upaya pencapaian swasembada pangan. Selain itu, teknologi nano juga diharapkan meningkatkan pengembangan produk pertanian lokal yang fungsional bernilai tambah dan berdaya saing tinggi.

Satu hal yang penting untuk dicatat adalah keunggulan pupuk yang dihasilkan dengan teknologi nano jika dibandingkan pupuk konvensional. Salah satu keunggulannya adalah sifatnya yang *slow release*, yakni pelepasan partikel-partikel pupuk baru secara lambat dan terkendali sehingga berpotensi menambah efisiensi penyerapan hara. Dengan cara itu penyerapan dapat terjadi lebih sempurna dibandingkan dengan pupuk konvensional yang hanya mampu diserap 10–50% oleh tanaman, sedangkan sisanya luruh ke tanah dan bisa mencemari lingkungan. Pupuk nano yang menggunakan bahan alami untuk pelapisan dan perekatan granula pupuk yang bisa larut memberi keuntungan karena biaya pembuatannya lebih rendah dibanding pupuk yang bergantung pada bahan pelapis hasil manufaktur. Pupuk yang dilepas dengan lambat dan terkendali bisa pula memperbaiki tanah dengan cara mengurangi efek racun yang terkait dengan pemberian pupuk secara berlebihan.

Kelebihan lainnya, pupuk nano hanya perlu diberikan sekali selama masa tanam, sedangkan pupuk konvensional biasanya butuh 2–3 kali penerapan. Dengan demikian, biaya pemupukan bisa dihemat, demikian juga biaya tenaga kerja.

Teknologi nano pada industri pangan dapat diterapkan pada industri makanan, minuman, maupun kemasan. Rochman (2011) menunjukkan potensi penerapan teknologi nano pada bidang pengolahan pangan di Indonesia, seperti tersaji pada Tabel 3. Dari tabel tersebut terungkap bahwa penggunaan teknologi nano pada bidang pengolahan pangan tidak saja meningkatkan kualitas pangan, namun juga meningkatkan keamanan pangan. Hal tersebut dikarenakan penggunaan teknologi nano yang mampu mendeteksi kontaminan dan masa kedaluwarsa pangan. Namun, pakar teknologi pangan Prof. F.G. Winarno (Tempo.co 2009) menyarankan bahwa sebaiknya penggunaan teknologi nano di bidang pangan diarahkan ke produk kemasan dahulu. Saran tersebut dikemukakan karena mempertimbangkan risiko penerapan teknologi nano terhadap pangan yang masih belum banyak diketahui, bahkan oleh kalangan ilmuwan sendiri.

Lebih lanjut, Winarno dan Fernandez (2010) menunjukkan bahwa saat ini teknologi nano mampu mengembangkan lapisan pembungkus berukuran nano yang dapat dimakan (*edible nanocoating*), yaitu lapisan setipis 5 nm yang tidak nampak oleh mata telanjang. Jenis *coating* tersebut dapat digunakan untuk daging, keju, buah-buahan, sayuran, *confectionary, bakery*, dan sebagainya. Jenis *coating* tersebut dapat memberikan pelindung terhadap udara dan pertukaran gas. Selain itu, *coating* tersebut berfungsi sebagai wahana untuk lebih menampakkan warna, cita rasa, antioksidan, enzim, serta senyawa *antibrowning* dan dapat meningkatkan daya simpan, bahkan setelah kemasan dibuka.

Peran Pemerintah dan Swasta dalam Pengembangan Teknologi Nano di Indonesia

Pemerintah Indonesia sudah mulai menempatkan sains dan teknologi nano sebagai prioritas arah pembangunan. Hal ini terlihat dari disebutkannya material nano sebagai salah satu bahan material maju yang diharapkan dapat dikuasai pembuatannya secara industri di dalam negeri di dalam Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2015–2019 (Perpres RI No. 2/2015).

Material nano sebagai salah satu bahan material maju yang diharapkan dapat dikuasai

pembuatannya secara industri di dalam negeri juga disebutkan dalam Rencana Induk Riset Nasional (RIRN) 2015–2045 (Kemenristekdikti 2016). Bahkan, dalam Rencana Induk Pembangunan Industri Nasional 2015–2035 (Kemenperin 2015) disebutkan bahwa “perkembangan teknologi di masa depan akan difokuskan pada *nanotechnology*, *biotechnology*, *information technology* dan *cognitive science*, dengan fokus aplikasi pada bidang energi, pangan, kesehatan, dan lingkungan.” Namun, teknologi nano nampaknya tidak diprioritaskan untuk dikembangkan dalam jangka pendek (2015–2019), melainkan mulai periode 2010–2024. Lebih lanjut, disebutkan bahwa perkembangan tersebut akan berpengaruh pada perkembangan sektor industri nasional sehingga perlu disiapkan sistem serta strategi alih teknologi dan inovasi teknologi yang sesuai, di antaranya peningkatan pembiayaan penelitian dan pengembangan (R&D), termasuk sinergi antara pemerintah, pengusaha, dan akademisi.

Sebelumnya, yakni pada tahun 2008 Kementerian Perindustrian (waktu itu masih Departemen Perindustrian) telah menerbitkan *Roadmap* Pengembangan Teknologi Industri Berbasis Nanoteknologi (Herman et al. 2008). Penyusunan *roadmap* tersebut ditujukan untuk meningkatkan daya saing klaster industri nasional, melalui pemetaan dan analisis faktor internal dan faktor eksternal secara komprehensif dan menyeluruh baik dari sisi teknis maupun ekonomis.

Sementara itu, struktur organisasi Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) memperlihatkan bahwa penelitian ilmu dan teknologi nano masih dinaungi berbagai bidang ilmu yang sudah mapan (LIPI c2016). Kegiatan penelitian ilmu dan teknologi nano masih di bawah pusat penelitian fisika, kimia, metalurgi, dan biologi. Demikian pula, profil BPPT belum jelas menampilkan keberpihakannya pada teknologi nano; melihat struktur organisasinya tidak ada deputi, balai pengkajian, dan unit pelaksana teknis khusus teknologi nano. Kebijakan Ditjen Pendidikan Tinggi (Dikti) untuk mendukung pendidikan sains dan teknologi nano juga belum jelas. Dari penelusuran website Dikti diketahui bahwa beberapa penelitian sains dan teknologi nano telah didanai oleh Dikti, namun program yang dikhususkan untuk pengembangan belum dilakukan. Walaupun demikian, integrasi sains dan teknologi nano ke dalam struktur pendidikan tinggi mungkin sudah dilakukan melalui berbagai program studi yang sudah ada.

Di Indonesia belum banyak lembaga publik atau privat yang fokus pada penelitian atau

advokasi nano teknologi. Lembaga privat yang melakukan riset dan advokasi teknologi nano di Indonesia adalah Mochtar Riady Institute for Nanotechnology (MRIN) (MRIN c2008) yang didirikan oleh Mochtar Riady secara pribadi. Lembaga yang secara resmi mulai beroperasi tanggal 12 Mei 2008 fokus pada penelitian untuk mendeteksi kanker hati sedini mungkin dan teknologi nano akan menjadi alat penting dalam jangka panjang untuk mengembangkan teknik pengendalian dan pengobatan kanker hati agar tidak berkembang menjadi penyakit kronis. Kanker hati dipilih menjadi fokus penelitian utama saat ini karena salah satu kanker yang banyak ditemui di dunia dan menyebabkan kematian lebih dari 600.000 orang setiap tahun. MRIN terintegrasi dengan Siloam Hospitals Group dan Teaching Hospital dalam grup rumah sakit (RS) tersebut. Selain MRIN, Mochtar Riady juga mendirikan Mochtar Riady Plaza Quantum (MRPQ) yang diresmikan pada tanggal 10 Maret 2015 di Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Indonesia (UI), Depok, Jawa Barat (UI 2015). Pusat penelitian teknologi nano itu difokuskan kepada pengembangan teknologi peranti nano untuk kebutuhan dunia industri.

Masyarakat Nano Indonesia (MNI) dibentuk sebagai forum komunikasi antara para peneliti dan pelaku industri, pemerintahan, lembaga riset, universitas maupun dunia industri, yang tertarik atau bergerak di bidang ilmu dan teknologi nano. Lembaga tersebut didirikan pada tanggal 28 April 2005 dan hingga saat ini telah berhasil menghimpun lebih dari 300 tenaga ahli teknologi nano di berbagai bidang, membuka jejaring dengan berbagai institusi, di antaranya Balai Riset Departemen Perindustrian; Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi (Dikti), Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi; serta berbagai organisasi profesi dan perguruan tinggi di seluruh Indonesia (NanoTech Indonesia [tanpa tahun]).

Bertepatan dengan Hari Kebangkitan Teknologi Nasional (Hakteknas) ke-19 (11 Agustus 2014) dibentuk Konsorsium Agro Nanoteknologi yang digagas oleh Komite Inovasi Nasional (KIN) di mana Balitbangtan turut terlibat bersama dengan IPB, PT Alamanda Sejati Utama, PT Smart Tbk, PT Polowijo Gosari dan Masyarakat Nano Indonesia. Melalui Konsorsium Agro Nanoteknologi yang menyinergikan kinerja unsur *academics*, *business*, *government*, dan *community* (model ABG+C), diharapkan teknologi nano dapat memberikan kontribusi bagi solusi permasalahan pertanian di Indonesia. Komite Inovasi Nasional sendiri kemudian dibubarkan melalui Perpres RI No.

164/2014 seiring dengan berakhirnya Kabinet Indonesia Bersatu II.

Menurut Suwarda dan Maarif (2012) tidak mudah mencari kebijakan dan arah penelitian secara mendetail di Indonesia. Baik LIPI maupun MNI belum secara transparan menentukan arah perkembangan sains dan teknologi nano di Indonesia, sementara pendidikan tinggi favorit di Indonesia belum membentuk program studi khusus di bidang sains dan teknologi nano. Demikian pula, lembaga advokasi yang terlibat dalam sains dan teknologi nano belum nampak di Indonesia. Kegiatan advokasi lebih banyak dilakukan pemerintah, lembaga riset, dan lembaga pendidikan melalui kegiatan seminar-seminar. Kegiatan-kegiatan penelitian dan advokasi terlihat belum tertata rapi dan jelas sehingga terkesan belum ada kepedulian yang signifikan akan risiko sains dan teknologi nano bagi masyarakat dan lingkungan.

Peran Badan Litbang Pertanian dalam Penelitian dan Pengembangan Teknologi Nano

Irawan et al. (2014) menyatakan bahwa tantangan pembangunan pertanian saat ini ialah peningkatan produktivitas, mutu, dan nilai tambah produk pertanian dengan menciptakan sistem pertanian yang ramah lingkungan; penggunaan pupuk kimia dan organik secara berimbang untuk memperbaiki dan meningkatkan kesuburan tanah; perbaikan dan pembangunan infrastruktur lahan, air, perbenihan, dan perbibitan; serta persaingan global yang semakin terbuka. Meningkatnya kompleksitas permasalahan dan tantangan global saat ini menuntut perubahan paradigma pembangunan pertanian ke depan yang harus didasarkan pada hasil penelitian dan pengembangan (*research and development*). Oleh karena itu, langkah-langkah strategis dan visioner perlu ditempuh, baik dalam program penelitian, pengembangan sumber daya manusia (SDM), dan fasilitas penelitiannya sehingga mampu menghasilkan invensi dan inovasi yang bernilai tinggi. Dalam visi perkembangan keilmuan ke depan, terlihat bahwa teknologi nano akan tumbuh sebagai penggiring baru revolusi teknologi dan industri abad 21, termasuk penerapannya di bidang pertanian dan pengolahan pangan.

Mengacu pada tupoksinya, Badan Litbang Pertanian sangat dimungkinkan untuk melaksanakan penelitian dan pengembangan berbasis teknologi nano. Terlebih, dengan adanya kesesuaian antara visi Kementerian Pertanian dan tupoksi Badan Litbang Pertanian, yaitu mendukung pembangunan pertanian

industrial, maka Badan Litbang Pertanian perlu mengembangkan teknologi maju (*advanced technology*), termasuk teknologi nano. Oleh karena itu, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian berinisiatif akan terus mengembangkan riset teknologi nano di bidang pertanian dan pengolahan pangan melalui riset yang intensif dan komprehensif sehingga diharapkan dapat dihasilkan aplikasi teknologi nano yang dapat meningkatkan produktivitas, efisiensi, nilai tambah, dan daya saing produk serta aman bagi kesehatan dan lingkungan sehingga keraguan mengenai dampak negatifnya dapat dihilangkan (Irawan et al. 2014).

Mengingat bahwa salah satu hambatan perkembangan teknologi nano di Indonesia ialah fasilitas teknologi nano yang kurang memadai, pada tahun 2013 Badan Litbang Pertanian membangun suatu Laboratorium Nanoteknologi di Kampus Penelitian Pertanian Cimanggu, Bogor, yang dilengkapi peralatan riset yang memadai dan tergolong terlengkap di Indonesia untuk bidang ilmu hayati. Pengelolaan Laboratorium Nanoteknologi tersebut berada di bawah koordinasi BB Pasca Panen, meskipun dapat dimanfaatkan oleh seluruh peneliti Badan Litbang Pertanian dan pihak lain yang membutuhkan. Hasil pengamatan Irawan et al. (2014) selama periode 2010–2013 terhadap beberapa lembaga penelitian yang aktif mengembangkan teknologi nano di Indonesia menunjukkan bahwa Laboratorium Nanoteknologi Badan Litbang Pertanian tersebut merupakan laboratorium teknologi nano yang memiliki fasilitas peralatan karakterisasi, preparasi, dan prosesing, serta penerapan nanopartikel yang paling lengkap, terpadu, dan terpusat di satu tempat.

Selain itu, untuk mendukung penyusunan program dan pelaksanaan riset teknologi nano, Badan Litbang Pertanian telah membentuk Tim Pelaksana Litbang Nanoteknologi melalui SK Kepala Badan Litbang Pertanian No. 289/Kpts/OT.160/I/9/2013, di samping membentuk Kelompok Kerja Litbang Nanoteknologi. Kelompok Kerja tersebut terdiri atas delapan kelompok, yang masing-masing menangani produk tertentu, yaitu (1) hormon nano dan vaksin nano; (2) benih nano; (3) pupuk nano; (4) pestisida nano; (5) kemasan nano yang *biodegradable*; (6) pangan dan nutrasetikal (nanonutrien dan nanobioaktif); (7) alat nano, biosensor, dan material; dan (8) pakan (nanonutrien). Demikian pula, telah disusun peta jalan (*roadmap*) litbang teknologi nano 2015–2019. Hal ini membuktikan keseriusan Badan Litbang Pertanian untuk menjadi *leader*

atau *trend setter* dalam pengembangan teknologi nano di bidang pertanian dan pengolahan pangan di Indonesia.

Dengan adanya Laboratorium Nanoteknologi tersebut, Badan Litbang Pertanian telah melakukan berbagai penelitian dan pengembangan teknologi nano di bidang pertanian (prapanen) dan pangan (pascapanen dan pengolahan pangan). Pengembangan teknologi nano di bidang pertanian yang sudah dilakukan Badan Litbang Pertanian di antaranya adalah teknologi nano untuk efisiensi pemupukan, yaitu penyediaan pupuk nano dengan daya serap tinggi dan bersifat *controlled release*. Perancangan sistem penghantaran pupuk dalam matriks berstruktur nano diharapkan mampu menyediakan unsur hara sesuai kebutuhan tanaman tanpa aplikasi berlebihan.

Pada aspek pascapanen, pengembangan teknologi nano diarahkan pada penyediaan ingredien pangan sehat dan bergizi. Kebutuhan masyarakat akan pangan sehat dan bergizi dapat dipenuhi dengan fortifikasi mikronutrien (vitamin dan mineral termasuk asam folat) yang diformulasikan dalam bentuk *premix* dan berstruktur nano sehingga memiliki stabilitas simpan serta bioavailabilitasnya yang tinggi untuk memastikan penyerapannya dalam tubuh sesuai kebutuhan.

Secara lebih terinci, berbagai hasil penelitian dan pengembangan yang telah dilakukan Badan Litbang Pertanian di antaranya adalah pupuk nano, zeolit nano, silika nano, pewarna alam nano, emulsi lemak kakao nano dari sekam padi, minyak pala nano, kurkuma nano, serat nano selulosa, vitamin A nano, pangan fungsional nano, dan nutrasetikal nano (Yuliani et al. 2012; Yuliani et al. 2014; Yuliani et al. 2015; Hoerudin et al. 2015; Iriani et al. 2015). Berbagai jenis hasil penelitian teknologi nano yang telah dilakukan Badan Litbang Pertanian tersebut memperkuat pernyataan Irawan et al. (2014), bahwa pemanfaatan Laboratorium Nanoteknologi Badan Litbang Pertanian masih didominasi oleh Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pascapanen Pertanian (BB Pascapanen).

PROSPEK DAN KENDALA PENGEMBANGAN TEKNOLOGI NANO DALAM PEMBANGUNAN PERTANIAN DAN PENGOLAHAN PANGAN DI INDONESIA

Gutierrez et al. (2012) melaporkan bahwa populasi manusia akan mencapai 9,1 miliar pada tahun 2050, yang berarti kenaikan sebesar

34% dari tahun 2012. Pertumbuhan ini terutama terjadi di negara-negara berkembang, termasuk di Indonesia. Sebagai konsekuensinya, akan terjadi peningkatan permintaan global akan pangan, pakan, dan energi. Estimasi awal mengungkapkan bahwa peningkatan permintaan dunia akan mencapai sekitar 70%. Oleh karena itu, tekanan terhadap sumber daya (khususnya lahan dan air) akan semakin tinggi sehingga dampaknya terhadap lingkungan akan tinggi. Tantangannya adalah bagaimana memenuhi kebutuhan pangan, pakan, dan energi yang semakin meningkat tersebut dengan ketersediaan lahan yang tetap atau bahkan menyusut dengan biaya input yang lebih rendah dan lebih sedikit dampak buruknya terhadap ekosistem.

Menurut Wheeler (2005), teknologi modern seperti bioteknologi dan teknologi nano dapat berperan penting dalam meningkatkan produksi dan memperbaiki kualitas pangan yang dihasilkan petani. Banyak yang percaya bahwa teknologi modern akan mengamankan kebutuhan pangan dunia yang semakin meningkat, seperti halnya lingkungan, kesehatan, dan ekonomi. Demikian pula Gutierrez et al. (2012) berpendapat bahwa penerapan teknologi nano mempunyai prospek yang sangat baik sebagai alat untuk mengatasi masalah-masalah, seperti manajemen dan penggunaan air, pertanian, eksploitasi ternak, dan pengolahan pangan. Sejalan dengan itu, FAO/WHO (2013) menyebutkan bahwa terdapat peningkatan tren pemanfaatan teknologi nano untuk menyelesaikan permasalahan-permasalahan di sektor pertanian, pangan, dan kesehatan.

Mukhopadhyay (2014) mengemukakan bahwa intervensi teknologi nano dalam pertanian mempunyai prospek yang cerah untuk meningkatkan efisiensi penggunaan nutrisi melalui formulasi pupuk nano, memecahkan pembatas hasil (*yield barriers*) melalui bioteknologi nano serta pengendalian hama dan penyakit, pemahaman mekanisme interaksi inang-parasit pada tingkat molekuler, pengembangan pestisida generasi baru dan pembawanya, pengawetan dan pengemasan pangan dan aditif pangan, memperkuat serat alam, menghilangkan kontaminan dari tanah dan air, meningkatkan umur simpan sayuran dan bunga, sumber daya nano berbasis tanah liat (untuk pengaturan pasokan secara tepat), reklamasi tanah yang dipengaruhi oleh salinitas, stabilisasi permukaan yang rawan erosi, dan lain-lain.

Akan tetapi, meskipun banyak disiplin ilmu bergabung dalam payung pertanian, perkembangan teknologi nano di bidang pertanian

relatif lambat. Menurut Mukhopadhyay (2014), hal ini disebabkan oleh (1) sifat unik dari produksi pertanian yang berfungsi sebagai sebuah sistem terbuka di mana energi dan substansi energi dipertukarkan secara bebas, skala permintaan materi input selalu sangat besar dibanding produk nano yang dihasilkan secara industri; (2) ketiadaan kontrol input material nano karena terkait dengan rangkaian kesatuan geosfer (pedosfer)-biosfer-hidrosfer-atmosfer (hal ini berbeda dengan produk nano industri, misalnya telepon seluler); (3) adanya jeda waktu antara munculnya teknologi hingga digunakan oleh petani; (4) banyak negara berkembang tidak mau mengalokasikan dana untuk inovasi tersebut; dan (5) kurangnya pandangan ke masa depan (*foresight*) yang disebabkan oleh kurangnya edukasi pertanian dan pemahaman terhadap sistem produksi pertanian.

Hambatan perkembangan teknologi nano di Indonesia salah satunya adalah fasilitas (sarana dan prasarana) teknologi nano yang kurang memadai dan terletak terpisah-pisah, tersebar di sejumlah institusi (Rochman 2012, Irawan et al. 2013, Irawan et al. 2014), dan hal yang paling mendasar dalam menghambat perkembangan teknologi nano adalah ketiadaan alat pengukuran (metrologi) material nano (Kompas 2013). Kendala lain dikemukakan Rochman (2012), yaitu sumber daya manusia yang masih relatif tidak merata dan kekurangan serta alokasi pendanaan masih relatif minim, padahal penelitian teknologi nano memerlukan investasi besar. Prioritas riset nano yang sesuai dengan kondisi Indonesia juga belum ditentukan. Secara lebih terperinci, disebutkan bahwa penerapan teknologi nano oleh industri di Indonesia mengalami kendala yang meliputi informasi (41%), teknologi (32%), SDM (11%), finansial (5%), dan lain-lain (11%).

Menurut Irawan et al. (2014), penelitian teknologi nano belum berkembang di lingkup Badan Litbang Pertanian (kecuali di BB Pascapanen) karena beberapa hal, di antaranya (1) sebagian besar peneliti Badan Litbang Pertanian belum mengenal teknologi nano; (2) penelitian berbasis teknologi nano membutuhkan biaya besar dan kontinuitas untuk menghasilkan produk akhir berbasis teknologi nano; dan (3) UPT belum memiliki SDM dan fasilitas teknologi nano serta belum mengetahui prosedur pemanfaatan fasilitas Laboratorium Nanoteknologi yang dikelola oleh BB Pascapanen. Jumlah peneliti yang mempunyai keahlian di bidang teknologi nano dan peneliti yang telah dilatih terkait teknologi nano hanya sebanyak 24 orang atau 1,35% dari total peneliti

Badan Litbang Pertanian. Dari total tersebut, 45,8% adalah peneliti BB Pascapanen. Demikian pula, fasilitas teknologi nano yang dibangun pada tahun 2012, sampai saat ini pemanfaatannya masih di bawah koordinasi BB Pascapanen.

PENUTUP

Globalisasi pasar dan liberalisasi perdagangan yang didorong oleh revolusi teknologi informasi, transportasi, dan deregulasi perdagangan yang diatur dalam naungan kesepakatan GATT semakin meluas diterapkan di seluruh negara. Globalisasi pasar menyebabkan harga komoditas pertanian di setiap negara semakin terintegrasi dengan harga di pasar dunia dan preferensi konsumen pada aspek tertentu semakin bersifat universal akibat globalisasi informasi. Pada sisi lain, arus perdagangan antarnegara semakin terbuka akibat dihapuskannya berbagai hambatan perdagangan antarnegara. Pada situasi tersebut maka peningkatan daya saing produk pertanian merupakan tantangan yang tidak bisa dihindari agar agroindustri nasional tidak kalah bersaing dan dapat terus berkembang.

Dalam rangka meningkatkan daya saing di pasar dunia, peningkatan efisiensi merupakan kata kunci dalam memproduksi dan memasarkan produk pertanian. Dalam kaitan ini, pemanfaatan teknologi nano memiliki potensi besar untuk mendorong peningkatan efisiensi agroindustri nasional. Pada sektor produksi penerapan teknologi nano berpotensi untuk meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk, pestisida, alat dan mesin pertanian, serta benih melalui pengembangan varietas berproduktivitas tinggi dan resisten terhadap hama dan penyakit. Pada sektor hilir, penerapan teknologi nano berpotensi meningkatkan daya simpan produk pertanian, meningkatkan kualitas produk, dan meningkatkan nilai tambah produk pertanian. Dalam konteks yang lebih luas pemanfaatan teknologi nano di sektor pertanian berpotensi untuk meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya, penanganan limbah pertanian, mengurangi polusi lingkungan akibat penggunaan bahan kimia seperti pupuk dan pestisida, dan meningkatkan kesejahteraan petani.

Pemanfaatan teknologi nano telah banyak dilakukan di negara-negara maju, tetapi sejauh ini lebih terfokus pada produk-produk industri dan belum banyak menyentuh produk pertanian. Beberapa lembaga riset dan universitas di Indonesia juga telah mulai mengembangkan

teknologi nano, tetapi penelitian teknologi nano yang dilakukan umumnya terfokus pada produk-produk industri. Sebagai lembaga riset pertanian, Badan Litbang Pertanian juga telah menginisiasi pengembangan teknologi nano melalui investasi yang cukup besar untuk membangun Laboratorium Nanoteknologi. Namun demikian, penelitian berbasis teknologi nano di bidang pertanian sejauh ini masih sangat terbatas akibat berbagai faktor.

Untuk mendorong penerapan teknologi nano pada agroindustri nasional maka peningkatan penguasaan teknologi nano di bidang pertanian merupakan upaya penting. Terkait dengan hal tersebut beberapa upaya perlu ditempuh. (a) Membangun jaringan riset teknologi nano pada lingkup nasional agar seluruh lembaga riset yang berkompeten dapat diberdayakan untuk mendukung pengembangan agroindustri nasional berbasis teknologi nano. Dalam kaitan ini, kerja sama dan sinergi penelitian teknologi nano perlu dikembangkan baik pada riset dasar maupun riset terapan. (b) Melakukan sosialisasi teknologi nano dan potensi pemanfaatannya di bidang pertanian kepada seluruh peneliti Badan Litbang Pertanian mengingat teknologi nano masih merupakan barang baru bagi sebagian besar peneliti. (c) Memperkuat SDM teknologi nano pada seluruh UK/UPT teknis lingkup Badan Litbang Pertanian. (d) Mengembangkan sinergi penelitian teknologi nano pada lingkup UK/UPT Badan Litbang Pertanian agar penelitian yang dilakukan dapat bersifat saling melengkapi dan tidak tumpang tindih yang dapat menimbulkan pemborosan. (e) Mengembangkan tata kelola penelitian teknologi nano dengan sasaran memberdayakan secara optimal infrastruktur dan SDM teknologi nano di lingkup Badan Litbang Pertanian. (f) Menetapkan prioritas penelitian teknologi nano agar inovasi teknologi nano yang dihasilkan lebih terarah untuk mendukung pengembangan agroindustri nasional berbasis teknologi nano. Pada intinya, prioritas penelitian teknologi nano perlu diberikan pada penelitian yang mampu menghasilkan produk-produk nano yang memiliki potensi dampak signifikan terhadap peningkatan produksi, kualitas, dan nilai tambah produk pertanian; penurunan ongkos produksi dan pemasaran produk pertanian; serta meningkatkan pendapatan petani. (g) Mengembangkan kerja sama dengan pihak swasta. Hal ini diperlukan mengingat inovasi teknologi nano umumnya berupa produk yang pemassalannya kepada para pengguna membutuhkan keterlibatan produsen swasta, di samping untuk mengatasi masalah keterbatasan anggaran penelitian.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Bambang Irawan yang telah memberikan banyak masukan kepada penulis dalam penyelesaian makalah ini. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada Dewan Redaksi dan Mitra Bestari yang telah menelaah naskah dan memberikan saran perbaikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Agusta MK, Indriani D, Dipojono HK. 2013. Simulasi Ab initio untuk aplikasi bidang energi dan teknologi pangan: adsorpsi etilen (C₂H₄) di permukaan TiO₂ dan hidrazin (N₂H₄) di permukaan logam transisi. In: Proceedings Workshop Nanotechnology: Research and Development on Nanotechnology in Indonesia; 2013 Dec 12; Bandung, Indonesia. Bandung (ID): National Research Center for Nanotechnology. hlm. 11-16.
- Arora A, Padua GW. 2010. Review: nanocomposites in food packaging. *J Food Sci.* 75(1):R43-R49. doi: 10.1111/j.1750-3841.2009.01456.x.
- Chaudhry Q, Castle L. 2011. Food applications of nanotechnologies: An overview of opportunities and challenges for developing countries. *Trends Food Sci Tech.* 22(11):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 Addit Contam.* 25(3):241-258.
- de Azeredo HMC, Mattoso LHC, McHugh TH. 2011. Chapter 4, Nanocomposites in food packaging – a review. In: Reddy B, editor. *Advances in diverse industrial applications of nanocomposites.* Rijeka (CR): InTechOpen. p. 57-78.
- Drexler KE. 1986. *Engines of creation: the coming era of nanotechnology.* New York (US): Doubleday.
- Duncan TV. 2011. Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: barrier materials, antimicrobials and sensors. *J Colloid Interface Sci.* 363(1):1-24.
- [FAO/WHO] Food and Agriculture Organization of the United States/World Health Organization. 2009. FAO/WHO expert meeting on the application of nanotechnologies in the food and agriculture sectors: potential food safety implications. Meeting Report. Rome (IT): Food and Agriculture Organization of the United Nations/World Health Organization.
- [FAO/WHO] Food and Agriculture Organization of the United States/World Health Organization. 2010. FAO/WHO Expert meeting on the application of nanotechnologies in the food and agriculture

- sectors: potential food safety implications. Rome (IT): Food and Agriculture Organization of the United Nations and World Health Organization.
- [FAO/WHO] Food and Agriculture Organization of the United States/World Health Organization. 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 (IT): Food and Agriculture Organization of the United Nations and World Health Organization.
- Gutiérrez FJ, Mussons ML, Gatón P, Rojo R. 2012. Chapter 6, Nanotechnology and food industry. In: Valdez B, editor. Scientific, health and social aspects of the food industry. Rijeka (CR): InTechOpen. p. 95-128.
- Herman AS, Djumarman, Rohman NT, Purwanto S, Syukri AF, Haryono A. 2008. Roadmap pengembangan teknologi industri berbasis nanoteknologi. Jakarta (ID): Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Industri.
- Hoerudin. 2015. Keamanan pangan produk nanoteknologi. *Foodrev Indones*. X(2):40-4.
- Hoerudin, Harimurti N. 2014. Nanoformulations for enhancing bioavailability and biological activities of curcumin. In: Rostiana O, editor. Proceeding of International Seminar on Spice, Medicinal and Aromatic Plants (SMSPs); 2013 Aug 29; Jakarta, Indonesia. Jakarta (ID): IAARD Press.
- Hoerudin, Irawan B. 2015. Prospek nanoteknologi dalam membangun ketahanan pangan. Dalam: Pasandaran E, Rachmat M, Hermanto, Ariani M, Sumedi, Suradisastra K, Haryono, editors. *Pembangunan pertanian berbasis ekoregion*. Jakarta (ID): IAARD Press. hlm. 49-67.
- 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 Akhir Penelitian. Bogor (ID): Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pascapanen Pertanian.
- Holden PA, Nisbet RM, Lenihan HS, Miller RJ, Cherr GN, Schimel JP, Gardea-Torresdey JL. 2012. Ecological nano-toxicology: integrating nanomaterial hazard considerations across the subcellular, population, community, and ecosystems levels. *Acc Chem Res*. 46:813-822.
- Irawan B, Rusastra IW, Alihamsyah T, Hoerudin, Ariani M, Syahyuti, Suhartini SH. 2014. Pengembangan organisasi dan jaringan kerja pada program pengembangan nanoteknologi Badan Litbang Pertanian. Laporan Akhir Penelitian. Bogor (ID): Pusat Sosial Ekonomi dan Kebijakan Pertanian.
- Irawan B, Rusastra IW, Swastika DKS, Sutoro, Talib C, Hoerudin, Ariani M, Suhartini SH. 2013. Keselarasan prioritas pengembangan SDM, sarana/prasarana dan penelitian: kasus pada BB Biogen, BB Pascapanen, BPTP Sulawesi Selatan. Laporan Akhir Penelitian. Bogor (ID): Pusat Sosial Ekonomi dan Kebijakan Pertanian.
- Iriani ES, Hoerudin, Yuliani S, Harimurti N, Agustinisari I, Permana AW, Juniawati, Kamsiati E, Suryanegara L, Fahma F, et al. 2015. Pemanfaatan biomassa pertanian untuk kemasan pintar prospek nanoteknologi dalam membangun ketahanan pangan memperkuat kemampuan swasembada pangan nano-biodegradable. Laporan Akhir Penelitian. Bogor (ID): Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pascapanen Pertanian.
- Joseph T, Morrison M. 2006. Nanotechnology in agriculture and food. *Nanoforum Report* [Internet]. [cited 2016 Jan 14]. Available from: [Ftp://Ftp.Cordis.Europa.Eu/Pub/Nanotechnology/Docs/Nano technology_In_Agriculture_And_Food.Pdf](http://Ftp://Ftp.Cordis.Europa.Eu/Pub/Nanotechnology/Docs/Nano%20technology_In_Agriculture_And_Food.Pdf).
- [ITS] Institut Teknologi Surabaya. 2016. ITS semakin serius kembangkan nanoteknologi [Internet]. Surabaya (ID): Institut Teknologi Sepuluh Nopember; [diunduh 2016 Mei 3]. Tersedia dari: <https://www.its.ac.id/article/tentang/en>.
- [Kemenristekdikti] Kementerian Riset, Teknologi, dan Perguruan Tinggi. 2016. Rencana induk riset nasional 2015–2045. Jakarta (ID): Kementerian Riset, Teknologi, dan Perguruan Tinggi.
- [Kemenperin] Kementerian Perindustrian. 2015. Rencana induk pembangunan industri nasional 2015–2035. Jakarta (ID): Kementerian Perindustrian, Pusat Dokumentasi Publik.
- Kompas. 2013 Jul 22. Nanoteknologi: pengembangan ke metrologi nanomaterial. *Teknologi*:13 (kol. 1-5).
- [LIPI] Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia. c2016. Struktur organisasi Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia [Internet]. Jakarta (ID): Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia; [diunduh 2016 Jan 13]. Tersedia dari: <http://lipi.go.id/struktur>.
- [LPPM-ITB] Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat-Institut Teknologi Bandung. c2016. Pusat Penelitian [Internet]. Bandung (ID): Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat-Institut Teknologi Bandung; [diunduh 2016 Mar 12]. Tersedia dari http://www.lppm.itb.ac.id/?page_id=131.
- Lu J, Bowles M. 2013. How will nanotechnology affect agricultural supply chains? *IFAMA Rev*. 16(2):21-42.
- [MARS] Market Attitude Research Services. 2011. Australian community attitudes held about nanotechnology—trends 2005 to 2011. Final Report. New South Wale (AU): Department of Industry, Innovation, Science and Research.
- Meyer-Plath A, Schweinberger FF. 2014. Nanomaterial characterization and metrology. In: Malsch I, Emond C, editors. *Nanotechnology and human health*. Boca Raton, FL (US): CRC Press.

- [MRIN] Mochtar Riady Institute for Nanotechnology. c2008. Mochtar Riady Institute for Nanotechnology [Internet]. Tangerang (ID): Mochtar Riady Institute for Nanotechnology; [cited 2016 Apr 12]. Available from: <http://www.mrinstitute.org/>.
- Mousavi SR, Rezael M. 2011. Nanotechnology in agriculture and food. *J Appl Environ Biol Sci*. 1(10):414-419.
- Mukopadhyay SS. 2014. Nanotechnology in agriculture: prospects and constraints [Internet]. [cited 2016 Apr 22]; *Nanotechnol Sci Appl*. 7:63-71. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4130717/>. doi: 10.2147/NSA.S39409.
- Nano.com. c2016. Nanotechnology products database [Internet]. [cited 2016 Apr 22]. Available from: <http://product.statnano.com/>
- NanoTech Indonesia. [tanpa tahun]. About us [Internet]. Jakarta (ID): Masyarakat Nanoteknologi Indonesia; [diunduh 2016 Apr 14]. Tersedia dari: <http://nano.or.id/about-us>
- [NNI] National Nanotechnology Initiative. [date unknown]. What is nanotechnology? [Internet]. [cited 2016 May 7]. Available from: <http://www.nano.gov/nanotech-101/what/definition>.
- Neethirajan S, Jayas DS. 2011. Nanotechnology for the food and bioprocessing industries. *Food Bioprocess Tech*. 4(1):39-47.
- [Perpres RI] Peraturan Presiden Republik Indonesia nomor 164 tahun 2014 tentang pembubaran Komite Inovasi Nasional. 2014. Jakarta (ID): Sekretariat Republik Indonesia.
- [Perpres RI] Peraturan Presiden Republik Indonesia nomor 2 tahun 2015 tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2015–2019. 2015. Lampiran: Buku II, Agenda pembangunan bidang. Jakarta (ID): Kementerian Hukum dan Hak Asasi Manusia Republik Indonesia.
- Pérez-Esteve E, Bernardos A, Martínez-Máñez R, Barat JM. 2013. Nanotechnology in the development of novel functional foods or their package. An overview based in patent analysis. *Recent Pat Food Nutr Agric*. 5:35-43.
- Pérez-de-Luque A, Hermosín MC. 2013. Nanotechnology and its use in agriculture. In: Bagchi D, Bagchi M, Moriyama H, Shahidi F, editors. *Bio-nanotechnology: a revolution in food, biomedical and health sciences* [Internet]. Oxford (GB): Blackwell Publishing Ltd; [cited 2016 May 8]. Available from: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118451915.ch20/summary>. doi: 10.1002/9781118451915.ch20.
- Persistence. 2016 Feb 2. Global nano-enabled packaging market to gain impetus due to rising demand from food and beverages industry [Internet]. [cited 2016 May 6]. Available from: <http://www.persistencemarketresearch.com/article/nano-enabled-packaging-market.asp>.
- Predicala B. 2009. Nanotechnology: potential for agriculture. In: *Fuelling the farm*. 2008 SSCA Annual Conference; 2008 Dec 29; Saskatchewan, Canada. Saskatchewan (CN): University of Saskatchewan. p. 123-134.
- [PI LIPI] Pusat Informasi Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia. 2014 Agu 8. Nanoteknologi: teknologi masa depan [Internet]. Jakarta (ID): Pusat Informasi Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia; [diunduh 2016 Mar 13]. Tersedia dari: <http://www.inovasi.lipi.go.id/id/berita/nanoteknologi-teknologi-masa-depan>
- Rhim JW, Ng PKW. 2007. Natural biopolymer-based nanocomposite films for packaging applications. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 47(4):411-433.
- Rhodes CJ. 2014. Eating small: applications and implications for nanotechnology in agriculture and the food industry. *Science Progress*. 97(2):173-182. doi: 10.3184/003685014X13995384317938.
- Rochman NT. 2011. Strategi pengembangan nanoteknologi dalam rangka peningkatan daya saing global agroindustri nasional [Disertasi]. [Bogor (ID)]: Institut Pertanian Bogor, Sekolah Pascasarjana.
- Rochman NT. 2012. Rekayasa dan inovasi nanoteknologi dalam upaya peningkatan daya saing produk-produk pertanian dan pangan. Makalah disampaikan pada Seminar Nasional Sains dan Teknologi 3: Penguasaan teknologi rekayasa proses pengolahan pangan guna mendukung pencapaian kemandirian bangsa; 2012 Jun 20; Semarang, Indonesia.
- Roco MC, Mirkin CA, Hersam MC, editors. 2010. *Nanotechnology research directions for societal needs in 2020: retrospective and outlook* [Internet]. World Technology Evaluation Center (WTEC) and the National Science Foundation (NSF) Report, September 2010. Boston [US]: Springer; [cited 2016 May 6]. Available from: http://www.wtec.org/nano2/Nanotechnology_Research_Directions_to_2020/.
- Salamanca-Buentello F, Persad DL, Court EB, Martin DK, Daar AS, Singer PA. 2005. Nanotechnology and the developing world. *PLoS Med*. 2(5):383-386.
- Siegrist M, Cousin ME, Kastenholz H, Wiek A. 2007. Public acceptance of nanotechnology foods and food packaging: the influence of affect and trust. *Appetite*. 49(2):459-466.
- Siegrist M, Stampfli N, Kastenholz H, Keller C. 2008. Perceived risks and perceived benefits of different nanotechnology foods and nanotechnology food packaging. *Appetite*. 51(2):283-290.
- Silva H, Cerqueira M, Vicente A. 2012. Nanoemulsions for food applications: development and characterization. *Food Bioprocess Tech*. 5:854-867

- Suwarda R, Maarif MS. 2012. Pengembangan inovasi teknologi nanopartikel berbasis pati untuk menciptakan produk yang berdaya saing. *J Tek Ind.* 13(2):104-122.
- Taniguchi N. 1974. On the basic concept of 'nanotechnology'. *Proceeding of the International Conference of Production Engineering*; 1974 Aug 26-29; Tokyo, Japan. Part II. Tokyo (JP): Japan Society of Precision Engineering. p.18-23.
- Taylor R, Thyer R. 2006. Farm factories: harvesting bioplastics [Internet]. California (US): CureZone; [cited 2016 Jan 3]. Available from: <http://www.curezone.org/forums/am.asp?i=1722193>
- Tempo.co. 2009 Agu 11. Nanoteknologi pangan sebaiknya pada kemasan [Internet]. [diunduh 2015 Mei 5]. Tersedia dari: <https://m.tempo.co/read/news/2009/08/11/061192099/nanoteknologi-pangan-sebaiknya-pada-kemasan>.
- [UI] Universitas Indonesia. 2015 Mar 10. Menristek Dikti resmikan Mochtar Riady Plaza Quantum UI [Internet]. Depok (UI): Universitas Indonesia; [diunduh 2015 Mar 12]. Tersedia dari: <http://www.ui.ac.id/berita/menristek-dikti-resmikan-mochtar-riady-plaza-quantum-ui.html>.
- US Environmental Protection Agency. 2007. Nanotechnology White Paper [Internet]. Report EPA 100/B-07/001. Washington, DC (US). [cited 2014 Jun 9]. Available from: <http://www.epa.gov/osainter/pdfs/nanotech/epa-nanotechnology-white-paper-0207.pdf>.
- Vance ME, Kuiken T, Vejerano EP, McGinnis SP, Hochella MF Jr, Rejeski D, Hull MS. 2015. Nanotechnology in the real world: redeveloping the nanomaterial consumer products inventory. *Beilstein J Nanotechnol* [Internet]. [cited 2016 May 7]; 6:1769-1780. Available from: <http://dx.doi.org/10.3762/bjnano.6.181>.
- Wardana AA. 2014 Jun 17. Mengenal nanoteknologi & aplikasinya untuk nilai tambah komoditas hortikultura Indonesia [Internet]. Jakarta (ID): Masyarakat Nano Indonesia; [diunduh 2016 Mei 2]. Tersedia dari: <http://nano.or.id/opini/mengenal-nanoteknologi-aplikasinya-untuk-nilai-tambah-komoditas-hortikultura-indonesia>.
- WhatIs.com. 2011. Definition: nanotechnology (molecular manufacturing) [Internet]. [cited 2016 May 7]. Available from: <http://whatis.techtarget.com/definition/nanotechnology-molecular-manufacturing>.
- Wheeler S. 2005. Factors influencing agricultural professional's attitudes toward organic agriculture and biotechnology. Adelaide (AU): University of South Australia, Center for Regulation and Market Analysis.
- Winarno FG, Fernandez IE. 2010. Nanoteknologi bagi industri pangan dan kemasan. Bogor (ID): MBRIO Press.
- Yuliani S, Harimurti N, Nurdjannah N, Herawati H. 2012. Teknologi nanoemulsi lemak kakao (cocoa butter) sebagai bahan spread kaya antioksidan untuk rototian dan biskuit. *Laporan Akhir Penelitian*. Bogor (ID): Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pascapanen Pertanian.
- Yuliani S, Hoerudin, Harimurti N, Iriani ES, Agustinisari I, Permana AW, Dewandari KT, Juniawati, Munarso SJ, Widaningrum HM, et al. 2014. Pengembangan nanoteknologi untuk pangan fungsional, nutrasetikal dan kemasan. *Laporan Akhir Penelitian*. Bogor (ID): Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pascapanen Pertanian.
- Yuliani S, Hoerudin, Permana AW, Dewandari KT, Juniawati, Susanto U, Abdulrahman S, Zarwazi LM, Rohaeni WR, Widowati LR, et al. 2015. Aplikasi nanoteknologi untuk pengembangan matriks pupuk nano dan ingredien pangan fungsional. *Laporan Akhir Penelitian*. Bogor (ID): Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pascapanen Pertanian.
- Zhao R, Torley P, Halley P. 2008. Emerging biodegradable materials: starch- and protein-based bio-nanocomposites. *J Mater Sci.* 43(9):3058-3071. doi: 10.1007/s10853-007-2434-8.