หากต้องการเอกสารหรือข้อมูลเพิ่มเติม โปรดติดต่อที่
สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา
กองแผนงานและวิชาการ
ศูนย์พัฒนานโยบายแห่งชาติด้านสารเคมี
ถนนติวานนท์ อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี 11000
โทรศัพท์ 0-2590-7269, 0-2591-8478
โทรสาร 0-2590-7287
Email: chemical_safety@fda.moph.go.th
เว็บไซต์: http://ipcs.fda.moph.go.th/csnetNEW/

ชุดความรู้ด้านเทคนิคและวิชาการเรื่อง
ความปลอดภัยของวัสดุและผลิตภัณฑ์นาโน

Nano Safety

สำหรับเจ้าหน้าที่ ผู้ประกอบการ และนักวิชาการ

สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา
Food and Drug Administration

ชุดความรู้ด้านเทคนิคและวิชาการเรื่อง
ความปลอดภัยของวัสดุและผลิตภัณฑ์นาโน

Nano Safety

สำหรับเจ้าหน้าที่ ผู้ประกอบการ และนักวิชาการ

สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา
Food and Drug Administration

P 1-4.indd 1 24/2/2554 15:57:34

ชุดความรู้ด้านเทคนิคและวิชาการ เรื่อง

“ความปลอดภัยของวัสดุและผลิตภัณฑ์นาโน (Nano Safety)”

สำหรับเจ้าหน้าที่ ผู้ประกอบการ และนักวิชาการ

จัดทำโดย

สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา

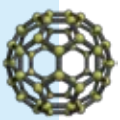
ออกแบบและพิมพ์โดย

สำนักพิมพ์อักษรกราฟฟิคแอนด์ดีไซน์

พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2553

จำนวน 500 เล่ม

.....



□□□□□□ P 1-4.indd 2 24/2/2554 15:57:36

คำนำ

นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) เริ่มเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันมากขึ้น ภาครัฐและเอกชนต่างทุ่มเทงบประมาณมหาศาลในการวิจัยและพัฒนาวัสดุนาโนและผลิตภัณฑ์ที่ใช้นาโนเทคโนโลยีเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์ โดยในปัจจุบันมีการผลิตและใช้วัสดุนาโนในกระบวนการผลิต รวมทั้งมีผลิตภัณฑ์นาโนทยอยออกสู่ตลาดผู้บริโภคมากขึ้นเรื่อยๆ แต่ประเด็นความปลอดภัยของวัสดุนาโนและผลิตภัณฑ์นาโน (nanosafety) ยังเป็นข้อมูลที่ยังไม่ได้มีการสื่อสารกันมากนักในระหว่างเจ้าหน้าที่ นักวิชาการ ผู้ประกอบการ รวมถึงประชาชนทั่วไป ดังนั้นอาจส่งผลให้เกิดการใช้อย่างขาดความระมัดระวัง และนำไปสู่อันตรายต่อสุขภาพและระบบนิเวศได้

จากการทบทวนเอกสารทางวิชาการและแนวปฏิบัติที่ดีในการจัดการกับวัสดุนาโนของทั้งในประเทศไทยและของต่างประเทศ พบว่า ข้อสรุปที่ตรงกันคือ ความรู้เกี่ยวกับความเป็นอันตรายของวัสดุนาโนและผลิตภัณฑ์นาโนต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมยังมีน้อยมาก เมื่อเทียบกับงานวิจัยด้านการพัฒนาเทคโนโลยีและวัสดุนาโน ด้วยเหตุนี้ การดำเนินการใดๆ ที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนาโนจึงต้องยึดหลักระวังไว้ก่อน (precautionary principle) และใช้มาตรการประเมินและควบคุมความเสี่ยงจนกว่าจะมีหลักฐานทางวิทยาศาสตร์ที่ยืนยันในเรื่องความปลอดภัย

สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา กองแผนงานและวิชาการ โดยศูนย์พัฒนานโยบายแห่งชาติด้านสารเคมี จึงได้พัฒนาชุดความรู้นี้เพื่อสร้างความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับประโยชน์และความเสี่ยงของวัสดุนาโนและผลิตภัณฑ์นาโนที่ใช้ในชีวิตประจำวัน เป็นชุดความรู้ทางวิชาการสำหรับเจ้าหน้าที่ ผู้ประกอบการ และนักวิชาการทั่วไป

ขอขอบคุณ ดร.สุจิตรา วาสนาดำรงดี จากศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตรายที่เป็นกำลังสำคัญในการพัฒนาชุดความรู้นี้ และขอขอบคุณในความร่วมมือของหน่วยงานหลักที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC) และผู้ทรงคุณวุฒิจากสถาบันการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้อง สำหรับคำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างมาก และทำให้การพัฒนาชุดความรู้นี้สำเร็จได้ด้วยดี

สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา คาดหวังว่าชุดความรู้ดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ต่อเจ้าหน้าที่ นักวิจัย และผู้ประกอบการในการออกมาตรการป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้วัสดุนาโนและผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งอาจเป็นข้อมูลให้แก่ประชาชนทั่วไปในฐานะผู้บริโภคได้มีข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการใช้ผลิตภัณฑ์นาโนอย่างปลอดภัยต่อไป

สำนักงานคณะกรรมการาหารและยา
ธันวาคม 2553

สารบัญ

บทที่ 1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยีและวัสดุนาโน 1

บทที่ 2 ประเภทของวัสดุนาโนและการประยุกต์ 12

บทที่ 3 การศึกษาความปลอดภัยของวัสดุและผลิตภัณฑ์นาโน 20

บทที่ 4 แนวทางการจัดการเพื่อความปลอดภัยของวัสดุและผลิตภัณฑ์นาโน 31

บทที่ 5 กฎหมายและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของวัสดุและผลิตภัณฑ์นาโน 45

แหล่งข้อมูลเพิ่มเติม 50

เอกสารอ้างอิง 52

P 1-4.indd 4 24/2/2554 15:57:37

บทที่ 1

ความรู้ทั่วไป เกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยี

1.1 นาโนเทคโนโลยีคืออะไร?

เนื่องจากนาโนเทคโนโลยีเป็นเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับวิทยาการหลากหลายสาขา ตั้งแต่เคมีสังเคราะห์ วัสดุศาสตร์ วิศวกรรมไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์และวิทยาศาสตร์ชีวภาพ จึงทำให้ยากต่อการระบุคำนิยามที่ครอบคลุมทั้งหมด อย่างไรก็ดี ในปัจจุบันองค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (The International Organization for Standardization: ISO) ได้ให้คำนิยาม "นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology)" ว่าหมายถึง การประยุกต์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ เพื่อสังเคราะห์และควบคุมสสารในระดับนาโน เพื่อใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติและปรากฏการณ์เชิงโครงสร้างที่เกิดจากอนุภาคขนาดที่เล็กมาก ทำให้มีความแตกต่างไปจากคุณสมบัติของสสารในระดับอะตอมหรือโมเลกุลหรือวัสดุใหญ่[1]

ส่วน National Nanotechnology Initiative (NNI) ประเทศสหรัฐอเมริกาได้ให้คำนิยาม "นาโนเทคโนโลยี" ว่าเป็นความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์ในการเข้าใจและควบคุมสสารที่มีมิติในระหว่าง 1 ถึง 100 นาโนเมตร ซึ่งคุณสมบัติพิเศษของอนุภาคระดับนาโนทำให้เกิดการประยุกต์ใช้ใหม่ๆ ได้[2]

---

[1] The application of scientific knowledge to manipulate and control matter in the nanoscale to make use of size- and structure-dependent properties and phenomena distinct from those associated with individual atoms or molecules or with bulk materials (อ้างถึง TC229 JWG 1 Terminology and Nomenclature Convener Report, ที่มา: http://www.packaginglaw.com/3052__.shtml)

[2] Nanotechnology is the understanding and control of matter at dimensions between approximately 1 and 100 nanometers, where unique phenomena enable novel applications. (ที่มา: http://www.nano.gov/html/facts/whatIsNano.html)

ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติซึ่งเป็นหน่วยงานส่งเสริมการวิจัยด้านนาโนเทคโนโลยีของประเทศไทยได้ให้คำนิยามที่ครอบคลุมว่า “นาโนเทคโนโลยี” หมายถึง เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดการ การสร้างหรือการสังเคราะห์วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักร หรือผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 1-100 นาโนเมตร) รวมถึงการออกแบบหรือการใช้เครื่องมือในการสร้างวัสดุที่มีขนาดเล็กมากหรือเรียงอะตอมและโมเลกุลในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ ส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุหรืออุปกรณ์มีคุณสมบัติพิเศษขึ้น ไม่ว่าทางด้านฟิสิกส์ เคมีหรือชีวภาพ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อผู้ใช้สอยได้ (วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, 2550)

1.2 วัตถุนาโน วัสดุนาโน ผลิตภัณฑ์นาโน ต่างกันอย่างไร?

ตามคำนิยามของ ISO **“วัตถุนาโน (nano-object)”** หมายถึง วัตถุที่มีขนาดเล็กระดับนาโนโดยมีขนาดระหว่าง 1 ถึง 100 นาโนเมตร ทั้งนี้โดยอาจเป็นวัตถุหนึ่ง สองหรือสามมิติ

วัตถุนาโนอาจมีได้หลายรูปแบบ เช่น ละอองลอยนาโน (nanoaerosol) อนุภาคนาโน (nanoparticle) แผ่นนาโน (nanoplate) และเส้นใยนาโน (nanofiber)

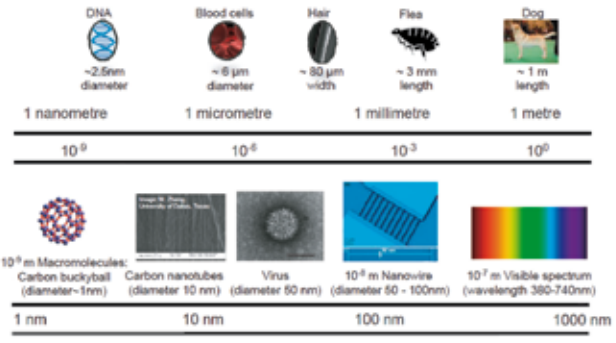
สำหรับ **“วัสดุนาโน (nanomaterial)”** หมายถึง วัสดุที่มีขนาดอย่างน้อยหนึ่งมิติเป็นขนาดนาโน หรือมีโครงสร้างของพื้นผิวหรือของโพรงภายในอยู่ในระดับนาโน กล่าวโดยย่อ วัสดุนาโนหมายถึงเนื้อวัสดุของวัตถุนาโน หรือเนื้อวัสดุที่ประกอบด้วยโครงสร้างนาโน ทั้งนี้ วัสดุนาโนมีทั้งที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น อนุภาคของแร่ต่างๆ หรือที่เกิดขึ้นโดยบังเอิญ เช่น อนุภาคในควันไฟหรือในไอเสียจากเครื่องยนต์ และวัสดุนาโนที่ผลิตขึ้น (engineered/manufactured nanomaterial) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้รับการออกแบบและผลิตขึ้นอย่างเจาะจง ให้มีสมบัติเฉพาะและมีขนาดใกล้เคียงกัน ข้อห่วงกังวลเกี่ยวกับความปลอดภัยของวัสดุนาโนส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปที่ความปลอดภัยของวัสดุนาโนที่มนุษย์ผลิตขึ้น

P 1-56 new.indd 2 24/2/2554 15:58:55

ส่วน **"ผลิตภัณฑ์นาโน (nanoproduct)"** หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ใช้นาโนเทคโนโลยีเป็นองค์ประกอบในกระบวนการผลิต หรือผลิตภัณฑ์ที่มีวัสดุนาโนเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ไม่ว่าจะฝังตัวอยู่ในเนื้อผลิตภัณฑ์หรือเคลือบอยู่ที่ผิว เช่น กรณีเส้นใยหรือสิ่งทอที่เคลือบผิวด้วยอนุภาคนาโนของสารบางชนิดเพื่อประโยชน์ในการกันน้ำหรือเพื่อฆ่าเชื้อแบคทีเรีย เป็นต้น[3] จะเห็นได้ว่า วัสดุนาโนจะเป็นส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์นาโน

1.3 ขนาดนาโนเมตร เล็กแค่ไหน?

คำว่า "นาโนเมตร" (Nanometer) หมายถึง สิบกำลังลบเก้าเมตร (10^{-9}) หรือ 1 ส่วนพันล้านของ 1 เมตร หากเปรียบเทียบกับสิ่งใกล้ตัว ขนาด 1 นาโนเมตร ก็จะเล็กกว่าเส้นผมประมาณหนึ่งแสนเท่า และเล็กกว่าเซลล์เม็ดเลือดแดงประมาณ 6,000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 1-1



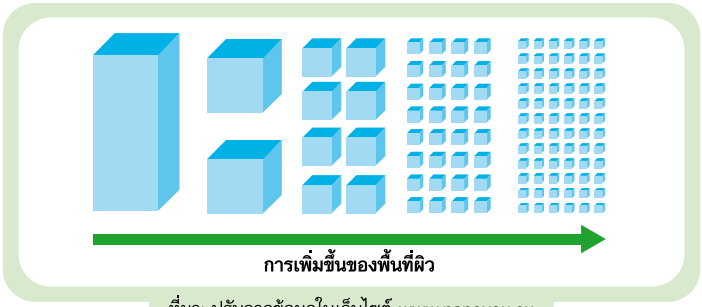
ที่มา: เว็บไซต์ www.nanoyou.eu

รูปที่ 1-1 เปรียบเทียบขนาดนาโนเมตรกับสิ่งต่างๆ

[3] ร่างแผนยุทธศาสตร์ด้านความปลอดภัยและจริยธรรมนาโนเทคโนโลยี

1.4 นาโนเทคโนโลยีทำให้เกิดคุณสมบัติพิเศษอย่างไร?

ยิ่งขนาดของวัสดุมีขนาดเล็กลงเท่าใด จำนวนอะตอมที่อยู่บริเวณผิวหน้าและผิวสัมผัสของวัสดุก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งจะส่งผลให้วัสดุที่มีขนาดระดับนาโนมีคุณสมบัติ (ทางไฟฟ้า กายภาพ แม่เหล็ก และแสง) แตกต่างไปจากเดิมและพิเศษแปลกใหม่อย่างไม่เคยพบมาก่อน การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวสัมผัสจะเห็นได้จากตัวอย่างการแบ่งลูกเต๋า (รูปที่ 1-2) หากเรานำลูกเต๋าขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีพื้นที่ผิว 6 ตารางเมตร มาแบ่งเป็นลูกเต๋าขนาดเล็กๆ ขนาดนาโนเมตร เราจะได้ลูกเต๋า จำนวน 10^{27} ลูก (10^{9} เท่ากับ 1 พันล้านลูก) และมีพื้นที่ผิวถึง 6,000 ตารางกิโลเมตร



ที่มา: ปรับจากข้อมูลในเว็บไซต์ www.nanoyou.eu

รูปที่ 1-2 การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิว เมื่อวัสดุมีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ แม้จะมีปริมาตรเดียวกัน

ตัวอย่างคุณสมบัติพิเศษบางประการของวัสดุนาโน มีดังนี้

- **คุณลักษณะเชิงแสงที่ต่างไปจากเดิม**

โดยทั่วไป ทองคำแบบก้อนจะมีสีเหลืองอย่างที่เราเคยเห็นกัน แต่ถ้าเราย่อขนาดทองคำให้เล็กลงไปเรื่อยๆ จนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าความยาวคลื่นแสงที่มาตกกระทบมากๆ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์เชิงแสงที่เรียกว่า เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ (surface plasmon resonance: SPR) ซึ่งจะทำให้อนุภาคนาโนของทองคำนั้นดูดกลืนสเปคตรัมของแสงที่อยู่ในช่วงสีเขียว (ความยาวคลื่นประมาณ 520 นาโนเมตร) จึงทำให้อนุภาคนาโนของทองคำเห็นเป็นสีแดงทับทิม (ruby red) ดังแสดงในรูปที่ 1-3

P 1-56 new.indd 4 24/2/2554 15:58:57

ทองคำแบบก้อน ทองคำนาโน

ที่มา: ปรับจากข้อมูลในเว็บไซต์ www.nanoyou.eu

รูปที่ 1-3 การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของทองคำ

- **ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่สูงขึ้น**

วัตถุที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรจะมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่กว่า ด้วยเหตุนี้จึงทำให้วัตถุที่มีขนาดระดับนาโนจะมีจำนวนอะตอมที่อยู่บริเวณผิวหน้าสูงมาก ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวหน้าวัสดุได้ง่ายมากขึ้น และยังเอื้อต่อการเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ อันเนื่องมาจากความเร็วต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของบริเวณผิวหน้าของวัตถุ ตัวอย่างเช่น วัสดุที่มีความฉุน กลายเป็นใส (ทองแดงนาโน) สารเฉื่อยที่เกิดปฏิกิริยายาก กลายเป็นสารเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวสูง (ทองคำขาวนาโน) สารที่มีความเสถียรกลับกลายเป็นติดไฟได้ง่าย (อะลูมินัมนาโน) ของแข็งกลายเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง (ทองคำนาโน) และสารที่เป็นฉนวนไฟฟ้ากลายเป็นสารนำไฟฟ้า (ซิลิคอนนาโน)

- **ความแข็งและความแข็งแรงที่ดีขึ้นกว่าเดิม**

วัสดุโลหะและเซรามิกที่มีขนาดเกรน (grain size) ในระดับนาโนเมตรจะมีความแข็งแรงและความทนทานต่อการแตกหักสูงมากกว่าวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดเกรนในระดับไมโครเมตรหรือที่ใหญ่กว่า เช่นเดียวกันกับโลหะที่มีโครงสร้างผลึกในระดับนาโนจะมีความแข็งแรงและความแข็งสูงกว่าโลหะที่มีขนาดผลึกใหญ่ มีสมบัติในการต้านทานกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น มีความจุความร้อนจำเพาะมากขึ้นและสามารถขยายตัวได้ดีมากขึ้นกว่าเดิม ตัวอย่างเช่น

โลหะทองแดงที่มีขนาดเกรนในระดับนาโนเมตรจะมีความแข็งสูงกว่าทองแดงปกติถึง 5 เท่า หรืออนุภาคระดับนาโนเมตรของอะลูมิเนียมส่งผลให้โครงสร้างของอะลูมิเนียมนาโนมีความเหนียวและแข็งแรงมากขึ้นกว่าอะลูมิเนียมในขนาดปกติ

1.5 การประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยี

เนื่องจากนาโนเทคโนโลยีทำให้มนุษย์สามารถจัดระเบียบโมเลกุลและอะตอมได้ นาโนเทคโนโลยีจึงเปรียบเสมือนเทคโนโลยีที่ช่วยขับเคลื่อนการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อต่อยอดเป็นอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น วงจรรวม หน่วยเก็บความจำของคอมพิวเตอร์ อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง พลังงาน ยา เครื่องสำอาง การแพทย์ อาหาร บรรจุภัณฑ์อาหาร สิ่งทอ เครื่องนุ่งห่มและเครื่องกีฬา ตัวอย่างการประยุกต์นาโนเทคโนโลยีในด้านต่างๆ มีดังต่อไปนี้[4]

- **วงจรรวม (integrated circuit)**

เทคนิคทางวัสดุศาสตร์ในระดับนาโน ทำให้มนุษย์สามารถสร้างชั้นวัสดุที่มีขนาดเล็กมากๆ ขึ้นเป็นส่วนประกอบของชิปสารกึ่งตัวนำ ส่งผลดีในการระบายความร้อน ในการลดการรั่วของกระแสไฟฟ้าระหว่างเส้นตัวนำ และลดค่าความจุที่ไม่พึงประสงค์อันเป็นเหตุให้สัญญาณรั่วไหล เป็นต้น วงจรรวมในยุคต่อไปจะมีความหนาแน่นของทรานซิสเตอร์สูงขึ้น กินไฟน้อยลง ปล่อยความร้อนน้อยลง ในขณะที่ทำงานได้เร็วขึ้น

- **หน่วยเก็บความจำของคอมพิวเตอร์ (memory unit)**

การใช้เทคนิคทางวัสดุศาสตร์ระดับนาโนจะทำให้ฮาร์ดดิสก์ในยุคต่อไปเก็บข้อมูลได้มากขึ้น ตัวอย่างเช่น บริษัทไอบีเอ็มได้พัฒนาอุปกรณ์เก็บข้อมูลชนิดใหม่ที่เรียกว่า Millipede Chip ซึ่งมีหัวอ่านกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM) บรรจุอยู่ 1,000-4,000 หัว ทำงานบันทึกและอ่านข้อมูลโดยการเจาะหัวเข็มลงไป (nano-indentation) บนโพลิเมอร์ หน่วยเก็บความจำชนิดนี้ เมื่อนำไปใส่ในฮาร์ดดิสก์จะทำให้ความจุเพิ่มขึ้นเป็นร้อยถึงเป็นพันเท่าของปัจจุบัน

[4] เนื้อหาส่วนใหญ่มาจากร่างแผนยุทธศาสตร์ด้านความปลอดภัยและจริยธรรมนาโนเทคโนโลยี

P 1-56 new.indd 6 24/2/2554 15:58:58

- **อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (optoelectronics)**

อิเล็กทรอนิคส์ทางแสงเป็นพื้นฐานรองรับอุตสาหกรรมอุปกรณ์โทรคมนาคมในยุคปัจจุบันและในอนาคตอันใกล้ นาโนเทคโนโลยีสร้างเลเซอร์ราคาถูกที่มีความยาวคลื่นตามต้องการและมีประสิทธิภาพสูงกว่าเลเซอร์ในปัจจุบัน ในด้านจอแสดงผล นาโนเทคโนโลยีอยู่เบื้องหลังการพัฒนาจอแบนแบบงอได้ ซึ่งสามารถดูได้ด้วยมุมกว้างมากและภาพสามารถเคลื่อนไหวได้เร็วโดยไม่ติดจอ โดยใช้ Organic Light Emitting Diode (OLED) (รูปที่ 1-4) ซึ่งเริ่มจะมีวางตลาดแล้ว

ที่มา: http://dvice.com/archives/2007/05/sony__shows__off__flexible__fullco.php

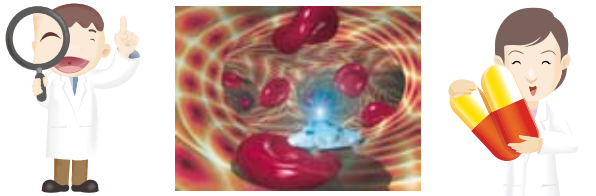
รูปที่ 1-4 ตัวอย่างการพัฒนาจอ OLED ของบริษัทโซนี่

- **พลังงาน (energy)**

Light Emitting Diode (LED) และ QCS (Quantum Caged Atoms) ที่ใช้นาโนเทคโนโลยีจะช่วยลดการใช้พลังงานเพื่อแสงสว่าง การใช้นาโนเทคโนโลยีในเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้ดูดแสงได้ในช่วงคลื่นที่กว้างขึ้น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้เซลล์แสงอาทิตย์ การใช้นาโนเทคโนโลยีในเซลล์เชื้อเพลิงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงนั้น

- **ยา (drug)**

แคปซูลนาโนได้รับการออกแบบให้กักเก็บยาไว้ แล้วปล่อยออกสู่อวัยวะเป้าหมายในเวลาที่พอเหมาะ (controlled release) แคปซูลนาโนมีทั้งที่ใช้หลักการนาโนทางชีวเคมีและที่ใช้อุปกรณ์กึ่งตัวนำที่ทำเป็นมอเตอร์ขนาดเล็กอยู่ในแคปซูลนั้นด้วยเทคโนโลยีนาโนประเภท Nano Electro-Mechanical (NEM)



http://www.nanoandme.org/nano-products/medical/

รูปที่ 1-5 จำลองภาพระบบนำส่งยาด้วยแคปซูลนาโน เปรียบเสมือนยานอวกาศนำส่งสารสำคัญไปยังเซลล์เป้าหมาย

- **เครื่องสำอาง (cosmetics)**

ในปัจจุบันมีเครื่องสำอางและเวชสำอาง ที่ใช้แคปซูลนาโนกักเก็บและปลดปล่อยสารออกฤทธิ์ช้าๆ ในตำแหน่งที่ต้องการ (เช่น ในผิวหนังชั้นหนังกำพร้าแต่ไม่ลึกถึงหนังแท้) นอกจากนั้น อนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide) ในโลชั่นทาผิวกันแดด สามารถสกัดกั้นแสงเหนือม่วงได้ในขณะที่ไม่มีสีขาวขุ่นเหมือนกับไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดใหญ่กว่า

http://www.nanoandme.org/nano-products/cosmetics-and-sunscreen/

รูปที่ 1-6 ครีมกันแดดที่มีอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์จะไม่ทิ้งคราบขาวเมื่อทา

- **การแพทย์ (medicine)**

การประยุกต์นาโนเทคโนโลยีที่สำคัญคือ นาโนเทคโนโลยีด้านการแพทย์ (nanomedicine) ซึ่งหมายถึง การนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้เกี่ยวกับสุขภาพ ไม่ว่าจะเป็นการป้องกัน การคัดกรอง การเตือนล่วงหน้าและการรักษาโรคต่างๆ การวิจัยด้านการแพทย์นาโนนั้นมีความก้าวหน้าไปอย่างมาก ตั้งแต่การใช้อนุภาค

P 1-56 new.indd 8 24/2/2554 15:59:03

ขนาดนาโนมาใช้เพื่อช่วยวิเคราะห์ระดับโมเลกุล (molecular diagnostics) การช่วยให้การถ่ายภาพอวัยวะต่างๆ มีรายละเอียดของข้อมูลมากขึ้น รวมถึงการรักษา ซึ่งอาจจะซับซ้อนและสามารถทำการรักษาในระดับเซลล์ การแพทย์แบบนาโน ในปัจจุบันสามารถแบ่งออกเป็นสาขาหลักๆ ได้ 3 สาขา ได้แก่ การตรวจวิเคราะห์ ระดับนาโน (nanodiagnostics and imaging) การนำส่งยาและการควบคุมการปล่อยยา (targeted drug delivery and controlled release) และการแพทย์แบบรักษาตัวเอง โดยการซ่อมแซม หรือทดแทนอวัยวะหรือเซลล์ที่ทำงานผิดปกติ (regenerative medicine)

ความก้าวหน้าด้านการตรวจวิเคราะห์ภายในร่างกายเราในปัจจุบัน เช่น การส่องกล้องเพื่อถ่ายภาพและรักษา การผ่าตัดแบบมีแผลเล็ก การฝังอุปกรณ์เข้าไปในร่างกายล้วนแล้วแต่สามารถใช้นาโนเทคโนโลยีมาช่วยได้ การตรวจหามะเร็งซึ่งเป็นโรคที่ร้ายแรงและมีอัตราการตายสูง ซึ่งเกิดจากเซลล์ของร่างกายมีความผิดปกติที่สารพันธุกรรมจนเกิดเป็นเซลล์มะเร็งที่แบ่งขยายตัวอย่างรวดเร็วจนเป็นเนื้อร้ายนั้นก็สามารถใช้นาโนเทคโนโลยีมาตรวจหาได้ เช่น การใช้หมุดควอนตัม (Quantum Dot) ซึ่งเป็นอนุภาคเล็กขนาดนาโนที่เปล่งแสงสีต่างๆ ตามขนาดและการจับรวมตัวของอนุภาคที่ต่างกัน ให้สีแตกต่างกัน สามารถช่วยแยกแยะเนื้อดีและเนื้อร้ายด้วยอุปกรณ์ทางรังสี เช่น X-ray หรือ MRI ให้ได้ผลที่ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ การพัฒนากล้องขนาดเล็ก (Nanoprobe) เพื่อสอดเข้าไปในร่างกายและวิเคราะห์เนื้อเยื่อต่างๆ ก็เป็นการแพทย์แบบนาโนที่กำลังพัฒนากันอยู่ทั่วโลก[5]

- **อาหารและบรรจุภัณฑ์อาหาร (food and food packaging)**

นาโนเทคโนโลยีมีที่ใช้ทั้งในการผลิตอาหาร การถนอมอาหาร และการบรรจุหีบห่อ เป็นต้นว่า การห่อหุ้มกลิ่นรสธรรมชาติไว้ในอนุภาคนาโนเพื่อให้กลิ่นรสอยู่ในอาหารได้นานขึ้น (เช่น คุกกี้) ขนมปังแซนวิชที่เติมโอเมก้า 3 ด้วยการใช้นาโนแคปซูลห่อหุ้มน้ำมันปลาทูน่าเพื่อไม่ให้ขนมปังมีกลิ่นคาวปลา นอกจากนั้น บรรจุภัณฑ์ที่เป็น nanocomposite อาจช่วยยืดอายุของอาหาร ด้วยการควบคุมการแพร่ของก๊าซแต่ละชนิด และอาจจะเปลี่ยนสี เพื่อเตือนผู้บริโภคว่าอาหารนี้ถูกปนเปื้อนด้วยสารพิษหรือเชื้อโรค หรือผลิตขวดเบียร์ที่สามารถใช้ขวดพลาสติกเคลือบด้วยนาโนเคลย์ (nano clay) แทนขวดแก้ว เป็นต้น

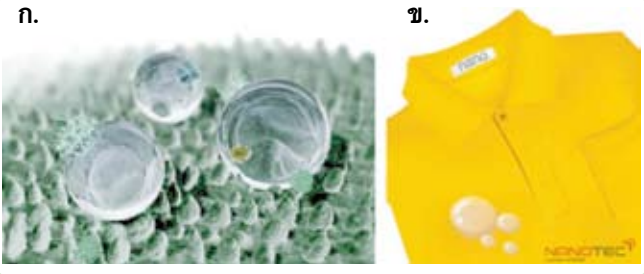
[5] http://www.whatgroupthai.com/whatelec/37/nanomedicine.html

ที่มา: http://www.dha-in-mind.com/australia+and+nz+omega-3+dha+enriched+foods.aspx
http://www.nanowerk.com/phpscripts/n__spotlight.php?cat=food
http://www.nanoandme.org/nano-products/packaging/

รูปที่ 1-7 ตัวอย่างอาหารและบรรจุภัณฑ์ที่ใช้วัสดุนาโน

- **สิ่งทอและเครื่องนุ่งห่ม (textile and garment)**

ในปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์ในท้องตลาดหลายรายการที่ผลิตด้วยนาโนเทคโนโลยี หรือใช้วัสดุนาโนเป็นส่วนประกอบ เช่น ผ้าเคลือบสารกันน้ำ (เคลือบด้วยอนุภาคนาโนของเทฟลอน) กันเปื้อน กันกลิ่น กันเชื้อแบคทีเรีย (ด้วยอนุภาคเงินนาโน) ผ้าฝ้ายที่ปรับผิวของเส้นใยเพื่อกันยับ (ด้วยไททาเนียมไดออกไซด์นาโน) และผ้าผสมอนุภาคตัวนำไฟฟ้า (เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์นาโน ซิงค์ออกไซด์นาโน) ทำให้ไม่เก็บประจุไฟฟ้าสถิต



ที่มา: http://www.nanoandme.org/nano-products/sports-and-leisure/

ก. คุณสมบัติกันน้ำของเส้นใยเลียนแบบปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนใบบัว ข. เสื้อนาโน

รูปที่ 1-8 ตัวอย่างเสื้อนาโน

P 1-56 new.indd 10 24/2/2554 15:59:05

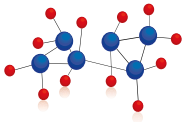
- **เครื่องกีฬา (sport equipments)**

ในปัจจุบันเริ่มมีตัวอย่างของเครื่องกีฬาที่ใช้นาโนเทคโนโลยีบ้างแล้ว เช่น high performance ski wax ที่ผสมด้วยวัสดุนาโนสำหรับเคลือบพื้นล่างของสกีที่สัมผัสกับหิมะให้ไถลได้รวดเร็วขึ้น ไม้เทนนิสที่ผสมท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotubes) เพิ่มความแข็งแรงได้มากกว่าเดิม และลูกเทนนิสที่เคลือบภายในแกนด้วย clay polymer nanocomposite สามารถใช้เล่นได้นานกว่าลูกเทนนิสปกติเท่าตัว เป็นต้น

ที่มา: http://www.nanoandme.org/nano-products/sports-and-leisure/

รูปที่ 1-9 นักเทนนิส (Roger Federer) ใช้ไม้เทนนิสที่ผสมท่อนาโนคาร์บอน

แม้ปัจจุบันจะมีผลิตภัณฑ์นาโนออกสู่ตลาด แต่ผลิตภัณฑ์เหล่านี้เป็นเพียงแค่ผลผลิตของการพัฒนานาโนเทคโนโลยีในยุคเริ่มต้นเท่านั้นนั่นคือเป็นเทคโนโลยีในการเติมอนุภาคนาโนลงในผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการผลิต เช่น การเคลือบอนุภาคนาโนของเงินเพื่อกำจัดแบคทีเรีย การเติมท่อนาโนคาร์บอนเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ แต่ในอนาคตอีก 5-10 ปีข้างหน้าเราจะเห็นการสังเคราะห์และการประกอบวัสดุและโครงสร้างระดับนาโนเมตรที่ซับซ้อนมากยิ่งขึ้น โดยอาศัยเทคโนโลยีตรวจวัด (sensor) เทคโนโลยีหุ่นยนต์ (robotics) และการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์เข้ากับโครงข่ายประสาท และในอนาคตข้างหน้านักวิทยาศาสตร์คาดการณ์ว่าจะมีการพัฒนาหุ่นยนต์นาโนที่มีความสามารถประกอบตัวเองได้ (self-assembly) และมีความสามารถจำลองตัวเองได้ (replication)



บทที่ 2

ประเภทของวัสดุนาโน และการประยุกต์

วัสดุนาโน (Nanomaterial) มีอยู่ 2 ประเภทใหญ่ คือ (1) วัสดุนาโนอนินทรีย์ เช่น โลหะ โลหะออกไซด์ เซรามิกส์ และ (2) วัสดุนาโนอินทรีย์ เช่น โพลีไวนิลคลอไรด์ ลาเท็กซ์ นอกจากนี้ ยังสามารถแบ่งประเภทวัสดุนาโนตามมิติการเรียงตัวของอะตอม ได้แก่ วัสดุนาโน 1 มิติ เช่น ฟิลม์นาโน (nanofilm) วัสดุนาโน 2 มิติ เช่น สายนาโน (nanowire) เส้นใยนาโน (nanofiber) และวัสดุนาโน 3 มิติ เช่น ท่อนาโนคาร์บอน หมุดควอนตัม

ในที่นี้จะอธิบายลักษณะ คุณสมบัติ และการประยุกต์วัสดุนาโน 5 ประเภท ที่มีความสำคัญและกำลังได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน ได้แก่

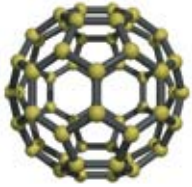
1. ฟูลเลอรีน
2. ท่อนาโนคาร์บอน
3. หมุดควอนตัม
4. อนุภาคนาโนของเงิน (ตัวอย่างของกลุ่มโลหะ)
5. อนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ (ตัวอย่างของกลุ่มโลหะออกไซด์)

2.1 ฟูลเลอรีน (Fullerene)

ฟูลเลอรีนเป็นอัญรูปหนึ่งของคาร์บอนที่เพิ่งค้นพบ ประกอบด้วยโมเลกุลของธาตุคาร์บอนทั้งหมด มีรูปทรงเป็นทรงกลม กลวง ทรงรี หรือท่อ ฟูลเลอรีนทรงกลมนั้นบางครั้งเรียกว่า “บักกี้บอล” (buckyball) ด้วยลักษณะที่คล้ายลูกฟุตบอลทำให้โครงสร้างของฟูลเลอรีนมีความสมมาตรสูงจึงเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงมาก สามารถรองรับและถ่ายเทแรงภายในโครงสร้างได้เป็นอย่างดี ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ สามารถใช้ฟูลเลอรีนเป็นตัวนำส่งยาต้านเชื้อไวรัสเอชไอวี (HIV) เชื้อแบคทีเรีย รวมทั้งเซลล์มะเร็งได้ นอกจากนี้

P 1-56 new.indd 12 24/2/2554 15:59:07

ยังพบว่ามีคุณสมบัติต้านสารอนุมูลอิสระได้ และยังอาจมีผลต่อการตายของเซลล์แบบ Apoptosis อีกด้วยซึ่งนักวิทยาศาสตร์กำลังเร่งศึกษา เพื่อนำมาใช้จริงในการรักษาโรคต่อไป นอกจากนี้ ยังมีการใช้ฟูลเลอรีนในการพัฒนานาโนอิเล็กทรอนิกส์ (nanoelectronics) เนื่องจากบัคกี้บอลมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) หากนำโครงสร้างโมเลกุลมาประกอบร่วมกับอะตอมของโลหะอัลคาไลน์จะทำให้กลุ่มโมเลกุลบัคกี้บอลมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (superconductor) ได้



ฟูลเลอรีนในสารละลาย

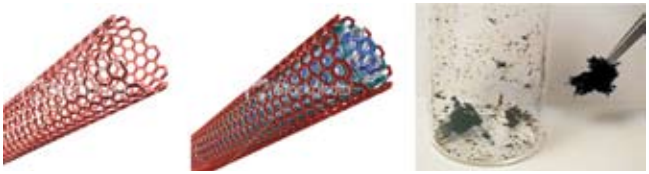
ที่มา: http://www.ornl.gov/~pk7/pictures/c60.html; http://www.atom.rmutphysics.com/charud/scibook/nanotech/Page/Unit3-7.html

รูปที่ 2-1 ภาพตัวอย่างฟูลเลอรีน

2.2 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube)

ท่อนาโนคาร์บอนเป็นวัสดุนาโนจากการสังเคราะห์ที่ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีลักษณะโครงสร้างพิเศษที่แตกต่างไปจากอัญรูปทั้ง 3 แบบของธาตุคาร์บอน (เพชร แกรไฟต์ และฟูลเลอรีน) ท่อนาโนคาร์บอนเกิดขึ้นจากอะตอมคาร์บอนที่จัดเรียงตัวกันเป็นแผ่นซึ่งมีความลื่นไหลสูง (เหมือนกับโครงสร้างของแกรไฟต์) อะตอมคาร์บอนเหล่านี้เชื่อมโยงกันเป็นตาข่ายที่มีรูรูปหกเหลี่ยม แต่มีลักษณะที่ม้วนตัวเข้าหากันเป็นท่อหรือเป็นหลอด จึงทำให้โครงสร้างนาโนนี้มีคุณสมบัติที่พิเศษหลายประการ เช่น มีความแข็งแกร่งน้ำหนักเบาและมีความยืดหยุ่นอย่างมาก กล่าวคือ ท่อนาโนคาร์บอนเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแกร่งมากกว่าเหล็ก 60 เท่า และสามารถทนต่อแรงดึงได้มากกว่าเหล็กถึง 20 เท่า จึงได้มีการนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น อุปกรณ์กีฬากอล์ฟและเทนนิส และมีแนวโน้มในการใช้ผลิตเป็นโครงสร้างของเครื่องบินอีกด้วย

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอน คือ สามารถเป็นได้ทั้งสารกึ่งตัวนำหรือเซมิคอนดัคเตอร์ (semiconductor) และเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดหรือซูเปอร์คอนดัคเตอร์ (คือ ตัวนำที่ไม่มีแรงต้านไฟฟ้าเลย) มีการนำมาใช้งานในการผลิตเป็นทรานซิสเตอร์ที่มีความเร็วสูงและมีความต้านทานต่ำมากและมีการนำมาพัฒนาในการสร้างเกทพื้นฐานเชิงตรรกะ (logic gate) ซึ่งจะนำไปสู่การสร้างระบบของคอมพิวเตอร์นาโน รวมทั้งมีการพัฒนาเพื่อใช้แทนโลหะในส่วนที่เป็นขั้วในตัวหลอดของจอภาพแบบรังสีแคโทดที่ใช้ในจอทีวีหรือจอคอมพิวเตอร์



2a. ผนังเดี่ยว (single-walled) 2b. ผนังหลายชั้น (multi- walled) 2c. ตัวอย่างท่อนาโนคาร์บอน

ที่มา: www.istockphoto.com ; http://www.atom.rmutphysics.com/charud/scibook/nanotech/Page/Unit3-7.html

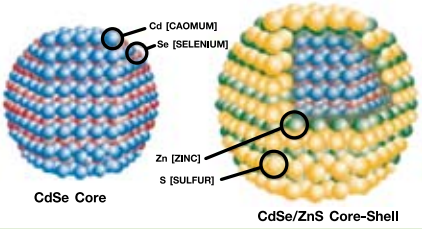
รูปที่ 2-2 ภาพตัวอย่างท่อนาโนคาร์บอน

2.3 หมุดควอนตัม (Quantum dot)

หมุดควอนตัมหรือควอนตัมดอท (Quantum dot) เป็นโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นผลึกนาโน (nanocrystal) ของสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) เช่น แคดเมียมเซลิไนด์ (CdSe) เลดซัลไฟด์ (PbS) ประกอบด้วยอิเล็กตรอนจำนวนระหว่าง 100-1,000 อิเล็กตรอน และเป็นโครงสร้างนาโนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 2-10 นาโนเมตร (หรือประกอบด้วยอะตอมจำนวนประมาณ 10-50 อะตอม) หมุดควอนตัมมีขนาดของโครงสร้างที่เล็กมาก โดยความยาว 2 เซนติเมตร สามารถจัดเรียงโครงสร้างของหมุดควอนตัมได้ทั้งสิ้นประมาณ 4,000,000 ดอทด้วยกัน

P 1-56 new.indd 14 24/2/2554 15:59:10

โครงสร้างของหมุดควอนตัมที่ได้จากสังเคราะห์มีคุณสมบัติที่พิเศษจากการที่อิเล็กตรอนที่อยู่ภายในถูกจำกัดบริเวณการเคลื่อนที่ทั้งสามมิติไว้ (Quantum confinement) การถูกกักขังนี้จึงส่งผลให้เกิดระดับการส่งผ่านพลังงานที่ไม่ต่อเนื่องหรือเกิดเป็นพลังงานแบบควอนตัม หมุดควอนตัมที่มีขนาดใหญ่จะมีสีสันที่แสดงออกมาอยู่ในขอบเขตของสีแดง และควอนตัมที่มีขนาดที่เล็กลงลดหลั่นกันลงมาจะมีสีสันอยู่ในขอบเขตของสีน้ำเงิน จากคุณสมบัติพิเศษดังกล่าวจึงมีการนำหมุดควอนตัมไปใช้ในทางการแพทย์สำหรับช่วยในการพิมพ์ภาพทางชีวภาพ (bioimaging) เพื่อระบุตำแหน่งและติดตามศึกษาเซลล์หรือโมเลกุลชีวภาพ ภายในร่างกายได้ง่ายและมีประสิทธิภาพมากขึ้น และนำมาใช้สำหรับเป็นเครื่องมือตรวจวัดทางชีวภาพ (biological sensors)



ที่มา: http://www.observatorynano.eu/project/document/103/

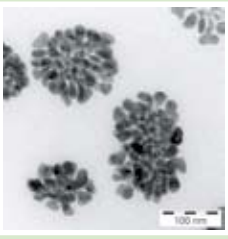
รูปที่ 2-3 หมุดควอนตัมหรือควอนตัมดอท

2.4 อนุภาคนาโนของเงิน (Silver nanoparticles)

คุณสมบัติทางเคมีของโลหะซิลเวอร์หรือเงิน (silver, Ag) นั้นเป็นธาตุที่มีอิเล็กตรอนวงนอกสุดแค่เพียงตัวเดียว เมื่อทำให้เล็กลงในระดับนาโนเมตร โลหะเงินจะแตกตัวทำให้เกิดเป็นประจุเงินแขวนลอย (silver colloid) อนุภาคนาโนของเงินจึงสามารถแทรกซึมเข้าไปสู่ผนังของแบคทีเรียโดยจะเข้าไปจับกับหมู่ sulphydryl (-SH) ของเอนไซม์ในแบคทีเรียและทำให้แบคทีเรียตายลงในที่สุด ในทางวิทยาศาสตร์พบว่าอนุภาคเงินสามารถฆ่าแบคทีเรียได้มากถึง 600 กว่าชนิด นอกจากนี้อนุภาคนาโนของเงินมีปฏิกิริยาตอบโต้อย่างมากกับโปรตีน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของจุลินทรีย์ เมื่อจุลินทรีย์สัมผัสกับอนุภาคนาโนของเงินจะมีผลต่อระบบเมทาโบลิซึม เกิดการยับยั้งการเจริญ

เติบโตของเซลล์ ทำลายระบบหายใจและยับยั้งการเพิ่มจำนวนและการเจริญของจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการติดเชื้อ กลิ่น อาการคัน และการเกิดแผล

เทคโนโลยีนาโนของเงินถูกนำมาประยุกต์อย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภค อุปกรณ์ทางการแพทย์ และเครื่องใช้ไฟฟ้า ตัวอย่างการที่ใช้อนุภาคนาโนของเงิน เช่น การป้องกันกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ที่เกิดขึ้นได้ในเสื้อผ้าที่สวมใส่ จากงานวิจัยพบว่า การผสมเงินนาโนลงไปในเนื้อผ้า เมื่อมีการใช้งานอนุภาคนาโนของเงินจะมีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ จำพวก *E.coli* และ *Staphylococcus aureus* ได้ถึง 100% นอกจากนี้ในกลุ่มสิ่งทอยังนิยมนำอนุภาคนาโนของเงินไปประยุกต์ในการผลิตผ้ากันน้ำ ในการผสมอนุภาคนาโนของเงินลงในเส้นใยผ้ามักจะใช้อัตราส่วนนาโนเงิน 1 ส่วนต่อเส้นใยผ้า 1 ล้านส่วนเพื่อหยุดยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียและจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและช่วยระงับกลิ่นเหงื่อ นอกจากนี้ มีการนำอนุภาคนาโนของเงินมาใช้ในการผลิตตู้เย็น เนื่องจากพบว่าสามารถช่วยรักษาความเย็นและยังช่วยยืดอายุของอาหารที่เก็บไว้ในตู้เย็น รวมทั้งมีการนำเทคโนโลยีนาโนของเงินมาใช้ในการผลิตเครื่องซักผ้าด้วย



ที่มา: http://www.polymermicroscopy.com/eng__tem__ag__partikel.htm

รูปที่ 2-4 ภาพขยายของอนุภาคนาโนของเงิน ขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร

2.5 อนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide nanoparticles)

ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารเก่าแก่ชนิดหนึ่งและเป็นหนึ่งใน 50 ชนิดของสารที่ผลิตมากที่สุดทั่วโลก ลักษณะทั่วไปมีสีขาว ทึบแสง เกิดเองตามธรรมชาติ มี 2 รูปแบบใหญ่ๆ คือ รูไทล์และอนาเทส ทั้ง 2 รูปแบบมีไททาเนียมไดออกไซด์

P 1-56 new.indd 16 24/2/2554 15:59:12

บริสุทธิ์อยู่กับสารปนเปื้อนจึงต้องผ่านกระบวนการทางเคมี เพื่อนำสารปนเปื้อนออก ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารที่มีสีขาวมีประโยชน์สำหรับการใช้งานได้หลากหลาย เนื่องจากไม่มีกลิ่นและมีความสามารถในการดูดซับ แร่ชนิดนี้พบได้ในหลายผลิตภัณฑ์ตั้งแต่สีทาบ้าน อาหารและเครื่องสำอาง โดยใช้เป็นตัวป้องกันแสงแดด ด้วยความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยี ทำให้มีการผลิตแร่ ไททาเนียมให้มีอนุภาคขนาดนาโนเมตรเพื่อเพิ่มคุณสมบัติหรือประสิทธิภาพของแร่ชนิดนี้

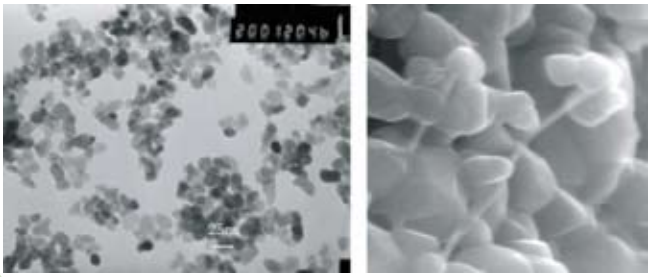
ปัจจุบัน มีการนำอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์มาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง ยกตัวอย่างเช่น

ความสามารถในการต้านแบคทีเรีย อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผสมลงในสีสามารถฆ่าแบคทีเรีย และกำจัดฝุ่นละอองได้ เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยรังสีอุลตร้าไวโอเลตจากแสงอาทิตย์ ทำให้พื้นผิวที่ทาสีมีคุณสมบัติในการทำความสะอาดตัวเองได้โดยสามารถกำจัดแบคทีเรียได้ด้วยความยาวคลื่นแสงที่อยู่ภายในอาคาร เช่น แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ สามารถนำไปใช้ได้ในสถานที่ต่างๆ โดยเฉพาะในโรงพยาบาลและสถานประกอบการ

ความสามารถด้านการกำจัดกลิ่น ไฮดรอกซีที่เกิดจากไททาเนียมไดออกไซด์สามารถกำจัดโมเลกุลของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds หรือ VOCs) อันเป็นสาเหตุของกลิ่นไม่พึงประสงค์ได้ เช่น กลิ่นของบุหรี่ ยาสูบ อุจจาระ น้ำมันเชื้อเพลิง และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีกหลายชนิดในอากาศ โดยการทำลายพันธะระหว่างโมเลกุลของสารเหล่านั้น ด้วยวิธีการนี้จะทำให้สารอินทรีย์ที่ระเหยอยู่ในอากาศแตกออกเป็นโมเลกุลเดี่ยว จึงไม่สามารถทำอันตรายหรือส่งผลต่อร่างกายมนุษย์ได้

ความสามารถในการฟอกอากาศ ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะสามารถกำจัดสารที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศได้ เช่น สารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ ควันบุหรี่ รวมถึงสารระเหยต่างๆ นอกจากนี้ ยังช่วยป้องกันเชื้อรา และคราบดำต่างๆ ที่จะเกาะผนังบ้าน รวมทั้งช่วยกำจัดสารทำลายชั้นบรรยากาศ เช่น ก๊าซคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) และก๊าซเรือนกระจกอื่น

ความสามารถป้องกันการเกิดหยดน้ำและคราบต่างๆ รวมทั้งทำให้เกิดสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง โดยเฉพาะการนำมาใช้เป็นส่วนผสมของสีทาผนังของอาคารทำให้ผนังตึกดูสะอาดและใหม่อยู่เสมอ



ที่มา http://chempowder.com/nano-TiO2.html; http://www.chemistry.ohio-state.edu/~dutta/index__files/Group__files/Joe%20O__files/CNT-TiO2.JPG

รูปที่ 2-5 ภาพขยายของอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์

2.6 วัสดุนาโนอื่นๆ

นอกจากวัสดุนาโนทั้ง 5 ประเภทที่กล่าวข้างต้นแล้ว ยังมีวัสดุนาโนอื่นๆ ที่เริ่มมีการผลิตและจำหน่ายเชิงพาณิชย์ สามารถสรุปได้ดังนี้

วัสดุนาโน	สมบัติพิเศษ	การประยุกต์ในทางอุตสาหกรรม
อนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์[6]	- สะท้อนรังสี UVA และ UVB - ยับยั้งแบคทีเรีย (Antibacterial) ลดโอกาสการเปลี่ยนรูปของแบคทีเรีย โดยหากลดขนาดให้มีอนุภาคระดับนาโนเมตรจะทำให้มีประสิทธิภาพในการต้านแบคทีเรียได้อย่างดีมาก โดยไม่จำเป็นต้องใช้แสงอุตราไวโอเล็ต (UV) ในการเร่งปฏิกิริยา - เป็นสารกึ่งตัวนำ	- เครื่องสำอาง ส่วนผสมของครีมหรือโลชั่นกันแดดโดยไม่ทิ้งคราบขาวเมื่อทา - สิ่งทอและเคมีภัณฑ์อื่นๆ การกำจัดกลิ่นของเสื้อผ้า ผลิตเส้นใยต้านแบคทีเรีย เส้นใยที่สามารถป้องกันรังสี UV ได้ - อาหารสัตว์และยา อนุภาคระดับนาโนทำให้อัตราการดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้สูงกว่า ทำให้ลดปริมาณการเติมซิงค์ออกไซด์ในอาหารได้ - เซรามิกซ์ ปกติจะใช้ซิงค์ออกไซด์ในการให้สีขาว การใช้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จะช่วยลดอุณหภูมิการเผาเซรามิกส์ และหลังการเผา ผิวของเซรามิกซ์มีความมันวาวราวกับกระจก - สี การเติมนาโนซิงค์ออกไซด์ในเรซินจะสามารถนำมาใช้ป้องกันไฟฟ้าสถิตได้

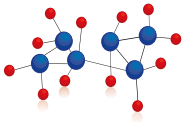
[6] ข้อมูลสมบัติและการประยุกต์ทั้งหมดได้จากวารสารนาโนเทคอินโฟ ปีที่ 2 ฉบับที่ 2 กุมภาพันธ์ 2549 http://www.nanotec.or.th/th/doc/88n8zQFC3nanotec__info__feb__2006.pdf

P 1-56 new.indd 18 24/2/2554 15:59:14

วัสดุนาโน	สมบัติพิเศษ	การประยุกต์ในทางอุตสาหกรรม
อนุภาคนาโนของแคลเซียมคาร์บอเนต	- ใช้ปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของโพลิเมอร์และยางให้ดีขึ้น เช่น ความทนทานต่อแรงดึง การฉีกขาด และการเสื่อมสภาพอันเนื่องจากความร้อน - คุณสมบัติสะท้อนแสงได้ดี ทำให้หน้าขาว	- ใช้เป็นสารตัวเติมในพลาสติกหลายชนิด เช่น โพลิโพรพิลีน (PP) โพลิเอสเทอร์เอไมด์ (PEA) - อุตสาหกรรมยาง (ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในยางธรรมชาติ) - กระดาษและหมึกพิมพ์ - สีและสารเคลือบ - เครื่องสำอาง - ยา
อนุภาคนาโนของทองคำ	เมื่อบดทองคำให้ละเอียดจนกลายเป็นผงนาโน ทองคำจะกลายเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) เพื่อเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งมีความเป็นพิษน้อยกว่าได้	- ใช้ในการควบคุมมลภาวะ เช่น การกำจัดมลพิษในอากาศ รวมไปถึงใช้ในการกำจัดกลิ่นและสารพิษ - เครื่องมือตรวจวัดเชิงโมเลกุลของสารเคมี (sensor) เช่น การตรวจสอบวัตถุระเบิด ยาเสพติด สารพิษตกค้างในน้ำอาหาร ผัก ผลไม้ ตรวจสอบน้ำสะอาด ก๊าซพิษในอากาศโดยเฉพาะสารที่ไม่มีกลิ่น และการตรวจวินิจฉัยทางการแพทย์ - ใช้ในการตรวจหาลายนิ้วมือแฝง (forensic fingerprint enhancement) - ชุดวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนในน้ำนมด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ
อนุภาคนาโนของซิลิโคน	ป้องกันการดูดซึมน้ำได้ดีเยี่ยม (super-hydrophobic effect)	- ผลิตภัณฑ์สี - สิ่งทอกันน้ำ (โพลิเอสเตอร์ให้ผลดีที่สุด)
อนุภาคนาโนของซิลิกอน ไดออกไซด์ (นาโนซิลิกา)	มีสมบัติที่แข็งแรง มีความเป็นรูพรุนสูง อีกทั้งยังเป็นสารกึ่งตัวนำ	- อุตสาหกรรมยาง (ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในยางธรรมชาติ) - ใช้เป็นสารตัวเติมในเครื่องสำอาง - เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงในด้านทันตกรรม - ใช้เติมในสีเพื่อเพิ่มความเหนียวข้น - อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ - ระบบนำส่งยา เช่น ใช้บรรจุยาเปปไทด์ ยีน โปรตีน รังสี นิวเคลียร์ หรือแม้แต่วัคซีน[7]

[7] http://www.medicthai.com/admin/news__cpe__detail.php?id = 616

บทที่ 3



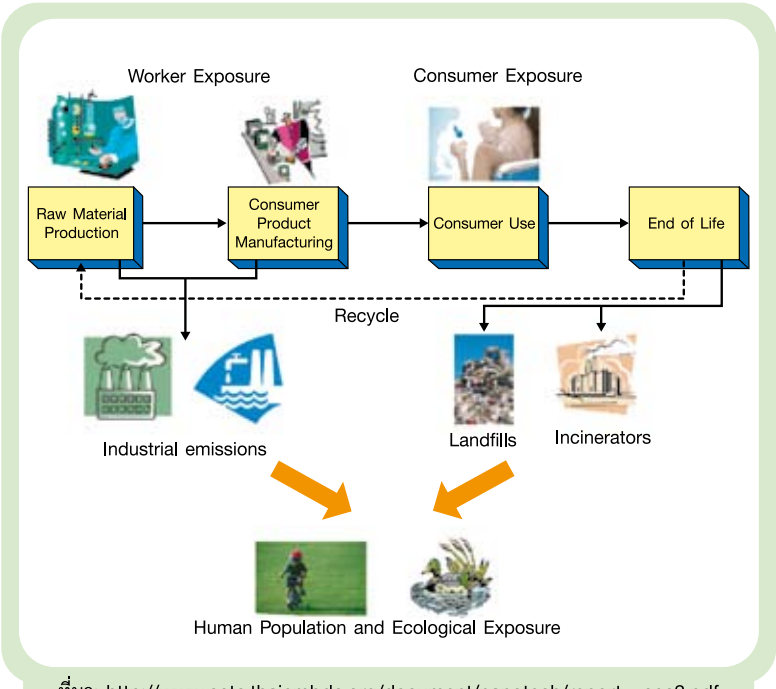
การศึกษาความปลอดภัย ของวัสดุและผลิตภัณฑ์นาโน

สิ่งใดที่ให้ประโยชน์มหาศาลก็มีความเสี่ยงอันตรายตามมาเช่นกัน ดังจะเห็นได้จากประสบการณ์ในอดีตที่พนักงานโรงงานทอผ้าป่วยเป็นโรคปอดลีบเนื่องจากการสัมผัสกับแร่ใยหิน (asbestos) จากบทเรียนของการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ ที่อาจก่อให้เกิดผลกระทบทางลบที่คาดไม่ถึงในช่วงแรก ทำให้นานาประเทศได้เริ่มให้ความสำคัญกับการศึกษาวิจัยความปลอดภัยของวัสดุนาโนและผลิตภัณฑ์นาโนมากขึ้นเรื่อยๆ

ข้อห่วงกังวลเกี่ยวกับวัสดุนาโนเกิดจากคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างไปจากวัสดุขนาดใหญ่ กล่าวคือ ด้วยขนาดที่เล็กมากของวัสดุนาโนจึงมีข้อห่วงกังวลว่าอนุภาคนาโนจะสามารถเข้าไปยังที่ที่อนุภาคขนาดใหญ่ไม่สามารถเข้าถึงได้ เช่น ถุงลมขนาดเล็กในปอด เส้นโลหิตฝอย รวมทั้งความสามารถในการเคลื่อนย้าย (translocation) จากเนื้อเยื่อชนิดหนึ่งไปยังเนื้อเยื่ออีกชนิดหนึ่งได้ง่าย เช่น จากปอดเข้าสู่กระแสโลหิตแล้วเข้าสู่สมอง เป็นต้น นอกจากนี้ พื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นอย่างมหาศาลของอนุภาคในระดับนาโน อาจส่งผลให้เกิดความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีและการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางชีวภาพที่อาจนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของความเป็นพิษได้ เช่น ธาตุคาร์บอนปกติจะไม่นำไฟฟ้าแต่กลับนำไฟฟ้าได้ดี เมื่อออกแบบโครงสร้างหรือปั่นเป็นเส้นใยนาโนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3-2 นาโนเมตร ส่วนธาตุทองจะไม่ทำปฏิกิริยากับสารประกอบรอบๆ แต่อนุภาคนาโนของทองจะทำลายแบคทีเรียและเซลล์สิ่งมีชีวิตอื่นๆ ได้ ส่วนโลหะเงินโดยปกตินั้นสามารถฆ่าจุลชีพได้ แต่จะมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นเมื่ออยู่ในลักษณะอนุภาคนาโน เป็นต้น

P 1-56 new.indd 20 24/2/2554 15:59:16

นอกจากนี้ สมบัติของวัสดุนาโนที่ผลิตขึ้น (engineered nanomaterials) จะไม่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีอย่างเดียว เพราะขนาด รูปร่าง พื้นที่ผิวสัมผัส และลักษณะการเคลือบผิว (surface coating) จะส่งผลต่อการทำงานของวัสดุนาโนดังกล่าว วัสดุนาโนสามารถผ่านเข้าสู่อวัยวะต่างๆ ของร่างกายทางกระแสเลือด ยิ่งไปกว่านั้น เนื่องจากวัสดุนาโนมีความคงทนสูงกว่าวัสดุแบบดั้งเดิมจึงทำให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมยาวนานกว่า เมื่อหมดอายุการใช้งานกลายเป็นขยะนาโน ในอนาคตหากมีการสะสมของขยะจากผลิตภัณฑ์นาโนเพิ่มขึ้นอย่างมาก ก็อาจก่อให้เกิดความเปลี่ยนแปลงความสมดุลของระบบนิเวศได้ ยกตัวอย่างเช่น การสะสมของอนุภาคนาโนของเงิน (silver nanomaterials) ซึ่งมีฤทธิ์ต้านเชื้อจุลชีพ อาจส่งผลเสียต่อเชื้อจุลชีพที่มีประโยชน์ในสิ่งแวดล้อมได้ ซึ่งถ้าส่วนล่างสุดของห่วงโซ่อาหารได้รับความกระทบกระเทือนก็จะส่งผลถึงด้านบนสุดของห่วงโซ่อาหารก็คือมนุษย์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3-1



ที่มา: http://www.ostc.thaiembdc.org/document/nanotech/report__sec3.pdf

รูปที่ 3-1 เส้นทางของวัสดุนาโนตลอดวงจรชีวิตผลิตภัณฑ์ (life-cycle perspective)

ลักษณะการได้รับสัมผัสวัสดุนาโนขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน เช่น ในผลิตภัณฑ์สเปรย์ที่มีวัสดุนาโนเป็นส่วนประกอบจะเพิ่มความเสี่ยงต่อการหายใจเข้าสู่ปอด หรือการสัมผัสที่ผิวหนัง แต่สำหรับวัสดุนาโนที่เป็นส่วนประกอบของสารละลาย เช่น ผลิตภัณฑ์สำหรับทำความสะอาดก็จะเพิ่มความเสี่ยงต่อการได้รับเข้าทางปาก เนื่องจากวัสดุนาโนอาจสะสมอยู่ในน้ำดื่มหรือในปลา ดังนั้นการศึกษาความเสี่ยงของวัสดุนาโนจึงมีความซับซ้อน และขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานไปตลอดจนถึงขั้นการหมดอายุใช้งาน อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงปัจจัยการสะสมของวัสดุนาโนเมื่อเวลาผ่านไปทั้งในอากาศ น้ำ ดินและตะกอน ถ้าจะพิจารณาความเสี่ยงต่อสุขภาพของพนักงานในสายการผลิตและพนักงานขนย้ายวัสดุนาโน ควรต้องพิจารณาระบบการรักษาความปลอดภัยในขั้นตอนการผลิต เก็บกัก และขนส่งเข้าไปด้วยกัน เช่น การกำหนดให้พนักงานสวมใส่อุปกรณ์ป้องกัน การติดตั้งระบบบำบัดมลพิษทางอากาศและระบบถ่ายเทอากาศที่ดีอย่างเพียงพอ เป็นต้น

ในบทนี้จะนำเสนอข้อมูลผลงานวิจัยทางด้านพิษวิทยา (toxicology) รวมทั้งศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการประเมินความเสี่ยง ได้แก่ การประเมินการได้รับสัมผัส (exposure assessment) และการเคลื่อนและการแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม (environmental fate) ซึ่งปัจจุบัน เริ่มมีผลงานวิจัยออกสู่สาธารณชนมากขึ้น แม้ว่าจะยังเป็นสัดส่วนที่ค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับผลงานวิจัยและพัฒนาใช้ประโยชน์จากนาโนเทคโนโลยี ทั้งนี้จะนำเสนอตัวอย่างงานวิจัยความเป็นพิษของวัสดุนาโนที่มีการผลิตและใช้อย่างมากในปัจจุบันได้แก่ ท่อนาโนคาร์บอน อนุภาคนาโนของเงิน และอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์[8] ทั้งนี้ ระดับความเสี่ยงหรือความเป็นอันตรายของวัสดุนาโนนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณและระยะเวลาในการได้รับวัสดุนาโนนั้นๆ เข้าสู่ร่างกาย โดยกลุ่มเสี่ยงมีทั้งกลุ่มผู้ปฏิบัติงานและกลุ่มผู้บริโภค รวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากของเสียที่ปนเปื้อนวัสดุนาโน

[8] ข้อมูลความเป็นพิษของวัสดุนาโนที่นำเสนอส่วนใหญ่อ้างอิงจากรายงานของสหภาพยุโรป Engineered Nanoparticles: Review of Health and Environmental Safety (ENRHES) (2010) ซึ่งเป็นโครงการความร่วมมือของมหาวิทยาลัยและสถาบันต่างๆ ในยุโรป ได้แก่ Edinburgh Napier University, Institute of Occupational Medicine (ION), Technical University of Denmark (DTU), Institute for Health and Consumer Protection of the European Commission's Joint Research Centre (JRC), and the Institute of Nanotechnology (IoN), Professor Vicki Stone เป็นผู้ประสานงานโครงการ http://nmi.jrc.ec.europa.eu/documents/pdf/ENRHES%20Review.pdf

P 1-56 new.indd 22 24/2/2554 15:59:17

3.1 ผลการศึกษาความเป็นอันตรายจากการสูดหายใจอนุภาคนาโนเข้าสู่ร่างกาย

ข้อห่วงกังวลเกี่ยวกับความปลอดภัยนาโนเทคโนโลยีมักจะมุ่งเน้นไปที่อนุภาคหรือละอองนาโน (aerosol nanoparticles) ที่สามารถฟุ้งกระจายและแขวนลอยในอากาศเป็นเวลานาน ซึ่งหากสูดหายใจรับอนุภาคนาโนเข้าสู่ร่างกายเป็นเวลานานและ/หรือในปริมาณมากอาจก่อให้เกิดการสะสมของอนุภาคนาโนอยู่ในร่างกาย อย่างไรก็ตาม อัตราการสะสมของอนุภาคนาโนในร่างกายขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ขนาดของอนุภาคนาโน การรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (agglomeration) อัตราการหายใจ สภาวะร่างกายโดยเฉพาะที่เป็นโรคปอดหรือโรคทางเดินหายใจ เป็นต้น

3.1.1 ท่อนาโนคาร์บอน

ปัจจุบันมีงานวิจัยทดสอบความเป็นพิษหลายฉบับที่รายงานว่าท่อนาโนคาร์บอนที่มีขนาดยาวและบางโดยเฉพาะชนิดผนังหลายชั้น (MWCNT) อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพในลักษณะเดียวกับแร่ใยหิน (Muller *et al*., 2005; Poland *et al*., 2008; Takagi *et al*., 2008) จากการทดลองกับหนู พบว่าเส้นใยขนาดยาวและบางของท่อนาโนคาร์บอนสามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปในปอดได้และสามารถสะสมอยู่ในปอดเป็นเวลานาน (biopersistent) ทำให้เกิดอาการปอดอักเสบและลุกลามกลายเป็นมะเร็งเยื่อหุ้มปอด (mesothelioma) ได้ เนื่องจากปอดไม่สามารถขจัดวัตถุแปลกปลอมที่มีลักษณะเป็นเส้นใยขนาดยาวและบางมากเหล่านี้ได้ (Deng *et al*. 2007)

3.1.2 อนุภาคนาโนของเงิน

มีงานศึกษาวิจัยความเป็นพิษของอนุภาคนาโนของเงินจากการสูดหายใจโดยใช้หนูเป็นสัตว์ทดลอง พบว่า เมื่อสูดหายใจเข้าสู่ปอดแล้ว อนุภาคนาโนสามารถเคลื่อนไปยังอวัยวะต่างๆ ได้ผ่านกระแสเลือด โดยพบการสะสมในตับ ม้าม ไต หัวใจและสมอง (Takenaka *et al*. 2001; Sung *et al*. 2009; Ji *et al*. 2007) ในงานวิจัยของ Sung *et al*. (2009) พบว่า หลังจากที่หนูทดลองได้รับอนุภาคนาโนของเงินติดต่อกันเป็นระยะเวลา 90 วัน เริ่มมีอาการ

อักเสบภายในปอดและทำให้สภาวะการทำงานของปอดเปลี่ยนแปลงไป แต่งานศึกษาที่ผ่านมายังไม่ได้ชี้ชัดถึงสถานะของเงินที่ทำให้เกิดความเป็นพิษว่าเกิดจากเงินไอออน (Ag^+) หรืออนุภาคนาโนของเงิน หรือทั้งสองสถานะประกอบกัน

3.1.3 อนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์

มีงานวิจัยที่ศึกษากับหนูทดลอง โดยให้หนูสูดอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 500 ไมโครกรัม สลับวันเว้นวันเป็นระยะเวลา 1 เดือน พบว่า มีการสะสมของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในสมองของหนู (บริเวณ Hippocampus และ olfactory bulb) นักวิจัยคาดว่าการสะสมในสมองน่าจะมาจากการเคลื่อนของอนุภาคนาโนผ่านเซลล์ประสาท (Wang *et al.* 2008a, 2008b)

มีงานศึกษาในสัตว์ทดลองหลายชิ้นที่ชี้ให้เห็นว่า อนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ (ขนาด 20-30 นาโนเมตร) มีความเป็นพิษมากกว่าอนุภาคที่ใหญ่กว่า (มากกว่า 100 นาโนเมตร) (Ferin *et al.* 1992; Renwick *et al.* 2004; Chen *et al.* 2006; Inoue *et al.* 2008) ความเป็นพิษที่พบได้แก่ อาการอักเสบของปอด ความเสียหายของเยื่อบุผิว การเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านของเยื่อหุ้มปอดและความเป็นพิษต่อเซลล์ นอกจากขนาดของอนุภาคแล้ว ชนิดของไททาเนียมไดออกไซด์ก็มีผลต่อระดับความเป็นพิษ ในงานศึกษาของ Warheit *et al.* (2007) พบว่า รูปผลึกแบบอานาเทสของไททาเนียมไดออกไซด์ทำให้อนุภาคมีความเป็นพิษมากกว่ารูปผลึกแบบรูไทล์

3.2 ผลการศึกษาความเป็นอันตรายจากการสัมผัสทางผิวหนังหรือการกินอนุภาคนาโน

มีรายงานการศึกษาความเป็นพิษจากการสัมผัสทางผิวหนังหรือการกินวัสดุ/อนุภาคนาโน จึงมีข้อห่วงกังวลว่าการสัมผัสอนุภาคนาโนบางประเภทอาจส่งผลให้อนุภาคนาโนซึมผ่านทะลุชั้นผิวหนังและเข้าสู่กระแสเลือดได้

P 1-56 new.indd 24 24/2/2554 15:59:18

3.2.1 ท่อนาโนคาร์บอน

มีผลการศึกษาความเป็นพิษของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (MWCNT) ทางการกิน พบว่า อนุภาคของท่อนาโนคาร์บอนส่วนใหญ่จะถูกขับออกมาพร้อมอุจจาระ แต่มีบางส่วนที่สะสมอยู่ในช่องท้อง ลำไส้เล็กและลำไส้ใหญ่ โดยไม่พบการเคลื่อนเข้าสู่กระแสโลหิต (Deng *et al.* 2007)

งานวิจัยความเป็นพิษของท่อนาโนคาร์บอนจากการสัมผัสทางผิวหนัง โดยศึกษากับหนูทดลองในระดับความเข้มข้นของอนุภาคที่แตกต่างกันเป็นระยะเวลา 5 วัน พบว่า ระดับความเข้มข้นที่ 160 ไมโครกรัม ทำให้ผิวหนังหนาขึ้นและเกิดอาการอักเสบ เช่นเดียวกับงานวิจัยที่ทดสอบกับเซลล์พบการอักเสบและความเสียหายต่อเซลล์ผิวหนังเนื่องจากอนุมูลอิสระจากท่อนาโนคาร์บอนทั้งชนิดผนังเดี่ยว (SWCNT) และผนังหลายชั้น (MWCNT) (Shvedova *et al.* 2003; Monteiro-Riviere *et al.* 2005a; Zhang *et al.* 2007) อย่างไรก็ดี ยังขาดงานศึกษาในสัตว์ทดลองที่บ่งชี้ถึงความสามารถในการซึมผ่านชั้นผิวหนังของท่อนาโนคาร์บอน

3.2.2 อนุภาคนาโนของเงิน

โอกาสการได้รับอนุภาคนาโนของเงินผ่านการกิน เกิดขึ้นในกรณีการกินสารแขวนลอยเงิน (colloidal silver) ซึ่งมีการโฆษณาในต่างประเทศว่าสามารถรักษาอาการต่างๆ รวมถึงภาวะข้ออักเสบและมะเร็ง อย่างไรก็ดี มีงานศึกษาความเป็นพิษ (Wadhera and Fung 2005; Chang *et al.* 2006) ชี้ให้เห็นว่า การกินสารแขวนลอยเงินก่อให้เกิดภาวะอาร์ไจเรีย (Argyria) อันเกิดจากการตกค้างของอนุภาคเงินตามเนื้อเยื่อต่างๆ ของร่างกายในปริมาณมาก ทำให้สีผิวเปลี่ยนเป็นสีเทาหรือสีน้ำเงิน (รูปที่ 3-2) นอกจากนี้ ยังก่อให้เกิดภาวะอักเสบและความเป็นพิษต่อตับ (Kim *et al.* 2008)

การใช้อนุภาคนาโนของเงินในผ้าปิดแผลทำให้อนุภาคนาโนของเงินมีโอกาสสัมผัสกับผิวหนังได้โดยตรง โดยมีรายงานอาการไม่พึงประสงค์ที่พบจากการใช้ผ้าปิดแผลไฟไหม้ที่มีผลึกเงินนาโนของ silver sulfadiazine ได้แก่ อาการคล้ายอาร์ไจเรียและความผิดปกติของตับ (Trop *et al.* 2006; Arora *et al.* 2008)

ที่มา: http://en.wikipedia.org/wiki/Argyria

รูปที่ 3-2 ภาวะอาร์ไจเรียจากการกินสารแขวนลอยเงิน

3.2.3 อนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์

จากการศึกษาของ Wang *et al.* (2007) โดยให้หนูได้รับอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ (ขนาด 25 และ 80 นาโนเมตร) ผ่านทางปาก เมื่อเวลาผ่านไป 2 สัปดาห์ พบการกระจายตัวของอนุภาคนาโนไปยังตับ ม้าม ปอดและไต ชี้ให้เห็นว่า อนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์สามารถเคลื่อนตัวไปยังอวัยวะต่างๆ ได้ผ่านทางกระแสโลหิต นอกจากนั้น Trouiller *et al.* (2009) ทดลองให้หนูดื่มน้ำที่มีอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ในวันที่ห้าของการดื่มน้ำ เริ่มพบความเสียหายเกิดขึ้นที่สารพันธุกรรม (genetic damage) เนื่องจากอนุภาคนาโนสามารถเข้าสู่เซลล์และถูกสะสมในอวัยวะต่างๆ โดยที่ร่างกายไม่สามารถขจัดออกไปได้ ส่งผลรบกวนกระบวนการต่างๆ ภายในเซลล์จึงมีความเสี่ยงที่จะเกิดความผิดปกติทางพันธุกรรมและ/หรือมะเร็งได้

การได้รับอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ผ่านทางผิวหนังอาจเกิดขึ้นได้จากการใช้เครื่องสำอางและครีมกันแดด รวมทั้งการสัมผัสกับผลิตภัณฑ์สีและน้ำมันเคลือบเงา มีงานศึกษาจำนวนมากทั้งงานศึกษากับสัตว์ทดลอง *(in vivo)* และในเซลล์เพาะเลี้ยง *(in vitro)* ที่ศึกษาการซึมผ่านของอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวหนังและความเป็นพิษที่อาจเกิดขึ้น ผลการศึกษาส่วนใหญ่พบว่า อนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ไม่สามารถซึม

P 1-56 new.indd 26 24/2/2554 15:59:19

ผ่านทะลุชั้นหนังกำพร้า *(Stratum Corneum)* ไปยังผิวหนังชั้นในได้ (Mavon *et al.* 2007; Schulz *et al.* 2002; Kiss *et al.* 2008; Gamer *et al.* 2006; Pflucker *et al.* 1999; Dussert *et al.* 1997) อย่างไรก็ดี จำเป็นต้องมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในส่วนความเป็นพิษในกรณีที่ทาบนสภาพผิวอักเสบ เช่น ผิวไหม้เกรียมจากแดด ผิวที่มีบาดแผล หรือผิวที่เป็นโรค

3.3 ผลการศึกษาความเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศ

วัสดุนาโนอาจแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้ผ่านการปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรม (ทางอากาศ น้ำเสีย และของเสีย) หรือการรั่วไหลระหว่างการขนส่ง รวมทั้งการแพร่กระจายจากผลิตภัณฑ์ที่มีวัสดุนาโน (ในช่วงการใช้งาน การกำจัด หรือการเสื่อมสภาพ) ดังนั้น การกระจายของอนุภาคนาโนสู่สิ่งแวดล้อมจึงเชื่อมโยงกับวงจรชีวิตของวัสดุนาโนตั้งแต่การผลิต การใช้ และการบำบัดของเสีย อนุภาคนาโนที่ถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมสามารถทำปฏิกิริยากับอนุภาคอื่นๆ เกิดการเปลี่ยนรูปและปรับเปลี่ยนองค์ประกอบที่แตกต่างไปจากเดิมและอาจแพร่กระจายไปยังสภาพแวดล้อม (ทางน้ำ อากาศ ดิน) ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต และระบบนิเวศได้

3.3.1 ท่อนาโนคาร์บอน

งานศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่และการแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม (environmental fate) ของท่อนาโนคาร์บอนยังมีอยู่น้อยมาก อย่างไรก็ดีมีรายงานวิจัยหลายชิ้นที่พบความเป็นพิษต่อปลา (ตัวอ่อนและลูกปลา) และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ เช่น ไรน้ำ แอมฟิพอด โพรโทซัว ตัวอ่อนของกบ แบคทีเรีย (*Escherichia coli*) ไส้เดือน (Cheng *et al.* 2007; Smith *et al.* 2007; Roberts *et al.* 2008; Kennedy *et al.* 2008; Zhu *et al.* 2008b; Mouchet *et al.* 2008; Kang *et al.* 2008; Scott Fordsmand *et al.* 2008) แต่ยังไม่สามารถหาข้อสรุปที่ชัดเจนได้เนื่องจากมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อความเป็นพิษ ได้แก่ ลักษณะและคุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน รวมทั้งสิ่งปลอมปน (impurities)

3.3.2 อนุภาคนาโนของเงิน

ในปัจจุบัน เริ่มมีการศึกษาการปลดปล่อยอนุภาคเงินนาโนจากการซักล้างผลิตภัณฑ์ประเภทเครื่องนุ่งห่มสู่สิ่งแวดล้อม Benn and Westerhoff (2008) ได้ทำการทดลองโดยนำถุงเท้าที่เคลือบอนุภาคนาโนของเงิน จำนวน 6 คู่ ที่วางจำหน่ายในสหรัฐอเมริกา มาแช่ในน้ำกลั่นแล้วเขย่าต่อเนื่องนาน 1 ชั่วโมง จากนั้น นำน้ำที่แช่ถุงเท้าไปตรวจสอบหาอนุภาคของเงิน พบว่า ถุงเท้าที่มาจากแหล่งผลิตต่างกัน มีการปลดปล่อยอนุภาคของเงินลงสู่น้ำในปริมาณที่ไม่เท่ากัน บางคู่ปล่อยอนุภาคเงินออกมาปริมาณมากในการซักครั้งแรกๆ บางยี่ห้อค่อยๆ ปล่อยออกมา บางยี่ห้อไม่ปล่อยเงินหลุดออกมาเลย นักวิจัยคาดว่าเป็นผลมาจากเทคโนโลยีการผลิตในการยึดอนุภาคนาโนให้ติดอยู่กับเส้นใยของถุงเท้า

อีกงานวิจัยหนึ่งในสวิตเซอร์แลนด์ Geranio, Heuberger and Nowack (2009) ได้ทดสอบการปลดปล่อยของอนุภาคนาโนของเงินในช่วงการซักผ้า 9 ชนิดที่มีการเคลือบอนุภาคนาโนของเงินบนผ้าหรือในเส้นใย ผลการศึกษาพบว่าอัตราการหลุดของอนุภาคนาโนของเงินจากผ้าแตกต่างกันไปตามบริษัทผู้ผลิต โดยมีอัตราการหลุดตั้งแต่ร้อยละ 1 ไปจนถึงร้อยละ 45 และอนุภาคนาโนของเงินที่หลุดออกมาส่วนใหญ่ (ร้อยละ 75) มีขนาดใหญ่กว่า 450 นาโนเมตร นอกจากนี้นักวิจัยยังพบว่า การใช้สารฟอกขาวสามารถเร่งการหลุดร่อนของอนุภาคเงินจากผ้าได้

มีผลงานวิจัยจำนวนมากที่แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของเงินที่อยู่ในน้ำทิ้งและหลุดออกสู่สิ่งแวดล้อมอาจจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและห่วงโซ่อาหารได้ มีรายงานวิจัยที่พบความเป็นพิษของอนุภาคนาโนของเงินต่อปลาม้าลาย *(Danio rerio)* (Griffitt *et al.* 2008; Asharani *et al.* 2008; Yeo and Kang 2008) ไรน้ำ (Griffitt *et al.* 2008) และสาหร่ายสีเขียว (Griffitt *et al.* 2008; Navarro *et al.* 2008)

นอกจากนี้ ยังมีรายงานการศึกษาหลายชิ้นที่แสดงให้เห็นถึงความเป็นพิษของอนุภาคนาโนของเงินต่อแบคทีเรียในดิน (Nitrifying bacteria) และแบคทีเรียชนิด *Pseudomonas fluorescens* (Choi and Hu 2008;

P 1-56 new.indd 28 24/2/2554 15:59:20

Choi *et al.* 2008; Fabrega *et al.* 2009) ข้อค้นพบดังกล่าวเป็นเครื่องยืนยันข้อห่วงกังวลเกี่ยวกับผลกระทบทางลบของอนุภาคนาโนของเงินที่อาจส่งผลต่อการกำจัดแบคทีเรียที่มีความจำเป็นในระบบนิเวศ เช่น แบคทีเรียบางชนิดที่มีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อรา แบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในดิน หรืออาจส่งผลให้เกิดการเพิ่มความต้านทานของเชื้อแบคทีเรียบางชนิด อย่างไรก็ดี ยังไม่มีข้อสรุปที่ชัดเจนว่าอนุภาคนาโนของเงินมีความเป็นพิษมากกว่าเงินไอออนหรือไม่ (Choi *et al.* 2008; Yeo and Kang 2008)

3.3.3 อนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์

ปัจจุบัน เริ่มมีงานศึกษาการแพร่กระจายของอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์สู่สิ่งแวดล้อม ดังเช่น งานศึกษาของ Kaegi *et al.* (2008) ซึ่งได้ทดสอบการชะละลายของอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ในสีที่ทาภายนอกของบ้าน โดยการใช้โมเดลและในสภาพที่เกิดขึ้นจริง (ผนังบ้านจริงที่ตากแดดตากฝนเป็นเวลา 2 ปี) พบว่าการชะละลายของอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์จากผนังบ้านจริงอยู่ที่ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 20-300 นาโนเมตร นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่พบการสะสมของอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ในสิ่งแวดล้อม (Zhang *et al.* 2007; Sun *et al.* 2007)

ในส่วนงานวิจัยที่ทดสอบความเป็นพิษของอนุภาคนาโนของไททา-เนียมไดออกไซด์ต่อสิ่งแวดล้อม ผลการทดสอบความเป็นพิษเฉียบพลันต่อปลาและสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังยังไม่ปรากฏผลถึงตาย แต่สามารถทำให้เกิดความเสียหายได้ เช่น การเปลี่ยนแปลงการทำงานของสมองในปลา (Vevers and Jha 2008; Zhu *et al.* 2008a; Federici *et al.* 2007) นอกจากนี้ มีงานวิจัยพบว่าไททาเนียมไดออกไซด์ (รวมทั้งซิงค์ออกไซด์ และอลูมีเนียมออกไซด์) ทั้งอนุภาคนาโนและอนุภาคที่ใหญ่กว่าระดับนาโนก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อไส้เดือนดิน (*C. elegans*) โดยมีผลยับยั้งการเติบโตและความสามารถในการสืบพันธุ์ของไส้เดือนดิน ทั้งนี้นักวิจัยพบว่า อนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์มีความเป็นพิษมากกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า (Wang, Wick and Xing 2009)

3.4 ความเสี่ยงต่อการเกิดไฟไหม้และการระเบิดจากวัสดุนาโน

ขนาดอนุภาคหรือพื้นที่ผิวเป็นปัจจัยหนึ่งที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาไวไฟและการระเบิดได้ ด้วยเหตุนี้จึงมีข้อห่วงกังวลว่าวัสดุนาโนอาจมีคุณสมบัติที่ก่อให้เกิดการระเบิดและการติดไฟได้ง่าย พื้นที่ผิวจำนวนมหาศาลอาจส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่ไม่สามารถควบคุมได้ อย่างไรก็ดี จนถึงปัจจุบันยังไม่มีงานศึกษาในเรื่องความเสี่ยงของวัสดุนาโนต่อการระเบิด แต่สามารถอิงจากข้อมูลที่มีอยู่เกี่ยวกับฝุ่นผงขนาดเล็กและเล็กมาก (fine and ultrafine powders) แต่ก็ไม่สามารถเทียบเคียงได้ทั้งหมด เนื่องจากวัสดุนาโนมีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพที่แตกต่างจากฝุ่นขนาดเล็กที่มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคระดับนาโน

นอกจากลักษณะในแง่ขนาดและพื้นที่ผิวแล้ว ยังมีลักษณะอื่นๆ เช่น ประเภท องค์ประกอบทางเคมี ความสามารถในการติดไฟ รวมทั้งสภาวะแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น แรงดัน ที่มีอิทธิพลต่อการระเบิด ตัวอย่างวัสดุหรือสารที่มีความเสี่ยงต่อการติดไฟหรือระเบิดสูงหากถูกลดขนาดให้อยู่ในระดับนาโนเมตร ได้แก่ สารอินทรีย์และโลหะ เช่น อลูมีเนียม แมกนีเซียม เซอร์โคเนียม ลิเทียม และสารอนินทรีย์บางชนิด (British Standard Institute, 2007)

P 1-56 new.indd 30 24/2/2554 15:59:21

บทที่ 4

แนวทางการจัดการ เพื่อความปลอดภัยของวัสดุและผลิตภัณฑ์นาโน

การบริหารจัดการความเสี่ยงที่เกิดจากการผลิตและใช้วัสดุและผลิตภัณฑ์นาโน (British Standard Institute, 2007) ควรเริ่มจากการดำเนินกระบวนการประเมินความเสี่ยงในสภาพการณ์จริงแล้วพิจารณาแนวทางควบคุมการได้รับสัมผัส การเลือกระดับการควบคุมการได้รับสัมผัสที่เหมาะสม รวมทั้งการให้ข้อมูลและฝึกอบรม นอกจากนี้ ควรพิจารณาเตรียมการจัดการหากเกิดอุบัติเหตุรั่วไหลของวัสดุนาโน แนวทางการป้องกันการระเบิดและการเกิดไฟไหม้ รวมทั้งแนวทางการจัดการของเสีย เพื่อให้เกิดการบริหารจัดการความปลอดภัยนาโนตลอดวงจรชีวิต ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

4.1 กระบวนการประเมินความเสี่ยง

ขั้นตอนแรกของการประเมินความเสี่ยง คือ การเก็บรวบรวมข้อมูล ในกรณีที่เรายังไม่มีข้อมูลความปลอดภัยเกี่ยวกับวัสดุนาโนที่ใช้ จำเป็นจะต้องจัดให้วัสดุนาโนนั้นเป็นวัตถุอันตรายและใช้มาตรการควบคุมหรือป้องกันการได้รับสัมผัสวัสดุนาโนนั้นอย่างเข้มงวด ผู้ประกอบการควรเริ่มต้นจากการเก็บข้อมูลวัสดุที่ใช้และลักษณะการทำงาน รวมถึงขั้นตอนการซ่อมบำรุง และการทำความสะอาด ข้อมูลที่ควรมีการเก็บรวบรวมเพื่อใช้ในการประเมินความเสี่ยงมีดังต่อไปนี้

- ชื่อทางเทคนิคและชื่อทางการค้าของวัสดุ/วัตถุดิบที่ใช้
- มีเอกสารข้อมูลความปลอดภัย (SDS) หรือไม่
- องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ/วัตถุดิบนั้นคืออะไร
- มีองค์ประกอบเป็นวัสดุนาโนหรือไม่ สัดส่วนเท่าใด
- วัสดุนาโนมีลักษณะยาวและบางหรือไม่
- วัสดุ/วัตถุดิบที่ใช้มีลักษณะเป็นผง/ฝุ่นหรือไม่

- วัสดุ/วัตถุดิบที่ใช้มีอุปกรณ์ป้องกันฝุ่นหรือไม่
- วัสดุ/วัตถุดิบที่ใช้สามารถละลายในน้ำหรือไม่
- วัสดุ/วัตถุดิบที่ใช้มีความเป็นอันตรายหรือความเป็นพิษอย่างไร

สำหรับวัสดุนาโนที่มีการผลิตเชิงพาณิชย์ ข้อมูลบางประเภทอาจปรากฏอยู่ในเอกสารข้อมูลความปลอดภัย (Safety Data Sheet: SDS) แต่ควรตรวจสอบว่าผู้ผลิตได้คำนึงถึงลักษณะของสารในระดับนาโนเมตรมากน้อยเพียงใด

ในกระบวนการประเมินความเสี่ยง ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ (1) การประเมินความเป็นอันตราย (hazard assessment) (2) การประเมินระดับการได้รับสัมผัส (exposure assessment) และ (3) การประเมินความเสี่ยง (risk assessment)

4.1.1 การประเมินความเป็นอันตราย

อนุภาคนาโนที่อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพมากที่สุดคือ อนุภาคที่สามารถลอยในอากาศและเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอนุภาคที่มีคุณสมบัติไม่ละลาย ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อปอด อย่างไรก็ดี ยังจำเป็นต้องให้ความสำคัญกับช่องทางการได้รับสัมผัสอื่นๆ ด้วย เช่น การสัมผัสทางผิวหนังหรือการกลืนกิน รวมทั้งความเสี่ยงจากการติดไฟและการระเบิด

ในเบื้องต้นอาจจัดกลุ่มการประเมินความเป็นอันตรายของวัสดุนาโนออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่

กลุ่มที่ 1 สารที่ลักษณะเป็นเส้นใย (Fibrous): วัสดุนาโนที่ลักษณะยาวและไม่ละลาย

กลุ่มที่ 2 สารก่อมะเร็งและสารพิษอื่นๆ (CMAR): วัสดุนาโนที่มาจากวัสดุที่พบว่าเป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogenetic toxin) สารก่อการกลายพันธุ์ (mutagenic toxin) สารก่อโรคหอบหืด (asthmagenic toxin) หรือสารที่มีพิษต่อระบบสืบพันธุ์ (reproductive toxin)

กลุ่มที่ 3 สารที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble): วัสดุนาโนที่มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยที่ไม่อยู่ในกลุ่มที่ 1 และ 2

กลุ่มที่ 4 สารที่ละลายน้ำ (Soluble): วัสดุนาโนที่ละลายน้ำได้และอยู่นอกเหนือจากกลุ่มที่ 1 และ 2

P 1-56 new.indd 32 24/2/2554 15:59:23

การประเมินความเสี่ยง ควรพิจารณาความเป็นอันตรายหรือความเป็นพิษของวัสดุนาโน โดยเปรียบเทียบกับวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่าหรือเทียบกับวัสดุนาโนอื่น

4.1.2 การประเมินระดับการได้รับสัมผัส

ความเสี่ยงขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุและระดับการได้รับสัมผัสกับวัสดุนาโนนั้นๆ ข้อมูลที่ควรมีการเก็บรวบรวมเพื่อช่วยในการประเมินระดับการได้รับสัมผัส ได้แก่

- ลักษณะงานที่อาจทำให้ผู้ปฏิบัติงานได้รับสัมผัสวัสดุนาโนมีอะไรบ้างและมีโอกาสได้รับสัมผัสมากน้อยเพียงใด (เช่น การผลิต การทำความสะอาด การซ่อมบำรุง การขนส่งและการจัดเก็บ รวมถึงกรณีการเกิดอุบัติเหตุ)
- ผู้ที่อาจได้รับสัมผัสกับวัสดุนาโนในระหว่างการทำงานเป็นใครบ้าง อาทิ ผู้ปฏิบัติงานฝ่ายการผลิต ผู้สนับสนุน เช่น พนักงานทำความสะอาด พนักงานซ่อมบำรุง ผู้จัดการ นักวิจัย พนักงานในสำนักงาน รวมทั้งผู้บริโภค กลุ่มเสี่ยงจะแตกต่างกันไปตามช่วงของการวิจัย การพัฒนา และการผลิตเชิงอุตสาหกรรม ดังแสดงในรูปที่ 4-1
- ช่องทางการได้รับสัมผัสที่เป็นไปได้ (เช่น การหายใจเข้า การกลืนกิน การสัมผัสกับผิวหนัง)
- ความถี่ในการได้รับสัมผัสมากน้อยเพียงใด
- วัสดุนาโนสามารถลอยในอากาศ หรือสะสมตามพื้นที่ทำงานอันเป็นเหตุให้ผู้ปฏิบัติงานหายใจเข้าหรือสัมผัสถูกผิวหนังได้หรือไม่
- มาตรการควบคุมระดับการได้รับสัมผัสที่สามารถนำมาใช้สำหรับการทำงานลักษณะต่างๆ ได้ มาตรการควบคุมรวมถึงการแยกผู้ปฏิบัติงานออกจากจุดเสี่ยงโดยการใช้ห้องหรือระบบปิด หรือการระบายอากาศ การฝึกอบรม และการใช้อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล

4.1.3 การประเมินความเสี่ยง

การศึกษาความเป็นอันตรายของวัสดุนาโนและการประเมินระดับการได้รับสัมผัสจะนำไปสู่การประเมินระดับความเสี่ยงที่คาดว่าจะเกิดขึ้น เพื่อนำไปสู่การตัดสินใจจัดการกับความเสี่ยงนั้น โดยหากผลการประเมินพบว่า มีความ

เสี่ยงสูง ผู้ประกอบการจำเป็นต้องใช้มาตรการป้องกันไว้ก่อน ระดับความเสี่ยงอาจพิจารณาได้จากความเสี่ยงต่อสุขภาพว่ามีความรุนแรงมากน้อยเพียงใด ความเสี่ยงนั้นจะเกิดขึ้นเร็วเพียงใด และเราสามารถจัดการกับความเสี่ยงนั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพเพียงใด

4.2 แนวทางการควบคุมการได้รับสัมผัส

ในขณะที่ข้อมูลความเป็นอันตรายของวัสดุนาโนยังไม่ชัดเจน แนวทางที่ควรใช้คือ การยึดหลักระวังไว้ก่อน (precautionary principle) โดยการควบคุมการได้รับสัมผัสกับวัสดุนาโนในระหว่างการทำงานนั้น อาจจัดระดับการควบคุมออกเป็น 6 ระดับ ดังต่อไปนี้

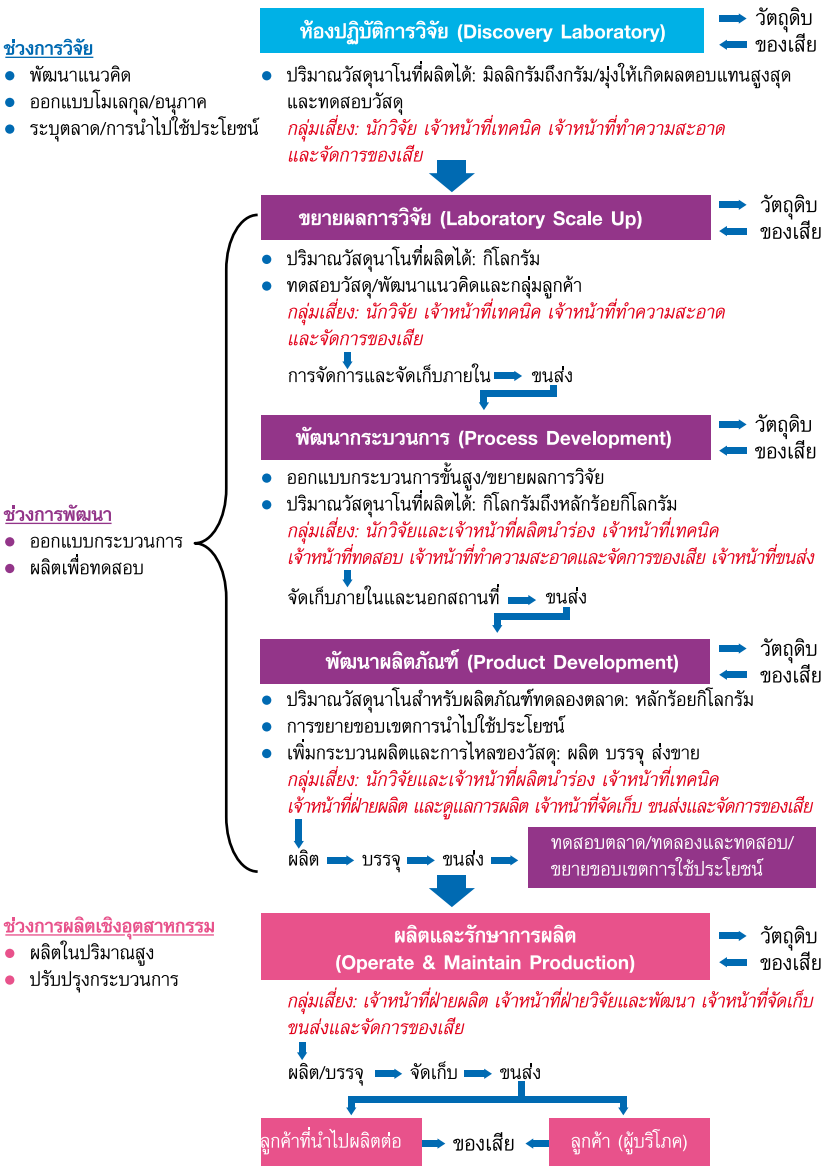
ระดับที่ 1 หลีกเลี่ยงหรือเลิกใช้วัสดุนาโนที่พบว่าเป็นอันตราย: หลีกเลี่ยงการใช้วัสดุนาโนที่เป็นอันตรายหรือกระบวนการที่อาจก่อให้เกิดการได้รับสัมผัสกับวัสดุนาโนนั้นๆ แม้ว่าแนวทางนี้อาจเป็นไปได้ยากหากผู้ประกอบการได้ตัดสินใจเลือกใช้วัสดุนาโนจากคุณสมบัติเฉพาะ แต่ผู้ประกอบการควรพิจารณาด้วยว่าการเลือกใช้วัสดุนาโนดังกล่าวนั้นคุ้มกับความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นหรือไม่

ระดับที่ 2 ทดแทนหรือเปลี่ยนรูป: เปลี่ยนไปใช้วัสดุหรือสารอื่นที่มีความเสี่ยงน้อยกว่า แม้ว่าการทดแทนวัสดุจะทำได้ลำบาก แต่ควรพิจารณาลดระดับการได้รับสัมผัสด้วยการเปลี่ยนวัสดุนาโนที่เป็นผงให้อยู่ในรูปของเหลวหรือของแข็งแทน

การปรับเปลี่ยนคุณสมบัติบางประการของวัสดุนาโนอาจช่วยลดความเป็นพิษได้ (Safe Work Australia, 2009) ตัวอย่างเช่น

- ฟลูเลอรีน (Fullerene) หากปรับเปลี่ยนรูปของฟลูเลอรีนพื้นฐาน (C_{60}) ให้เป็นรูปอื่นโดยการทำปฏิกิริยาตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ (carboxylation) และการทำปฏิกิริยาไฮดรอกซีเลชัน (hydroxylation) จะทำให้เกิดฟลูเลอรีนรูปใหม่ ($C_{60}(OH)_{20}$) ซึ่งมีความเป็นพิษน้อยลง

P 1-56 new.indd 34 24/2/2554 15:59:23



ที่มา: ปรับจาก Schulte *et al.* (2008)

รูปที่ 4-1 กลุ่มเสี่ยงต่อการได้รับสัมผัสวัสดุนาโนตามช่วงการวิจัยพัฒนา และผลิตเชิงอุตสาหกรรม

• ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) หลีกเลี่ยงการสังเคราะห์ชนิดที่ยาวและบางที่มีลักษณะคล้ายแร่ใยหินที่อาจทำให้เกิดโรคมะเร็งเยื่อหุ้มปอดได้ นอกจากนี้ การปรับเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีของท่อนาโนคาร์บอน สามารถลดความเป็นพิษต่อเซลล์ (cytotoxicity) ได้ เช่น การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังเดียว (SWCNT) ให้เป็นแบบ sidewall functionalisation แทนการสังเคราะห์แบบ surfactant-stabilisation

• หมุดควอนตัม (Quantum dot) ความเป็นพิษของหมุดควอนตัมที่เกิดจากการมีแกนหลักเป็นแคดเมียมหรือเซเลเนียม สามารถป้องกันได้โดยการเคลือบด้วยโพลีเมอร์ (polymer coatings) หรือการเคลือบด้วยสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นกลาง (neutral organic coatings)

• โลหะ/โลหะออกไซด์ (Metal/metal oxide) สำหรับไททาเนียมไดออกไซด์หากเป็นชนิดที่มีโครงสร้างผลึกรูไทล์จะมีความเป็นพิษน้อยกว่าผลึกอนาเทส (เนื่องจากผลึกอนาเทสทำปฏิกิริยากับแสงยูวีได้ไวกว่า) นอกจากนี้ เราสามารถปรับเปลี่ยนกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสของอนุภาคนาโนของโลหะออกไซด์ด้วยการเติมสารโด๊ป “dopants” เข้าไปในโครงผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์

ระดับที่ 3 ดำเนินการในระบบปิด: กระบวนการทั้งหมดที่คาดว่าจะมีการปลดปล่อยอนุภาคนาโนสู่อากาศควรจะดำเนินการในห้องที่ปิดมิดชิดหรือสถานที่ที่แยกผู้ปฏิบัติงานออกจากกระบวนการผลิต ทั้งนี้ ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการผลิตวัสดุนาโนที่เป็นก๊าซ กระบวนการแปรรูปของเหลวให้เป็นผงด้วยการพ่นกระจาย (spray drying process) หรือกระบวนการอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการใช้วัสดุนาโนที่แห้ง (เป็นผง) ควรดำเนินการภายใต้ห้องปิด

ระดับที่ 4 ใช้การควบคุมทางวิศวกรรม: กระบวนการทั้งหมดที่อาจก่อให้เกิดฝุ่นละอองควรดำเนินการด้วยระบบดูดอากาศ (extract ventilation) เช่น ตู้ดูดไอระเหย เครื่องดูดฝุ่นควันในกระบวนการผลิต การสัมผัสทางผิวหนังสามารถป้องกันได้โดยการปรับกระบวนการทำงาน

P 1-56 new.indd 36 24/2/2554 15:59:25

ระดับที่ 5 ควบคุมการดำเนินงาน: โดยการลดจำนวนบุคลากรที่คาดว่าจะได้รับสัมผัสลงหรือลดระยะเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงานลง และจำกัดกระบวนการผลิตอยู่ภายในบริเวณที่กำหนดเท่านั้น รวมทั้งไม่ปล่อยให้บุคคลที่ไม่ได้รับอนุญาตเข้าไปในบริเวณดังกล่าว ผู้ปฏิบัติงานควรได้รับข้อมูลเกี่ยวกับความเป็นอันตรายของอนุภาคนาโนที่อยู่ในรูปฝุ่น/ผง และผลกระทบต่อสุขภาพจากการได้รับสัมผัสกับฝุ่นที่เป็นอนุภาคนาโน ควรมีการเฝ้าระวังหรือตรวจสุขภาพอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ ควรมีการทำความสะอาดชุดที่ใช้ทำงาน และจัดเก็บแยกต่างหากจากเสื้อผ้าส่วนตัว และควรมีการวางแผนการทำความสะอาดสถานที่ทำงานเป็นประจำสม่ำเสมอ

ระดับที่ 6 ใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล: อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (Personal protective equipment, PPE) ที่สำคัญ ได้แก่ อุปกรณ์ป้องกันระบบหายใจและอุปกรณ์ป้องกันการสัมผัสทางผิวหนัง ได้แก่ ถุงมือ รองเท้า แว่นตา และชุดป้องกันสารเคมี

อุปกรณ์ป้องกันระบบหายใจ ควรใช้อุปกรณ์ที่มีระดับความปลอดภัยสูง เช่น หน้ากากมาตรฐานสากล ชนิด P3 และ FFP3 หรือชุดส่งผ่านอากาศ (Powered Air Purifying Respirator, PAPR) (รูปที่ 4-2) นอกจากนี้ ควรมีการอบรมการใช้อุปกรณ์ การทดสอบความแนบสนิท (fit test) รวมทั้งการบำรุงรักษาเพื่อให้การใช้อุปกรณ์เกิดประสิทธิผลสูงสุด

สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันการสัมผัสทางผิวหนัง ได้แก่ ถุงมือ รองเท้า แว่นตากันลม/ฝุ่นและชุดสวมใส่ ควรใช้ถุงมือยางสังเคราะห์ โดยอาจใส่สองชั้นตามสภาพการใช้งานและความเสี่ยง ส่วนชุดที่สวมใส่ควรเป็นผ้าที่ผลิตจากใยสังเคราะห์โพลีเอธีลีน (เช่น Tyvek) ซึ่งสามารถป้องกันการแทรกซึมของอนุภาคนาโนได้ดีกว่าชุดที่ทำจากผ้าฝ้ายหรือผ้าที่มีการทักทอ (Safe Work Australia, 2009)

หน้ากากชนิด FFP3 ชุด PAPR

ที่มา: http://www.sygnatureworkwear.co.uk; http://ehs.virginia.edu/ehs/ehs.es/es.rp.html

รูปที่ 4-2 ตัวอย่างอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลที่แนะนำ

4.3 การเลือกระดับการควบคุมการได้รับสัมผัส

จุดมุ่งหมายของการควบคุมการได้รับสัมผัส คือ เพื่อให้แน่ใจว่าการได้รับสัมผัสวัสดุ/อนุภาคนาโนนั้นอยู่ในระดับที่ต่ำเท่าที่จะเป็นไปได้ การประเมินความเสี่ยงจะช่วยให้ผู้ประกอบการสามารถตัดสินใจเลือกแนวทางการควบคุมการได้รับสัมผัสที่เหมาะสมได้โดยพิจารณาจากความจำเป็น ความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติและค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้น

ปัจจุบันยังไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับความเป็นอันตรายของวัสดุ/อนุภาคนาโนหลายประเภท อย่างไรก็ดี ทางสถาบันมาตรฐานแห่งประเทศอังกฤษ (British Standard Institute, BSI) ได้เสนอเกณฑ์เบื้องต้นในการควบคุมระดับการได้รับสัมผัสวัสดุนาโน 4 กลุ่ม (ที่เสนอข้างต้น) ภายใต้สมมติฐานที่ว่า อนุภาคนาโนมีความเป็นอันตรายมากกว่าอนุภาคที่ใหญ่กว่า ซึ่งสมมติฐานนี้อาจไม่สอดคล้องกับความเป็นจริงในทุกกรณี

กลุ่มที่ 1 วัสดุนาโนที่เป็นเส้นใย BSI ได้เทียบเคียงกับมาตรฐานการได้รับสัมผัสแร่ใยหิน (asbestos) โดยค่ามาตรฐานในการได้รับสัมผัสเส้นใยของแร่ใยหินในอากาศอยู่ที่ 0.01 เส้นใยต่อมิลลิลิตร เส้นใยหมายถึงอนุภาคที่มีสัดส่วนแนวตั้งและแนวนอนเกิน 3 ต่อ 1 และมีความยาวมากกว่า 5,000 นาโนเมตร โดยใช้อุปกรณ์วัด คือ phase contract optical microscopy มาตรฐาน

P 1-56 new.indd 38 24/2/2554 15:59:26

การได้รับสัมผัสที่เสนอ (0.01 เส้นใยต่อมิลลิลิตร) นั้นมาจากการประเมินโดยใช้เครื่อง scanning หรือ transmission electron microscopy

กลุ่มที่ 2 วัสดุนาโนที่เป็นสารก่อมะเร็งและสารพิษอื่นๆ (CMAR) วัสดุที่จัดอยู่ในกลุ่ม CMAR และมีคุณสมบัติละลายได้เมื่ออยู่ในขนาดนาโนเมตร อาจสามารถแทรกซึมเข้าสู่กระแสเลือดได้มากขึ้น ค่ามาตรฐานในการได้รับสัมผัสวัสดุนาโนในกลุ่มนี้กำหนดให้อยู่ที่ 0.1 x material WEL (Workplace Exposure Limits) แสดงในรูปของระดับความเข้มข้นโดยมวล

กลุ่มที่ 3 วัสดุนาโนที่ไม่ละลายน้ำ สถาบันแห่งชาติเพื่อความปลอดภัยด้านอาชีวอนามัย (National Institute for Occupational Safety and Health: NIOSH) ประเทศสหรัฐอเมริกาได้เสนอค่ามาตรฐานในการได้รับสัมผัสอยู่ที่ 1.5 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับอนุภาคเล็กของไททาเนียมไดออกไซด์ (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 0.1 ไมโครเมตร) และ 0.1 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับอนุภาคขนาดเล็กมากของไททาเนียมไดออกไซด์ โดยใช้ค่าเฉลี่ย (time-weighted average) BSI เสนอค่ามาตรฐานในการได้รับสัมผัสอยู่ที่ 0.066 x WEL แสดงในรูปของระดับความเข้มข้นโดยมวล หรืออีกทางเลือกหนึ่งคือ การกำหนดค่า Benchmark เป็นความเข้มข้นของจำนวนอนุภาคของวัสดุนาโนในบรรยากาศ ในช่วง 20,000-50,000 อนุภาคต่อมิลลิลิตร

กลุ่มที่ 4 วัสดุนาโนที่ละลายน้ำ สำหรับวัสดุที่สามารถละลายน้ำได้ การลดขนาดให้อยู่ในระดับนาโนเมตรน่าจะส่งผลกระทบไม่มากนัก BSI จึงเสนอค่ามาตรฐานอยู่ที่ 0.5 x WEL

BSI ได้สรุปแนวทางการควบคุมการได้รับสัมผัสวัสดุนาโน ตามการจัดกลุ่มวัสดุนาโน 4 กลุ่ม ดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 แนวทางการควบคุมการได้รับสัมผัสวัสดุนาโนตามลักษณะงาน

ลักษณะของงาน	กลุ่มของวัสดุนาโน	แนวทางการควบคุม
การจงใจทำให้วัสดุฟุ้งกระจายได้ เช่น การผลิตภาคอุตสาหกรรม การเคลือบโดยการพ่น	กลุ่มเส้นใย กลุ่ม CMAR	ควรเป็นระบบปิดหรือแยกจากผู้ปฏิบัติงาน
	กลุ่มที่ละลายน้ำ กลุ่มที่ไม่ละลายน้ำ	ควรเป็นระบบปิดหรือแยกจากผู้ปฏิบัติงาน อย่างไรก็ดี การควบคุมทางวิศวกรรมด้วยการใช้ระบบระบายอากาศ เช่น ตู้หรือเครื่องดูดฝุ่น/ไอระเหย อาจเพียงพอต่อการควบคุม

ตารางที่ 4-1 แนวทางการควบคุมการได้รับสัมผัสวัสดุนาโนตามลักษณะงาน (ต่อ)

ลักษณะของงาน	กลุ่มของวัสดุนาโน	แนวทางการควบคุม
การเคลื่อนย้าย การผสม การเติมหรือ ตักวัสดุชนิดแห้ง	กลุ่มเส้นใย กลุ่ม CMAR	ควรเป็นระบบปิดหรือแยกจากผู้ปฏิบัติงาน
	กลุ่มที่ละลายน้ำ กลุ่มที่ไม่ละลายน้ำ	ควรเป็นระบบปิดหรือแยกจากผู้ปฏิบัติงาน แม้ว่าการควบคุมทางวิศวกรรมโดยใช้ระบบระบายอากาศ เช่น ตู้หรือเครื่องดูดฝุ่น/ไอระเหย จะเพียงพอต่อการควบคุมหากวัสดุนั้นมีปริมาณน้อยมาก (เช่น ระดับมิลลิกรัม) อาจใช้การควบคุมโดยการแยกไปดำเนินการหรือใช้อุปกรณ์ป้องกันการหายใจ (RPE)
การเคลื่อนย้าย การผสม การเติมวัสดุชนิดสารแขวนลอย	กลุ่มเส้นใย กลุ่ม CMAR	ควรเป็นระบบปิดหรือแยกจากผู้ปฏิบัติงาน อย่างไรก็ดี ส่วนใหญ่ เป็นการควบคุมทางวิศวกรรมโดยใช้ระบบการระบายอากาศ หากวัสดุนั้นมีปริมาณน้อยมาก (เช่น ระดับมิลลิกรัม) อาจใช้การควบคุมโดยการแยกไปดำเนินการหรือใช้อุปกรณ์ป้องกันการหายใจ (RPE)
	กลุ่มที่ละลายน้ำ กลุ่มที่ไม่ละลายน้ำ	การควบคุมทางวิศวกรรมด้วยการใช้ระบบระบายอากาศ เช่น ตู้หรือเครื่องดูดฝุ่น/ไอระเหย อาจเพียงพอต่อการควบคุมหากวัสดุนั้นมีปริมาณน้อยมาก (เช่น ระดับมิลลิกรัม) อาจใช้การควบคุมโดยการแยกไปดำเนินการหรือใช้อุปกรณ์ป้องกันการหายใจ (RPE)
การบำรุงรักษาและการทำความสะอาด	กลุ่มเส้นใย กลุ่ม CMAR	ควรดำเนินการในระบบปิดเท่าที่จะเป็นไปได้ อย่างไรก็ดี ในทางปฏิบัติ การใช้อุปกรณ์ป้องกันการหายใจ (RPE) และอุปกรณ์ป้องกันการสัมผัสทางผิวหนังน่าจะมีประสิทธิภาพเพียงพอ การทำความสะอาดจะต้องไม่ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของวัสดุนาโน
	กลุ่มที่ละลายน้ำ กลุ่มที่ไม่ละลายน้ำ	ส่วนใหญ่ การใช้อุปกรณ์ป้องกันการหายใจ (RPE) และอุปกรณ์ป้องกันการสัมผัสทางผิวหนังน่าจะมีประสิทธิภาพเพียงพอ การทำความสะอาดจะต้องไม่ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของวัสดุนาโน

ที่มา: British Standard Institute (2007)

P 1-56 new.indd 40 24/2/2554 15:59:27

4.4 การให้ข้อมูลและการฝึกอบรม

พนักงานหรือผู้ที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนาโนควรได้รับการอบรมให้ความรู้เกี่ยวกับมาตรการความปลอดภัย โดยข้อมูลพื้นฐานที่ควรรู้ ประกอบด้วย

- ชื่อของวัสดุนาโนที่มีแนวโน้มได้รับสัมผัสและมีความเสี่ยงที่จะเกิดผลกระทบทางสุขภาพจากการได้รับสัมผัสนั้น
- ค่ามาตรฐานความปลอดภัยของการได้รับสัมผัสในสถานที่ทำงาน (workplace exposure limit, WEL) ของวัสดุนาโน
- เอกสารข้อมูลความปลอดภัย (Safety Data Sheet: SDS) ของวัสดุนาโน
- ผลการศึกษาที่สำคัญของการประเมินความเสี่ยง
- ข้อควรระวังที่พนักงานหรือผู้ที่เกี่ยวข้องควรนำไปปฏิบัติเพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้น
- ผลการตรวจวัดระดับการได้รับสัมผัส โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่เกินค่ามาตรฐาน (WEL)
- ผลการตรวจเฝ้าระวังสุขภาพของพนักงานหรือผู้ที่เกี่ยวข้อง

4.5 แนวทางป้องกันการระเบิดและการเกิดไฟไหม้

แนวทางป้องกันและควบคุมความเสี่ยงต่อการระเบิดและการเกิดไฟไหม้ (BSI 2007; Ostiguy *et al.* 2009) ได้แก่

1. ทดสอบความเสี่ยงการจุดติดไฟของวัสดุนาโนในสภาวะที่ควบคุมได้ โดยพิจารณาปัจจัยสำคัญคือ ขนาดของอนุภาค ระดับความเข้มข้นในน้ำและความชื้นในอากาศ ตัวอย่างวิธีการทดสอบ ได้แก่ Method ASTM E2019-99 และ Method ASTM E1266-00 อย่างไรก็ดี ทั้งสองวิธียังมีข้อจำกัดในการทดสอบวัสดุขนาดนาโน เนื่องจากต้องใช้ปริมาณวัสดุอย่างน้อย 500 กรัมในการทดสอบ

2. ดูแลมิให้ที่ทำงานมีการสะสมของฝุ่นซึ่งอาจก่อให้เกิดการแขวนลอยของอนุภาคนาโนในอากาศและนำไปสู่การติดไฟและการระเบิดได้ โดยตรวจสอบสภาพและการทำงานของระบบระบาย/ดูดอากาศในระหว่างการทำงาน

ตั้งแต่การขนส่ง ถ่ายเท และการทำความสะอาดอุปกรณ์และห้องทำงาน ต้องดูแลอุปกรณ์ และถังแก๊ส/ท่อแก๊ส มิให้รั่วหรือซึมได้ รวมทั้งสิ่งแวดล้อมบริเวณทำงานต้องปราศจากไอน้ำมัน หรือเชื้อเพลิงที่จะติดไฟได้

3. การทำงานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนาโนควรทำในระบบปิดที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมเพลิงที่ได้มาตรฐาน

4. ป้องกันการเกิดสภาวะที่เอื้อต่อการติดไฟและการระเบิด (แยกองค์ประกอบของการติดไฟ ได้แก่ การแยกเชื้อเพลิง ออกซิเจน ความร้อน ปฏิกิริยาต่อเนื่อง) โดยระมัดระวังแหล่งกำเนิดไฟ (ignition source) ที่สำคัญได้แก่ ไฟจากกระแสไฟฟ้า สะเก็ดไฟจากการเสียดสีของอุปกรณ์ วัสดุที่ร้อนจัด/ผิวโลหะร้อน

5. ป้องกันการเกิดการติดไฟ เมื่อมีเชื้อเพลิงและอ๊อกซิเจน (ในอากาศ) รวมตัวกันอยู่แล้ว หากมีปฏิกิริยาเคมีที่ให้ความร้อนเกิดขึ้น และสะสมจนอุณหภูมิถึงจุดติดไฟ ไฟก็จะเกิดขึ้นเองได้ซึ่งเป็นสิ่งที่ควรระวังมาก ไม่ควรเก็บเชื้อเพลิงในบริเวณใกล้เคียงที่จะทำให้ไฟลุกลามได้

6. ประกายไฟฟ้าที่เกิดจากไฟฟ้าสถิต อาจจุดติดไฟกับไอ ฝุ่นละออง หรือเศษผงของวัสดุไวไฟได้ง่าย ดังนั้น การใช้เครื่องปั่น เครื่องกวน สายพาน และการเติมน้ำมันลงถัง ควรป้องกันโดยต่อสายดิน

4.6 แนวทางจัดการอุบัติเหตุรั่วไหลของวัสดุนาโน

เนื่องจากอุบัติเหตุการหกรั่วไหลของวัสดุนาโนอาจเกิดขึ้นได้ พนักงานหรือผู้ที่เกี่ยวข้องจึงจำเป็นต้องศึกษานโยบาย และวิธีปฏิบัติเพื่อเตรียมความพร้อมกับสถานการณ์ฉุกเฉิน ทั้งในกรณีอุบัติเหตุเล็กน้อยและอุบัติเหตุร้ายแรง

การประเมินความเสี่ยงอย่างเพียงพอจะนำไปสู่การกำหนดมาตรการอย่างเหมาะสมสำหรับการแก้ไขสถานการณ์ฉุกเฉิน วิธีการที่จะใช้ควรสอดคล้องกับระดับความเป็นอันตรายและปริมาณของวัสดุนาโนที่มีการหกหรือรั่วไหล การเข้าจัดการกับพื้นที่ที่ปนเปื้อนวัสดุนาโนควรดำเนินการอย่างระมัดระวัง เพื่อป้องกันการได้รับสัมผัสกับวัสดุนาโนหรือให้ได้รับสัมผัสน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เจ้าหน้าที่ที่ต้องจัดการกับสถานการณ์ฉุกเฉินจะต้องผ่านการอบรมอย่างเพียงพอที่จะ

P 1-56 new.indd 42 24/2/2554 15:59:28

สามารถประเมินระดับการหกรั่วไหลและปนเปื้อน รวมทั้งสามารถระบุวิธีการจัดการและอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลที่จะสวมใส่ ตลอดจนรู้วิธีการกำจัดของเสียปนเปื้อนอย่างปลอดภัย

ในกรณีที่เกิดเหตุรั่วไหลหรือปนเปื้อน เจ้าหน้าที่ควรประเมินขอบเขตของพื้นที่ปนเปื้อนและกั้นเขตมิให้บุคคลอื่นเข้ามาได้ นอกจากนี้ ควรใช้มาตรการป้องกันการแพร่กระจายของวัสดุนาโนที่รั่วไหลออกนอกพื้นที่ เช่น การวางเสื่อดูดซับวัสดุนาโนที่หก/รั่วไหล ณ ทางออกของพื้นที่ปนเปื้อน ในกรณีที่ต้องจัดการกับอุบัติเหตุรั่วไหลของวัสดุนาโนที่เป็นผงแห้ง เจ้าหน้าที่ควรใช้วิธีการทำความสะอาดแบบเปียกเพื่อลดการฟุ้งกระจายของวัสดุนาโนในอากาศหรือใช้เครื่องดูดฝุ่นที่มีไส้กรอง HEPA

พนักงานหรือลูกจ้างควรพิจารณาและศึกษาสถานการณ์ที่จำเป็นต้องมีการอพยพผู้คนออกจากพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบโดยพิจารณาระดับความรุนแรงของการหกหรือรั่วไหล รวมทั้งดูกลไกที่ต้องประสานงานกับหน่วยงานอื่น เช่น หน่วยงานด้านการตอบโต้เหตุฉุกเฉินและด้านสิ่งแวดล้อม เป็นต้น

นอกจากนี้ ชิ้นส่วนที่ใช้ในการจัดการกับพื้นที่ปนเปื้อน เช่น ไส้กรอง อุปกรณ์เช็ดทำความสะอาด เสื่อและวัสดุดูดซับจะถือว่าเป็นของเสียปนเปื้อนวัสดุนาโน และจะต้องถูกกำจัดตามแนวทางการจัดการของเสียวัสดุนาโนที่นำเสนอในส่วนถัดไป

4.7 แนวทางจัดการของเสียวัสดุนาโน

BSI เสนอให้นำแนวทางการจัดการวัตถุอันตรายมาใช้ในการจัดการของเสียวัสดุนาโน ซึ่งครอบคลุมวัสดุนาโนทั้งในรูปของแข็ง และของเหลว ส่วนของเสียที่มีการปนเปื้อนวัสดุนาโน เช่น บรรจุภัณฑ์ อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลที่ใช้แล้ว สารแขวนลอยที่มีองค์ประกอบวัสดุนาโน และวัสดุของแข็งที่เปราะหรือมีโครงสร้างนาโนติดกับพื้นผิววัสดุอย่างหลวม ซึ่งอาจทำให้มีการแพร่กระจายของอนุภาคนาโนได้ หากสัมผัสกับอากาศหรือน้ำหรือสัมผัสกับสิ่งอื่น

ในการจัดการของเสียวัสดุนาโน ควรมีการวางแผนการจัดเก็บและการกำจัด โดยคำนึงถึงลักษณะความเป็นอันตรายของวัตถุนั้น และปริมาณวัตถุหรือของเสีย หากวัตถุมีการสัมผัสกับวัสดุนาโน เช่น อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล อุปกรณ์เช็ดทำความสะอาดจะต้องถือว่าเป็นของเสียปนเปื้อนวัสดุนาโน ไม่สามารถทิ้งรวมกับขยะทั่วไป หากแต่ต้องแยกนำมากำจัดต่างหาก อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตหรือจัดการกับวัสดุนาโนจะต้องทำการชะล้างก่อนการกำจัดหรือนำกลับมาใช้ใหม่ ของเสียจากการชะล้างถือว่าเป็นของเสียปนเปื้อนวัสดุนาโน ห้ามทิ้งลงท่อระบายน้ำ (Hallock *et al.* 2009)

ก่อนกำจัด ควรจัดเก็บของเสียวัสดุนาโนในภาชนะที่ปิดมิดชิดและติดป้ายแสดงลักษณะและคุณสมบัติของของเสียนั้น หากเป็นของเสียหรือขยะที่มีการปนเปื้อนวัสดุนาโนเล็กน้อย เช่น กระดาษ ผ้าเช็ด อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล อาจจัดเก็บในถุงพลาสติกหรือภาชนะ หากถุงพลาสติกเต็มให้ปิดปากถุงแล้วใส่ในถุงพลาสติกอีกชั้นหรือในภาชนะอื่น เพื่อป้องกันการปนเปื้อนสู่ภายนอก รวมทั้งติดป้ายแสดง

ในกรณีที่ยังไม่มีข้อมูลความเป็นอันตรายของวัสดุนาโนที่ชัดเจน ควรกำหนดให้ของเสียวัสดุนาโนเป็นของเสียอันตราย และกำจัดตามแนวทางการกำจัดของเสียอันตรายที่กำหนดไว้ในกฎหมาย

P 1-56 new.indd 44 24/2/2554 15:59:29

บทที่ 5

กฎหมายและหน่วยงาน ที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัย ของวัสดุและผลิตภัณฑ์นาโน

5.1 การกำกับดูแลในต่างประเทศ

ในส่วนของการกำกับดูแลความปลอดภัยของวัสดุนาโนและผลิตภัณฑ์นาโนที่อยู่ในความรับผิดชอบของหน่วยงานภาครัฐนั้น ประเด็นที่ต้องสร้างความชัดเจน คือ หน่วยงานใดจะเป็นผู้กำกับดูแล ความปลอดภัยของวัสดุและผลิตภัณฑ์นาโน หากมองความเคลื่อนไหวในต่างประเทศ จะเห็นได้ว่าประเทศที่พัฒนาแล้วและเป็นผู้นำในการพัฒนานาโนเทคโนโลยีได้พยายามนำกฎหมายที่มีอยู่มาปรับปรุงแก้ไขให้ครอบคลุมการกำกับดูแลวัสดุนาโน เช่น คำนิยาม "substance" ในกฎหมายสารเคมีของสหภาพยุโรป (REACH) ครอบคลุมวัสดุนาโน ซึ่งหากมีการผลิตหรือนำเข้ามากกว่า 1 ตันต่อปีจะต้องเข้าสู่กระบวนการขึ้นทะเบียนและให้ข้อมูลความปลอดภัยตลอดห่วงโซ่อุปทาน (supply chain)[9] รวมทั้งต้องปฏิบัติตามกฎหมายว่าด้วยการจำแนกประเภท การติดฉลาก และการบรรจุหีบห่อสารเคมีและสารผสม (CLP)[10] นอกจากนี้ ในปี 2552 สหภาพยุโรปได้ออกกฎระเบียบใหม่สำหรับกฎหมายควบคุมเครื่องสำอางโดยกำหนดให้ผู้ผลิตเครื่องสำอางที่วางจำหน่ายในยุโรปจะต้องแสดงคำว่านาโนในวงเล็บ (nano) ในฉลากแสดงส่วนประกอบของเครื่องสำอาง[11] ในปี 2553 สภายุโรปได้มีมติให้

[9] http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/chemicals/reach/nanomaterials/index__en.htm

[10] ชื่อเต็มของกฎหมายนี้คือ: REGULATION (EC) No 1272/2008 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 16 December 2008 on classification, labelling and packaging of substances and mixtures, amending and repealing Directives 67/548/EEC and 1999/45/EC, and amending Regulation (EC) No 1907/2006

[11] http://www.rsc.org/chemistryworld/News/2009/November/27110901.asp

ส่วนประกอบของอาหารที่มีวัสดุนาโนจะต้องแสดงคำว่านาโนในวงเล็บ (nano) ต่อจากส่วนประกอบนั้นและอาหารที่มีส่วนประกอบของวัสดุนาโนจะถูกห้ามวางจำหน่ายในตลาดจนกว่าจะมีวิธีการทดสอบความปลอดภัย[12]

ในสหรัฐอเมริกา องค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อม (Environmental Protection Agency: EPA) ได้ออกกฎเกณฑ์ข้อบังคับในปี 2550 เพื่อควบคุมผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบของอนุภาคนาโนของโลหะเงิน โดยกำหนดคำนิยามคำว่า “สารกำจัดแมลงและศัตรูพืช” (Pesticide) ตามกฎหมาย Federal Insecticide, Fungicide, Rodenticide Act (FIFRA) ให้ครอบคลุมผลิตภัณฑ์ที่มีการปลดปล่อยไอออน (เช่น เงินหรือทองแดง) เพื่อวัตถุประสงค์ในการป้องกัน กำจัด ขับไล่หรือลดแบคทีเรียหรือเชื้อรา ส่งผลให้บริษัทผู้ผลิตและจำหน่ายผลิตภัณฑ์ที่อ้างคุณสมบัติในการฆ่าทำลายเชื้อโรคด้วยการปล่อยอนุภาคนาโนของโลหะเงินจะต้องขึ้นทะเบียนและเสนอหลักฐานข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ให้ EPA พิจารณาและประเมินผลความเสี่ยงต่อสิ่งแวดล้อมก่อนวางจำหน่ายในท้องตลาด

5.2 การกำกับดูแลในประเทศไทย

สำหรับประเทศไทย ยังไม่มีการออกกฎหมายที่กำกับดูแลความปลอดภัยของวัสดุนาโนโดยเฉพาะ แต่สามารถนำกฎหมายที่มีอยู่โดยเฉพาะอย่างยิ่งกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยสารเคมีมาปรับปรุงแก้ไขให้ครอบคลุมวัสดุนาโนโดยเฉพาะอย่างยิ่งพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 (รวมฉบับแก้ไขเพิ่มเติม) และกฎหมายที่ควบคุมผลิตภัณฑ์สุขภาพและผลิตภัณฑ์สำหรับผู้บริโภค ได้แก่ กฎหมายเกี่ยวกับอาหาร ยา เครื่องมือแพทย์ เครื่องสำอาง และวัตถุอันตรายในบ้านเรือน ภายใต้การกำกับดูแลของสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา เป็นต้น ตารางที่ 5-1 แสดงกฎหมายและหน่วยงานกำกับดูแลความปลอดภัยสารเคมี และผลิตภัณฑ์ตามวงจรชีวิตของวัสดุนาโน ตั้งแต่การนำเข้า ผลิต ใช้ และจัดการของเสีย รวมทั้งรายชื่อหน่วยงานสนับสนุนทั้งในส่วนการกำหนดนโยบาย การวิจัย การกำหนดมาตรฐาน และการวิเคราะห์ทดสอบ

[12] http://www.eeb.org/index.cfm/news-events/news/nano-food-european-parliament-puts-safety-first/; http://www.eubusiness.com/news-eu/food-cloned-animals.707/

P 1-56 new.indd 46 24/2/2554 15:59:30

อย่างไรก็ดี กฎหมายที่มีอยู่ยังมีช่องว่างบางประการที่จำเป็นต้องได้รับการแก้ไขเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถกำกับดูแลความปลอดภัยของวัสดุนาโนและผลิตภัณฑ์นาโนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่องว่างที่สำคัญ คือ การนิยามของวัสดุนาโน และการกำหนดประเภทวัสดุและผลิตภัณฑ์นาโน เพื่อพัฒนาการควบคุมดูแลตามกฎหมายที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งความเป็นอันตรายของอนุภาคของสารชนิดหนึ่งที่ไม่จำกัดเฉพาะปริมาณที่ได้รับสัมผัส (เช่น สูดดม) แต่ต้องรวมถึงขนาดและพื้นที่ผิวของอนุภาคชนิดนั้นๆ ด้วย นอกจากนี้ ยังต้องพิจารณาประเด็นการบังคับใช้กฎหมาย โดยเฉพาะเรื่องความพร้อมของเครื่องมือวัด เช่น เครื่องวัดความเข้มข้นของอนุภาคนาโนในอากาศในโรงงานอุตสาหกรรม เครื่องมือตรวจวัดอนุภาคนาโนในผลิตภัณฑ์และในสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำทิ้งจากชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรม การเตรียมความพร้อมของระบบตอบโต้สถานการณ์ฉุกเฉินหากเกิดการรั่วไหลของวัสดุนาโน เป็นต้น

ในระดับนโยบาย คณะกรรมการนาโนเทคโนโลยีแห่งชาติได้แต่งตั้งคณะอนุกรรมการด้านความปลอดภัยและการบริหารความเสี่ยงด้านนาโนเทคโนโลยีขึ้นในปี พ.ศ. 2548 และในปี 2553 คณะอนุกรรมการดังกล่าวได้ตั้งคณะทำงานร่างยุทธศาสตร์ทางด้านความปลอดภัยของนาโนเทคโนโลยี ซึ่งได้มียกร่างยุทธศาสตร์ฯ และรับฟังความคิดเห็นจากภาคส่วนต่างๆ และจะนำเสนอยุทธศาสตร์ฯ ต่อคณะกรรมการพัฒนาวิทยาศาตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (กวทช.) และคณะกรรมการแห่งชาติว่าด้วยการพัฒนายุทธศาสตร์การจัดการสารเคมีต่อไป หากยุทธศาสตร์ฯ ได้ผ่านความเห็นชอบจะช่วยให้การบริหารจัดการด้านความปลอดภัยและจริยธรรมที่เกี่ยวข้องกับนาโนเทคโนโลยีของหน่วยงานต่างๆ มีความชัดเจนและเป็นเอกภาพมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 5-1 กฎหมายและหน่วยงานของไทยที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของวัสดุนาโนและผลิตภัณฑ์นาโน

วงจรชีวิต	การนำเข้า-ส่งออก/ การผลิตวัสดุนาโน	การขนส่ง	การผลิต ผลิตภัณฑ์นาโน	การจำหน่าย รวมทั้งการโฆษณาและการแสดงฉลาก	การบริโภคหรือใช้ผลิตภัณฑ์	การจัดการของเสีย
กฎหมายที่เกี่ยวข้อง (ระดับพระราชบัญญัติ)	- พระราชบัญญัติ (พ.ร.บ.) วัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 - พ.ร.บ. ควบคุมยุทธภัณฑ์ พ.ศ. 2530 - พ.ร.บ. อาหาร พ.ศ. 2522 - พ.ร.บ. ยา พ.ศ. 2510 - พ.ร.บ. เครื่องสำอาง พ.ศ. 2535 - พ.ร.บ. เครื่องมือแพทย์ พ.ศ. 2551	- พ.ร.บ. วัตถุอันตราย พ.ศ. 2535	- พ.ร.บ. วัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 - พ.ร.บ. โรงงาน พ.ศ. 2535 - พ.ร.บ. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2511 - พ.ร.บ. มาตรฐานสินค้าเกษตร พ.ศ. 2551 - พ.ร.บ. อาหาร พ.ศ. 2522 - พ.ร.บ. ยา พ.ศ. 2510 - พ.ร.บ. เครื่องสำอาง พ.ศ. 2535 - พ.ร.บ. เครื่องมือแพทย์ พ.ศ. 2551 - พ.ร.บ. คุ้มครองแรงงาน พ.ศ. 2541	- พ.ร.บ. อาหาร พ.ศ. 2522 - พ.ร.บ. ยา พ.ศ. 2510 - พ.ร.บ. เครื่องสำอาง พ.ศ. 2535 - พ.ร.บ. เครื่องมือแพทย์ พ.ศ. 2551 - พ.ร.บ. คุ้มครองผู้บริโภค พ.ศ. 2522	- พ.ร.บ. คุ้มครองผู้บริโภค พ.ศ. 2522 - พ.ร.บ. ความรับผิดต่อความเสียหายที่เกิดขึ้นจากสินค้าที่ไม่ปลอดภัย พ.ศ. 2551 - พ.ร.บ. ควบคุมยุทธภัณฑ์ พ.ศ. 2530	- พ.ร.บ. วัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 (กรณีของเสียจากโรงงาน) - พ.ร.บ. สาธารณสุข พ.ศ. 2535 (ฉบับที่ 2 2550) (กรณีของเสียจากชุมชน)
หน่วยงานกำกับดูแล (ระดับกรม)	กรมศุลกากรร่วมกับหน่วยงานควบคุมตาม พ.ร.บ. วัตถุอันตราย : - กรมโรงงานอุตสาหกรรม - สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา - กรมวิชาการเกษตร - กรมประมง - กรมปศุสัตว์ - กรมธุรกิจพลังงาน - กรมยุทธภัณฑ์	- หน่วยงานตาม พ.ร.บ. วัตถุอันตราย - กรมขนส่งทางบก - การท่าเรือแห่งประเทศไทย - กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย	- หน่วยงานตาม พ.ร.บ. วัตถุอันตราย - สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม - สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ - สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา - กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน - กรมควบคุมโรค	- สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา - สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม - สำนักงานคณะกรรมการคุ้มครองผู้บริโภค	- สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา - สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม - สำนักงานคณะกรรมการคุ้มครองผู้บริโภค	- กรมโรงงานอุตสาหกรรม (กรณีของเสียจากโรงงาน) - กรมควบคุมมลพิษ - องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น

P 1-56 new.indd 48 24/2/2554 15:59:32

P 1-56 new.indd 49

ตารางที่ 5-1 กฎหมายและหน่วยงานของไทยที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของวัสดุนาโนและผลิตภัณฑ์นาโน (ต่อ)

วงจรชีวิต	การนำเข้า-ส่งออก/ การผลิตวัสดุนาโน	การขนส่ง	การผลิต ผลิตภัณฑ์นาโน	การจำหน่าย รวมทั้งการโฆษณาและการแสดงฉลาก	การบริโภคหรือใช้ผลิตภัณฑ์	การจัดการของเสีย
หน่วยงาน/องค์กรสนับสนุนการกำกับดูแล การกำหนดนโยบายและการวิจัย	- คณะกรรมการระหว่างกระทรวง ได้แก่ 1) คณะอนุกรรมการด้านความปลอดภัยและการบริหารความเสี่ยงด้านนาโนเทคโนโลยี ภายใต้คณะกรรมการนาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ 2) คณะอนุกรรมการประสานนโยบายและแผนการดำเนินงานว่าด้วยการจัดการสารเคมี ภายใต้คณะกรรมการแห่งชาติว่าด้วยการพัฒนายุทธศาสตร์การจัดการสารเคมี - ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ - สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา กองแผนงานและวิชาการ ศูนย์พัฒนานโยบายแห่งชาติด้านสารเคมี - กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ - กรมวิทยาศาสตร์บริการ - กรมส่งเสริมการเกษตร - สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย - มหาวิทยาลัยและสถาบันวิจัยต่างๆ - สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย - สภาหอการค้า - องค์กรพัฒนาเอกชน					

24/2/2554 15:59:33

แหล่งข้อมูลเพิ่มเติม

เว็บไซต์และรายงานเกี่ยวกับการทดสอบความเป็นพิษของวัสดุนาโน:

Nanotechnology Citizen Engagement Organization, http://www.nanoceo.net/nanorisks/risks-reviews

Nanowerk, http://www.nanowerk.com/

OECD Working Party on Manufactured Nanomaterials (WPMN). Publications in the Series on the Safety of Manufactured Nanomaterials

OECD Working Party on Manufactured Nanomaterials (WPMN). (July 2008). List of Manufactured Nanomaterials and List of Endpoints for Phase One of the OECD Testing Programme

OECD Working Party on Manufactured Nanomaterials (WPMN). (November 2007). Current Developments/Activities on the Safety of Manufactured Nanomaterials: Tour de table at the 3rd Meeting of the WPMN

Safe Work Australia. (2009). Engineered nanomaterials: A Review of the Toxicology and Health Hazards. http://www.safework-australia.gov.au/NR/rdonlyres/47D5968D-4A11-45A0-8121-8C992E111447/0/ToxicologyReview__Nov09.pdf

Stone, Vicki (Project Coordinator) (2010). Engineered Nanoparticles: Review of Health and Environmental Safety (ENRHES). (2010). Edinburgh Napier University, Institute of Occupational Medicine, Technical University of Denmark, Institute for Health and Consumer Protection of the European Commission's Joint Research Centre (JRC), and the Institute of Nanotechnology (IoN). http://nmi.jrc.ec.europa.eu/documents/pdf/ENRHES%20Review.pdf

P 1-56 new.indd 50 24/2/2554 15:59:33

เว็บไซต์และคู่มือและแนวปฏิบัติความปลอดภัยของวัสดุนาโน:

American Society for Testing and Materials (ASTM)(Released March 2010)-07 Standard Guide for Handling Unbound Engineered Nanoscale Particles in Occupational Settings, ASTM E2535

GoodNanoGuide: Interactive forum to exchange ideas on how to safely handle nanomaterials in the workplace (International Sponsors) http://www.goodnanoguide.org/

International Council on Nanotechnology (ICON). A partnership for nanotechnology stewardship and sustainability. http://icon.rice.edu/

Massachusetts Office of Technical Assistance (MOTA). (2010). Nanotechnology--Considerations for Safe Development. http://www.mass.gov/Elwd/docs/dos/nano/OTA_nanotech_guidance_doc.pdf

NanoSafe: Safe Production and Use of Nanomaterials (Europe) http://www.nanosafe.org/

National Institute for Occupational Safety & Health (NIOSH) Nanotechnology Page (United States)

NIOSH. (March 2009). Approaches to Safe Nanotechnology-Managing the Health and Safety Concerns Associated with Engineered Nanomaterials. http://www.cdc.gov/niosh/docs/2009-125/pdfs/2009-125.pdf

Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) Database on research into the safety of manufactured nanomaterials (International).

Safe Work Australia. (2009). Engineered nanomaterials: Evidence on the effectiveness of workplace controls to prevent exposure http://www.safeworkaustralia.gov.au/NR/rdonlyres/E3C113AC-4363-4533-A128-6D682FDE99E0/0/EffectivenessReport.pdf

SafeNano. United Kingdom's independent source on nanotechnology Hazard & Risk.

เอกสารอ้างอิง

ภาษาไทย

คณะทำงานร่างยุทธศาสตร์ทางด้านความปลอดภัยของนาโนเทคโนโลยี (2553) (ร่าง) แผนยุทธศาสตร์ด้านความปลอดภัยและจริยธรรมนาโนเทคโนโลยี (พ.ศ. 2554-2559) เอกสารประกอบการสัมมนา วันที่ 22 กรกฎาคม 2553

ณัฐพันธุ์ ศุภกา. ไขปริศนา...นาโนเทคโนโลยี http://www.vcharkarn.com/varticle/324#P1

วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล (บก.)(2550). นาโนเทคโนโลยีกับเทคโนโลยีอนุภาค ใครยิ่งใหญ่กว่า? กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เว็บไซต์ของวิกิพีดี สารานุกรมเสรี http://th.wikipedia.org/wiki/Nanotechnology

เว็บไซต์บทเรียนอิเล็กทรอนิกส์ของสถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล
http://www.atom.rmutphysics.com/charud/scibook/nanotech/
http://th.wikipedia.org/wiki/Nanotechnology
http://www.nanotechproject.org/news/archive/mwcnt/
http://www.thai-nano.com/whatnano.php
http://www.ostc.thaiembdc.org/document/nanotech/report__sec3.pdf

ภาษาอังกฤษ

Arora, S. *et al.* (2008). "Cellular responses induced by silver nanoparticles: *In vitro* studies." Toxicology Letters. Vol. 179, 2, 93-100.

Asharani, P.V. *et al.* (2008). "Toxicity of silver nanoparticles in zebrafish models." Nanotechnology, 19 255102 doi: 10.1088/0957-4484/19/25/255102

Benn, T. M. and Westerhoff, P. (2008). "Nanoparticle Silver Released into Water from Commercially Available Sock Fabrics." Environmental Science & Technology, Vol. 42, 4133-4139.

British Standard Institute (BSI)(2007). Nanotechnologies–Part 2: Guide to safe handling and disposal of manufactured nanomaterials. PD 6699-2:2007. http://shop.bsigroup.com/en/Browse-by-Subject/Nanotechnology/

Chang, A.L.S., Khosravi, V. And Egbert, B. (2006). "A case of argyria development after colloidal silver digestion." Journal of Cutaneous Pathology. Vol. 33, 12, 809-811.

Chen, H.W. *et al.* (2006). "Titanium dioxide nanoparticles induce emphysema-like lung injury in mice." FASEB Journal, Vol.20, 13, 2393-2395.

Cheng, J., Flahaut, E. and Cheng, S.H. (2007). "Effect of carbon nanotubes on developing zebrafish (*Danio rerio*) embryos." Environmental Toxicology and Chemistry. Vol. 26, 4, 708-716.

Choi, O. and Hu, Z.Q. (2008). "Size dependent and reactive oxygen species related nanosilver toxicity to nitrifying bacteria." Environmental Science and Technology. Vol. 42, 12, 4583-4588.

Choi, O. *et al.* (2008). "The inhibitory effects of silver nanoparticles, silver ions, and silver chloride colloids on microbial growth." Water Research. Vol. 42, 12, 3066-3074.

Deng, X. *et al.* (2007). "Translocation and fate of multi-walled carbon nanotubes *in vivo*." Carbon, Vol. 45, 7, 1419-1424.

P 1-56 new.indd 52 24/2/2554 15:59:34

Dussert, A.S., Gooris, E. and Hemmerle, J. (1997). "Characterization of the mineral content of a physical sunscreen emulsion and its distribution onto human stratum corneum." International Journal of Cosmestic Science. Vol. 19, 3, 119-129.

Fabrega, J. Fawcett, S. R., Renshaw, J. C. And Lead, J. R. (2009). "Silver Nanoparticle Impact on Bacterial Growth: Effect of pH, Concentration, and Organic Matter." Environmental Science & Technology, Vol. 43 (19), 7285–7290.

Ferin, J., Oberdorster, G. and Penney, D. P. (1992). "Pulmonary retention of ultrafine and fine particles in rats." American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology, Vol. 6, 5, 535-542.

Federici, G. Shaw, B.J. and Handy, R.D. (2007). "Toxicity of titanium dioxide nanoparticles to rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): Gill injury, oxidative stress, and other physiological effects. Aquatic Toxicology. Vol. 84, 415-430.

Gamer, A.O., Leibold, E. and Van, R.B. (2006). "The *in vitro* absorption of microfine zince oxide and titanium dioxide through porcine skin." Toxicology *In Vitro*. Vol. 20, 3, 301-307.

Geranio, L., Heuberger, M. and Nowack, B. (2009). "The Behavior of Silver Nanotextiles during Washing." Environmental Science & Technology, Vol.43, 8113-8118.

Griffitt, R.J. *et al.* (2008). "Effects of particle composition and species on toxicity of metallic nanomaterials in aquatic organisms." Environmental Toxicology and Chemistry. Vol. 27, 9, 1972-1978.

Hallock, M. F., Greenley, P., DiBerardinis, L., and Kallin, D. (2009). "Potential risks of nanomaterials and how to safely handle materials of uncertain toxicity." Journal of Chemical Health & Safety, 16-23.

Inoue, K. *et al.* (2008). "Size effects of nanomaterials on lung inflammation and coagulatory disturbance." International Journal of Immunopathology and Pharmacology. Vol.21, 1, 197-206.

Ji, J.H. *et al.* (2007). "Twenty-eight-day inhalation toxicity study of silver nanoparticles in Sprague-dawley rats." Inhalation Toxicology, Vol. 19, 10, 857-871.

Kaegi, R. *et al.* (2008). "Synthetic TiO2 nanoparticle emission from exterior facades into the aquatic environment." Environmental Pollution. Vol. 156, 233-239.

Kang, S. Mauter, M.S. and Elimelech, M. (2008). "Physicochemical determinants of multiwalled carbon nanotube bacterial cytotoxicity." Environmental Science and Technology. Vol. 42, 19, 7528-7534.

Kennedy, A.J. *et al.* (2008). "Factors influencing the partitioning and toxicity of nanotubes in the aquatic environment. Environmental Toxicology and Chemistry.

Kim, Y.S. *et al.* (2008). "Twenty-eight-day oral toxicity, genotoxicity, and gender-related tissue distribution of silver nanoparticles in Sprague-Dawley rats. Inhalation Toxicology. Vol. 20, 575-583.

Kiss, B. *et al.* (2008). "Investigation of micronized titanium dioxide penetration in human skin xenografts and its effect on cellular functions of human skin-derived cells." Experimental Dermatology. Vol. 17, 8, 659-667.

Mavon, A. *et al.* (2007). "*In vitro* percutaneous absorption and *in vivo* stratum corneum distribution of an organic and a mineral subscreen." Skin Pharmacology and Physiology. Vol. 20, 1, 10-20.

Monteiro-Riviere, N.A. *et al.* (2005a). "Surfactant effects on carbon nanotube interactions with human keratinocytes." Nanomedicine, Vol. 1, 4, 293-299.

Mouchet, F. *et al.* (2008). "Characterisation and *in vivo* ecotoxicity evaluation of double-wall carbon nanotubes in larvae of the amphibian *Xenopus laevis*. Aquatic Toxicology. Vol. 87, 2, 127-137.

Muller, J. *et al.* (2005). "Respiratory toxicity of multi-wall carbon nanotubes." Toxicology and Applied Pharmacology, Vol. 207, no.3, 221-231.

Navarro, E. *et al.* (2008). "Toxicity of silver nanoparticles to *Chlamydomonas reinhardtii*, Environmental Science Technology. Vol. 42, 23, 8959-8964.

Ostiguy, C., Roberge, B., Menard, L., and Endo, C-A (2009). Best Practices Guide to Synthetic Nanoparticle Risk Management.

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2008). List of Manufactured Nanomaterials and List of Endpoints for Phase One of the OECD Testing Programme. http://www.oecd.org/officialdocuments/displaydocumentpdf?cote=ENV/JM/MONO(2008)13/REV&doclanguage=en

Poland, C.A. *et al.* (2008). "Carbon nanotubes introduced into the abdominal cavity of mice show asbestos-like pathogenicity in a pilot study." Nature Nanotechnology, Vol.3, no.7, 423-428.

Pflucker, F. *et al.* (1999). "The outermost stratum corneum layer is an effective barrier against dermal uptake of topically applied micronized titanium dioxide." International Journal of Cosmetic Science. Vol. 21, 6, 399-411.

Renwick, L.C. *et al.* (2004). "Increased inflammation and altered macrophage chemotactic responses caused by two ultrafine particle types." Occupational and Environmental Medicine. Vol. 61, 5, 442-447.

Roberts, J.E. *et al.* (2008). "Phototoxicity and cytotoxicity of fullerol in human lens epithelial cells." Toxicology and Applied Pharmacology. Vol. 228, 1, 49-58.

Schulte, P., Geraci, C., Zumwalde, R., Hoover, M. and Kuempel, E. (2008). "Occupational Risk Management of Engineered Nanoparticles." Journal of Occupational and Environmental Hygiene, Vol. 5, 4, 239-249.

Schulz, J. *et al.* (2002). "Distribution of sunscreens on skin." Advanced Drug Delivery Reviews. Vol. 54, 1 S157-S163.

Scott-Fordsmand, J.J. *et al.* (2008). The toxicity testing of double-walled nanotubes-contaminated food to *Eisenia veneta* earthworms. Ecotoxicology Environmental Safety. Vol. 71, 3, 616-619.

Shvedova, A.A. *et al.* (2003). "Exposure to carbon nanotube material: assessment of nanotube cytotoxicity using human keratinocyte cells." Journal of Toxicology and Environmental Health Part A., Vol. 66,20, 1909-1926.

Smith, C.J., Shaw, B.J. and Handy, R.D. (2007). Toxicity of single walled carbon nanotubes to rainbow trout (Oncorhynchus mykiss): Respiratory toxicity, organ pathologies, and other physiological effects. Aquatic Toxicology. Vol. 82, 2, 94-109.

Sun, H.W. *et al.* (2007). Enhanced accumulation of arsenate in carp in the presence of titatium dioxide nanoparticles. Water Air and Soil Pollution. Vol. 178, 1-4, 245-254.

P 1-56 new.indd 54 24/2/2554 15:59:35

Sung, J.H. *et al.* (2009). "Subchronic inhalation toxicity of silver nanoparticles." Toxicological Sciences, Vo. 108, 2, 452-461.

Takagi, A. *et al.* (2008). "Induction of mesothelioma in P53+/- mouse by intraperitoneal application of multi-wall carbon nanotube." Journal of Toxicological Sciences, Vol. 33, no.1, 105-116.

Takenaka, S. *et al.* (2001). "Pulmonary and systemic distribution of inhaled ultrafine silver particles in rats." Environmental Health Perspective, Vol. 109 Suppl 4, 547-551.

Trop, M. *et al.* (2006). "Silver coated dressing Acticoat caused raised liver enzymes and argyria-like symptoms in burn patient." The Journal of Trauma. 60(3), 648-652.

Trouiller, B., Reliene, R., Westbrook, A., Solaimani, P. and Schiestl, R. H. (2009). "Titanium Dioxide Nanoparticles Induce DNA Damage and Genetic Instability *in vivo* in Mice." Journal of Cancer Research, Vol. 69, 22, 8784-8789.

Vevers, W.F. and Jha, A.N. (2008). "Genotoxic and cytotoxic potential of titanium dioxide (TiO2) nanoparticles on fish cells *in vitro*. Ecotoxicology. Vol. 17, 5, 410-420.

Wadhera, A. and Fung, M. (2005). "Systemic argyria associated with ingestion of colloidal silver." Dermatology Online Journal. Vol. 11, 1, 12.

Wang, J. *et al.* (2007). "Acute toxicity and biodistribution of different sized titanium dioxide particles in mice after oral administration." Toxicology Letter. Vol. 168, 2, 176-185.

Wang, J. *et al.* (2008a). "Potential neurological lesion after nasal instillation of TiO_2 nanoparticles in the anatase and rutile crystal phases." Toxicology Letters, Vol. 183. 1-3, 72-80.

Wang, J. *et al.* (2008b). "Time-dependent translocation and potential impairment on central nervous system by intranasally instilled TiO_2 nanoparticles." Toxicology. Vol. 254, 1-2, 82-90.

Wang, H., Wick, R. L. and Xing, B. (2009). "Toxicity of nanoparticulate and bulk ZnO, Al_2O_3 and TiO_2 to the nematode *Caenorhabditis elegans*." Environmental Pollution, Vol. 157, Issue 4, 1171-1177.

Warheit, D.B. *et al.* (2007). "Pulmonary toxicity study in rats with three forms of ultrafine-TiO_2 particles: differential responses related to surface properties. Toxicology, Vol. 230, 1, 90-104.

Yeo, M.K. and Kang, M. (2008). "Effects of nanometer sized silver materials on biological toxicity during zebrafish embryogenesis." Bulletin of the Korean Chemical Society. Vol. 29, 6, 1179-1184.

Zhang, L.W., Zeng, L., Barron, A.R. and Monteiro-Riviere, N.A. (2007). "Biological interactions of functionalized single-wall carbon nanotubes in human epidermal keratinocytes." International Journal of Toxicology. Vol. 26, 2, 103-113.

Zhu, X.S. *et al.* (2008a). "Comparative toxicity of several metal oxide nanoparticle aqueous suspensions to Zebrafish (*Danio rerio*) early developmental stage." Journal of Environmental Science and Health Part A-Toxic/hazardous Substances and Environmental Engineering. Vol. 43, 3, 278-284.

Zhu, X.S. *et al.* (2008b). "Oxidative stress and growth inhibition in the freshwater fish *Carassius auratus* induced by chronic exposure to sublethal fullerene aggregates." Environmental Toxicology and Chemistry. Vol. 27, 9, 1979-1985.

รายชื่อคณะทำงานจัดทำชุดความรู้ด้านเทคนิคและวิชาการเรื่อง "ความปลอดภัยของวัสดุและผลิตภัณฑ์นาโน (Nano Safety)" สำหรับเจ้าหน้าที่ ผู้ประกอบการ และนักวิชาการ

ที่ปรึกษา

นพ.สุวิทย์	วิบุลผลประเสริฐ	ผู้ทรงคุณวุฒิด้านควบคุมป้องกันโรค กระทรวงสาธารณสุข
นพ.พิพัฒน์	ยิ่งเสรี	เลขาธิการคณะกรรมการอาหารและยา
ภญ.วีรวรรณ	แตงแก้ว	ผู้ตรวจราชการ กระทรวงสาธารณสุข
ภญ.ศรีนวล	กรกชกร	รองเลขาธิการคณะกรรมการอาหารและยา

ผู้ทรงคุณวุฒิ

ภญ.ดร.ยุพิน	ลาวัลย์ประเสริฐ	สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา
นางสาวจิตรา	เศรษฐอุดม	สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา
ดร.ศิรศักดิ์	เทพาคำ	ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ
ดร.ณัฐพันธ์	ศุภกา	ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ
ภญ.ลักษณา	ลือประเสริฐ	กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์
ดร.นลินี	ศรีพวง	กรมควบคุมโรค
นางกนกวรรณ	บุญยาทิษฐาน	สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
ดร.สิริวรรณ	มิ่งบรรเจิดสุข	กรมวิทยาศาสตร์บริการ
นายดนัย	กิจชัยนุกูล	กรมวิทยาศาสตร์บริการ
นางสุมาลี	ชนะชาญมงคล	กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน
นางชื่นสุข	เมธากุลวัฒน์	สำนักงานคณะกรรมการคุ้มครองผู้บริโภค
นายสิรธีร์	พจน์จิราภรณ์	สำนักงานคณะกรรมการคุ้มครองผู้บริโภค
ดร.ขวัญฤดี	โชติชนาทวีวงศ์	สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย
ดร.กิติชัย	รัตนะ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.เลอสรร	ธนสุกาญจน์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ประเสริฐ	ภวสันต์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.สุรินทร์	เหล่าสุขสถิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.ชุติมา	เอี่ยมโชติชวลิต	สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
ดร.ดามพ์	เศรษฐจันทร	สถาบันวิจัยจุฬาภรณ์
ดร.ยุวรี	อินนา	นักวิชาการอิสระ
นายเชวง	จาว	สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย
นางสาววลัยพร	มุขสุวรรณ	มูลนิธิบูรณะนิเวศ

ผู้จัดทำ

ดร.สุจิตรา	วาสนาดำรงดี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ภญ.อมรรัตน์	ลีนะนิธิกุล	สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา
ภญ.ดร.ออรัศ	คงพานิช	สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา
ภก.ศิระ	จันทร์เพ็ง	สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา

P 1-56 new.indd 56 24/2/2554 15:59:36