ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

ฉบับที่ ๔๗๕๐ (พ.ศ. ๒๕๕๘)

ออกตามความในพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

พ.ศ. ๒๕๑๑

เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

นาโนเทคโนโลยี เล่ม ๓ แนวทางการจัดกระทำ และกำจัดวัสดุนาโนอย่างปลอดภัย

อาศัยอำนาจตามความในมาตรา ๑๕ แห่งพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. ๒๕๑๑ ซึ่งแก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (ฉบับที่ ๗) พ.ศ. ๒๕๕๘ รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรมออกประกาศกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม นาโนเทคโนโลยี เล่ม ๓ แนวทางการจัดกระทำ และกำจัดวัสดุนาโนอย่างปลอดภัย มาตรฐานเลขที่ มอก. 2691 เล่ม 3 – 2558 ไว้ ดังมีรายละเอียดต่อท้ายประกาศนี้

ทั้งนี้ ให้มีผลตั้งแต่วันที่ประกาศในราชกิจจานุเบกษาเป็นต้นไป

ประกาศ ณ วันที่ ๑๗ ธันวาคม พ.ศ. ๒๕๕๘

อรรชกา สีบุญเรือง

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
นาโนเทคโนโลยี
เล่ม 3 แนวทางการจัดกระทำ และกำจัดวัสดุนาโนอย่างปลอดภัย

1. ขอบข่าย

1.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ ครอบคลุมถึงแนวทางการจัดกระทำและกำจัดวัสดุนาโนโดยอาศัยการประเมินความเสี่ยง และคำนึงถึงความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นได้ในการพัฒนา การผลิต และการใช้งานของวัสดุนาโน รวมทั้งเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและการจัดเตรียมยุทธศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพในการจัดการปัญหาและควบคุมความเสี่ยง

1.2 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ นำไปปรับใช้ได้กับวัสดุนาโน โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัตถุนาโน และกลุ่มของวัตถุนาโนที่เป็นก้อนเกาะแน่นและก้อนเกาะหลวม (nano-objects and their aggregates and agglomerates ; NOAA) รวมถึงวัสดุใด ๆ หรือกระบวนการเตรียมใด ๆ ที่มีวัสดุนาโนเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนที่มีนัยสำคัญ แต่ไม่รวมถึงวัสดุนาโนที่เกิดขึ้นโดยกระบวนการทางธรรมชาติ หรือที่เกิดขึ้นโดยไม่ตั้งใจ เช่น การเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล การเชื่อมโลหะ

1.3 เนื่องจากข้อมูลการประเมินความเสี่ยงของวัสดุนาโนยังมีความไม่แน่นอนอยู่ในหลายประเด็น จึงควรใช้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ในการจัดกระทำและกำจัดวัสดุนาโนเพื่อเป็นแนวทางการดำเนินการให้ปลอดภัยไว้ก่อน

2. บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ ให้เป็นไปตาม มอก. 2691 เล่ม 1 และดังต่อไปนี้

2.1 ฟูลเลอรีน (fullerene) หมายถึง โมเลกุลที่ประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอนทั้งหมดซึ่งสร้างเป็นรูปแบบของระบบของพอลิไซคลิก (polycyclic) ที่มีการหลอมวงแหวนคล้ายกรงปิด ประกอบด้วยวงแหวนห้าเหลี่ยม 12 วง และที่เหลือเป็นวงแหวนหกเหลี่ยม

หมายเหตุ *1. ดัดแปลงมาจาก**คำ**นิยามในระบบการเรียกชื่อคำศัพท์สารเคมีของ IUPAC*

2. ตัวอย่างที่รู้จักกันดีคือ C_{60} ซึ่งมีรูปร่างแบบทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 nm

3. อักษรย่อ

ความหมายของอักษรย่อที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ มีดังต่อไปนี้

3.1 ACGIH (American conference of governmental industrial hygienist) คือ การประชุมนักสุขศาสตร์อุตสาหกรรมภาครัฐแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2 CMAR (carcinogenetic, mutagenic, asthmagenic or reproductive toxin) คือ สารก่อมะเร็ง สารก่อการกลายพันธุ์ สารที่ก่อโรคหอบหืด หรือ สารพิษต่อระบบสืบพันธุ์

3.3 CNF (carbon nanofibre) คือ เส้นใยนาโนคาร์บอน

3.4 CNT (carbon nanotube) คือ ท่อนาโนคาร์บอน

3.5 CPC (condensation particle counter) คือ เครื่องวัดความควบแน่นโดยจำนวนอนุภาค

3.6 DMPS (differential mobility particle sizer) คือ เครื่องวัดขนาดอนุภาคโดยการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้า

3.7 ELPI (electrostatic low pressure impactor) คือ เครื่องอิเล็กโตรสแตติกโลวเพรสเชอร์อิมแพคเตอร์

3.8 EPA (environmental protection agency) คือ องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อม

3.9 HEPA (high efficiency particulate air filter) คือ แผ่นกรองอากาศที่มีประสิทธิภาพสูง หรือแผ่นกรองเฮปา

3.10 HSE (Health and Safety Executive) คือ คณะกรรมการจัดการสุขภาพและความปลอดภัย

3.11 IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) คือ สหภาพเคมีบริสุทธิ์และเคมีประยุกต์ระหว่างประเทศ

3.12 MWCNT (multi-wall carbon nanotube) คือ ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น

3.13 NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) คือ สถาบันอาชีวอนามัยและความปลอดภัยแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา

3.14 NOAAs (nano-objects and their aggregates and agglomerates) คือ วัตถุนาโน และกลุ่มของวัตถุนาโนที่เป็นก้อนเกาะแน่น/ก้อนเกาะหลวม

3.15 OSHA (Occupational Safety and Health Administration) คือ สำนักงานบริหารความปลอดภัยและอาชีวอนามัย

3.16 PEL (permissible exposure limit) คือ ค่าขีดจำกัดการรับสัมผัสสารในสิ่งแวดล้อมการทำงาน

3.17 PPE (personal protective equipment) คือ อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล

3.18 REL (recommended exposure limit) คือ ค่าขีดจำกัดการรับสัมผัสสารในสิ่งแวดล้อมการทำงาน

3.19 RPE (respiratory protective equipment) คือ อุปกรณ์คุ้มครองทางเดินหายใจ

3.20 SDS (safety data sheet) คือ เอกสารข้อมูลความปลอดภัย

3.21 SEM (scanning electron microscope) คือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.22 SMPS (switched-mode power supply) คือ เครื่องสวิตช์โหมดเพาเวอร์ซัพพลาย

3.23 SWCNT (single-wall carbon nanotube) คือ ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดี่ยว

3.24 TEM (transmission electron microscope) คือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

3.25 TEOM (tapered element oscillating microbalance) คือ เครื่องวัดมวลระดับไมโครแบบเทเปอร์อีเลเมนต์ออสซิลเลติง

3.26 TiO_2 (titanium dioxide) คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์

3.27 TLV (threshold limit value) คือ ค่าขีดจำกัดการรับสัมผัสสารในสิ่งแวดล้อมการทำงาน

3.28 TWA (time-weighted average) คือ ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นสารเคมีในอากาศตลอดเวลาการทำงาน

3.29 WEL (workplace exposure limit) คือ ค่าขีดจำกัดการรับสัมผัสสารในสิ่งแวดล้อมการทำงาน

4. ความเสี่ยงจากวัสดุนาโน

4.1 ทั่วไป

วัสดุนาโน เป็นวัสดุที่มีมิติภายนอก หรือโครงสร้างภายใน หรือโครงสร้างพื้นผิวอยู่ในช่วง 1 nm ถึง 100 nm โดยประมาณ (ตัวอย่างของวัสดุนาโนจากการผลิตแสดงไว้ในภาคผนวก ก.) หลายปีที่ผ่านมามีรายงานความเจ็บป่วยที่เกิดจากการรับสัมผัสอนุภาคต่าง ๆ รวมถึงวัสดุนาโน ซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพ ทั้งต่อบุคคลและกลุ่มประชากรที่มีโอกาสรับสัมผัสกับอนุภาค รายงานเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นมักเกี่ยวข้องกับการรับสัมผัสขณะทำงานในโรงงานอุตสาหกรรม และจากมลภาวะในสิ่งแวดล้อม เช่น การรับสัมผัสกับฝุ่นถ่านหินซึ่งเชื่อมโยงกับการเกิดโรคทางปอด เช่น โรคฝุ่นจับปอด (pneumoconiosis) และโรคปอดอุดกลั้น (chronic obstructive pulmonary disease) และการรับสัมผัสกับแร่ใยหิน (asbestos) ซึ่งเชื่อมโยงกับการเกิดโรคใยหิน (asbestosis) โรคมะเร็งเยื่อหุ้มปอด (mesothelioma) โรคมะเร็งปอด (lung cancer) สำหรับการรับสัมผัสกับอนุภาคที่ปะปนอยู่กับมลภาวะทางอากาศในสิ่งแวดล้อมนั้น ส่งผลให้อัตราการเข้ารับการรักษาในโรงพยาบาลสูงขึ้น

โอกาส (หรือความเสี่ยง) ของอันตรายนั้น โดยหลักขึ้นกับปริมาณของวัสดุนาโนที่เข้าสู่อวัยวะ และความเป็นพิษของวัสดุนาโน อย่างไรก็ตามปริมาณของวัสดุนาโนที่กระตุ้นให้เกิดโรคไม่สามารถวัดได้โดยตรง แต่สามารถอนุมานได้จากปริมาณการรับสัมผัส ร่วมกับระดับความเข้มข้นของวัสดุนาโนในอากาศที่บุคคลนั้นหายใจเข้าไป รวมทั้งระยะเวลาที่ได้รับสัมผัสวัสดุนาโนของบุคคลนั้นด้วย ดังนั้น หากไม่มีการรับสัมผัสกับวัสดุนาโน (เช่นไม่พบวัสดุนาโนในอากาศ) ทำให้ไม่มีการสะสมของอนุภาค จึงไม่มีความเสี่ยงต่อสุขภาพเกิดขึ้น แม้ว่าวัสดุนาโนนั้นอาจมีความเป็นพิษก็ตาม ดังนั้นการปฏิบัติตามวิธีการที่ถูกต้องเกี่ยวกับ

การควบคุมความเสี่ยงของการใช้งานวัสดุนาโน คือการเข้าใจถึงโอกาสการรับสัมผัสกับวัสดุนาโนจากการผลิตและการใช้งาน โดยมีมาตรการเพื่อควบคุม จัดการ หรือลดการรับสัมผัสกับวัสดุนาโน ทำให้สามารถควบคุมความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นได้

การประเมินความเสี่ยงและการรับสัมผัสของวัสดุนาโนควรมีการดำเนินการตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ที่มีวัสดุนาโนเป็นองค์ประกอบตั้งแต่กระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโน การเก็บและการจัดการการนำวัสดุนาโนไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ การใช้งาน และการทำลาย เพื่อให้เกิดความมั่นใจในด้านสุขภาพและความปลอดภัย

หมายเหตุ *แนวทางการจัดการด้านความเสี่ยงของวัสดุนาโนตลอดวัฏจักรชีวิตของระบบผลิตภัณฑ์ที่มีวัสดุนาโนเป็นองค์ประกอบ เริ่มต้นตั้งแต่การผลิตวัสดุนาโน (หรือสารตั้งต้นของวัสดุนาโน) ที่มีจุดเริ่มจากผืนดินไปยังจุดที่ซึ่งวัสดุนาโนที่เหลือตกค้างถูกส่งกลับสู่สิ่งแวดล้อม ดูได้จาก มอก. 2691 เล่ม 6 ซึ่งเกี่ยวข้องกับข้อแนะนำเกี่ยวกับความปลอดภัยและประเมินความเสี่ยงในการผลิตวัสดุนาโน*

4.2 แนวโน้มความเสี่ยงของวัสดุนาโน

วัสดุนาโนเป็นวัสดุที่มีขนาดระดับนาโนสเกลซึ่งอยู่ในช่วง 1 nm ถึง 100 nm โดยประมาณ และด้วยขนาดดังกล่าวทำให้วัสดุมีสมบัติพิเศษที่แตกต่างจากสารชนิดเดียวกันที่อยู่เป็นอะตอม หรือโมเลกุล หรือวัสดุขนาดใหญ่ ซึ่งมนุษย์สามารถนำสมบัติพิเศษที่เกิดขึ้นมาใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ได้ แต่ขณะเดียวกันสมบัติพิเศษที่เกิดขึ้น ทั้งที่ระบุได้และระบุไม่ได้ ส่งผลให้ความเป็นพิษของวัสดุนาโนเปลี่ยนไปด้วยเช่นกัน สมบัติของวัสดุนาโนที่อาจส่งผลให้แนวโน้มความเสี่ยงของวัสดุนาโนต่อสุขภาพเปลี่ยนแปลงไป ได้แก่

(1) ขนาดที่เล็กของวัสดุนาโน

วัสดุนาโนมีขนาดเล็ก จึงผ่านเข้าสู่ระบบต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิตได้ดีกว่าวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งรวมถึงโอกาสการเคลื่อนย้ายตำแหน่งที่ง่ายกว่าด้วย เช่น การเคลื่อนที่ผ่านขอบเขตเซลล์ หรือการเคลื่อนที่จากปอดเข้าสู่กระแสเลือดโดยตรง และต่อไปยังอวัยวะต่าง ๆ ทั้งหมดของร่างกาย หรือการสะสมในจมูก และเคลื่อนที่ต่อไปยังสมองโดยตรง

(2) พื้นที่ผิวที่สูงขึ้นของวัสดุนาโน

วัสดุนาโนมีขนาดเล็ก ทำให้มีพื้นที่ผิวต่อมวลที่สูงกว่าวัสดุขนาดใหญ่ ซึ่งอาจส่งผลให้ความเป็นพิษสูงขึ้นด้วย

(3) ความสามารถในการละลาย

วัสดุนาโนมีความสามารถในการละลายที่เปลี่ยนแปลงไป การลดขนาดช่วยให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์นี้อาจช่วยเพิ่มอัตราสารเข้าระบบชีวภาพ (bioavailability) ได้มากกว่าอนุภาคชนิดเดียวกันที่ละลายไม่ได้เนื่องจากอนุภาคมีขนาดใหญ่ ส่วนวัสดุนาโนที่มีสมบัติการละลาย

ต่ำอาจส่งผลให้เพิ่มการตกค้างหรือสะสมในอวัยวะ หรือร่างกายทำให้มีความอันตรายต่อร่างกายที่สูงขึ้นได้เช่นกัน

(4) สัณฐานวิทยาของวัสดุนาโน

อัตราส่วนด้านยาวต่อด้านสั้นของวัสดุมีผลต่อความเป็นพิษ วัสดุนาโนหลายชนิดมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางที่สูง (เช่น CNT หรือลวดนาโน) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับสัณฐานวิทยาของแร่ใยหิน ซึ่งเมื่อมีการสูดดมวัสดุที่มีลักษณะนี้เข้าสู่ถุงลมปอด การกำจัดออกจากปอดเป็นไปได้ยาก เนื่องจาก รูปร่างที่ไม่เอื้ออำนวยต่อการกำจัดด้วยกลไกตามธรรมชาติของปอด ความคงทนและความที่ไม่ละลายได้ด้วยของเหลวภายในปอดทำให้วัสดุนั้นคงอยู่ในปอดเป็นระยะเวลานาน ส่งผลให้เกิดการอักเสบและเกิดโรคในท้ายที่สุด

(5) สมบัติอื่น ๆ

วัสดุนาโนบางชนิดอาจมีสมบัติใหม่ที่แตกต่างไปจากวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่กว่า โดยสมบัติทางฟิสิกส์-เคมีที่เกิดขึ้นใหม่นี้ มักเกิดขึ้นควบคู่กับการเปลี่ยนสมบัติใหม่ทางชีวภาพ ซึ่งส่งผลให้ความเป็นพิษเพิ่มขึ้นด้วย

4.3 แนวโน้มความเสี่ยงจากการรับสัมผัสวัสดุนาโน

4.3.1 การรับสัมผัสกับวัสดุนาโนผ่านทางการสูดดม

ปอดเป็นอวัยวะที่มีโอกาสได้รับผลกระทบจากการสูดดมวัสดุนาโนมากที่สุด หลักฐานทางการศึกษาพบว่าวัสดุนาโนที่สูดดมเข้าไปกระตุ้นให้เกิดกระบวนการอักเสบ แต่ปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดความรุนแรงการตอบสนองนั้นยังไม่ทราบแน่ชัด ผลการศึกษาทางระบาดวิทยาเกี่ยวกับผลกระทบต่อสุขภาพจากการรับสัมผัสกับมลภาวะทางอากาศที่มีสัดส่วนของอนุภาคที่มีความละเอียดรวมถึงอนุภาคนาโนที่สูง ส่งผลให้เกิดโรคที่เกี่ยวข้องกับระบบหลอดเลือดได้ อย่างไรก็ตามผลกระทบของวัสดุนาโนจากการรับสัมผัสกับวัสดุนาโนในสถานปฏิบัติงานนั้นยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด การให้ความสำคัญต่อการป้องกัน หรือลดการรับสัมผัสวัสดุนาโนจึงเป็นแนวทางที่ควรดำเนินการ

4.3.2 การรับสัมผัสกับวัสดุนาโนผ่านทางผิวหนังและดวงตา

การศึกษาการซึมของวัสดุนาโนผ่านทางผิวหนังนั้นยังอยู่ในช่วงเริ่มต้น และยังมีอีกหลายประเด็นที่ต้องทำการศึกษาต่อไป เช่น ผลในกรณีที่ผิวหนังมีบาดแผล สำหรับการศึกษาทางด้านอื่นยังอยู่ในช่วงดำเนินการ ดังนั้นจึงควรระมัดระวัง และป้องกันการรับสัมผัสกับวัสดุนาโนผ่านทางผิวหนังโดยตรง หรือจนกว่าจะมีผลการศึกษาด้านความปลอดภัยอย่างชัดเจน จากการศึกษาผลกระทบของการรับสัมผัส CNT ผ่านทางผิวหนังและดวงตาในหลอดทดลอง พบว่า SWCNT ที่ไม่บริสุทธิ์ ส่งผลให้อัตราการรอดชีวิตของเซลล์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ การใช้อุปกรณ์ป้องกันดวงตาจึงมีความสำคัญ และควรคำนึงถึงการเกิดฝ้าบริเวณเลนส์ และต้องมีการดูแลเป็นพิเศษสำหรับผู้ที่ใส่แว่นสายตา

4.4 ความเสี่ยงการเกิดเพลิงไหม้และการระเบิดจากวัสดุนาโน

อินทรียวัตถุส่วนใหญ่ โลหะหลายชนิด และอนินทรียวัตถุบางชนิดที่ไม่ใช่โลหะ สามารถเกิดการระเบิดได้ หากเกิดเป็นละอองฝอยในอากาศ หรือหมอกฝุ่นที่มีความเข้มข้นมากพอ และหากมีออกซิเจน และแหล่งของการเกิดประกายไฟอยู่ในบริเวณใกล้เคียง นอกจากนี้โอกาสในการเกิดเพลิงไหม้และระเบิดของวัสดุใด ๆ ยังขึ้นกับขนาดและพื้นที่ผิวของวัสดุนั้นด้วย วัสดุนาโนมีขนาดเล็ก ทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะ เช่น พื้นที่ผิวโดยรวมต่อปริมาตร หรือต่อมวลของฝุ่นเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้มีโอกาสการเกิดระเบิดที่รุนแรงขึ้นด้วย โอกาสและความรุนแรงของการระเบิดจากวัสดุนาโนเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับปริมาณของวัสดุนาโนไวไฟที่นำมาใช้ ดังนั้นการทำงานกับวัสดุนาโนปริมาณมาก เช่น ในระดับกึ่งอุตสาหกรรม หรือระดับอุตสาหกรรมควรหลีกเลี่ยงการทำให้เกิดหมอก หรือละอองของวัสดุนาโนไวไฟในอากาศ

5. การบริหารจัดการความเสี่ยงของวัสดุนาโน

การบริหารจัดการความเสี่ยงเป็นสิ่งที่นายจ้างจำเป็นต้องนำมาใช้เพื่อป้องกันหรือลดการรับสัมผัสของสารอันตรายของลูกจ้างที่เป็นผู้ปฏิบัติงานและบุคคลอื่น ๆ ที่อาจได้รับอันตราย ขั้นตอนการบริหารจัดการความเสี่ยงที่มาจากแหล่งอ้างอิงต่าง ๆ อาจมีความแตกต่างกันไป แต่การดำเนินการพื้นฐานโดยทั่วไปมีความสอดคล้องกันโดยครอบคลุมกิจกรรมดังนี้ การรวบรวมข้อมูล การประเมินความเสี่ยง การกำหนดมาตรการควบคุมการรับสัมผัสและดำเนินการ การเฝ้าระวังและทบทวน และการจดบันทึกและการสื่อสาร

หมายเหตุ *1. การประเมินความเสี่ยงในสถานปฏิบัติงานควรได้รับการสนับสนุนให้มีการดำเนินการ ถึงแม้ไม่เป็นการบังคับเนื่องจากข้อจำกัดของจำนวนข้อมูลความเสี่ยงที่เกิดจากการรับสัมผัสที่มีอยู่อย่างจำกัดในเวลานี้ แต่เพื่อป้องกันความปลอดภัยให้กับผู้ปฏิบัติงาน ผู้ที่อาจได้รับสัมผัสอื่น ๆ และสิ่งแวดล้อม*

2. การประเมินความเสี่ยงและแนวทางการควบคุมนั้น อยู่บนพื้นฐานของข้อมูลล่าสุดทางพิษวิทยา ข้อมูลการประเมินการรับสัมผัสและข้อมูลวิธีการสำหรับควบคุมการรับสัมผัส ซึ่งหาได้จากหน่วยงานภาครัฐและหน่วยงานด้านกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนาโน เช่น NIOSH EPA HSE EU OSHA

6. ผู้ประเมินความเสี่ยง

การคัดสรรบุคลากรที่มีความสามารถในการประเมินความเสี่ยงเป็นการตัดสินใจลำดับแรก กลุ่มบุคคลที่มีส่วนร่วมในกระบวนการประเมินความเสี่ยงของสารเคมีโดยทั่วไปนั้น ประกอบด้วย บุคลากรที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนากระบวนการ หรือผู้ปฏิบัติงาน ผู้จัดการ หรือผู้เชี่ยวชาญด้านอาชีวสุขศาสตร์ จากความรู้ที่เกี่ยวกับวัสดุนาโนซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดในปัจจุบัน จึงเป็นการยากที่ปัจเจกบุคคลซึ่งขาดความรู้ด้านความเสี่ยงของวัสดุนาโนจะสามารถตัดสินใจเกี่ยวกับขั้นตอนการดำเนินการได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ โดยมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ชี้แนะให้บุคลากรที่เกี่ยวข้องในการพัฒนาการประเมินความเสี่ยงของวัสดุนาโนจำเป็นต้องหาความรู้เพิ่มเติม หรือเข้ารับการฝึกอบรมจากหน่วยงานที่มีความเชี่ยวชาญทางด้านนาโนเทคโนโลยี

หมายเหตุ *การบริหารจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน ต้องอาศัยความรู้ความเชี่ยวชาญเฉพาะจากผู้ซึ่งมีความรู้ ความเชี่ยวชาญเฉพาะด้านต่าง ๆ เพื่อการดำเนินการดังกล่าว ตามที่กำหนดไว้ในพระราชบัญญัติความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน พ.ศ. 2554 โดย*

บุคคลดังกล่าวต้องเป็นผู้ซึ่งได้ขึ้นทะเบียน หรือได้รับอนุญาตจึงจะดำเนินการได้ ซึ่งให้เป็นไปตาม พ.ร.บ. ดังกล่าวในมาตรา 9 มาตรา 11 และมาตรา 33

7. การรวบรวมข้อมูล

การรวบรวมข้อมูล ครอบคลุม ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนาโน งานที่เกี่ยวข้อง และแนวปฏิบัติในการทำงานกับวัสดุนาโน ทั้งรูปแบบงานประจำและงานที่เกิดขึ้นเป็นครั้งคราว เช่น การบำรุงรักษา และการทำความสะอาด ในกรณีที่พบว่าข้อมูลของวัสดุนาโนมีไม่เพียงพอ ต้องให้การจัดการกับวัสดุนั้นเสมือนกับเป็นวัสดุที่มีความอันตรายสูงและใช้มาตรการควบคุมที่รัดกุม รายละเอียดที่ต้องให้ความสำคัญจากข้อมูลที่รวบรวมได้ คือ

- ชื่อทางการค้า และชื่อทางเคมีของวัสดุ
- ข้อมูลใน SDS ที่เพียงพอ และครบถ้วน
- องค์ประกอบทางเคมี
- การมีอยู่ของวัสดุนาโนในวัสดุที่ใช้ สัดส่วนปริมาณของวัสดุนาโนที่เป็นองค์ประกอบ
- วัสดุมีอัตราส่วนด้านยาวต่อด้านสั้นที่สูงหรือไม่
- การกระจายตัวของขนาดวัสดุนาโน
- ความเป็นฝุ่นของวัสดุนาโน
- สารที่ใช้ระงับการฟุ้งกระจายของฝุ่นในวัสดุนาโน หรือการยึดจับของวัสดุนาโนกับวัสดุอื่น
- ความสามารถในการละลายน้ำของวัสดุ
- อันตราย หรือ ความเป็นพิษของวัสดุ

ข้อควรคำนึงถึงในการรวบรวมข้อมูล คือ ควรบันทึกทั้งข้อมูลที่หาได้และระบุส่วนของข้อมูลที่ขาดหายไป และควรตรวจสอบว่าข้อมูลใน SDS ที่ผู้ขายระบุไว้ได้คำนึงถึงความเป็นวัสดุนาโนของวัสดุนั้น ๆ หรือไม่ นอกจากนี้ควรมีการรวบรวมข้อมูลมาตรฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องไว้ด้วย

8. การประเมินความเสี่ยง

8.1 การแบ่งกลุ่มของวัสดุนาโน

วัสดุนาโนแบ่งตามการประเมินความเป็นอันตรายออกเป็น 4 กลุ่ม คือ

กลุ่มที่ 1 วัสดุนาโนที่เป็นเส้นใย

กลุ่มที่ 2 วัสดุนาโนที่เป็นสารก่อมะเร็งและสารพิษอื่น ๆ (CMAR)

กลุ่มที่ 3 วัสดุนาโนที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อย

กลุ่มที่ 4 วัสดุนาโนที่ละลายน้ำได้

8.2 การประเมินการรับสัมผัส

8.2.1 รายละเอียดที่ต้องจัดทำในการประเมินเกี่ยวกับการรับสัมผัส มีดังนี้

(1) วัตถุประสงค์ ขอบเขต ระดับของรายละเอียด และแนวทางที่ใช้ในการประเมินการรับสัมผัส

(2) การคาดการณ์การรับสัมผัสและปริมาณสำหรับแต่ละช่องทางการรับสัมผัส ทั้งกรณีบุคคลและกลุ่มบุคคล

(3) การประเมินคุณภาพของการประเมินการรับสัมผัสโดยรวม และระบุระดับความเชื่อมั่นของการคาดการณ์การรับสัมผัสและผลสรุปที่ได้

หมายเหตุ *1. การคาดการณ์ระดับของการรับสัมผัสอาจมีความไม่แน่นอนสูง เนื่องด้วยความขาดแคลนข้อมูลความรู้เกี่ยวกับวัสดุนาโน ดังนั้นการประเมินการรับสัมผัสควรทำด้วยความระมัดระวัง และจำเป็นต้องใช้แนวทางปลอดภัยไว้ก่อนในกรณีที่เกิดความไม่แน่ใจ*

2. ควรให้ความสำคัญกับการจัดทำข้อมูลเพิ่มเติม ซึ่งรวมถึงโปรแกรมการวัดการรับสัมผัสด้วยวิธีการตรวจวัดสำหรับการเฝ้าระวังและควบคุมการรับสัมผัส ตามข้อ 10.

8.2.2 ตัวอย่างคำถามสำหรับช่วยในการประเมินการรับสัมผัส มีดังนี้

(1) งานหรือกิจกรรมใดที่บุคคลมีโอกาสรับสัมผัสกับวัสดุนาโน เช่น กระบวนการผลิต การทำความสะอาด งานซ่อมบำรุง การขนส่ง และการจัดเก็บ

(2) ใครในแต่ละงานหรือแต่ละกิจกรรมที่มีโอกาสรับสัมผัสกับวัสดุนาโน เช่น ผู้ปฏิบัติงานที่รับผิดชอบงานนั้น ผู้ปฏิบัติงานในพื้นที่ใกล้เคียง เช่น ผู้มาติดต่อ พนักงานรับจ้าง/ผู้รับเหมา ผู้จัดการ และอื่น ๆ

(3) ช่องทางใดที่มีโอกาสรับสัมผัส เช่น ทางการสูดดม ทางปาก ทางผิวหนังและดวงตา

(4) เหตุการณ์ใดที่ทำให้เกิดการรับสัมผัส เช่น จากการทำงานตามปกติ อุบัติเหตุจากการรั่วไหลและการบำรุงรักษา (พิจารณาจากเหตุการณ์ที่ไม่ใช่เหตุการณ์ปกติด้วย)

(5) ความถี่ในการรับสัมผัส (ตลอดระยะเวลาการทำงานทั้งกะ ระยะเวลาหนึ่ง หรือนาน ๆ เกิดครั้ง)

(6) ระดับการรับสัมผัสอยู่ในระดับใดและระยะเวลานานเท่าไร (อาจต้องเฝ้าระวังด้านสุขภาพ)

(7) มีโอกาสที่บุคคลอาจรับสัมผัสกับวัสดุนาโนที่กระจายตัวอยู่ในอากาศ หรือบนพื้นผิวของสถานปฏิบัติงาน หรืออื่น ๆ หรือไม่

8.3 การประเมินความเสี่ยง

การประเมินความเสี่ยงเป็นการนำข้อมูลการกำหนดอันตรายและโอกาสการรับสัมผัสของวัสดุนาโนที่ได้จากการดำเนินการในข้อ 8.1 และข้อ 8.2 มาใช้จัดระดับความเสี่ยงเพื่อหาแนวทางการจัดการต่อไป ทั้งนี้เนื่องจากการจัดการอันตรายอาจไม่สามารถดำเนินการได้อย่างเร่งด่วนพร้อมกันทั้งหมด จึงจำเป็นต้องมีการจัดลำดับการดำเนินการ โดยประเมินจาก

(1) ความเสี่ยงที่ส่งผลร้ายแรงต่อสุขภาพมากที่สุด

(2) ความเสี่ยงที่มีโอกาสเกิดในระยะเวลาอันใกล้ที่สุด

(3) ความเสี่ยงที่สามารถจัดการได้เร็วที่สุด

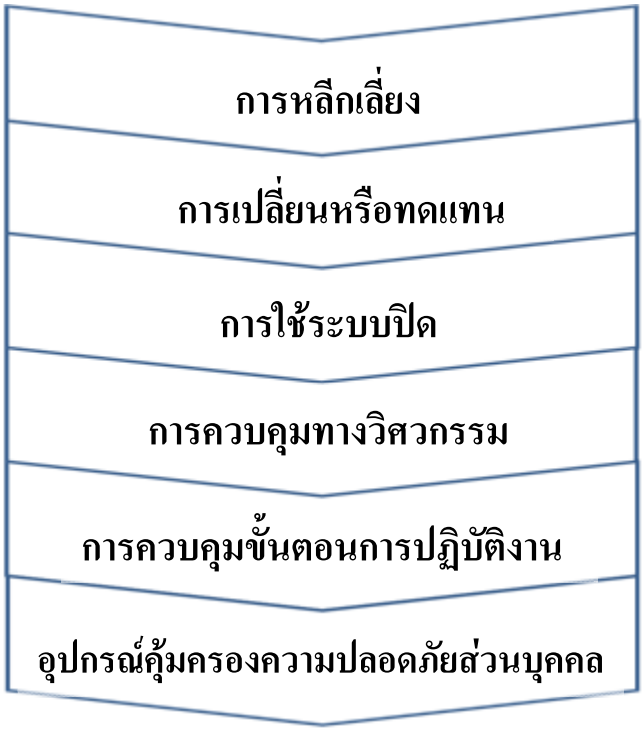
ควรให้ความสำคัญกับความร้ายแรงของความเสี่ยงเป็นสำคัญ โดยควรจัดการกับความเสี่ยงที่ร้ายแรงทันที ขณะเดียวกันไม่ควรจัดลำดับความเสี่ยงที่มีความร้ายแรงน้อยที่สุดไว้ลำดับท้าย หากสามารถจัดการกับความเสี่ยงนั้นได้ง่าย และเป็นความเสี่ยงที่อาจมีความถี่ในการเกิดสูง

หมายเหตุ *ให้ใช้ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การประเมินความเสี่ยงด้านสารเคมีต่อสุขภาพผู้ปฏิบัติงานในโรงงานอุตสาหกรรม พ.ศ. 2555 เป็นแนวทางประกอบเพิ่มเติมสำหรับการประเมินความเสี่ยงได้*

9. การกำหนดมาตรการควบคุมการรับสัมผัส

9.1 มาตรการควบคุมการรับสัมผัส

วัตถุประสงค์ของการใช้มาตรการควบคุม คือเพื่อลดการรับสัมผัสของผู้ปฏิบัติงานให้ต่ำที่สุดโดยใช้มาตรการที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ การพิจารณาใช้มาตรการต้องเป็นไปตามลำดับขั้นของการควบคุมที่แสดงไว้ในรูปที่ 1 จากบนลงล่าง ลำดับการควบคุมที่สูงที่สุดมีความเป็นไปได้ทางเทคนิคสูงและต้นทุนต่ำ อย่างไรก็ตามมาตรการที่ใช้ต้องสมดุลกับระดับของการควบคุมที่จำเป็นต้องใช้เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในสภาพแวดล้อมการทำงาน และประสิทธิภาพของมาตรการควบคุม ทั้งนี้สามารถใช้มาตรการหลายมาตรการร่วมกัน เช่น ผลจากการประเมินความเสี่ยงอาจระบุว่าการควบคุมขั้นตอนการปฏิบัติงานเพียงอย่างเดียวนั้นเพียงพอต่อการควบคุม แต่ควรพิจารณาให้มีการควบคุมขั้นตอนการปฏิบัติงานควบคู่ไปกับการควบคุมทางวิศวกรรมด้วยสำหรับบางกรณี



รูปที่ 1 ลำดับขั้นของการควบคุม

(ข้อ 9.1)

9.1.1 การหลีกเลี่ยง (elimination)

เป็นการพิจารณาหลีกเลี่ยงการใช้วัสดุนาโนอันตรายหรือกระบวนการที่เป็นเหตุให้เกิดการรับสัมผัส มาตรการนี้อาจเป็นไปได้ยากหากวัสดุนาโนที่นำมาใช้นั้นมีสมบัติที่จำเพาะต่อการใช้งาน

9.1.2 การเปลี่ยนหรือทดแทน (substitution)

เป็นการพิจารณาเปลี่ยนวัสดุนาโนหรือกระบวนการไปยังวัสดุหรือกระบวนการทางเลือกที่มีความเสี่ยงน้อยกว่า หรืออาจพิจารณาใช้วัสดุนาโนในรูปแบบที่ช่วยลดโอกาสการรับสัมผัสให้ต่ำลง เช่น การใช้วัสดุนาโนในรูปแบบที่มีการกระจายตัวอยู่ในของเหลวหรือของแข็ง ครีม อัดเม็ด แทนที่การใช้ในรูปแบบผง

9.1.3 การใช้ระบบปิด (enclosure)

เป็นการจัดการแยกกระบวนการหรือชิ้นส่วนอุปกรณ์ไว้ในระบบปิด แยกออกจากผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งช่วยจำกัดการปลดปล่อยของวัสดุนาโน ใช้กับกระบวนการใด ๆ ที่ส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยวัสดุนาโนไปสู่อากาศ รวมถึงกระบวนการผลิตวัสดุนาโนในสถานะแก๊ส และกระบวนการทำแห้งแบบพ่น และกระบวนการอื่น ๆ ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการใช้วัสดุนาโนในรูปแบบแห้ง

9.1.4 การควบคุมทางวิศวกรรม (engineering control)

เป็นการจัดการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ของกระบวนการหรือสถานปฏิบัติงานเพื่อลดการปลดปล่อยที่ส่งผลต่อการรับสัมผัสของผู้ปฏิบัติงาน เช่น การติดตั้งระบบระบายอากาศพร้อมอุปกรณ์บำบัด หรือดักจับวัสดุนาโน เช่นตู้ดูดควัน และอุปกรณ์ดักจับฝุ่น นอกจากนี้ จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาและทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์อย่างสม่ำเสมอ สำหรับอากาศที่หมุนเวียนเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ต้องทำให้บริสุทธิ์ก่อน ส่วนการลดการรับสัมผัสทางผิวหนังและดวงตาทำได้ด้วยการปรับโครงสร้างกระบวนการทำงานใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงการสาดกระเด็น หรือการจุ่ม

หมายเหตุ *1. การเลือกใช้มาตรการควบคุมการรับสัมผัสด้วยระบบปิด หรือการควบคุมทางวิศวกรรมควรพิจารณาจากปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น หากปริมาณวัสดุนาโนที่มีการใช้งานหรือผลิตมีปริมาณมาก วัสดุนาโนอยู่ในรูปแบบผงและง่ายต่อการฟุ้งกระจาย วัสดุนาโนมีอันตรายต่อสุขภาพมาก และกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนาโนมีระยะเวลาการดำเนินการยาวนานตลอดวัน จึงต้องใช้มาตรการในระดับที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมที่สูงขึ้น*

2. รายละเอียดเพิ่มเติมสำหรับการใช้ระบบปิด หรือการควบคุมทางวิศวกรรมได้จาก มอก. 2691 เล่ม 5 ที่มีการประกาศใช้ ซึ่งเกี่ยวข้องกับแนวทางการจัดการอาชีวอนามัยและความปลอดภัยเกี่ยวกับวัสดุนาโน

9.1.5 การควบคุมขั้นตอนการปฏิบัติงาน (procedural control)

การควบคุมขั้นตอนการปฏิบัติงาน ครอบคลุม การลดจำนวนบุคลากรที่รับสัมผัสหรือระยะเวลาการปฏิบัติงานในกระบวนการ และการจำกัดจำนวนกระบวนการในบริเวณควบคุมและห้ามผู้ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องผ่านเข้าสู่บริเวณควบคุม ต้องมีกระบวนการสื่อสารข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับอันตรายจากวัสดุนาโน มาตรการป้องกันที่จำเป็น และผลกระทบต่อสุขภาพจากการรับสัมผัสฝุ่นละออง และข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับวิธีการปฏิบัติในการทำงานให้กับผู้ที่เกี่ยวข้องทราบ ควรมีโปรแกรมการตรวจสุขภาพและการเฝ้าระวังทางการแพทย์อย่างสม่ำเสมอ แยกเสื้อคลุมที่ใช้ในการปฏิบัติงานออกจากเสื้อผ้าปกติทั้งระหว่างการซัก และการเก็บรักษา และจัดให้มีโปรแกรมการทำความสะอาดพื้นที่ปฏิบัติงานอย่างสม่ำเสมอ

9.1.6 อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล (personal protective equipment)

โดยทั่วไป การใช้ PPE เป็นทางเลือกลำดับสุดท้ายของการควบคุมการรับสัมผัส แต่เนื่องจาก PPE ช่วยลดโอกาสการรับสัมผัสกับวัสดุนาโนได้ พิจารณาใช้ PPE ทั้งในรูปแบบเดี่ยว หรือใช้ร่วมกับการควบคุมการรับสัมผัสอื่น ๆ

9.1.6.1 การป้องกันการรับสัมผัสทางการหายใจ

ในเอกสารของ HSE (HSG53) ได้ระบุข้อมูลเกี่ยวกับการเลือกและใช้หน้ากากป้องกันแก๊สพิษ ซึ่งขึ้นอยู่กับผลการประเมินความเสี่ยง โดยชนิด RPE ที่เหมาะสมนั้นได้แก่ หน้ากากแบบใช้แล้วทิ้ง หมวกหรือหน้ากากป้องกันแบบเต็มหน้า-ครึ่งหน้า เครื่องดูดควัน หมวกนิรภัย ชุด และเสื้อคลุม

ซึ่งควรเลือกใช้ระบบกรองแบบที่มีประสิทธิภาพสูง (ชนิด P3 และชนิด FFP3) ผู้ที่ใช้อุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจควรตรวจสอบว่าสวมใส่ได้ถูกต้องเหมาะสม และพอดีกับใบหน้าหรือไม่ ควรมีการฝึกอบรม การแนะนำ และการดูแลรักษา PPE โดยเฉพาะที่ใช้ป้องกันระบบทางเดินหายใจ หากการเลือกใช้ PPE ไม่ถูกต้อง หรือไม่พอดีกับสรีระ หรือขาดประสิทธิภาพนั้นส่งผลต่อระดับการป้องกัน

9.1.6.2 การป้องกันการรับสัมผัสทางผิวหนังและดวงตา

การประเมินความเสี่ยงอาจระบุได้ถึงความจำเป็นในการใช้ถุงมือป้องกัน แว่นตานิรภัยที่มีการป้องกันบริเวณด้านข้าง และชุดป้องกัน การเลือกถุงมือป้องกันสำหรับการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมมีเกณฑ์ดังต่อไปนี้

(1) ถุงมือต้องเหมาะสมกับความเสี่ยงและสภาวะในระหว่างการใช้งาน

(2) ถุงมือต้องเหมาะสมกับสรีระและสภาพของผู้ใช้งาน

(3) ถุงมือที่เลือกใช้ต้องเหมาะกับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน

(4) ถุงมือต้องป้องกันการรับสัมผัสได้โดยไม่เพิ่มความเสี่ยงอื่น ๆ ต่อผู้สวมใส่

ทั้งนี้ ในทางปฏิบัติ ต้องใส่ถุงมือและดูแลรักษาในระหว่างการใช้งานอย่างถูกต้องและเหมาะสม

การพัฒนาระบบการจัดกระทำกับถุงมือเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ช่วยให้การป้องกันมีประสิทธิภาพเพียงพอและสร้างความมั่นใจให้กับผู้ใช้ได้มากขึ้น ระบบการจัดกระทำกับถุงมือนั้นพิจารณาจากความสำคัญในองค์ประกอบหลักต่าง ๆ เช่น การประเมินการทำงาน และการรับสัมผัสที่อาจเกิดขึ้น การเลือกประเภทวัสดุของถุงมือ การฝึกอบรมทั้งผู้จัดการและผู้ปฏิบัติงาน การติดตามตรวจสอบระบบการจัดเก็บ การบำรุงรักษา และการกำจัด

อุปกรณ์สำหรับใช้ป้องกันดวงตา ได้แก่ ครอบตานิรภัย แว่นตานิรภัย และชุดกระบังหน้าแบบเต็มหน้า ในกรณีที่ผู้ปฏิบัติใช้แว่นสายตา หรือคอนแทคเลนส์สามารถใช้เครื่องป้องกันการหายใจแบบเต็มหน้าที่มีส่วนของการป้องกันดวงตาอยู่ด้วยได้อย่างเหมาะสม

9.2 การเลือกมาตรการควบคุม

จุดมุ่งหมายของการเลือกใช้มาตรการควบคุมการได้รับสัมผัส คือ เพื่อให้แน่ใจว่าการได้รับสัมผัสวัสดุนาโนนั้นอยู่ในระดับต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ การประเมินความเสี่ยงจะช่วยให้ผู้ประกอบการสามารถตัดสินใจเลือกแนวทางการควบคุมการได้รับสัมผัสที่เหมาะสมได้โดยพิจารณาจากความจำเป็น ความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติและประสิทธิภาพด้านค่าใช้จ่าย

โดยทั่วไปการเลือกใช้มาตรการควบคุมที่เหมาะสมนั้น ต้องพิจารณาร่วมกับข้อมูลค่ามาตรฐานต่าง ๆ ที่ใช้ควบคุมการรับสัมผัส เช่น ค่า REL-TWA ที่กำหนดโดย NIOSH หรือค่า PEL-TWA ที่กำหนดโดย OSHA หรือค่า TLV-TWA ที่กำหนดโดย ACGIH หรือค่า WEL ที่กำหนดโดย HSE ยกตัวอย่างเช่น ค่า REL-TWA

ของ CNT เท่ากับ 7 $\mu g/m^3$ และค่า REL-TWA ของอนุภาคนาโน TiO_2 เท่ากับ 0.1 mg/m^3 อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันยังไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับความเป็นอันตรายของวัสดุนาโนหลายประเภท ทำให้การเลือกมาตรการควบคุมยังมีข้อจำกัด มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ ได้เสนอแนวทางเบื้องต้นในการควบคุมระดับการได้รับสัมผัสวัสดุนาโน 4 กลุ่ม ที่แบ่งออกตามลักษณะที่ใช้สำหรับการประเมินความเป็นอันตรายของวัสดุนาโน ตามที่ได้ระบุไว้ในข้อ 8.1 ภายใต้สมมติฐานที่ว่า วัสดุนาโนมีความเป็นอันตรายมากกว่าวัสดุที่ใหญ่กว่า ซึ่งสมมติฐานนี้อาจไม่สอดคล้องกับความเป็นจริงในทุกกรณี

กลุ่มที่ 1 วัสดุนาโนที่เป็นเส้นใย วัสดุนาโนกลุ่มนี้เทียบเคียงได้กับมาตรฐานการได้รับสัมผัสแร่ใยหินโดยค่ามาตรฐานในการได้รับสัมผัสเส้นใยของแร่ใยหินในอากาศอยู่ที่ 0.01 เส้นใยต่อมิลลิลิตร (เส้นใยในที่นี้หมายถึงอนุภาคที่มีสัดส่วนแนวตั้งและแนวนอนเกิน 3 ต่อ 1 และมีความยาวมากกว่า 5 000 nm) จากการนับจำนวนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์เฟสคอนทราส (phase contrast optical microscopy)โดยค่ามาตรฐานการได้รับสัมผัสของวัสดุนาโนที่แนะนำคือ 0.01 เส้นใยต่อมิลลิลิตร ประเมินจากการนับจำนวนโดยใช้กล้อง SEM หรือ TEM

กลุ่มที่ 2 วัสดุนาโนที่เป็นสารก่อมะเร็งและสารพิษอื่น ๆ (CMAR) วัสดุนาโนกลุ่มนี้มีคุณสมบัติละลายได้เมื่ออยู่ในขนาดนาโนเมตร อาจแทรกซึมเข้าสู่กระแสเลือดได้มากขึ้น โดยค่ามาตรฐานการได้รับสัมผัสของวัสดุนาโนที่แนะนำคือ 0.1 x material WEL กำหนดในรูปของระดับความเข้มข้นโดยมวล

กลุ่มที่ 3 วัสดุนาโนที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อย วัสดุนาโนกลุ่มนี้เทียบเคียงได้กับมาตรฐานการได้รับสัมผัสอนุภาคขนาดเล็กของ TiO_2 (ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 0.1 μm) อยู่ที่ 1.5 mg/m^3 และอนุภาคขนาดเล็กมากของ TiO_2 เท่ากับ 0.1 mg/m^3 โดยใช้ค่าเฉลี่ย TWA โดยในกรณีที่ยังไม่มีมาตรฐานอื่นโดยค่ามาตรฐานการได้รับสัมผัสของวัสดุนาโนที่แนะนำคือ 0.066 x material WEL กำหนดในรูปของระดับความเข้มข้นโดยมวล หรืออีกทางเลือกหนึ่ง คือ การกำหนดค่าเทียบเคียงเป็นความเข้มข้นของจำนวนอนุภาคของวัสดุนาโนในบรรยากาศ ในช่วง 20 000 อนุภาคต่อมิลลิลิตร ถึง 50 000 อนุภาคต่อมิลลิลิตร

กลุ่มที่ 4 วัสดุนาโนที่ละลายน้ำได้ วัสดุนาโนกลุ่มนี้สามารถละลายน้ำได้ การลดขนาดให้อยู่ในระดับนาโนเมตรน่าจะส่งผลกระทบไม่มากนัก โดยค่ามาตรฐานการได้รับสัมผัสของวัสดุนาโนที่แนะนำ คือ 0.5 x material WEL

หมายเหตุ *แม้ว่าเกณฑ์มาตรฐานของระดับการรับสัมผัสดังกล่าวมีความเชื่อมโยงกับค่าขีดจำกัดการรับสัมผัสที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน แต่ไม่ได้มีการพัฒนาอย่างเต็มรูปแบบ การใช้ค่าดังกล่าวจึงนำมาใช้เป็นแนวทางในการปฏิบัติเท่านั้น ไม่ควรนำมาใช้กำหนดเป็นค่าขีดจำกัดการรับสัมผัสสารในสิ่งแวดล้อมการทำงานที่ปลอดภัย*

แนวทางการควบคุมขั้นต่ำสำหรับวัสดุนาโนทั้ง 4 กลุ่ม แสดงไว้ในตารางที่ 1 ใช้เป็นแนวทางการควบคุมสำหรับใช้งานทั่วไปที่นำไปสู่ระดับการรับสัมผัสที่สอดคล้องกับค่าขีดจำกัดการรับสัมผัสสารในสิ่งแวดล้อมการทำงานที่ระบุไว้ข้างต้น อย่างไรก็ตามปัจจุบันยังไม่มีข้อมูลที่เพียงพอเกี่ยวกับการประเมิน

ประสิทธิภาพของวิธีการเหล่านี้ การใช้มาตรการควบคุมทั้งหมดควรวัดค่าการรับสัมผัสร่วมด้วยทุกครั้งเท่าที่ทำได้

ตารางที่ 1 แนวทางแนะนำการควบคุมตามลักษณะงาน

(ข้อ 9.2)

งานพ่น เช่น อุตสาหกรรมการผลิต การเคลือบแบบพ่น

กลุ่มวัสดุนาโน	แนวทางการควบคุม
กลุ่มของวัสดุนาโนที่มีลักษณะเป็นเส้นใย และกลุ่มของวัสดุนาโน CMAR	ใช้ระบบปิด โดยแยกจากผู้ปฏิบัติงาน
กลุ่มของวัสดุนาโนที่ไม่ละลาย และกลุ่มของวัสดุนาโนที่ละลายได้	ใช้ระบบปิด โดยแยกจากผู้ปฏิบัติงาน ถึงแม้ว่ามีการควบคุมการระบายอากาศ เช่น ห้องแยกสารละลาย หรือการดูดอากาศอย่างเพียงพอก็ตาม

งานขนย้าย การผสม การเติม การตวง (สำหรับวัสดุแห้ง)

กลุ่มวัสดุนาโน	แนวทางการควบคุม
กลุ่มของวัสดุนาโนที่มีลักษณะเป็นเส้นใย และกลุ่มของวัสดุนาโน CMAR	ใช้ระบบปิด โดยแยกจากผู้ปฏิบัติงาน
กลุ่มของวัสดุนาโนที่ไม่ละลาย และกลุ่มของวัสดุนาโนที่ละลายได้	ใช้ระบบปิด โดยแยกจากผู้ปฏิบัติงาน ถึงแม้ว่ามีการควบคุมการระบายอากาศ เช่น ห้องแยกสารละลาย หรือการดูดอากาศอย่างเพียงพอก็ตาม แต่ถ้าสารมีจำนวนน้อย เช่น มีจำนวนเป็นมิลลิกรัม ใช้แค่การแยกหรืออุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันระบบทางเดินหายใจก็เพียงพอ

งานขนย้าย การผสม การเติม (สำหรับสารแขวนลอย)

กลุ่มวัสดุนาโน	แนวทางการควบคุม
กลุ่มของวัสดุนาโนที่มีลักษณะเป็นเส้นใย และกลุ่มของวัสดุนาโน CMAR	ใช้ระบบปิด โดยแยกจากผู้ปฏิบัติงาน ส่วนใหญ่ควรมีการควบคุมการระบายอากาศอย่างเพียงพอ ถ้าสารมีจำนวนน้อย เช่น มีจำนวนเป็นมิลลิกรัมใช้แค่การแยกหรืออุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันระบบทางเดินหายใจก็เพียงพอ
กลุ่มของวัสดุนาโนที่ไม่ละลาย และกลุ่มของวัสดุนาโนที่ละลายได้	การควบคุมการระบายอากาศ เช่น ห้องแยกสารละลายหรือการดูดอากาศอย่างเพียงพอ แต่ถ้าสารมีจำนวนน้อย เช่น มีจำนวนเป็นมิลลิกรัมใช้แค่การแยกหรืออุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันระบบทางเดินหายใจก็เพียงพอ

ตารางที่ 1 แนวทางแนะนำการควบคุมตามลักษณะงาน (ต่อ)

งานบำรุงรักษาและการทำความสะอาด

กลุ่มวัสดุนาโน	แนวทางการควบคุม
กลุ่มของวัสดุนาโนที่มีลักษณะเป็นเส้นใย และกลุ่มของวัสดุนาโน CMAR	อยู่ในระบบปิด ขยายพื้นที่ทำงานให้กว้างขึ้น ในทางปฏิบัติควรใช้อุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันระบบทางเดินหายใจที่เหมาะสมและอุปกรณ์ป้องกันผิวหนังที่มีประสิทธิภาพ การทำความสะอาดไม่ควรก่อให้เกิดการฟุ้งกระจายในอากาศ
กลุ่มของวัสดุนาโนที่ไม่ละลาย และกลุ่มของวัสดุนาโนที่ละลายได้	ใช้อุปกรณป้องกันระบบทางเดินหายใจและอุปกรณ์ป้องกันผิวหนังที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ การทำความสะอาดไม่ควรก่อให้เกิดการฟุ้งกระจายในอากาศ

10. วิธีการตรวจวัดสำหรับการเฝ้าระวังและควบคุม

10.1 ทั่วไป

การสุ่มตัวอย่าง และการวัดอนุภาคมีส่วนสำคัญที่ช่วยให้เกิดความเข้าใจความเสี่ยงในสถานปฏิบัติงาน นำมาใช้เพื่อกำหนดกิจกรรมต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

(1) การกำหนดแหล่งที่มีการปลดปล่อยวัสดุนาโน

(2) การประเมินประสิทธิภาพของมาตรการควบคุมที่ใช้งานอยู่

(3) การทำให้เกิดความมั่นใจว่าปริมาณอนุภาคในสถานปฏิบัติงานสอดคล้องตามค่าขีดจำกัดการรับสัมผัสสารในสิ่งแวดล้อมการทำงาน หรือเกณฑ์มาตรฐานการรับสัมผัสที่กำหนดขึ้น

(4) การกำหนดข้อบกพร่อง และความเสื่อมประสิทธิภาพของมาตรการควบคุม ซึ่งสามารถส่งผลร้ายแรงต่อสุขภาพ

วิธีและกิจกรรมต่าง ๆ เหล่านี้ต้องใช้เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบที่มีความเฉพาะเจาะจงแตกต่างกัน เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบต่าง ๆ ที่มีอยู่ตามรายละเอียดในข้อ 10.2 ตารางที่ 2 และตารางที่ 3 และแนวทางการสุ่มตัวอย่างตามข้อ 10.3

10.2 การเลือกใช้เครื่องมือ

รายละเอียดของเครื่องมือและวิธีการวัดจำนวน มวล และพื้นที่ผิวโดยตรง แสดงไว้ในตารางที่ 2 ส่วนการวัดทางอ้อมที่อาศัยข้อมูลของขนาดร่วมกับสมมติฐานเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าเหล่านี้ แสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 เครื่องมือสำหรับวัดความเข้มข้นทางตรงโดยจำนวน มวล และพื้นที่ผิว

(ข้อ 10.1 ข้อ 10.2 และข้อ10.3)

ปริมาณ	เครื่องมือ	หมายเหตุ
ความเข้มข้นโดยจำนวน (จากการวัด)	CPC	ใช้วัดจำนวนอนุภาคแบบทันที ภายใต้ระดับเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคที่เครื่องทำได้ การวัดอาศัยหลักการควบแน่นของไอบนตัวอย่างอนุภาค และติดตาม/นับจำนวนหยดน้ำที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปใช้ช่องคัดขนาด (size selection inlet) 1 000 nm และสามารถติดตามอนุภาคที่มีขนาดเล็กได้ถึง 10 nm
	DMPS	ใช้วัดความเข้มข้นโดยจำนวนของอนุภาคตามขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลางขณะเคลื่อนที่) แบบทันที โดยให้ค่าความเข้มข้น และการกระจายตัวของอนุภาคขนาดต่าง ๆ
	SEM และ TEM	ใช้วัดความเข้มข้นโดยจำนวนตามขนาดอนุภาคที่อยู่ในรูปละอองในอากาศ
ความเข้มข้นโดยมวล (จากการวัด)	เครื่องไซส์ซีเล็คทีฟสแตติก แซมเปลอร์ (size selective static sampler)	ใช้วัดมวลอนุภาคโดยสุ่มตัวอย่างตามขนาดที่มีค่าไม่เกิน 100 nm และวิเคราะห์ตัวอย่างการชั่งน้ำหนัก หรือการวิเคราะห์ทางเคมี แม้ว่าไม่มีเครื่องมือทดสอบนี้จำหน่ายทางการค้า แต่ใช้เครื่องแคสเคดอิมแพ็คเตอร์ (cascade impactor) ได้แก่ Berner-type low pressure impactor หรือ microorifice impactor ในช่วง 100 nm วิเคราะห์ได้
	TEOM	ใช้วัดความเข้มข้นโดยมวลของอนุภาคนาโนละอองลอยแบบเชื่อมตรงกับระบบ (on-line) เป็นเครื่องวัดทันทีแบบความไวสูง (sensitive real-time) สามารถใช้ร่วมกับช่องคัดขนาด
ความเข้มข้นโดยพื้นผิว (จากการวัด)	เครื่องแพร่ประจุ (diffusion charger)	ใช้วัดพื้นที่ผิวของละอองลอยที่แอ็กทิฟแบบทันที ในกรณีที่พื้นที่ผิวที่มีขนาดของอนุภาคสูงกว่า 100 nm วัดผลไม่ได้โดยตรง เครื่องแพร่ประจุบางรุ่นไม่สามารถวัดพื้นที่ผิวที่มีขนาดของอนุภาคต่ำกว่า 100 nm ได้ เครื่องแพร่ประจุจึงใช้ได้กับอนุภาคนาโนที่ผ่านช่องคัดขนาดมาแล้วเท่านั้น
	ELPI	ใช้วัดความเข้มข้นโดยพื้นที่ผิวแบบทันทีตามขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์) ในกรณีที่พื้นที่ผิวมีขนาดของอนุภาคสูงกว่า 100 nm อาจวัดผลโดยตรงไม่ได้

ตารางที่ 2 เครื่องมือสำหรับวัดความเข้มข้นทางตรงโดยจำนวน มวล และพื้นที่ผิว (ต่อ)

ปริมาณ	เครื่องมือ	หมายเหตุ
ความเข้มข้นโดยพื้นผิว (จากการวัด) (ต่อ)	SEM และ TEM	ใช้วิเคราะห์แบบไม่เชื่อมตรงกับระบบ (off-line) โดยให้ข้อมูลพื้นที่ผิวของอนุภาคที่เกี่ยวข้องกับขนาด การวิเคราะห์โดย TEM ให้ข้อมูลโดยตรงของอนุภาคในบริเวณพื้นที่ผิวที่วิเคราะห์ซึ่งเกี่ยวข้องกับพื้นที่ที่มีรูปทรงทางเรขาคณิตต่างกัน

ตารางที่ 3 เครื่องมือสำหรับวัดความเข้มข้นทางอ้อมโดยจำนวน มวล และพื้นที่ผิว

(ข้อ 10.1 ข้อ 10.2 และข้อ 10.3)

ปริมาณ	เครื่องมือ	หมายเหตุ
ความเข้มข้นโดยจำนวน (จากการคำนวณ)	ELPI	ใช้วัดขนาดจำเพาะแบบทันที (เส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์) ความเข้มข้นของพื้นที่ผิวที่แอ็กทีฟ และบอกการกระจายตัวของขนาดละอองลอยได้ ข้อมูลเกิดจากการประมวลผลปริมาณความเข้มข้น ตัวอย่างขนาดอนุภาควิเคราะห์ได้โดยไม่เชื่อมตรงกับระบบ
ความเข้มข้นโดยมวล (จากการคำนวณ)	ELPI	ใช้วัดขนาดแบบทันที (เส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์) ความเข้มข้นของพื้นที่ผิวที่แอ็กทีฟ และบอกการกระจายตัวของขนาดละอองลอยได้ ความเข้มข้นมวลละอองลอยคำนวณได้หากทราบประจุอนุภาค และ ความหนาแน่นของตัวอย่าง ขนาดอนุภาควิเคราะห์ได้โดยไม่เชื่อมตรงกับระบบ
	DMPS	ใช้วัดขนาดอนุภาคแบบทันที (เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่เคลื่อนที่) โดยแสดงผลการกระจายตัวของขนาดละอองลอย ความเข้มข้นของมวลละอองลอยคำนวณได้จากรูปร่าง และความหนาแน่นของอนุภาคที่ทราบหรือที่สมมุติ
ความเข้มข้นโดยพื้นที่ผิว (จากการคำนวณ)	DMPS	ใช้วัดขนาดอนุภาคแบบทันที (เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่เคลื่อนที่) โดยแสดงผลการกระจายตัวของขนาดละอองลอย ความเข้มข้นของมวลละอองลอยคำนวณได้จากรูปร่าง และความหนาแน่นของอนุภาคที่ทราบหรือที่สมมุติ
	DMPS ELPI	ใช้วัดความแตกต่างระหว่างการวัดอนุภาคแบบอากาศพลศาสตร์กับแบบเคลื่อนที่ ใช้เป็นหลักในการคำนวณค่าแตกต่างของมิติ ซึ่งทำให้คำนวณพื้นที่ผิวได้

10.3 แนวทางการสุ่มตัวอย่าง

การวัดการรับสัมผัสในสถานที่ปฏิบัติงานต้องใช้การสุ่มตัวอย่างหลายเทคนิคที่ระบุไว้ในตารางที่ 2 และตารางที่ 3 ร่วมกันเนื่องจากยังไม่มีวิธีสุ่มตัวอย่างใดเพียงวิธีเดียวที่ใช้แสดงการรับสัมผัสอนุภาคละอองลอยนาโนในอากาศได้ ทั้งนี้อาจวัดจากลักษณะเฉพาะที่สัมพันธ์กับการรับสัมผัสวัสดุนาโน และใช้แนวทางการสุ่มตัวอย่างที่สอดคล้องกับการวัดลักษณะเฉพาะนั้น ๆ เพื่อวิเคราะห์ระดับการรับสัมผัสในสถานปฏิบัติงาน

10.3.1 ขั้นแรกของการดำเนินการ ควรระบุแหล่งที่มีการปลดปล่อยวัสดุนาโนก่อน และ CPC เป็นเครื่องมือที่เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ดังกล่าว ในการวัดปริมาณอนุภาคนั้นจำเป็นต้องวัดปริมาณอนุภาคในบรรยากาศปกติ ก่อนการวัดอนุภาคระหว่างการผลิต หรือแปรรูปที่มีวัสดุนาโนเป็นส่วนประกอบ และหากต้องการตรวจวัดวัสดุนาโนชนิดใดชนิดหนึ่งอย่างจำเพาะ ให้สุ่มตัวอย่างด้วยแผ่นกรองที่เหมาะต่อการนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน การใช้ TEM ในการวิเคราะห์ทำให้ระบุชนิดของอนุภาค และคาดคะเนการกระจายตัวของขนาดอนุภาคได้

10.3.2 เมื่อทราบแหล่งของการปล่อยอนุภาคแล้ว ควรดำเนินการตรวจวัดพื้นที่ผิวของอนุภาคละอองลอยด้วยเครื่องแพร่ประจุแบบพกพา (portable diffusion charger) และการกระจายตัวของขนาดวัสดุนาโนด้วย SMPS หรือ ELPI โดยการแสดงผลแบบอยู่กับที่หรือแบบสถิต เครื่องมือวัดพื้นที่แบบพกพาขนาดเล็กสามารถนำมาใช้กับผู้ปฏิบัติงานหรือเจ้าหน้าที่ระหว่างปฏิบัติงานได้ แต่อาจทำให้การปฏิบัติงานขาดความคล่องตัว นอกจากนี้ควรประมวลผลการสูญเสียของอนุภาคละอองลอยในหลอดสุ่มตัวอย่างด้วย และควรพิจารณาสถานที่ติดตั้งเครื่องมือเหล่านี้อย่างรอบคอบ ซึ่งแนวทางปฏิบัติที่ดีที่สุดคือควรวางเครื่องมือใกล้กับบริเวณปฏิบัติงานของผู้ปฏิบัติงาน อย่างไรก็ดีควรคำนึงถึงขนาดของเครื่องมือและตำแหน่งของปลั๊กไฟด้วย

10.3.3 หลังจากนั้นควรใช้แผ่นกรอง หรือตะแกรงจับอนุภาคในการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนหรือด้วยวิธีทางเคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการตรวจวัดการรับสัมผัสวัสดุนาโนชนิดใดชนิดหนึ่งที่สนใจ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนใช้เพื่อระบุชนิดของอนุภาคและให้ข้อมูลประเมินการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่สนใจ การใช้เครื่องแคสเคดอิมแพ็คเตอร์ส่วนบุคคล (personal cascade impactor) หรือเครื่องเรสไพเรเบิลไซโคลนแซมเปลอร์ (respirable cyclone sampler) ด้วยตัวกรอง แม้ว่าอาจมีข้อจำกัดอยู่บ้าง แต่ช่วยคัดกรองอนุภาคขนาดใหญ่ที่ไม่ต้องการออกไปได้ และทำให้การตรวจวิเคราะห์แม่นยำยิ่งขึ้น การวิเคราะห์ด้วยการกรองสำหรับการปนเปื้อนของฝุ่นละอองในอากาศช่วยในการระบุแหล่งของการแพร่กระจายของอนุภาคเหล่านั้นได้ และควรปฏิบัติตามวิธีตรวจวิเคราะห์ทางเคมีตามมาตรฐานทั่วไป

การใช้วิธีตรวจวิเคราะห์แบบบูรณาการด้วยเทคนิคเหล่านี้ช่วยให้ตรวจหาการรับสัมผัสกับวัสดุนาโนในกลุ่มผู้ปฏิบัติงานได้ ซึ่งนำไปสู่การจำแนกชนิดและวัดปริมาณของวัสดุนาโนต่อไป อย่างไรก็ตามวิธีนี้ใช้ได้เฉพาะบริเวณที่จำเพาะหรือบริเวณสุ่มตัวอย่างเท่านั้น ซึ่งยังมีข้อจำกัดที่ยืนยันผลการตรวจวิเคราะห์การปนเปื้อนในกลุ่มผู้ปฏิบัติงานไม่ได้ทั้งหมด

10.4 ข้อจำกัดของการวัด

การวัดจำนวนอนุภาคในพื้นที่จำเพาะนั้น บางครั้งอาจให้ข้อมูลที่คลาดเคลื่อนได้ ทั้งนี้เนื่องจากผลของการวัดจำนวนปริมาณอนุภาคที่ได้นั้น โดยมากมักเป็นการประเมินช่วงการกระจายตัวของอนุภาค (จากต่ำสุด ถึงสูงสุด) ของเครื่อง ดังนั้นความเข้าใจในการอ่านค่าผลรายงานจึงเป็นสิ่งสำคัญมาก เช่น ความแม่นยำอาจลดลงหากใช้เครื่องวัดความเข้มข้นโดยจำนวนอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 nm ถึง 20 nm ดังนั้นการวัดปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคด้วยเครื่องที่มีความสามารถในการวัดขนาดที่แตกต่างกัน จึงให้ผลแตกต่างกันอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากอนุภาคที่วัดนั้นมีค่ากลาง (median) ของเส้นผ่านศูนย์กลาง อยู่ในช่วง 10 nm ถึง 20 nm นี้ ทำให้การวัดปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคละอองลอยนาโนต่ำกว่าความเป็นจริงอย่างมีนัยสำคัญ

ละอองลอยในสภาพแวดล้อมมีผลทำให้การอ่านค่ายุ่งยากและซับซ้อนขึ้นกว่าเดิม หากสถานที่ปฏิบัติงานไม่ได้เป็นห้องปลอดฝุ่น (clean room) แล้ว ละอองลอยนาโนจากภายนอกสามารถเข้ามาปะปนอยู่กับวัสดุนาโนที่ต้องการวัดในสถานที่ปฏิบัติงาน ซึ่งทำให้การอ่านผลของปริมาณวัสดุนาโนสูงกว่าความเป็นจริง วิธีหนึ่งที่ใช้ในการแก้ปัญหานี้ได้คือการประเมินอนุภาคฝุ่นละอองในสภาพแวดล้อมก่อนเริ่มผลิต หรือแปรรูปวัสดุนาโน อีกวิธีหนึ่งก็คือการวัดปริมาณฝุ่นละอองในสภาพแวดล้อมด้านนอก โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบที่เหมือนกันอีกชุดหนึ่ง แล้วนำค่าของการวัดฝุ่นละอองภายนอกนั้นมาหักลบจากค่าที่วัดฝุ่นภายใน อย่างไรก็ตาม วิธีนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง และได้ผลต่อเมื่อฝุ่นในสภาพแวดล้อมภายนอกไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อปลิวเข้ามาในสถานที่ปฏิบัติงาน

อีกวิธีหนึ่งคือการใช้ค่าความแตกต่างขององค์ประกอบเชิงเคมี เพื่อแยกความแตกต่างระหว่างอนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นในสถานที่ปฏิบัติงาน และละอองลอยนาโนจากสภาพแวดล้อม

11. เอกสารและการทบทวน

ความสำคัญในการประเมินความเสี่ยง คือ การจดบันทึกทันทีเมื่อมีการประเมินเกิดขึ้น หรือเร็วที่สุดเท่าที่สามารถทำได้ภายหลังจากการประเมิน ในบางกรณีการประเมินความเสี่ยงไม่ได้เกิดขึ้นพร้อมกันเนื่องจากบางครั้งต้องหาข้อมูลที่สำคัญบางประการเพิ่มเติมก่อนประเมิน เช่น การทดสอบล่วงหน้าที่ช่วงระยะเวลาหนึ่งก่อนการประเมินที่สมบูรณ์แบบ หรือการรอผลการเก็บข้อมูลของอากาศ โดยการบันทึกเหตุการณ์เหล่านี้ต้องทำให้ครบถ้วนหรือเพิ่มเติมข้อมูลใหม่ทันทีที่หาข้อมูลได้

การให้ข้อมูลสถานการณ์ที่เกิดขึ้นใหม่ จากความรู้เกี่ยวกับการประเมินความเสี่ยงของวัสดุนาโนนั้น ความรู้ใหม่ที่สำคัญนี้อาจใช้ได้ทันเหตุการณ์ในบางเวลา ดังนั้นการประเมินความเสี่ยงต้องมีการตรวจสอบ/ทบทวนข้อมูลทุกปี เพื่อให้มีข้อมูลและองค์ความรู้ใหม่ ๆ อยู่เสมอ และผู้ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการนั้นควรมีส่วนร่วมในการดำเนินการตรวจสอบและทบทวนข้อมูลการประเมินความเสี่ยงเพื่อให้มั่นใจว่าความรู้ที่เขามีอยู่นั้นทันต่อเหตุการณ์

12. ข้อมูล ข้อแนะนำ และการฝึกอบรม

ให้จัดเตรียมความพร้อมเพื่อให้มั่นใจว่าการใช้มาตรการควบคุมเป็นไปอย่างเหมาะสมและครอบคลุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการกำหนดหน้าที่และความรับผิดชอบให้ชัดเจน ให้มีการฝึกอบรมและฝึกอบรมซ้ำให้กับผู้ที่รับผิดชอบการใช้มาตรการควบคุม และขั้นตอนการปฏิบัติงาน เพื่อให้มั่นใจว่ามีการใช้มาตรการอย่างเหมาะสม ผู้ที่เกี่ยวข้องและผู้ที่อาจได้รับผลกระทบ รวมทั้งจัดให้มีการสื่อสารและการมีส่วนร่วมของผู้ปฏิบัติงานในกระบวนการประเมินความเสี่ยง โดยผู้ปฏิบัติงานจำเป็นต้องทราบข้อมูลขั้นพื้นฐานซึ่งประกอบด้วย

(1) ชื่อของสารที่มีโอกาสรับสัมผัส และเสี่ยงต่อสุขภาพจากการรับสัมผัส

(2) ค่าที่เกี่ยวข้องกับค่าขีดจำกัดการรับสัมผัสสารในสิ่งแวดล้อมการทำงาน ได้แก่ WEL REL PEL TLV หรือเกณฑ์มาตรฐานการรับสัมผัสที่กำหนดขึ้น

(3) ข้อมูลใน SDS ที่เกี่ยวข้องกับสารนั้น

(4) ข้อมูลที่มีนัยสำคัญซึ่งได้จากการประเมินความเสี่ยง

(5) ข้อควรระวังเบื้องต้นเพื่อการป้องกันตนเองและผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้อง

(6) ผลของการเฝ้าระวังการรับสัมผัส โดยเฉพาะเมื่อมีค่าเกินค่าขีดจำกัดการรับสัมผัสสารในสิ่งแวดล้อมการทำงาน ได้แก่ WEL REL PEL TLV ใด ๆ

(7) รวบรวมผลของการเฝ้าระวังด้านสุขภาพ (ข้อ 13.)

13. การเฝ้าระวังด้านสุขภาพ

เกณฑ์การเฝ้าระวังด้านสุขภาพเบื้องต้นพิจารณาได้จาก ความน่าจะเป็นของโรค หรือการเจ็บป่วยที่เกิดจากการรับสัมผัสสารที่จำเพาะระหว่างการทำงาน โดยสามารถตรวจวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคซึ่งได้รับการยอมรับทางการแพทย์ อย่างไรก็ตาม ยังไม่พบว่ามีการตรวจวัดผลกระทบต่อสุขภาพที่จำเพาะต่อการรับสัมผัสกับวัสดุนาโนในปัจจุบัน ทำให้การเฝ้าระวังด้านสุขภาพที่จำเพาะกับวัสดุนาโนยังไม่สามารถทำได้อย่างเหมาะสม ณ เวลาปัจจุบัน แนวทางที่ทำได้ดีที่สุดคือการเก็บรวมรวมข้อมูลเท่าที่ทำได้เกี่ยวกับวัสดุที่ใช้และระยะเวลาการใช้ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวมีประโยชน์ในการจัดทำรายละเอียดของโอกาสการรับสัมผัสซึ่งมีความสำคัญหากมีผลกระทบใด ๆ ต่อสุขภาพที่เกิดขึ้นภายหลัง

14. การรั่วไหล และการปลดปล่อยวัสดุนาโนโดยอุบัติเหตุ

การรั่วไหลและการปลดปล่อยวัสดุนาโนโดยอุบัติเหตุ เป็นเหตุการณ์ที่สามารถเกิดขึ้นได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการกำหนดนโยบายและแนวทางเป็นลายลักษณ์อักษรในการจัดการกับเหตุการณ์ดังกล่าว ทั้งในกรณีที่เป็นอุบัติเหตุขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ควรมีการประเมินความเสี่ยงที่เหมาะสมและเพียงพอสำหรับใช้กำหนดขั้นตอนการดำเนินการเมื่อมีอุบัติเหตุเกิดขึ้น โดยวิธีการที่ใช้ควรสอดคล้องกับระดับของอันตรายและปริมาณของวัสดุนาโนที่รั่วไหล การทำความสะอาดพื้นที่ควรดำเนินการในทิศทางที่ทำให้มั่นใจได้ว่าผู้ปฏิบัติงานจะได้รับการรับสัมผัสในระดับที่ต่ำที่สุด ในทางปฏิบัติ ผู้ปฏิบัติงานที่อาจต้องมีส่วนในการจัดการกับเหตุการณ์อุบัติเหตุควรได้รับข้อมูล

ข้อแนะนำ การฝึกอบรมที่เพียงพอเกี่ยวกับการประเมินขอบเขตของการรั่วไหลหรือการปลดปล่อยวัสดุนาโนที่อาจเกิดขึ้น มาตรการการเก็บกวาด และ PPE ที่ต้องนำมาสวมใส่ รวมทั้งแนวทางในการหลีกเลี่ยงวัสดุนาโนที่เกิดจากการเก็บกวาดได้อย่างปลอดภัย

เมื่อมีการรั่วไหลหรือการปลดปล่อยวัสดุนาโนโดยอุบัติเหตุ ผู้ปฏิบัติงานในบริเวณควรพิจารณาการดำเนินการและจัดการกับวัสดุที่รั่วไหลหรือปลอดปล่อยวัสดุนาโนออกมา ตามแนวทางต่อไปนี้

(1) ประเมินขอบเขตบริเวณที่อาจได้รับผลกระทบจากการรั่วไหล หรือการปลดปล่อยวัสดุนาโนโดยอุบัติเหตุ

(2) ปิดพื้นที่บริเวณนั้น พร้อมนำผู้ปฏิบัติงานที่ไม่เกี่ยวข้องออกจากพื้นที่โดยเร็ว

(3) ใช้มาตรการควบคุมโดยเร่งด่วน เพื่อลดโอกาสการแพร่กระจายของวัสดุนาโน เช่น การติดตั้งแผ่นรองซับฝุ่นในบริเวณทางออกของพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบ เป็นต้น

(4) เลือกใช้วิธีการทำความสะอาดด้วยการเช็ดเปียก

(5) ทำแนวกั้นเพื่อลดขอบเขตการแพร่กระจายของอากาศ ด้วยวิธีที่อาศัยระบบกรองสุญญากาศ HEPA ที่ผ่านการทดสอบและรับรองสำหรับการจัดการวัสดุนาโนในรูปแบบแห้ง หรือเศษหลงเหลือจากการรั่วไหลของของเหลวที่แห้งแล้ว

หมายเหตุ *เมื่อใช้ HEPA ควรมีการพิสูจน์ยืนยันประสิทธิภาพ ตามความถี่ที่ผู้ทำระบุไว้ และหากเป็นไปได้ควรใช้ระบบสุญญากาศในการทำความสะอาดบริเวณ รวมทั้งควรบันทึกชนิดของวัสดุนาโนที่เก็บกวาดไว้และหลีกเลี่ยงการปะปนกันของวัสดุที่เข้ากันไม่ได้ในเครื่องดูดฝุ่น หรือแผ่นกรองเดียวกัน*

นายจ้างควรพิจารณาและทำบันทึกแจ้งให้เจ้าหน้าที่ หรือผู้ปฏิบัติงานทราบในสถานการณ์ที่ควรอพยพออกจากพื้นที่ที่เกิดการรั่วไหลและปลดปล่อยโดยอุบัติเหตุ การพิจารณาถึงความรุนแรงที่เกิดขึ้นร่วมกับความสามารถของเจ้าหน้าที่ที่ปฏิบัติงานในพื้นที่ว่าสามารถจัดการได้เองหรือไม่ หรือต้องมีเจ้าหน้าที่จากที่อื่น เช่น พนักงานหน่วยฉุกเฉิน เจ้าหน้าที่ที่มีประสบการณ์เกี่ยวกับการควบคุมมลพิษ และสิ่งแวดล้อมเข้ามาร่วมตรวจสอบด้วย

เศษสิ่งตกค้างจากการทำความสะอาดฝุ่นวัสดุนาโนที่เกิดการรั่วไหลหรือปลดปล่อยวัสดุนาโนโดยอุบัติเหตุ (เช่น แผ่นกรองอากาศ อุปกรณ์ทำความสะอาด แผ่นรองซับฝุ่น และวัสดุอื่น ๆ) ควรมีการดำเนินการเช่นเดียวกับการจัดการของเสียวัสดุนาโน ซึ่งระบุไว้ในข้อ 15.

15. ขั้นตอนการจัดการของเสีย

15.1 การวางแผนการจัดเก็บ และกำจัดวัสดุนาโน

การจัดการของเสียที่ระบุไว้ในข้อนี้ ใช้ได้กับของเสียที่ปนเปื้อนวัสดุนาโน (ทั้งของแข็งและของเหลว)ได้แก่

(1) วัสดุนาโนบริสุทธิ์

(2) วัสดุที่ปนเปื้อนวัสดุนาโน เช่น ภาชนะบรรจุ ผ้าหรืออุปกรณ์ทำความสะอาด และชุดปฏิบัติงาน PPE ที่ใช้แล้วทิ้ง

(3) สารแขวนลอยเหลวที่มีวัสดุนาโนเป็นองค์ประกอบ

(4) ของแข็งที่แตกหักได้ ซึ่งมีวัสดุนาโนเป็นองค์ประกอบ หรือมีโครงสร้างนาโนที่ยึดติดอยู่กับพื้นผิวและมีโอกาสที่หลุดออกมา หรือกรองออกเมื่อสัมผัสกับอากาศและน้ำ หรือเมื่อได้รับแรงกระแทก

แผนงานสำหรับการจัดเก็บ และการกำจัดวัสดุนาโนหรือกากของเสียที่มีวัสดุนาโนปนเปื้อน ควรได้รับการพัฒนา และพิจารณาถึงความเป็นพิษ และปริมาณความเข้มข้นที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษด้วย วัสดุใดก็ตามที่ได้รับสัมผัสกับวัสดุนาโนจากการผลิต (ซึ่งยังไม่ได้รับการกำจัดสิ่งปนเปื้อน) ควรได้รับการพิจารณาเช่นเดียวกับของเสียที่ปนเปื้อนวัสดุนาโน ซึ่งรวมถึงชุดปฏิบัติงาน PPE ที่ใช้แล้วทิ้ง อุปกรณ์ทำความสะอาด กระดาษซับกรอง และวัสดุอุปกรณ์วิจัยที่ใช้แล้วทิ้ง ซึ่งวัสดุที่ปนเปื้อนด้วยวัสดุนาโนไม่ควรกำจัดลงในถังขยะทั่วไป หรือทิ้งลงในท่อน้ำทิ้ง การปนเปื้อนที่พื้นผิวควรได้รับการประเมินและกำจัดทันที อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตหรือขนส่งวัสดุนาโนควรได้รับการกำจัดสิ่งปนเปื้อนหรือทำความสะอาดก่อนทิ้งหรือนำกลับมาใช้ใหม่ ของเสีย (จากน้ำยาทำความสะอาด น้ำทิ้ง ผ้าขี้ริ้ว หรือชุดปฏิบัติงาน PPE ที่ใช้แล้วทิ้ง) ที่เกิดจากการทำความสะอาดควรได้รับการกำจัดและจัดการเช่นเดียวกับของเสียที่ปนเปื้อนวัสดุนาโน

15.2 การจัดเก็บของเสียวัสดุนาโนก่อนนำไปกำจัด

การเก็บรวบรวมและจัดเก็บของเสียวัสดุนาโนก่อนการกำจัดมีวิธีปฏิบัติ ดังนี้

(1) การจัดเก็บในภาชนะบรรจุของเสีย

ควรจัดเก็บของเสียที่ปนเปื้อนวัสดุนาโนในภาชนะที่อยู่ในสภาพดี ปิดสนิท มีขนาดใหญ่เพียงพอเพื่อป้องกันการเล็ดลอดและรั่วซึมได้ ควรติดฉลากที่ภาชนะของเสีย และควรมีรายละเอียดของข้อมูลที่ได้รับการวิเคราะห์และสมบัติของวัสดุให้ชัดเจน

(2) การจัดเก็บในถุงพลาสติก

ควรเก็บรวบรวมกระดาษ อุปกรณ์ทำความสะอาด ชุดปฏิบัติงาน PPE ตลอดจนวัตถุอื่นที่ได้รับการปนเปื้อนในถุงพลาสติกหรือภาชนะที่ปิดสนิท และจัดเก็บไว้ในตู้ดูดควันในห้องปฏิบัติการ (laboratory hood) และเมื่อถุงพลาสติกเต็มให้ปิดให้สนิทและใส่ถุงพลาสติกซ้อนอีกชั้นหนึ่งเพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากด้านนอก จากนั้นนำออกจากตู้ดูดควันด้วยความระมัดระวัง และติดฉลากด้านนอกของถุงขยะให้ถูกต้องและชัดเจน

15.3 การกำจัดของเสียวัสดุนาโน

ของเสียที่มีวัสดุนาโนเป็นองค์ประกอบให้กำจัดตามแนวทางที่สอดคล้องกับประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว โดยพิจารณาให้ของเสียวัสดุนาโนทั้งหมดให้เป็นวัสดุอันตรายและให้การปฏิบัติกับกากของเสียวัสดุนาโนเป็นไปในแนวทางเดียวกับวัตถุอันตรายอื่น ๆ นอกจากนี้ให้พิจารณาร่วมกับข้อมูลใน SDS จนกว่าจะมีข้อมูลมากขึ้นสำหรับวัสดุนาโนชนิดนั้น ๆ

16. การป้องกันการเกิดเพลิงไหม้และการระเบิด

วิธีการควบคุมวัสดุนาโนจากการเกิดเพลิงไหม้ การระเบิด และการทำปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพนั้น ยังไม่ได้มีการกำหนดและประเมินอย่างจริงจัง ผลิตภัณฑ์ที่มีวัสดุนาโนเป็นองค์ประกอบบางชนิดมีความสามารถในการกระจายตัวได้ดีกว่า และมีการกระจายตัวที่คงตัวกว่าผลิตภัณฑ์ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่เป็นองค์ประกอบ กลุ่มอนุภาคผงฝุ่นนาโนที่หนาแน่นอาจสังเกตได้ยาก ในขณะที่อนุภาคฝุ่นแขวนลอยชนิดเดียวกัน มีปริมาณความเข้มข้นเท่ากันแต่มีขนาดใหญ่กว่าสามารถสังเกตเห็นได้ง่าย หลักการที่ใช้กับการบริหารจัดการทั้งผงอนุภาคขนาดเล็ก ฝุ่นหรือวัสดุที่ฟุ้งกระจาย ควรนำมาประยุกต์กับวัสดุนาโนเช่นกัน อย่างไรก็ดีควรเพิ่มการระมัดระวังเป็นพิเศษในกรณีที่เป็นผงฝุ่นโลหะที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเมื่อสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ มาตรการป้องกันการระเบิดได้ระบุไว้สำหรับการจัดการกับการกระจายของฝุ่น และได้กำหนดปริมาณที่อาจก่อให้เกิดอันตรายสำหรับวัตถุที่มีขนาดใหญ่ด้วยและยังใช้กับการจัดการวัสดุนาโนที่ง่ายต่อการระเบิด ควรหลีกเลี่ยงและป้องกันการรับสัมผัสของวัสดุนาโนที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาหรือเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยากับสารชนิดอื่นที่ไม่เข้ากัน

การป้องกันการเกิดเพลิงไหม้ใช้แนวทางตามคู่มือการจัดการความปลอดภัย โรงงานที่มีฝุ่นระเบิดได้ ของสำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม

ควรให้ความสำคัญกับข้อกำหนดของระบบไฟฟ้า เพื่อป้องกันการเกิดเพลิงไหม้ การเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ทางไฟฟ้าให้เป็นไปตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง ในการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าควรคำนึงถึงการป้องกันฝุ่นจากวัสดุนาโนที่มีความละเอียดและสามารถกระจายตัวในอากาศได้นาน หากวัสดุนาโนนั้นติดไฟได้ควรเพิ่มความระมัดระวังให้มากขึ้น

การเลือกสารดับเพลิงควรพิจารณาถึงความเข้ากันได้หรือเข้ากันไม่ได้ของวัสดุนาโนกับน้ำ ฝุ่นโลหะบางชนิดอาจทำปฏิกิริยากับน้ำ และให้สารหลายชนิดรวมทั้งแก๊สไฮโดรเจนซึ่งติดไฟง่าย สารดับเพลิงประเภทผงเคมีสามารถใช้ในการดับเพลิงของผงฝุ่นโลหะที่ลุกไหม้ได้ แต่วิธีนี้ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายซึ่งทำให้เพลิงลุกลามยิ่งขึ้นได้ ดังนั้นวิธีลดความเสี่ยงจากการเกิดเพลิงไหม้ และการลุกลามของเปลวเพลิง จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมสภาวะบรรยากาศในกระบวนการผลิต และกระบวนการเก็บรักษา โดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน หรือแก๊สเฉื่อยชนิดอื่น วิธีนี้เองก็อาจทำให้เกิดอันตรายจากสภาวะการขาดออกซิเจน

การป้องกันการเกิดระเบิดและเพลิงไหม้ของฝุ่น เครื่องจักรและอุปกรณ์ไฟฟ้าในบริเวณผลิตต้องต่อสายดินเพื่อป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิต และให้สวมรองเท้าป้องกันไฟฟ้าสถิตตลอดเวลาในพื้นที่ปฏิบัติงานที่เก็บรักษาวัสดุนาโนเพื่อป้องกันการก่อตัวของประจุไฟฟ้าสถิตซึ่งอาจก่อให้เกิดการติดไฟได้

ภาคผนวก ก.

วัสดุนาโนจากการผลิต

(ข้อ 4.1)

วัสดุนาโน หมายถึง วัสดุที่มีมิติภายนอก หรือโครงสร้างภายใน หรือโครงสร้างที่พื้นผิวอยู่ในระดับนาโนสเกล (ช่วง 1 nm ถึง 100 nm โดยประมาณ)

วัสดุนาโนแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ตามแหล่งกำเนิด คือ

(1) วัสดุนาโนจากธรรมชาติ เป็นวัสดุนาโนที่เกิดจากกระบวนการทางธรรมชาติ กระบวนการให้ความร้อน และการดำเนินการอื่น ๆ ซึ่งก่อให้เกิดวัสดุนาโนอย่างไม่ตั้งใจ

(2) วัสดุนาโนจากการผลิต เป็นวัสดุนาโนที่ผลิตขึ้นสำหรับใช้ในวัตถุประสงค์ทางการค้าเพื่อให้มีสมบัติหรือองค์ประกอบที่จำเพาะ โดยแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยตามโครงสร้างได้ 2 กลุ่ม คือ วัตถุนาโน และวัสดุโครงสร้างนาโน

(2.1) วัตถุนาโน (nano-object) หมายถึง วัสดุที่มีมิติภายนอก 1 มิติ (แผ่นนาโน) 2 มิติ (แท่งนาโน) หรือ 3 มิติ (อนุภาคนาโน) ในระดับนาโนสเกล

(2.2) วัสดุโครงสร้างนาโน (nanostructured material) หมายถึง วัสดุที่มีโครงสร้างภายในอยู่ในระดับนาโนสเกล หรือมีโครงสร้างพื้นผิวอยู่ในระดับนาโนสเกล เช่น นาโนคอมโพสิต ซึ่งเป็นวัสดุที่มีวัตถุนาโนฝังตัวอยู่ภายในเมทริกซ์ที่เป็นของแข็ง หรือเป็นวัตถุนาโนที่ยึดเกาะกันด้วยการจัดเรียงตัวแบบสุ่มง่าย ๆ ในรูปแบบของอนุภาคก้อนเกาะแน่น และอนุภาคก้อนเกาะหลวม หรือจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบในรูปแบบของผลึก เช่น กลุ่มผลึกของฟูลเลอรีน หรือ กลุ่มของ CNT

นอกจากนี้ยังจัดวัสดุนาโนออกเป็นกลุ่มได้จากการพิจารณาจำนวนมิติและองค์ประกอบพื้นฐานทางเคมี แต่อาจมีวัสดุนาโนหลายชนิดที่จัดเข้ากลุ่มไม่ได้ หรืออาจมีสมบัติที่สอดคล้องกับหลายกลุ่มของการจัดจำแนก เช่น วัสดุนาโนในรูปแบบทั่วไป แต่มีการเคลือบผิวและมีโครงสร้างทางฟิสิกส์-เคมีที่ซับซ้อน การจัดจำแนกวัสดุนาโนในภาคผนวกนี้ จึงมีไว้เพื่อให้เกิดความเข้าใจในเบื้องต้นเท่านั้น

วัสดุนาโนจากการผลิตจัดจำแนกออกเป็นกลุ่มตามองค์ประกอบทางเคมีพื้นฐาน โดยเรียงจากวัสดุนาโนที่มี 3 มิติ ไปยัง 1 มิติ ตามลำดับ ดังนี้

ก.1 วัสดุนาโนที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ

ก.1.1 ฟูลเลอรีน (fullerene)

ฟูลเลอรีน เป็นกลุ่มของสารเคมีที่มีลักษณะคล้ายกรงทรงกลม เกิดจากอะตอมของคาร์บอนสร้างพันธะเคมีกับคาร์บอนสามอะตอมที่อยู่ติดกัน ตัวอย่างของฟูลเลอรีนที่เป็นที่รู้จักกันดีที่สุด คือ C_{60} โมเลกุลของฟูลเลอรีนประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนตั้งแต่ 28 อะตอม จนถึงมากกว่า 100 อะตอม จากรายงานผลการศึกษาทดลองบางฉบับพบว่าโมเลกุลของฟูลเลอรีนประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนได้

ถึง 1 500 อะตอม โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุล 8.2 nm การตั้งสมมติฐานจากทฤษฎียืนยันว่ามีฟูลเลอรีนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าอยู่จริง ฟูลเลอรีนที่มีผนังหลายชั้นคล้ายอนุภาคนาโน หรือที่เรียกกันว่า คาร์บอนนาโนออเนียนส์ (carbon nano-onions) มีขนาดอยู่ระหว่าง 4 nm ถึง 36 nm พบว่ามีการใช้งานฟูลเลอรีนอย่างกว้างขวาง เช่น แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เซลล์ไฟฟ้าแสงอาทิตย์ เซลล์เชื้อเพลิง วัสดุสำหรับกักเก็บแก๊สออกซิเจนและแก๊สมีเทน สารเติมแต่งในพลาสติก น้ำมันยาง และใช้เพื่อบำบัดรักษามะเร็งและภูมิคุ้มกันบกพร่อง

ก.1.2 คาร์บอนแบล็ก

คาร์บอนแบล็ก ประกอบด้วยวัสดุที่มีบางส่วนเป็นอสัณฐาน มีประเภทที่จัดเรียงตัวของอนุภาคทรงกลมหรืออนุภาคที่ใกล้เคียงทรงกลมที่รวมกันเป็นอนุภาคก้อนเกาะแน่น หรืออนุภาคก้อนเกาะหลวม และท้ายที่สุดมักรวมเป็นก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น คาร์บอนแบล็ก 98% ของการผลิตทั่วโลกมาจากการเผาในเตาหลอมและอยู่ในรูปแบบของอนุภาคก้อนเกาะแน่นซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยระหว่าง 80 nm ถึง 500 nm และมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิเฉลี่ยที่ 11 nm ถึง 95 nm การใช้งานคาร์บอนแบล็กในภาคอุตสาหกรรม เช่น เม็ดสี สารเสริมแรงสำหรับอุตสาหกรรมยาง โดยเฉพาะยางรถยนต์

ก.1.3 CNF

CNF มีโครงสร้างเป็นรูปทรงกระบอกหรือทรงกรวยโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 2 nm ถึง 100 nm และมีความยาวอยู่ในช่วงน้อยกว่าไมโครเมตรถึงหลายมิลลิเมตร โครงสร้างภายในประกอบด้วยชั้นแกรไฟต์หลายชั้นซ้อนกัน หรือแผ่นแกรฟีนหลายแผ่นซึ่งมีรูปร่างเป็นรูปกรวย (โครงสร้างรูปแฉกเป็นรูปตัววี) รูปถ้วย (โครงสร้างแบบไม้ไผ่) รูปแท่ง (โครงสร้างของแข็ง) หรือรูปท่อ (โครงสร้างเป็นโพรง) ลักษณะเฉพาะที่เป็นเอกลักษณ์ของ CNF ที่แตกต่างจาก CNT คือการซ้อนกันของแผ่นแกรฟีนโดยทำมุมกับแกนของ CNF ซึ่งมีค่าไม่เท่ากับ 0 ° แต่เมื่อแผ่นแกรฟีนวางตัวเป็นแนวขนานกับแกนเส้นใยจะมีรูปร่างเป็น CNT เนื่องจากการมีองค์ประกอบที่จัดเรียงตัวทั้งในระนาบและระหว่างระนาบของการขนส่งและสมบัติเชิงกลตามแกนเส้นใย ตลอดจนการมีพันธะที่ไม่อิ่มตัวที่คล้ายกับแกรไฟต์ ทำให้ลักษณะเฉพาะของ CNF แตกต่างจาก CNT

CNF เกิดขึ้นในช่วงที่มีการสะสมไอระเหย (vapour deposition) ของแก๊สที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบจำนวนมาก เช่น ไฮโดรคาร์บอน กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะ การควบคุมเพื่อให้เกิดโครงสร้างและองค์ประกอบที่เป็น CNF ทำได้ด้วยการใช้พลาสมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยากระตุ้นให้เกิดไอระเหยของสาร CNF ที่ผลิตได้จากอุตสาหกรรมนั้นนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งในพอลิเมอร์ วัสดุกักเก็บแก๊ส และวัสดุยึดเกาะของตัวเร่งปฏิกิริยา

ก.1.4 CNT

CNT เป็นหนึ่งในตัวอย่างของวัสดุหลายกลุ่มที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่ง CNT เกิดจากการเรียงตัวของแผ่นแกรฟีนที่ม้วนเป็นท่อ CNT อาจเกิดจากแผ่นแกรฟีนชั้นเดียว (SWCNT) หรือเกิดจากแผ่นแกรฟีนหลายชั้น (MWCNT) CNT ผนังเดี่ยวเปิดหรือปิดที่ปลายท่อ ขึ้นอยู่กับว่า CNT เหล่านั้นจะหุ้มด้วยฟูลเลอรีนครึ่งหนึ่งที่ปลายแต่ละด้านหรือไม่ CNT อาจมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กเพียง 0.4 nm และมีความยาวท่อได้หลายเซนติเมตร MWCNT อาจมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้ถึง 100 nm

SWCNT มีสมบัติเป็นโลหะ หรือสารกึ่งตัวนำได้โดยขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของแผ่นแกรฟีน และการตอบสนองทางอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งสามารถปรับได้โดยการแทนที่ธาตุ CNT อาจมีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กถึง 60 เท่า ในขณะที่มีน้ำหนักเบากว่าเหล็กถึง 6 เท่า นอกจากนี้ CNT ยังมีสมบัติเป็นตัวนำความร้อนที่ดีมาก มีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลได้ดีมาก อีกทั้งมีความเสถียรทางเคมีและความร้อนสูง

ในปัจจุบันมีการนำ CNT มาใช้งานหลากหลาย เช่น เป็นวัสดุคอมโพสิตของพอลิเมอร์ ฉนวนป้องกันแม่เหล็กไฟฟ้า ตัวปล่อยสนามอิเล็กตรอน ตัวเก็บประจุยิ่งยวด แบตเตอรี่ วัสดุสำหรับเก็บแก๊สไฮโดรเจน และวัสดุคอมโพสิตของโครงสร้าง วิธีสังเคราะห์ CNT มี 2 วิธี วิธีที่ 1 คือการทำให้ธาตุคาร์บอนกลายเป็นไอด้วยการใช้เลเซอร์ (laser) หรืออาร์กไฟฟ้า (electric arc) และวิธีที่ 2 คือ การแยกคาร์บอนที่อุณหภูมิต่ำจากแหล่งคาร์บอนร่วมกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือพลาสมา

ก.1.5 แผ่นนาโนแกรฟีน (graphene nanosheet)

แผ่นนาโนแกรฟีน คือวัสดุที่มีโครงสร้างของแกรไฟต์แบบชั้นเดียว โดยที่พันธะของกลุ่มคาร์บอนสามอะตอมไปสร้างพันธะกับกลุ่มคาร์บอนสามอะตอมข้างเคียง จนมีลักษณะเชื่อมต่อกันเป็นหกเหลี่ยมเป็นแผ่นขนาดเล็กแบบหยาบตลอดทั้งแผ่น ทำให้แผ่นแกรฟีนมีความหนาประมาณ 1 nm แกรฟีนมีสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ทั้งทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ แม่เหล็ก เชิงแสง และเชิงกล และมีการประยุกต์ในเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ที่แบน ยืดหยุ่นและใช้ในการเคลือบ ในปัจจุบันการผลิตแผ่นนาโนแกรฟีนใช้วิธีการแยกเชิงกลระดับจุลภาค (micromechanical cleavage)

ก.2 วัสดุนาโนโลหะออกไซด์

วัสดุโครงสร้างนาโนของโลหะออกไซด์ที่อยู่ในรูปแบบของอนุภาคก้อนเกาะแน่น และอนุภาคก้อนเกาะหลวม นิยมนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยใช้เป็นสารเติมแต่งในการผลิตสีและผลิตภัณฑ์ป้องกันแสงแดด และนิยมนำไปใช้เคลือบพื้นผิววัสดุเพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการ วิธีการผลิตส่วนใหญ่ใช้การเผาหรือแยกสลายโดยการใช้ละอองความร้อน (spray pyrolysis) การระเหิดด้วยเลเซอร์ (laser ablation) และการสังเคราะห์ในเฟสสารละลาย (solution phase synthesis)

วัสดุนาโนโลหะออกไซด์ มีรูปร่างหลายแบบ เช่น แท่งนาโน ท่อนาโน เกล็ดหรือแผ่นนาโน (nanoflake) และโครงสร้างที่มีความซับซ้อนมากขึ้น เช่น แปรงนาโน (nanobrush) สปริงนาโน (nanospring) และสายเข็มขัดนาโน (nanobelt) โครงสร้างนาโนเหล่านี้มีสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นเอกลักษณ์และนำมาใช้กับ

อุปกรณ์ประเภทออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (optoelectronic) หรืออุปกรณ์ที่เปลี่ยนแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า หรือเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นแสง ประยุกต์ได้กับอุปกรณ์รับสัญญาณหรืออุปกรณ์รับรู้ ตัวแปรสัญญาณ และยารักษาโรค

ซิลิกาอสัณฐานสังเคราะห์ (synthetic amorphous silica) นั้นผลิตให้มีโครงสร้างระดับนาโนได้ โดยใช้วิธีการการสังเคราะห์ในเฟสแก๊ส (gas phase synthesis) หรือกระบวนการทางเคมีแบบเปียก (wet chemical process) เช่น การตกตะกอน หรือกระบวนการผลิตแบบโซล-เจล (sol-gel process) วัสดุโครงสร้างระดับนาโนนั้นประกอบด้วยอนุภาคปฐมภูมิที่มีขนาดระหว่าง 5 nm ถึง 10 nm รวมตัวกันเป็นอนุภาคก้อนเกาะแน่นที่มีขนาด 1 μm ถึง 40 μm เนื่องจากอนุภาคปฐมภูมิแยกอยู่อย่างอิสระไม่ได้ แต่มักรวมกันเป็นอนุภาคก้อนเกาะหลวมมากกว่า ซึ่งเป็นรูปแบบหลักของการรวมตัวกันของอนุภาค มีการนำซิลิกาอสัณฐานสังเคราะห์มาใช้กันอย่างแพร่หลายในเชิงอุตสาหกรรม โดยมักใช้กับอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการเสริมความแข็งแรงให้กับวัสดุยืดหยุ่น (elastomer) คล้ายยางธรรมชาติ การเพิ่มความหนืดให้กับของเหลว การเพิ่มสมบัติการไหลให้กับผงวัสดุ หรือส่วนประกอบของวัสดุปูพื้น ตัวดูดซับ และวัสดุที่เป็นฉนวนกันความร้อน

ก.3 วัสดุนาโนโลหะ

อนุภาคนาโนทอง (gold nanoparticle) เป็นวัสดุนาโนโลหะที่ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวาง การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนทองทำได้โดยการเรโซแนนซ์เชิงแสงให้เห็นชัดเจนในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น ซึ่งมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อม ขนาด และรูปร่างของอนุภาค รวมถึงการทำปฏิกิริยาเชิงแสงในระบบเรโซแนนซ์ โดยสมบัติเฉพาะพิเศษของอนุภาคนาโนทองนี้นำมาใช้ประโยชน์ต่าง ๆ มากมาย เช่น ใช้ทำเครื่องหมายเชิงแสง (optical marker) และการรักษามะเร็งด้วยความร้อนเฉพาะที่ในทางการแพทย์

อนุภาคนาโนเงิน (silver nanoparticle) เป็นวัสดุนาโนโลหะที่มีปริมาณการผลิตสูงสุด และมีการใช้ประโยชน์ที่หลากหลาย ได้แก่ ใช้เป็นองค์ประกอบในผ้าปิดแผล ใช้เป็นสารฆ่าเชื้อในเครื่องล้างอุปกรณ์ เนื่องจากอนุภาคนาโนเงินมีสมบัติในการยับยั้งแบคทีเรีย อนุภาคนาโนโลหะที่มีขนาดและรูปร่างตามที่ต้องการสังเคราะห์ขึ้นโดยใช้ปฏิกิริยารีดักชันในเฟสสารละลาย

ลวดนาโนโลหะ (metal nanowire) เช่น โคบอลต์ ทอง ทองแดง เป็นได้ทั้งวัสดุตัวนำไฟฟ้าหรือวัสดุกึ่งตัวนำ และใช้เป็นตัวเชื่อมต่อเพื่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในอุปกรณ์นาโนอิเล็กทรอนิกส์ (nanoelectronic device) ลวดนาโนผลิตโดยวิธีการสร้างแม่แบบแล้วประจุไอระเหยของสารเคมีเข้าไปให้เต็ม และทำให้เกิดการขึ้นรูปเป็นเส้นลวดนาโน กระบวนการสะสม (deposition process) ที่ใช้ในปัจจุบัน ประกอบด้วยการสะสมทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical deposition) และการสะสมไอระเหยของสารเคมี (chemical vapour deposition) การทำแม่แบบทำได้หลายวิธี เช่น การกัดด้วยกรด (etching) หรือการใช้วัสดุนาโนชนิดอื่น ๆ เช่น ท่อนาโน

ก.4 หัวหมุดควอนตัม (quantum dot)

หัวหมุดควอนตัม คือผลึกนาโนรูปทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 1 nm ถึง 10 nm ประกอบด้วยวัสดุกึ่งตัวนำซึ่งมีสมบัตินำแสงแบบพิเศษเนื่องจากปรากฏการณ์ควอนตัม ทำให้เรียกว่า “หัวหมุดควอนตัม” ด้วยจำนวนอะตอมในหัวหมุดควอนตัมทำให้หัวหมุดควอนตัมไม่มีลักษณะโครงสร้างเป็นของแข็งที่ขยายตัวได้และไม่เป็นโมเลกุล แสงที่คายออกมาสามารถปรับความยาวคลื่นตามต้องการได้โดยการเปลี่ยนขนาดมิติทั้งหมด

การใช้งานหัวหมุดควอนตัมอย่างหนึ่ง คือ การใช้เป็นโพรบเรืองแสง (fluorescent probe) สำหรับถ่ายภาพเพื่อการวินิจฉัยทางการแพทย์ และในการรักษาโรค โดยการใช้ตามวัตถุประสงค์เหล่านี้เนื่องจากหัวหมุดควอนตัมมีสมบัติเชิงแสงที่เหมาะกับการใช้งาน และสามารถเคลือบ หรือดัดแปลงพื้นผิวของหัวหมุดควอนตัมด้วยเพปไทด์ แอนติบอดี กรดนิวคลีอิก และโมเลกุลทางชีวภาพที่สำคัญอื่น ๆ ได้

วิชาเคมี ฟิสิกส์ และวัสดุศาสตร์ ให้ข้อมูลวิธีการผลิตหัวหมุดควอนตัม ซึ่งวิธีเหล่านั้นทำให้สามารถควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ได้ เช่น ขนาดและการเพิ่มขนาดของอนุภาค ความสามารถในการละลาย และสมบัติของการปล่อยพลังงาน วิธีที่นิยมใช้ในการผลิตหัวหมุดควอนตัมมากที่สุด คือ กระบวนการผลิตคอลลอยด์แบบเคมีเปียก (wet chemical colloidal process)

ก.5 วัสดุนาโนพอลิเมอร์อินทรีย์ (organic polymeric nanomaterial)

ก.5.1 เดนไดรเมอร์ (dendrimer)

เดนไดรเมอร์ เป็นพอลิเมอร์กลุ่มใหม่ที่มีกิ่งก้านสาขามากและมีการควบคุมโครงสร้างให้มีขนาดมิติอยู่ในระดับนาโนสเกล ควบคุมการสังเคราะห์โครงสร้างนาโนในระดับอะตอมอย่างแม่นยำให้มีขนาด รูปร่าง และเคมีผิว เป็นไปตามที่ต้องการ เดนไดรเมอร์แสดงลักษณะเฉพาะเป็นได้ทั้งวัสดุที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และสามารถรองรับหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ได้หลากหลายสำหรับการนำมาใช้งานในทางการแพทย์ โดยเดนไดรเมอร์นำมาใช้ได้ทั้งในทางการแพทย์และในทางชีวการแพทย์ วิธีที่นิยมใช้สังเคราะห์เดนไดรเมอร์ เป็นวิธีที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงแบบซ้ำไปซ้ำมาในการทำปฏิกิริยาเพื่อขยายขนาด และปฏิกิริยาการกระตุ้น (activation reaction) ซึ่งวิธีที่ใช้กันทั่วไป เช่น ปฏิกิริยาไมเคิลแบบดั้งเดิม (traditional Michael reaction) การสังเคราะห์อีเทอร์แบบวิลเลียมสัน (Williamson ether systhesis) การสังเคราะห์เฟสของแข็งแบบใหม่ (modern solid-phase synthesis) เคมีโลหะอินทรีย์ (organic-metallic chemistry) เคมีซิลิคอนอินทรีย์ (organo-silicon chemistry) และเคมีฟอสฟอรัสอินทรีย์ (organo-phosphorus chemistry)

ก.5.2 เส้นใยนาโน (nanofiber)

เส้นใยนาโนสร้างขึ้นได้โดยใช้วัสดุพอลิเมอร์หลายชนิด โดยเทคนิคที่นิยมใช้ในการผลิตคือการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (electrospinning) และการเป่าด้วยแก๊ส (gas-blowing) เทคนิคดังกล่าวควบคุมองค์ประกอบทางเคมีและพารามิเตอร์ทางฟิสิกส์ เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและความยาว

ของเส้นใยได้อย่างดี เส้นใยนาโนสแคฟโฟลด์ (scaffold) สามารถใช้งานได้หลายอย่าง เช่น อุปกรณ์รับสัญญาณ และเครื่องกรองของเหลวและแก๊สแบบอัลทรา (ultrafiltration device for liquid and gas phase) การประยุกต์ส้นใยนาโนพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติในทางการแพทย์มีได้หลายทาง เช่น วิศวกรรมเนื้อเยื่อหรือเนื้อเยื่อเทียม การควบคุมการปลดปล่อยตัวยาในอวัยวะเป้าหมาย ผ้าปิดแผล การแยกโมเลกุล (molecular separation) และการฟื้นฟูกระดูก (bone restoration)

ก.6 วัสดุนาโนเลียนแบบธรรมชาติ (bio-inspired nanomaterial)

วัสดุนาโนเลียนแบบธรรมชาติ ได้นำมาใช้เพื่อกักเก็บสารทางชีวภาพโดยการห่อหุ้มไว้ในแคปซูล (encapsulated) หรือดูดซับบนพื้นผิว วัสดุนาโนเหล่านี้เป็นสารหลากหลายชนิดที่เป็นหน่วยโครงสร้างทางชีวภาพ ไขมัน เพปไทด์ พอลิแซ็กคาไรด์ ซึ่งใช้เป็นตัวนำส่งยา ตัวรับสาร กรดนิวคลีอิก และสารสร้างภาพ เช่น ไมเซลล์จากพอลิเมอร์ (polymeric micelle) กรงกักเก็บโปรตีน (protein cage architecture) อนุภาคนาโนมีเปลือกหุ้มที่มาจากกลุ่มไวรัส (viral-derived capsid nanoparticle) พอลิเพล็กซ์ (polyplexe) และไลโปโซม (liposome) ซึ่งใช้เป็นท่อลำเลียงและนำยาไปยังอวัยวะเป้าหมาย ปัจจุบันอยู่ระหว่างการพัฒนาคิดค้นสูตรจำนวนมากเพื่อนำยาผ่านไปยังระบบทางเดินอาหาร ระบบทางเดินหายใจ และทางผิวหนัง

ไมเซลล์มีรูปแบบเป็นก้อนผลึกแข็งในสารละลายโดยโมเลกุลแอมฟิฟิลิก (amphiphilic molecule) จัดเรียงเป็นโครงสร้างคล้ายทรงกลมโดยมีแกนเป็นโมเลกุลไม่ชอบน้ำและหันส่วนที่ชอบน้ำออกด้านนอก มีลักษณะคล้ายเปลือกหุ้มล้อมรอบส่วนที่ไม่ชอบน้ำ เป็นระบบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 50 nm มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เพื่อใช้ส่งยาที่ไม่ละลายในน้ำ ยาหรือสารมีสีที่ช่วยทำให้เห็นความแตกต่าง (contrast agent) มีการกักเก็บไว้ภายในแกนที่เป็นโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ หรือเชื่อมกันด้วยพันธะโคเวเลนซ์กับโมเลกุลที่เป็นส่วนประกอบของไมเซลล์

ไลโปโซมมีลักษณะเป็นถุงเล็ก ๆ ปิดด้วยลิพิดสองชั้น (closed lipid bilayer vesicle) ที่เกิดจากการระเหยของฟอสโฟลิพิดแบบแห้ง (dry phospholipid) โมเลกุลของยาอาจละลายในบริเวณที่มีน้ำหรือแทรกเข้าไปในชั้นไขมันสองชั้นของไลโปโซม ขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะทางฟิสิกส์และเคมีของยา พื้นผิวของไลโปโซมนั้นเปลี่ยนไปด้วยลิแกนด์เป้าหมาย (targeting ligand) และพอลิเมอร์ได้

พอลิเพล็กซ์ (polyplex) เป็นการรวมตัวกันของสารที่เกิดขึ้นได้เองระหว่างกรดนิวคลีอิกและพอลิแคตไอออน (polycation) หรือไลโปโซมประจุบวก (cationic liposome) หรือพอลิแคตไอออนจับคู่กับลิแกนด์เป้าหมาย หรือพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ (hydrophilic polymer) และใช้ในการเป็นต้นแบบของการทรานส์เฟกชัน (transfection) รูปร่าง การกระจายตัวของขนาด และความสามารถในการทรานส์เฟกชันของสารชนิดนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและอัตราส่วนประจุของกรดนิวคลีอิกต่อไขมันหรือพอลิเมอร์ที่มีประจุบวก ตัวอย่างของพอลิแคตไอออนที่มีการนำมาใช้ในการถ่ายทอดยีนหรือเป็นต้นแบบในการทำยีนบำบัด รวมทั้งพอลิแอลไลซีน (poly-L-lysine) พอลิเอทิลีนอิมีนแบบเส้นตรงหรือแบบกิ่งก้าน(linear-and branched-

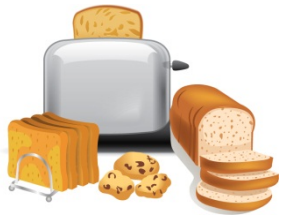
poly(ethylenimine)) พอลิแอมิโดเอมีน (poly(amidoamine)) พอลิบีตาแอมิโนเอสเทอร์ (poly-β-amino esters) และไซโคลเด็กซ์ทรินประจุบวก (cationic cyclodextrin)

โครงสร้างการเรียงตัวของโปรตีนแบบกรงและอนุภาคนาโนมีเปลือกหุ้มที่มาจากกลุ่มไวรัสนั้นเป็นการจัดเรียงตัวเอง (self-assembly) ของโปรตีนหน่วยโครงสร้างของวัสดุนาโนที่มาจากชีวภาพนี้ได้มาจากวัสดุทางธรรมชาติ และใช้เทคนิคทางจุลชีววิทยาสังเคราะห์ (synthetic microbiology technique) ในขณะที่การจัดเรียงตัวเองนั้นเกิดขึ้นในเฟสของเหลว

ภาคผนวก ข.

การใช้ผลิตภัณฑ์นาโนอย่างปลอดภัย

(ข้อ 4.2)

ผลิตภัณฑ์/ กลุ่มผลิตภัณฑ์	นาโนเทคโนโลยี/ วัสดุนาโนที่ใช้และประโยชน์	วิธีการใช้ที่ปลอดภัย/ ข้อควรระวัง
อาหาร เช่น คุกกี้ ขนมปัง ไอศกรีม 	- ใช้เป็นแคปซูลนาโนเพื่อถนอมอาหาร ช่วยเก็บกลิ่นหอมของอาหารให้ทนนาน - ใช้เป็นแคปซูลนาโนบรรจุสารอาหารที่ต้องการเพื่อเพิ่มคุณค่าอาหารโดยไม่ทำให้รสชาติของอาหารเปลี่ยน	- แคปซูลนาโนที่ทำจากไขมันหรือสารชีวภาพไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค - ไม่หลงเชื่อคำโฆษณาที่อ้างการใช้วัสดุนาโนที่เป็นสารอนินทรีย์ เช่น อนุภาคนาโนซิลเวอร์ ในผลิตภัณฑ์อาหารหรืออาหารเสริม - สำหรับผู้บริโภคที่ยังไม่มั่นใจในความปลอดภัยของอาหารที่ใช้นาโนเทคโนโลยี ผู้บริโภคควรเลือกบริโภคอาหารที่ไม่ผ่านกระบวนการแปรรูปและการบรรจุ
บรรจุภัณฑ์อาหาร (รวมทั้งฟิล์มห่อหุ้มอาหาร) 	- ยืดอายุอาหารด้วยการบรรจุในภาชนะที่ทำจากวัสดุนาโนที่มีรูพรุนสำหรับควบคุมการแพร่ของแก๊สออกซิเจน - ฆ่าเชื้อโรคด้วยการใช้ภาชนะที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์เพื่อฆ่าจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสีย	- วัสดุนาโนที่มีรูพรุนไม่เป็นอันตราย แต่หากเป็นภาชนะที่เคลือบอนุภาคนาโนซิลเวอร์เพื่อป้องกันหรือยับยั้งจุลินทรีย์ อาจแทรกซึมสู่อาหารได้ จึงควรยึดหลักระวังไว้ก่อน จนกว่าจะมีข้อมูลทางวิทยาศาสตร์มายืนยันความปลอดภัยต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมอย่างเพียงพอ

ผลิตภัณฑ์/ กลุ่มผลิตภัณฑ์	นาโนเทคโนโลยี/ วัสดุนาโนที่ใช้และประโยชน์	วิธีการใช้ที่ปลอดภัย/ ข้อควรระวัง
ผลิตภัณฑ์สิ่งของใช้ส่วนตัว เช่น ยาสีฟัน แปรงสีฟัน แชมพู ครีมนวดผม สบู่ ครีมบำรุงผิว น้ำยาบ้วนปาก ผ้าปิดแผล เครื่องเป่าผม เจลล้างมือ สเปรย์โรลออน	- เคลือบหรือผสมด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์เพื่อฆ่าเชื้อโรค	- ระมัดระวังการใช้ผลิตภัณฑ์ที่เคลือบนาโนซิลเวอร์หรือวัสดุนาโนประเภทอื่นที่เป็นกลุ่มโลหะที่ย่อยสลายไม่ได้ทางธรรมชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลิตภัณฑ์ประเภทสเปรย์ เนื่องจากมีความเสี่ยงต่อการเข้าสู่ร่างกายไม่ว่าจะเป็นในรูปของการสูดดมหรือการซึมผ่านเข้าผิวหนัง - ระมัดระวังการใช้ยาสีฟันและน้ำยาบ้วนปากที่ผสมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ เนื่องจากมีความเสี่ยงจากการกลืน/กินยาสีฟัน/น้ำยาบ้วนปาก - ระมัดระวังการใช้ผ้าปิดแผลที่เคลือบอนุภาคนาโนซิลเวอร์ เนื่องจากมีความเสี่ยงที่อนุภาคนาโนซิลเวอร์จะซึมเข้าสู่ผิวหนัง
ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด เช่น น้ำยาซักผ้า ผงซักฟอก	- ผสมอนุภาคนาโนซิลเวอร์เพื่อฆ่าเชื้อโรค ลดกลิ่นอับ	- ระมัดระวังการใช้ผลิตภัณฑ์ที่อาจก่อให้เกิดการปล่อยอนุภาคนาโนซิลเวอร์สู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณมาก โดยเฉพาะน้ำยาซักผ้าและผงซักฟอกซึ่งคาดว่าจะมีการปลดปล่อยอนุภาคนาโนซิลเวอร์มากกว่าผลิตภัณฑ์ประเภทอื่น จนกว่าจะมีข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ที่มายืนยันความปลอดภัยต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมอย่างเพียงพอ

ผลิตภัณฑ์/ กลุ่มผลิตภัณฑ์	นาโนเทคโนโลยี/ วัสดุนาโนที่ใช้และประโยชน์	วิธีการใช้ที่ปลอดภัย/ ข้อควรระวัง
ครีมหรือผลิตภัณฑ์กันแดด	- ผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์หรืออนุภาคนาโนซิงค์ ออกไซด์ในครีมกันแดดทำให้เมื่อทาเนื้อครีมจะไม่ทิ้งคราบขาวและสามารถสะท้อนแสงและรังสียูวีได้ดียิ่งขึ้น	- ระมัดระวังการใช้ผลิตภัณฑ์กันแดดแบบสเปรย์ที่มีความเสี่ยงสูงที่อนุภาคนาโนจะเข้าสู่ร่างกายของผู้บริโภคได้ผ่านการสูดหายใจละอองจากสเปรย์ - ระมัดระวังการใช้ลิปสติกและลิปมันที่มีส่วนผสมสารกันแดดที่ใช้นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์หรือนาโนซิงค์ออกไซด์ - กรณีครีมกันแดดชนิดทาบนผิวหนัง ควรระมัดระวังการใช้ครีมกันแดดกับผิวที่อักเสบ ผิวที่มีบาดแผลเปิด - ผู้บริโภคที่ไม่ต้องการใช้ผลิตภัณฑ์กันแดดที่มีส่วนผสมของอนุภาคนาโนอาจเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ที่ระบุว่า “nano-free” หรือสามารถทดสอบได้ด้วยการทาครีมกันแดดลงบนผิว หากปรากฏเป็นคราบขาวเมื่อทาก็แสดงว่าผลิตภัณฑ์นั้นมิได้ใช้อนุภาคนาโนของสารกันแดด

ผลิตภัณฑ์/ กลุ่มผลิตภัณฑ์	นาโนเทคโนโลยี/ วัสดุนาโนที่ใช้และประโยชน์	วิธีการใช้ที่ปลอดภัย/ ข้อควรระวัง
เครื่องสำอาง 	- ใช้แคปซูลนาโนกักเก็บและปลดปล่อยสารบำรุงผิวให้ออกฤทธิ์ช้าๆ ในชั้นของผิวหนังที่ต้องการ (เช่น ในผิวหนังชั้นหนังกำพร้า) และช่วยให้สารบำรุงถูกดูดซึมผ่านชั้นผิวหนังได้ดี โดยตัวแคปซูลนาโนมักจะเป็นไลโปโซมหรือไขมันชนิดก้อนแข็ง (solid lipid carrier) ซึ่งโดยทั่วไปเป็นสารที่มีความเป็นพิษต่ำ	- สำหรับเครื่องสำอางที่บำรุงผิว ควรเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ที่ใช้แคปซูลนาโนที่ทำจากไขมันหรือสารชีวภาพซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค แต่ในกรณีเครื่องสำอางแต่งแต้มสีสันให้กับผิวหนังชั้นนอกเป็นการชั่วคราว เช่น แป้งฝุ่น รองพื้น ลิปสติก ผู้บริโภคไม่จำเป็นต้องใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบของสารระดับนาโน
เครื่องนุ่งห่ม (เช่น เสื้อผ้า ถุงเท้า ชุดว่ายน้ำ) 	- ผสมหรือเคลือบด้วยนาโนซิลเวอร์เพื่อฆ่าเชื้อโรคที่ทำให้เกิดกลิ่นเหม็น - ผ้ากันน้ำโดยเคลือบผิวผ้าด้วยอนุภาคนาโนของสารที่ไม่ชอบน้ำ เช่น นาโนเทฟลอน	- เสื้อผ้านาโนไม่เป็นอันตรายต่อผู้สวมใส่ อย่างไรก็ดี หากสวมใส่เสื้อผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ไม่ควรซักทุกครั้งที่สวมใส่เหมือนกับเสื้อผ้าทั่วไป เนื่องจากจะทำให้อนุภาคนาโนซิลเวอร์ทยอยหลุดออกจากเนื้อผ้า สร้างความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนของอนุภาคอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในสิ่งแวดล้อม

ผลิตภัณฑ์/ กลุ่มผลิตภัณฑ์	นาโนเทคโนโลยี/ วัสดุนาโนที่ใช้และประโยชน์	วิธีการใช้ที่ปลอดภัย/ ข้อควรระวัง
สีทาบ้าน 	- สมบัติในการทำความสะอาดตัวเอง ป้องกันการเกิดหยดน้ำและคราบต่าง ๆ และฝุ่นละออง โดยผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ในสีทาผนังอาคาร - กำจัดเชื้อแบคทีเรียด้วยความยาวคลื่นแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์โดยผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์กับสีทาผนังภายในอาคาร - ป้องกันการดูดซึมน้ำและไม่ให้คราบสกปรกเกาะติดได้ง่าย โดยผสมอนุภาคนาโนซิลิโคนในสีทาบ้าน	- ระมัดระวังการใช้ผลิตภัณฑ์สีทั้งที่เป็นของเหลวและสเปรย์ โดยควรสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลขณะใช้ ได้แก่ ถุงมือ ผ้าปิดจมูก - หลังจากทาสีผนังห้อง ควรเปิดให้อากาศถ่ายเท เพื่อระบายกลิ่นและสารที่อยู่ในสี และหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับผนังที่ทาสี (ทั้งผนังในและนอกบ้าน) โดยเฉพาะเด็กเล็ก (ไม่ว่าผลิตภัณฑ์สีนั้นจะผสมวัสดุนาโนหรือไม่ก็ตาม) เนื่องจากยังไม่มีข้อมูลระดับการแพร่กระจายของอนุภาคนาโนจากสีที่ทาผนัง
อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ 	- อนุภาคนาโนทองในชิปสารกึ่งตัวนำที่อยู่ในแผงวงจรรวม ทำให้อุปกรณ์มีสมรรถนะสูงขึ้น ลดการรั่วของกระแสไฟฟ้าระหว่างเส้นตัวนำและลดค่าความจุที่ไม่พึงประสงค์ ทำให้ปล่อยความร้อนน้อยลง - หน่วยเก็บความจำ ชนิด NanoRAM ที่มีส่วนประกอบของท่อนาโนคาร์บอน ทำให้เก็บข้อมูลได้มากขึ้น	- อนุภาคนาโนอยู่ในอุปกรณ์จึงไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค - เมื่ออุปกรณ์หมดอายุการใช้งาน ควรส่งคืนผู้ผลิตที่มีโครงการรับคืนไปรีไซเคิลหรือส่งให้โรงงานรีไซเคิลนำไปจัดการอย่างเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ผลิตภัณฑ์/ กลุ่มผลิตภัณฑ์	นาโนเทคโนโลยี/ วัสดุนาโนที่ใช้และประโยชน์	วิธีการใช้ที่ปลอดภัย/ ข้อควรระวัง
รถยนต์	- ใช้ท่อนาโนคาร์บอน เสริมความแข็งแรงของโครงและตัวถังรถยนต์ - ใช้วัสดุพอลิเมอร์ประกอบ (nanocomposite) เช่น ผสมท่อนาโนคาร์บอนกับเซรามิก เป็นส่วนประกอบของห้องเครื่องยนต์และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้เบาและแข็งแรงกว่าใช้โลหะ - ยางรถยนต์ ผสมคาร์บอนแบล็กหรือ ซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica) เข้าไปในส่วนผสมของยางรถยนต์เพื่อให้เกาะถนนดียิ่งขึ้น	- อนุภาคนาโนฝังอยู่ในเนื้อวัสดุและอยู่ในชิ้นส่วนที่ไม่สัมผัสกับผู้บริโภคโดยตรง จึงไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค