สมอ./ศน./CDV

มกราคม 2557

ห้ามใช้หรือยึดถือร่างนี้เป็นมาตรฐาน
มาตรฐานฉบับสมบูรณ์จะมีประกาศในราชกิจจานุเบกษา

ร่าง

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

นาโนเทคโนโลยี บทที่ 2: แนวปฏิบัติสำหรับการขนส่ง จัดการ และกำจัดวัสดุนาโนสังเคราะห์

NANOTECHNOLOGIES – PART 2: GUIDE TO SAFE HANDLING AND DISPOSAL OF MANUFACTURED NANOMATERIALS

สำหรับเสนอคณะกรรมการวิชาการพิจารณาร่างมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
กระทรวงอุตสาหกรรม ถนนพระรามที่ 6 กรุงเทพฯ 10400
โทรศัพท์ 0 2202 3490

คณะผู้จัดทำร่างมาตรฐาน
มาตรฐานนาโนเทคโนโลยี บทที่ 2: แนวปฏิบัติสำหรับการขนส่ง จัดการ และกำจัดวัสดุนาโนสังเคราะห์

ที่ปรึกษา

นายชัยณรงค์ เชิดชู	ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ
นายศิรศักดิ์ เทพาคำ	ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ

ประธาน

นางฉลอง เลาจริยกุล	ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ

รองประธาน

นายประสงค์ นรจิตร์	กรมโรงงานอุตสาหกรรม

กรรมการ

นางสาวทิพิชา โปษยานนท์	สำนักงานคณะกรรมการสุขภาพแห่งชาติ
นางนราพร รังสิมันตกุล	สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ
นายสมศักดิ์ ศรีสุภรวาณิชย์	สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย
นางดรุณี เอ็ดเวิร์ดส	หอการค้าและสภาหอการค้าแห่งประเทศไทย
นางสุพิณ แสงสุข	สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
นายวิสันติ เลาหอุดมโชค	กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน
นางสาวจริยา บัวเจริญ	สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ
นางกนกวรรณ บุญยาทิษฐาน	สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
นางสาวพิกุลทอง ขอเพิ่มทรัพย์	ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ
นางสาวสุภาพันธุ์ บุนนาค	
นางสาวฉวีวรรณ ทรัพย์เจริญกุล	
นางสาวภนิตา เกษมโชติช่วง	

กรรมการและเลขานุการ

นายณัฐพันธุ์ ศุภกา	ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ

ปัจจุบันประเทศไทยมีการนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้เพื่อการพัฒนาคุณภาพและเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์หลากหลายประเภท โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของไทย อย่างไรก็ตามความเข้าใจในนาโนเทคโนโลยีโดยเฉพาะอย่างยิ่งเกี่ยวกับวัสดุนาโนในการก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมทั้งทางตรงและทางอ้อมยังไม่มีข้อสรุปและแนวทางการดำเนินการที่ชัดเจน และยังไม่มีหน่วยงานใดทั้งภาครัฐและเอกชนทำหน้าที่ควบคุมดูแลด้านผลกระทบต่อนาโนเทคโนโลยีอย่างจริงจัง ซึ่งการใช้นาโนเทคโนโลยีอย่างระมัดระวังควบคู่ไปกับการพัฒนาทางด้านนาโนเทคโนโลยีนั้นทำให้เกิดการพัฒนาอย่างยั่งยืน

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ จัดทำขึ้นเพื่อเป็นแนวทางในการประเมินความเสี่ยงและพัฒนาการจัดการเกี่ยวกับคุณสมบัติบางประการ การผลิต และการใช้งานวัสดุนาโน รวมทั้งการพัฒนาและการจัดเตรียมที่มีประสิทธิภาพในการจัดการปัญหาและควบคุมความเสี่ยง

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ จัดทำขึ้นเพื่อช่วยให้เกิดมุมมองและความเป็นไปได้เกี่ยวกับการประเมินความเสี่ยงของวัสดุนาโนในหลาย ๆ ด้าน รวมทั้งอันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากอนุภาคนาโนชนิดต่าง ๆ และขอบเขตในการสัมผัสระดับบุคคลที่เกี่ยวข้องกับการทำงานกับวัสดุนาโน ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพได้

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ จัดทำขึ้นตามความร่วมมือระหว่างสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกับศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้กำหนดขึ้นโดยอาศัยข้อมูลจากผู้ทำ ผู้ใช้ และเอกสารต่อไปนี้เป็นแนวทาง

BS PD 6699-2:2007	Nanotechnologies-Part 2 - Guide to safe handling and disposal of manufactured nanomaterials
BS PAS 136:2007	Terminology for nanomaterials
ISO/TR 12885:2008	Nanotechnologies – Health and safety practices in occupational settings relevant to nanotechnologies
ISO/TR 13121:2011	Nanotechnologies - Nanomaterial risk evaluation
ISO/TR 27628:2007	Workplace atmospheres – Ultrafine, nanoparticle and nano-structured aerosols – Inhalation exposure characterization and assessment
ISO/TS 27687:2008	Nanotechnologies - Terminology and definitions for nano-objects - Nanoparticle, nanofibre and nanoplate
ISO/TS 80004-3:2010	Nanotechnologies-Vocabulary - Part 3: Carbon nano-objects
มอก. 2535-2555	การประเมินความเสี่ยงด้านสารเคมีต่อสุขภาพผู้ปฏิบัติงานในโรงงานอุตสาหกรรม

ประกาศกระทรวงมหาดไทย ความปลอดภัยในการทำงานเกี่ยวกับภาวะแวดล้อม (สารเคมี)
ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว
ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม หลักเกณฑ์การชี้บ่งอันตราย การประเมินความเสี่ยงและการจัดทำแผนงานบริหารจัดการความเสี่ยง

Health and safety Regulations (COSHH) 2677. (2002). Control of Substances Hazardous to Health

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (2007). Approaches to Safe Nanotechnology: An Information Exchange with NIOSH

Brouwer DH, Gijsbers JH, Lurvink MW (2004). Personal Exposure to Ultrafine Particles in the Workplace: Exploring Sampling Techniques and Strategies. *Ann. Occup. Hyg*.

Maynard AD, Baron PA , Foley M, Shvedova AA, Kisin ER, Castranova V. (2004). Exposure to carbon nanotubes material: aerosol release during the handling of unrefined single walled carbon nanotube material. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, Part A.

Ryman-Rasmussen JP, Riviere JE, Monteiro-Riviere NA. Penetration of intact skin by quantum dots with diverse physicochemical properties. *Toxicol. Sci.* 2006 May.

Tinkle SS, Antonini JM, Rich BA, Roberts JR, Salmen R, DePree K, Adkins EJ. Skin as a route of exposure and sensitization in chronic beryllium disease. *Environ. Health Perspect*. 2003 Jul.

สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม 2553. คู่มือการจัดการความปลอดภัย: โรงงานที่มีฝุ่นระเบิดได้

สารบัญ

	หน้า
1. ขอบข่าย	1
2. บทนิยาม	1
3. อักษรย่อ	3
4. ตัวอย่างวัสดุนาโนสังเคราะห์	4
5. การรับสัมผัสวัสดุนาโน และความเสี่ยง	6
6. แนวทางทั่วไปในการบริหารจัดการความเสี่ยงจากวัสดุนาโน	9
7. การคัดสรรบุคลากรที่มีความสามารถในการประเมินความเสี่ยง	11
8. การรวบรวมข้อมูล	11
9. การประเมินความเสี่ยง	12
10. การควบคุมการรับสัมผัส	15
11. การเฝ้าระวังด้านสุขภาพ	21
12. วิธีการตรวจวัดสำหรับประเมินการควบคุม	22
13. การรั่วและฟุ้งกระจายของวัสดุนาโนโดยอุบัติเหตุ	26
14. ขั้นตอนการจัดการของเสีย	27
15. การป้องกันการเกิดเพลิงไหม้และการระเบิด	29

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม นาโนเทคโนโลยี บทที่ 2: แนวปฏิบัติสำหรับการขนส่ง จัดการ และกำจัดวัสดุนาโนสังเคราะห์

1. ขอบข่าย

1.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมฉบับนี้ครอบคลุมถึงแนวทางในการประเมินความเสี่ยง และคำนึงถึงความไม่แน่นอนที่สามารถเกิดขึ้นได้ในการพัฒนา การผลิต และการใช้งานของวัสดุนาโน รวมทั้งเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและการจัดเตรียมยุทธศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพในการจัดการปัญหาและควบคุมความเสี่ยง

1.2 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมฉบับนี้สามารถนำไปปรับใช้ได้กับวัสดุนาโนและวัสดุที่มีโครงสร้างระดับนาโนสเกลหลายชนิด ซึ่งระบุไว้ในเอกสาร ISO/TS 27687:2008 เช่น อนุภาคนาโน เส้นใยนาโน ผงนาโน ท่อนาโน และลวดนาโน โดยทั่วไปยังหมายถึงวัตถุนาโน รวมทั้งอนุภาคเกาะก้อนแบบแน่น (aggregate) และอนุภาคเกาะก้อนแบบหลวม (agglomerate) ของวัสดุเหล่านี้ด้วย นอกจากนี้ยังครอบคลุมถึงวัสดุและการเตรียมวัสดุที่มีวัสดุนาโนเป็นส่วนประกอบสำคัญอีกด้วย ซึ่งการใช้งานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมฉบับนี้ไม่รวมถึงวัสดุนาโนที่เกิดขึ้นโดยกระบวนการทางธรรมชาติ หรือที่เกิดขึ้นโดยไม่ตั้งใจ เช่น การเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล การเชื่อมโลหะ

หมายเหตุ *ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมฉบับนี้ เมื่อกล่าวถึง อนุภาคนาโน และ วัสดุนาโน หมายถึง วัสดุนาโนทุกชนิดดังรายการที่กล่าวไว้ข้างต้น*

1.3 สืบเนื่องจากความไม่แน่นอนในหลากหลายประเด็นที่เกี่ยวข้องกับการประเมินความเสี่ยงของวัสดุนาโนอย่างมีประสิทธิภาพ ได้แก่ โอกาสของอันตรายจากอนุภาคนาโนหลากหลายชนิด และระดับของวัสดุนาโนที่ต่ำกว่าระดับการได้รับสัมผัสต่ำสุดที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ จึงนำมาซึ่งมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมฉบับนี้ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการจัดการและกำจัดวัสดุนาโนอย่างระมัดระวังได้

2. บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ มีดังต่อไปนี้

2.1 ท่อนาโน (nanotube) หมายถึง เส้นใยนาโนที่มีลักษณะกลวง

2.2 ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube) หมายถึง ท่อนาโนที่ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอน

หมายเหตุ *ท่อนาโนคาร์บอนโดยปกติประกอบด้วยแผ่นของกราฟีนม้วนเป็นท่อ เช่น ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังเดี่ยว (single-wall carbon nanotube) และ ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (multi-wall carbon nanotube)*

2.3 นาโนเทคโนโลยี (nanotechnology) หมายถึง การประยุกต์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ในการจัดการและ ควบคุมสสารในระดับนาโนสเกล เพื่อใช้ประโยชน์จากสมบัติ หรือปรากฏการณ์ที่ขึ้นกับขนาด หรือโครงสร้างของสสารโดยสมบัติ หรือปรากฏการณ์ดังกล่าวแตกต่างจากที่พบในอะตอม หรือโมเลกุล หรือวัสดุขนาดใหญ่

หมายเหตุ *การจัดการและควบคุมนั้นรวมถึงการสังเคราะห์วัสดุด้วย*

2.4 นาโนสเกล (nanoscale) หมายถึง ขนาดในช่วง 1 nm ถึง 100 nm โดยประมาณ

หมายเหตุ 1 *ในกรณีที่วัสดุสามารถแสดงสมบัติใหม่ (ที่ไม่สามารถอาศัยการคาดการณ์ หรือเทียบบัญญัติไตรยางค์จากวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่าได้) ในช่วงนาโนสเกลนี้ สามารถอนุโลมให้คำจำกัดความของนาโนสเกลเป็น "ค่าโดยประมาณ" ระหว่าง 1* nm *ถึง 100* nm *ได้*

หมายเหตุ 2 *การกำหนดให้ขอบเขตล่างของนาโนสเกลมีค่าเท่ากับ 1* nm *มีวัตถุประสงค์เพื่อหลีกเลี่ยงการกำหนดอะตอมหรือกลุ่มอะตอมว่าเป็น "วัตถุนาโน" หรือธาตุองค์ประกอบของวัสดุโครงสร้างนาโน*

2.5 แผ่นนาโน (nanoplate) หมายถึง วัตถุนาโนที่มีมิติภายนอกอยู่ในระดับนาโนสเกล 1 มิติ ส่วนมิติที่ 2 และ 3 ใหญ่กว่าอย่างมีนัยสำคัญ

หมายเหตุ 1 *มิติภายนอกที่เล็กที่สุด คือ ความหนาของแผ่นนาโน*

หมายเหตุ 2 *มิติภายนอก 2 มิติต้องมีขนาดใหญ่กว่ามิติที่เล็กที่สุดมากกว่า 3 เท่า*

หมายเหตุ 3 *มิติภายนอกที่มีขนาดใหญ่กว่าไม่จำเป็นต้องอยู่ในระดับนาโน*

2.6 ฟูเลอรีนส์ (fullerenes) หมายถึง โมเลกุลที่ประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอนทั้งหมดซึ่งสร้างเป็นรูปแบบของระบบของพอลิไซคลิก (polycyclic) ที่มีการหลอมวงแหวนคล้ายกรงปิด ประกอบด้วยวงแหวนห้าเหลี่ยม 12 วง และที่เหลือเป็นวงแหวนหกเหลี่ยม

หมายเหตุ 1 *ดัดแปลงมาจากคำนิยามในระบบการเรียกชื่อคำศัพท์สารเคมีของ IUPAC*

หมายเหตุ 2 *ตัวอย่างที่รู้จักกันดีคือ C_{60} ซึ่งมีรูปร่างแบบทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1* nm

2.7 ลวดนาโน (nanowire) หมายถึง เส้นใยนาโนที่มีสมบัติเป็นตัวนำ หรือ กึ่งตัวนำไฟฟ้า

2.8 วัตถุนาโน (nano-object) หมายถึง วัสดุที่มีมิติภายนอก 1 มิติ 2 มิติ หรือ 3 มิติ อยู่ในระดับนาโนสเกล

2.9 วัสดุนาโน (nanomaterial) หมายถึง วัสดุที่มีมิติภายนอกอยู่ในระดับนาโนสเกล หรือ วัสดุที่มีโครงสร้างภายใน หรือมีโครงสร้างพื้นผิวอยู่ในระดับนาโนสเกล

2.10 วัสดุนาโนสังเคราะห์ (manufactured nanomaterial) หมายถึง วัสดุนาโนที่ผลิตขึ้นสำหรับใช้ในวัตถุประสงค์ทางการค้าเพื่อให้มีสมบัติ หรือองค์ประกอบที่จำเพาะ

2.11 เส้นใยนาโน (nanofibre) หมายถึง วัตถุนาโนที่มีมิติภายนอกอยู่ในระดับนาโนสเกลเหมือนกัน 2 มิติ ส่วนมิติที่ 3 ใหญ่กว่าอย่างมีนัยสำคัญ

หมายเหตุ 1 *เส้นใยนาโนสามารถมีความยืดหยุ่นหรือไม่ยืดหยุ่น*

หมายเหตุ 2 *มิตินาโนสเกลทั้ง 2 มิติมีขนาดแตกต่างกันไม่เกิน 3 เท่า และมิติที่ 3 ใหญ่กว่าทั้ง 2 มิติมากกว่า 3 เท่า*

หมายเหตุ 3 *มิติที่ 3 ไม่จำเป็นต้องอยู่ในระดับนาโนสเกล*

2.12 อนุภาคนาโน (nanoparticle) หมายถึง วัตถุนาโนที่มีมิติภายนอกทั้ง 3 มิติอยู่ในระดับนาโนสเกล

หมายเหตุ *หากอัตราส่วนด้านยาวต่อด้านสั้นของวัตถุมีค่ามากกว่า 3 ให้เรียกว่า "เส้นใยนาโน" หรือ "แผ่นนาโน" แทน "อนุภาคนาโน"*

2.13 อนุภาคเกาะก้อนแบบแน่น (aggregate) หมายถึง อนุภาคเดี่ยวที่ยึดติดกันด้วยพันธะที่แข็งแรง หรือ อนุภาคหลายอนุภาคที่หลอมรวมกัน และส่งผลให้พื้นที่ผิวภายนอกลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับผลรวมพื้นที่ผิวของแต่ละอนุภาคทั้งหมดรวมกัน

หมายเหตุ 1 *แรงยึดเหนี่ยวที่เชื่อมยึดอนุภาคเกาะก้อนแบบแน่นเข้าด้วยกันเป็นแรงที่แข็งแรง เช่น พันธะโคเวเลนท์ หรือ ผลจากการเผาเพื่อผนึก หรือ การพัวพันทางกายภาพของอนุภาคอย่างซับซ้อน*

หมายเหตุ 2 *อนุภาคเกาะก้อนเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า "อนุภาคทุติยภูมิ" และอนุภาคเริ่มต้นก่อนเกาะเป็นก้อนเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า "อนุภาคปฐมภูมิ"*

2.14 อนุภาคเกาะก้อนแบบหลวม (agglomerate) หมายถึง กลุ่มของอนุภาค หรือกลุ่มของอนุภาคเกาะก้อนแบบแน่น หรือส่วนผสมของอนุภาคทั้งสองชนิด ที่เกาะกันด้วยแรงแบบอ่อน ๆ และส่งผลให้พื้นที่ผิวภายนอกไม่แตกต่างไปจากผลรวมพื้นที่ผิวของแต่ละอนุภาคทั้งหมดรวมกัน

หมายเหตุ 1 *แรงยึดเหนี่ยวที่เชื่อมยึดอนุภาคเกาะก้อนแบบหลวมเข้าด้วยกันเป็นแรงแบบอ่อน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ หรือ การพัวพันทางกายภาพของอนุภาคอย่างง่าย*

หมายเหตุ 2 *อนุภาคเกาะก้อนเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า "อนุภาคทุติยภูมิ" และอนุภาคเริ่มต้นก่อนเกาะเป็นก้อนเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า "อนุภาคปฐมภูมิ"*

3. อักษรย่อ

3.1 สารก่อมะเร็ง สารก่อการกลายพันธุ์ สารที่ก่อโรคหอบหืด หรือ สารพิษต่อระบบสืบพันธุ์ (carcinogenetic, mutagenic, asthmagenic or reproductive toxin ; CMAR)

3.2 โรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง (chronic obstructive pulmonary disease ;COPD)

3.3 การควบคุมสารอันตรายต่อสุขภาพ (control of substances hazardous to health ; COSHH)

3.4 เครื่องวัดความหนาแน่นอนุภาค (condensation particle counter ; CPC)

3.5 เครื่องวัดขนาดอนุภาคโดยการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้า (differential mobility particle sizer ; DMPS)

3.6 เครื่องอิเล็กโตรสแตติกโลวเพรสเชอร์อิมแพคเตอร์ (electrostatic low pressure impactor ; ELPI)

3.7 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีคุณสมบัติเป็นของเสียอันตราย (hazardous waste – absolute entry ; HA)

3.8 แผ่นกรองอากาศที่มีประสิทธิภาพสูง หรือแผ่นกรองเฮปา (high efficiency particulate air filter ; HEPA)

3.9 คณะกรรมการจัดการสุขภาพและความปลอดภัย (Health and Safety Executive ; HSE)

3.10 สหภาพเคมีบริสุทธิ์และเคมีประยุกต์ระหว่างประเทศ (International Union of Pure and Applied Chemistry ; IUPAC)

3.11 สถาบันอาชีวอนามัยและความปลอดภัยแห่งสหรัฐอเมริกา (National Institute for Occupational Safety and Health ; NIOSH)

3.12 อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล (personal protective equipment ; PPE)

3.13 เอกสารความปลอดภัย (safety data sheet ; SDS)

3.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope ; SEM)

3.15 เครื่องสวิทช์โหมดเพาเวอร์ซัพพลาย (switched-mode power supply ; SMPS)

3.16 เครื่องชั่งแทเปอร์อีเลเมนต์ออสซิลเลติงไมโครบาลานซ์ (tapered element oscillating microbalance ; TEOM)

3.17 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope ; TEM)

3.18 ค่าขีดจำกัดการรับสัมผัสสารในสถานปฏิบัติการ (workplace exposure limit ; WEL)

4. ตัวอย่างวัสดุนาโนสังเคราะห์

หัวข้อนี้อธิบายถึงวัสดุนาโนสังเคราะห์ที่สามารถนำแนวทางในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมฉบับนี้ไปใช้ได้ อนึ่งรายละเอียดในหัวข้อนี้มิได้มีวัตถุประสงค์สำหรับใช้เป็นแนวทางการจัดจำแนกชนิดวัสดุนาโน

4.1 ฟูเลอรีนส์

ฟูเลอรีนส์เป็นหนึ่งในโครงสร้างสี่ชนิดของธาตุคาร์บอนที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ มีการค้นพบฟูเลอรีนส์เป็นครั้งแรกในช่วงทศวรรษที่ 1980 โมเลกุลของฟูเลอรีนส์ประกอบด้วยคาร์บอนอะตอมทั้งหมด มีรูปร่างเป็นทรงกลมกลวงหรือทรงกระบอก ฟูเลอรีนส์มีโครงสร้างคล้ายคลึงกับแกรไฟต์ ที่ประกอบด้วยวงหกเหลี่ยมของอะตอมคาร์บอนเรียงเป็นแผ่น แต่ยังมีวงห้าเหลี่ยมและวงเจ็ดเหลี่ยมเป็นองค์ประกอบ ซึ่งทำให้เกิดเป็นโครงสร้างสามมิติ โครงสร้างฟูเลอรีนส์ที่รู้จักกันดีคือ C_{60} ที่เรียกกันว่า บัคมินสเตอร์ฟูเลอรีน (buckminsterfullerene) หรือบักกีบอล (buckyball) ฟูเลอรีนส์เป็นวัสดุที่มีความเสถียรทางเคมีและไม่ละลายในสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย มีศักยภาพในการใช้งานทางด้านการนำส่งยา การเคลือบ การหล่อลื่น และการกักเก็บไฮโดรเจน

4.2 ท่อนาโนคาร์บอน

ท่อนาโนคาร์บอน คือรูปแบบเฉพาะของฟูเลอรีนส์ ซึ่งมีรายงานการพบครั้งแรกโดยอิจิมา (Sumio Iijima) ท่อนาโนคาร์บอนมีโครงสร้างคล้ายกับ C_{60} แต่มีรูปทรงเป็นท่อยาวและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเล็ก

มากในระดับนาโนเมตร ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนสามารถสร้างให้มีอัตราส่วนระหว่างความยาวของท่อและเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่มีค่าสูง และความยาวของท่อนาโนคาร์บอนสามารถมีค่าได้มากกว่า 1 mm โดยรูปแบบพื้นฐานที่ง่ายที่สุดของท่อนาโนคาร์บอนนั้นประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนเรียงตัวต่อกันแบบผนังชั้นเดี่ยวเป็นทรงกระบอก ซึ่งรู้จักกันในชื่อท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยว ท่อนาโนคาร์บอนยังสามารถสร้างเป็นรูปแบบท่อที่มีผนังหลายชั้น โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้ถึง 20 nm และมีความยาวได้มากกว่า 1 mm ท่อนาโนคาร์บอนนั้นมีความทนทานต่อการยืดได้มาก และมีความแข็งแรงกว่าโลหะถึง 100 เท่า แต่มีน้ำหนักเบากว่าโลหะถึง 6 เท่า นอกจากนี้ท่อนาโนคาร์บอนมีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดี มีพื้นที่ผิวมาก มีสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์เฉพาะ และมีความสามารถในการดูดซับสูง ทั้งนี้ท่อนาโนคาร์บอนเป็นวัสดุที่มีความเสถียรทางเคมี และไม่ละลายในสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย และท่อนาโนคาร์บอนนั้นมีศักยภาพในการใช้งานทางด้านการเคลือบวัสดุประกอบแต่งหรือวัสดุคอมโพสิต อิเล็กทรอนิกส์ การกรองน้ำ และเป็นวัสดุโครงสร้าง

4.3 ลวดนาโน

ลวดนาโน คือวัสดุนาโนที่เป็นตัวนำไฟฟ้าหรือสารกึ่งตัวนำขนาดเล็ก โดยมีโครงสร้างผลึกแบบเดี่ยวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 nm และมีอัตราส่วนระหว่างความยาวกับเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีค่าสูง มีการนำโลหะหลายชนิดมาสร้างเป็นลวดนาโน เช่น โคบอลต์ ทองคำ ทองแดง รวมทั้งมีการผลิตลวดนาโนซิลิคอนด้วยเช่นกัน โดยลวดนาโนนั้นมีศักยภาพในการใช้งานทางด้านการเชื่อมต่อระบบภายในของอุปกรณ์นาโนอิเล็กทรอนิกส์ การใช้งานทางด้านเซลล์แสงอาทิตย์ และด้านเซนเซอร์

4.4 ควอนตัมดอทส์ หรือ หัวหมุดควอนตัม

ควอนตัมดอทส์ คือวัสดุกึ่งตัวนำที่มีขนาดเล็ก (ประมาณ 2 nm ถึง 10 nm) และมีสมบัติพิเศษใหม่ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ แสง แม่เหล็ก และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ควอนตัมดอทส์ประกอบด้วยอะตอมจำนวนตั้งแต่ 1 000 atom ถึง 100 000 atom ซึ่งควอนตัมดอทส์จัดอยู่ในกลุ่มที่อยู่ระหว่างโครงสร้างของแข็งและลักษณะเฉพาะโมเลกุลเดี่ยว ควอนตัมดอทส์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าสามารถแสดงสมบัติทางด้านโฟโตอิเล็กทรอนิกส์ได้โดยมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดของอนุภาค เช่น แสงที่เปล่งออกมาจากการที่อนุภาคถูกกระตุ้นสามารถปรับให้มีความยาวคลื่นที่เฉพาะเจาะจงตามความต้องการได้โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาค โดยควอนตัมดอทส์มีศักยภาพในการใช้งานทางด้านการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การถ่ายภาพทางการแพทย์ อุปกรณ์เชิงแสง และเซนเซอร์

4.5 วัสดุนาโนประเภทอื่น

สำหรับหมวดนี้เป็นการรวบรวมวัสดุนาโนที่มีรูปแบบหลากหลาย เช่น แบบทรงกลม อนุภาคเกาะก้อนแบบแน่น หรืออนุภาคเกาะก้อนแบบหลวม เช่น อนุภาคคาร์บอนแบล็กละเอียด (ultrafine carbon black) และซิลิ

กาฟูม (fumed silica) ที่เกิดจากกระบวนการเผาด้วยเปลวไฟของก้อนมวลรวม เนื่องจากวัสดุนาโนนั้นเกิดขึ้นได้จากวัสดุหลากหลายชนิด เช่น โลหะ ออกไซด์ เซรามิก สารกึ่งตัวนำ วัสดุอินทรีย์ (organic material) ดังนั้นวัสดุนาโนสามารถเป็นวัสดุเชิงประกอบหรือวัสดุคอมโพสิตได้ด้วย เช่น การที่มีแกนกลางเป็นโลหะและมีออกไซด์เป็นเปลือกหุ้ม หรือโลหะเจือที่มีส่วนผสมของโลหะมากกว่าหนึ่งชนิด การระบุขนาดและรูปร่างของวัสดุนาโนในกลุ่มคอมโพสิตหรือโลหะเจือนั้นค่อนข้างยาก และมีโอกาสที่เกิดเป็นก้อนมวลรวมที่มีปริมาณมากกว่าวัสดุนาโนรูปแบบอื่น วัสดุนาโนเหล่านี้มีศักยภาพการใช้งาน เช่น สารเคลือบและสีย้อม ตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์เพื่ออนามัยส่วนบุคคล เครื่องสำอาง และวัสดุคอมโพสิต

5. การรับสัมผัสวัสดุนาโน และความเสี่ยง

5.1 ทั่วไป

หลายปีที่ผ่านมามีรายงานการรับสัมผัสอนุภาคต่าง ๆ รวมถึงอนุภาคนาโนที่สามารถก่อให้เกิดความเจ็บป่วยและส่งผลกระทบต่อสุขภาพทั้งต่อบุคคล และกลุ่มประชากรที่มีการรับสัมผัสกับอนุภาค จากรายงานเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นมักเกี่ยวข้องกับการรับสัมผัสขณะทำงานในโรงงานอุตสาหกรรม และจากมลภาวะในสิ่งแวดล้อม ยกตัวอย่างในด้านการทำงาน เช่น การรับสัมผัสกับฝุ่นถ่านหินซึ่งเชื่อมโยงกับการเกิดโรคทางปอด เช่น โรคปอดจากการประกอบอาชีพ (pneumoconiosis) และ COPD และการรับสัมผัสกับแร่ใยหิน (asbestos) ซึ่งเชื่อมโยงกับการเกิดโรคปอดใยหิน (asbestosis) โรคมะเร็งเยื่อหุ้มปอด (mesothelioma) โรคมะเร็งปอด (lung cancer) ในด้านสิ่งแวดล้อมนั้นปัจจุบันพบว่าการรับสัมผัสกับอนุภาคที่ปะปนอยู่กับมลภาวะทางอากาศส่งผลให้อัตราการเข้ารับการรักษาในโรงพยาบาลสูงขึ้น และยังส่งผลต่อโรคหัวใจและหลอดเลือด อย่างไรก็ตาม พบว่ามีประชากรนับล้านคนได้รับสัมผัสกับอนุภาคต่าง ๆ ที่ปะปนมากับมลภาวะทางอากาศในชีวิตประจำวัน แต่ไม่ปรากฏอาการเจ็บป่วย ทั้งนี้ เนื่องจากความเสี่ยงหรือโอกาสที่สารใด ๆ จะก่อให้เกิดการเจ็บป่วยนั้นขึ้นกับปริมาณของสารที่ได้รับ โดยปริมาณสารที่ได้รับ (dose) นั้น หมายถึงปริมาณของสารที่เข้าสู่อวัยวะเป้าหมายแล้วทำให้เกิดโรคขึ้น รวมถึงระยะเวลาที่สารตกค้างอยู่ในอวัยวะนั้นด้วย ความเป็นพิษยังขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวรวมของอนุภาคด้วย โดยเฉพาะอนุภาคที่มีการละลายได้ต่ำ

5.2 ความเสี่ยงต่อสุขภาพที่อาจเกิดจากการสูดดมวัสดุนาโน หรือการที่วัสดุนาโนเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ มีรายงานและบทความจำนวนมาก เกี่ยวกับแนวโน้มความเสี่ยงด้านสุขภาพและสิ่งแวดล้อมจากการรับสัมผัสวัสดุนาโน ซึ่งความเสี่ยงที่เกิดจากการรับสัมผัสทางการหายใจสามารถสรุปได้ ดังต่อไปนี้

5.2.1 เนื่องจากขนาดที่เล็ก วัสดุนาโนสามารถผ่านเข้าสู่ระบบต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิตที่ปกติอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าผ่านเข้าถึงไม่ได้ ซึ่งรวมถึงโอกาสที่เพิ่มขึ้นของการเคลื่อนที่ผ่านขอบเขตเซลล์ หรือโอกาสที่เพิ่มขึ้นของการเคลื่อนที่จากปอดเข้าสู่กระแสเลือดโดยตรง และต่อไปยังอวัยวะต่าง ๆ ทั้งหมดของร่างกาย หรือ

แม้แต่ผ่านทางการสะสมในจมูก และเคลื่อนที่ต่อไปยังสมองโดยตรง ซึ่งกระบวนการเคลื่อนย้ายตำแหน่งของวัสดุนาโนเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่

5.2.2 เนื่องจากขนาดที่เล็ก วัสดุนาโนจึงมีพื้นที่ผิวสูงกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีมวลเท่ากันเป็นอย่างมาก ซึ่งกรณีที่พื้นที่ผิวทำให้เกิดความเป็นพิษเพิ่ม นั่นหมายความว่ามีโอกาสที่วัสดุนาโนที่จะมีความเป็นพิษมากขึ้นด้วย

5.2.3 สำหรับวัสดุนาโนบางชนิด การลดขนาดช่วยให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์นี้อาจช่วยเพิ่มชีวปริมาณการออกฤทธิ์ (bioavailability) ได้มากกว่าอนุภาคชนิดเดียวกันที่ไม่สามารถละลายได้เนื่องจากอนุภาคมีขนาดใหญ่

5.2.4 เนื่องจากเหตุผลสำคัญในการพัฒนาวัสดุนาโน และอนุภาคนาโนนั้น คือความต้องการสมบัติ และหน้าที่การทำงานแบบใหม่ที่แตกต่างไปจากอนุภาคชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่กว่า โดยสมบัติทางเคมี และ/หรือสมบัติทางกายภาพที่เกิดขึ้นใหม่นี้ มักเกิดขึ้นควบคู่กับการเปลี่ยนสมบัติใหม่ทางชีวภาพ ซึ่งบางครั้งรวมถึงความเป็นพิษที่เพิ่มขึ้นด้วย

5.2.5 ประเด็นพิเศษเกี่ยวกับการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุนาโนที่มีอัตราส่วนด้านยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสูง (เช่น ท่อนาโนคาร์บอน หรือลวดนาโน) กับแร่ใยหินซึ่งมีสัณฐานวิทยาเป็นแบบเส้นใยที่มีอัตราส่วนด้านยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสูง อนุภาคที่เป็นเส้นใยบางประเภทก่อให้เกิดโรคได้ เนื่องจากเมื่อสูดดมและเข้าสู่ถุงลมปอด ไม่สามารถกำจัดออกจากร่างกายได้โดยง่าย ด้วยสาเหตุต่อไปนี้

5.2.5.1 มิติทางกายภาพของวัสดุไม่เอื้อต่อการกำจัดด้วยกลไกตามธรรมชาติภายในปอด

5.2.5.2 ความคงทน และการไม่ละลายด้วยของเหลวภายในปอด ทำให้วัสดุเหล่านี้คงอยู่ในปอดเป็นระยะเวลานาน ส่งผลให้เกิดการอักเสบ และเกิดโรคในท้ายที่สุด

ดังนั้น เมื่อมีการสูดดมวัสดุนาโนซึ่งมีอัตราส่วนด้านยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสูงบางประเภทที่มีสัณฐานวิทยาคล้ายคลึงกับแร่ใยหินและคงทน จึงมีโอกาสคงอยู่ในปอดเป็นระยะเวลานานเช่นกัน

การที่วัสดุเหล่านี้มีการเพิ่มปริมาณการผลิต มีราคาที่ถูกลง และมีการเพิ่มการใช้งานวัสดุเหล่านี้ในระดับอุตสาหกรรมและผลิตภัณฑ์ทางการค้านี้เอง ชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการประเมินความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้วัสดุนาโน รวมถึงการมีแนวทางการจัดการ และการกำจัดอย่างเหมาะสมเมื่อต้องมีการทำงานหรือรับสัมผัสกับอนุภาคนาโนเหล่านี้

โอกาส (หรือความเสี่ยง) ของโรคที่อาจเกิดขึ้นนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณของวัสดุนาโนที่เข้าสู่อวัยวะ และความเป็นพิษของวัสดุนาโน อย่างไรก็ตามปริมาณของวัสดุนาโนที่กระตุ้นให้เกิดโรคไม่สามารถวัดได้โดยตรง แต่สามารถอนุมานได้จากปริมาณการรับสัมผัส ร่วมกับระดับความเข้มข้นของวัสดุนาโนในอากาศที่บุคคลนั้นหายใจเข้าไป รวมทั้งระยะเวลาที่ได้รับสัมผัสวัสดุนาโนของบุคคลนั้นด้วย ดังนั้น หากไม่มีการรับสัมผัส

กับวัสดุนาโน (เช่นไม่พบวัสดุนาโนในอากาศ) ก็จะไม่มีการสะสมของอนุภาค จึงไม่มีความเสี่ยงต่อสุขภาพเกิดขึ้น แม้ว่าวัสดุนาโนนั้นจะมีความเป็นพิษก็ตาม

ดังนั้นการปฏิบัติตามวิธีการที่ถูกต้องเกี่ยวกับการควบคุมความเสี่ยงของการใช้งานวัสดุนาโน คือการเข้าใจถึงโอกาสการรับสัมผัสกับวัสดุนาโนจากการผลิตและการใช้งาน โดยมีมาตรการเพื่อควบคุม จัดการ หรือลดการรับสัมผัสกับวัสดุนาโน ทำให้สามารถควบคุมความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นได้

5.3 ความเสี่ยงต่อสุขภาพที่อาจเกิดขึ้นจากการรับสัมผัสทางผิวหนัง หรือทางปาก

5.3.1 เนื่องจากมีความเป็นไปได้ที่วัสดุนาโนอาจซึมเข้าสู่ผิวหนัง และผ่านเข้าสู่กระแสเลือด ทำให้เกิดเป็นประเด็นความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการรับสัมผัสวัสดุนาโนบางชนิดผ่านทางผิวหนัง ในปัจจุบันการรายงานผลการศึกษาการซึมผ่านผิวหนังของอนุภาคนาโนนั้นมีจำนวนน้อยมาก และไม่สามารถอธิบายได้ว่าการซึมผ่านเกิดขึ้นได้มากน้อยเพียงใด อย่างไรก็ตาม การศึกษานั้นยังอยู่ในช่วงเริ่มต้น และยังมีอีกหลายประเด็นที่ต้องทำการศึกษาต่อไป เช่น ผลในกรณีที่ผิวหนังมีบาดแผล สำหรับการศึกษาทางด้านอื่นยังอยู่ในช่วงดำเนินการ ดังนั้นจึงควรระมัดระวัง และป้องกันการรับสัมผัสกับวัสดุนาโนโดยตรงผ่านทางผิวหนัง หรือจนกว่าจะมีผลการศึกษาด้านความปลอดภัยอย่างชัดเจน

5.3.2 ผลต่อสุขภาพที่อาจเกิดขึ้นจากการรับสัมผัสทางปาก ได้มีการหยิบยกขึ้นมาเนื่องจากอนุภาคนาโนสามารถเคลื่อนที่ผ่านระบบทางเดินอาหาร และดูดซึมเข้าสู่ร่างกายผ่านทางผนังกระเพาะอาหารหรือผนังลำไส้ อย่างไรก็ตาม แม้ปัจจุบันยังไม่มีหลักฐานชัดเจนว่ามีผู้ป่วยเนื่องมาจากสาเหตุนี้ แต่เพื่อความรอบคอบ จึงควรระวัง และหลีกเลี่ยงการรับสัมผัสวัสดุนาโนผ่านทางปาก

5.4 วัสดุนาโนในกลุ่มวัตถุอันตราย

แนวทางสำหรับบ่งชี้วัตถุอันตรายสามารถดูได้จาก SDS ในปัจจุบันยังไม่มีข้อมูลที่ชัดเจนเกี่ยวกับความเป็นพิษของวัสดุนาโน นอกจากนี้ ข้อกำหนดของคู่มือความปลอดภัยของสารเคมียังไม่เพียงพอ และไม่ครอบคลุมผลกระทบเกี่ยวกับอันตรายของวัสดุนาโน ดังนั้น เพื่อความปลอดภัยจึงควรพิจารณาว่าวัสดุนาโนนั้นเป็นสารอันตราย จนกว่าจะมีการรายงานและข้อมูลที่เพียงพอ

5.5 ความเสี่ยงการเกิดเพลิงไหม้และการระเบิดจากวัสดุนาโน

อินทรีย์วัตถุส่วนใหญ่ โลหะหลายชนิด และอนินทรีย์วัตถุบางชนิดที่ไม่ใช่โลหะสามารถทำให้เกิดหมอกของฝุ่นที่ระเบิดได้ ปัจจัยสำคัญที่ทำให้หมอกฝุ่นไวต่อการติดไฟ และเกิดระเบิดที่รุนแรงนั้นขึ้นกับขนาดของอนุภาค หรือ พื้นที่ผิวจำเพาะ เช่น พื้นที่ผิวโดยรวมต่อปริมาตร หรือต่อมวลของฝุ่น เมื่อขนาดอนุภาคลดลง พื้นที่ผิวจำเพาะจะเพิ่มมากขึ้น แนวโน้มโดยทั่วไป คือ ความรุนแรงของการระเบิด และไวในการจุดระเบิดจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคลดลง อนุภาคหลายชนิดแสดงแนวโน้มดังกล่าวตั้งแต่ขนาดอนุภาคในระดับหลายสิบไมโครเมตร อย่างไรก็ตาม ไม่ได้มีการระบุว่าขนาดอนุภาคเล็กเท่าใดที่ไม่ก่อให้เกิดการระเบิด และ

อนุภาคนาโนหลายชนิดมีแนวโน้มในการเกิดระเบิด นอกจากนี้ยังไม่มีข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับอันตรายของวัสดุนาโนในการก่อให้เกิดเพลิงไหม้และการระเบิด ณ เวลาปัจจุบัน

6. แนวทางทั่วไปในการบริหารจัดการความเสี่ยงจากวัสดุนาโน

COSHH 2002 นั้นเกี่ยวข้องกับการใช้สารเคมีหรือสารอันตรายต่าง ๆ ในที่ทำงานซึ่งกำหนดให้นายจ้างควบคุมการรับสัมผัสของสารอันตรายสู่พนักงานและบุคคลอื่น ๆ ที่อาจได้รับอันตราย ซึ่งให้กรอบแนวทางการประเมิน และบริหารจัดการความเสี่ยงจากวัสดุนาโน ประกอบด้วย 8 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

(1) ระบุอันตราย และประเมินความเสี่ยง

(2) พิจารณาข้อควรระวังที่จำเป็น

(3) ป้องกันและควบคุมการรับสัมผัสอย่างเพียงพอ

(4) ตรวจสอบให้มั่นใจว่ามีการใช้มาตรการการป้องกันอย่างต่อเนื่อง

(5) ตรวจติดตามการรับสัมผัส

(6) การเฝ้าระวังด้านสุขภาพ

(7) เตรียมแผนงานและกระบวนการจัดการกับอุบัติเหตุหรือเหตุการณ์ฉุกเฉิน

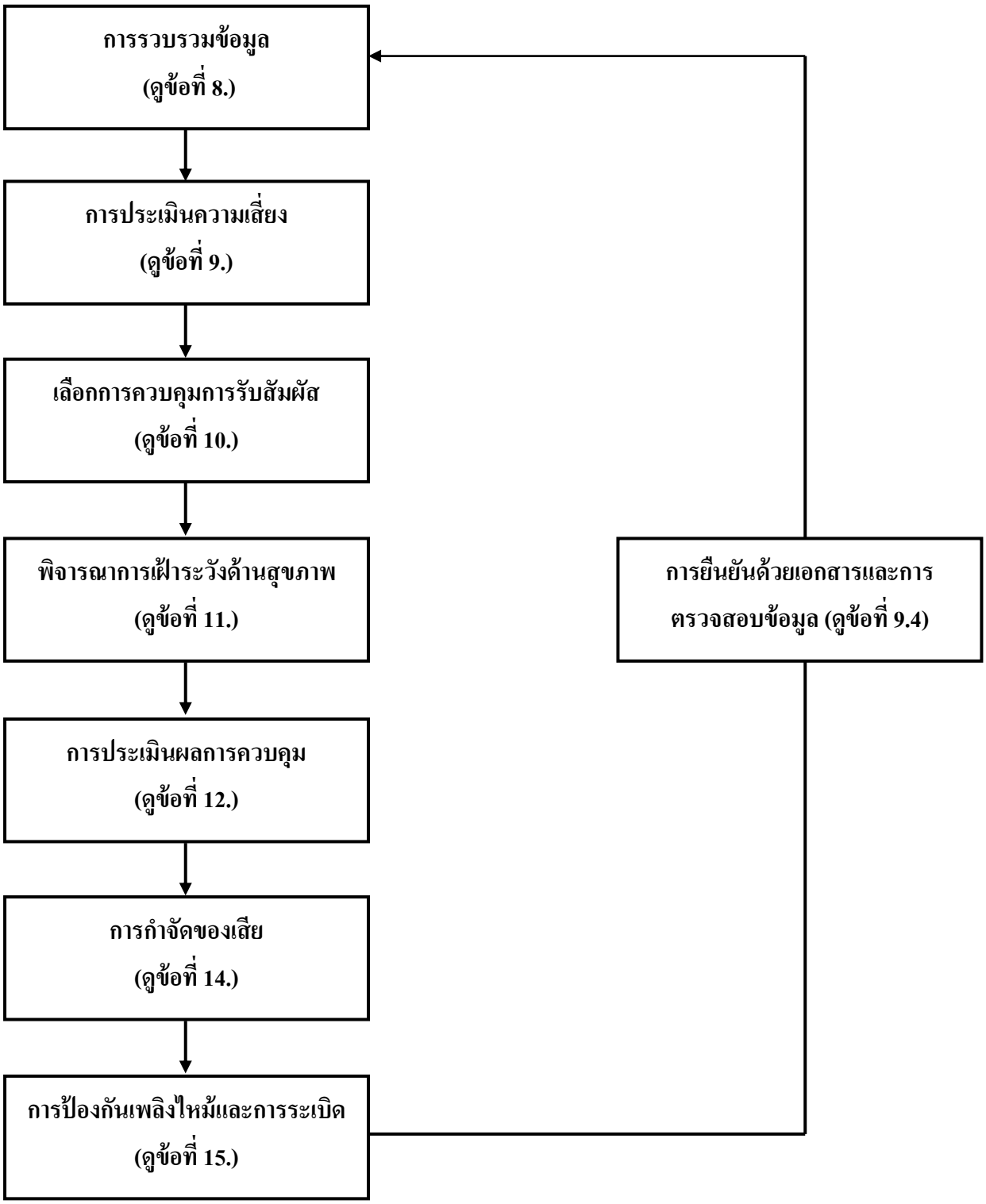
(8) ตรวจสอบให้มั่นใจว่าพนักงานได้รับข้อมูล ได้รับการฝึกอบรม และได้รับคำแนะนำอย่างเหมาะสม

โดยวิธีการปฏิบัติที่นำเสนอในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมฉบับนี้ยึดถือขอบข่ายข้างต้นเป็นแบบอย่าง

6.1 COSHH มีข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับธรรมชาติความอันตรายของวัสดุ ประสิทธิภาพของแนวทางการควบคุม และวิธีการตรวจติดตามการรับสัมผัสที่ทำได้ง่ายและไม่ซับซ้อน อย่างไรก็ตาม การนำ COSHH มาใช้กับวัสดุนาโนนั้นยังมีความยุ่งยากอยู่ เนื่องจากข้อมูลที่อาจยังไม่สมบูรณ์ หรืออาจไม่ถูกต้อง

6.2 องค์ความรู้เกี่ยวกับอันตรายต่อสุขภาพของวัสดุนาโนชนิดใหม่ยังมีความไม่สมบูรณ์ นำมาซึ่งความไม่แน่นอนที่อาจเกิดขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในการประเมินความเสี่ยง ในกรณีที่ข้อมูลความรู้ที่มี ไม่เพียงพอ ควรต้องมีแนวทางในการควบคุมที่รัดกุมมากขึ้น

6.3 รูปที่ 1 แสดงขั้นตอนปฏิบัติสำหรับการจัดการความเสี่ยงจากวัสดุนาโนสำหรับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมฉบับนี้ (ซึ่งเป็นขั้นตอนอ้างอิงสำหรับส่วนที่เหลือที่จะกล่าวต่อไปในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมฉบับนี้) โดยแสดงขั้นตอนอย่างละเอียดในการประเมินความเสี่ยง การรับมือกับความไม่แน่นอน และการพัฒนาและประยุกต์ใช้กลยุทธ์ในการควบคุมการรับสัมผัสและจัดการความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้น



รูปที่ 1 ขั้นตอนปฏิบัติสำหรับการจัดการความเสี่ยงจากวัสดุนาโน

(ข้อ 6.3)

7. การคัดสรรบุคลากรที่มีความสามารถในการประเมินความเสี่ยง

การคัดสรรบุคลากรที่มีความสามารถในการประเมินความเสี่ยงเป็นการตัดสินใจลำดับแรก กลุ่มคนที่มีส่วนร่วมในกระบวนการประเมินความเสี่ยงของสารเคมีโดยทั่วไปนั้น ประกอบด้วย บุคลากรที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนากระบวนการ หรือผู้ปฏิบัติงาน ผู้จัดการ หรือผู้เชี่ยวชาญด้านอาชีวสุขศาสตร์ จากความรู้ที่เกี่ยวกับอนุภาคนาโนซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดในปัจจุบัน จึงเป็นการยากที่ปัจเจกบุคคลซึ่งขาดความรู้ด้านความเสี่ยงของวัสดุนาโนจะสามารถตัดสินใจเกี่ยวกับขั้นตอนการดำเนินการได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ โดยมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมฉบับนี้ชี้แนะให้บุคลากรที่เกี่ยวข้องในการพัฒนาการประเมินความเสี่ยงของวัสดุนาโนจำเป็นต้องหาความรู้เพิ่มเติม หรือเข้ารับการฝึกอบรมจากหน่วยงานภายนอกที่มีความเชี่ยวชาญทางด้านนาโนเทคโนโลยี

8. การรวบรวมข้อมูล

8.1 การรวบรวมข้อมูลเป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินความเสี่ยง หากองค์ความรู้เกี่ยวกับวัสดุยังมีไม่เพียงพอต้องจัดการวัสดุนั้นในรูปแบบของวัสดุนั้นเป็นอันตรายและใช้มาตรการควบคุมการรับสัมผัสที่เข้มงวด ดังนั้น การรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุ การใช้งาน และวิธีปฏิบัติเมื่อใช้งานจึงมีความสำคัญ รวมถึงข้อมูลการบำรุงรักษา และการทำความสะอาด โดยควรมุ่งเน้นเก็บรวบรวมข้อมูลที่สามารถใช้ประเมินความเสี่ยงอันตราย และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้นได้ ดังรายการต่อไปนี้

- ชื่อทางการค้า และชื่อทางเคมี
- SDS
- องค์ประกอบทางเคมี
- สัดส่วนของวัสดุนาโน (ถ้ามี)
- ความยาวและความหนาของอนุภาค
- การกระจายตัวของขนาดอนุภาค
- ลักษณะการฟุ้งกระจายของฝุ่น
- สารที่ใช้ระงับการฟุ้งกระจายของฝุ่นในวัสดุ หรือมีการยึดจับกับวัสดุอื่น
- ความสามารถในการละลายน้ำของวัสดุ
- ความอันตราย หรือ ความเป็นพิษของวัสดุ

8.2 การรวบรวมองค์ความรู้ที่มีอยู่และที่ยังไม่สมบูรณ์มีความสำคัญอย่างมาก สำหรับวัสดุนาโนที่ขายในเชิงพาณิชย์นั้นจะมีข้อมูลบางส่วนระบุไว้ใน SDS แต่การนำข้อมูลใน SDS มาใช้ยังต้องมีการประเมินขอบเขต

ความน่าเชื่อถือของข้อมูลเบื้องต้นจากผู้ขายก่อนว่าได้มีการพิจารณาความเสี่ยงของสารในลักษณะที่สารนั้นอยู่ในระดับนาโนสเกลหรือไม่

8.3 ต้องมีการระบุบุคคลที่อาจได้รับอันตรายจากการรับสัมผัสสาร โดยหมายรวมถึงพนักงานในกระบวนการผลิตและพนักงานฝ่ายสนับสนุน เช่น พนักงานทำความสะอาด พนักงานฝ่ายซ่อมบำรุง พนักงานก่อสร้าง ผู้เยี่ยมชม ผู้จัดการ นักเรียน พนักงานในสำนักงาน และบุคคลภายนอกที่มาติดต่อ

8.4 ควรมีการรวบรวมข้อมูลลักษณะของวัสดุนาโนที่มีแนวโน้มที่อาจทำให้เกิดอันตรายและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

9. การประเมินความเสี่ยง

9.1 การประเมินอันตราย

อนุภาคขนาดเล็กส่วนใหญ่เมื่อเกิดการแขวนลอยในอากาศและสูดดมเข้าสู่ร่างกาย โดยเฉพาะอนุภาคที่มีสมบัติในการละลายต่ำ ควรคำนึงถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อปอดเป็นลำดับแรก ทั้งสำหรับกรณีการผลิตหรือการใช้งาน อย่างไรก็ตาม ควรพิจารณาถึงการรับสัมผัสทางผิวหนัง หรือทางปาก และโอกาสของอันตรายอื่น ๆ เช่นการระเบิด และการเกิดเพลิงไหม้อีกด้วย

9.1.1 การประเมินอันตรายควบคู่ไปกับการประเมินความเป็นไปได้ในการรับสัมผัสสามารถนำไปสู่การวางแผนกลยุทธ์ในการควบคุมอันตรายที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งหากมีข้อมูลที่ชัดเจนมากเท่าไร การดำเนินการก็สามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการประเมินข้อมูลที่ได้มาอย่างละเอียดรอบคอบทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ การประเมินอันตรายควรเริ่มจากการจำแนกชนิดของอันตรายต่าง ๆ โดยอาจให้สอดคล้องกับประเภทของวัสดุนาโน ตัวอย่างการจัดจำแนกอาจแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มดังต่อไปนี้

เส้นใยนาโน	วัสดุนาโนที่ไม่ละลาย และมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสูง
CMAR	วัสดุนาโนใด ๆ ที่มีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกันกับวัสดุขนาดใหญ่ที่จัดเป็นสารก่อมะเร็ง สารก่อกลายพันธุ์ สารก่อโรคหอบหืด หรือสารพิษต่อระบบสืบพันธุ์
สารที่ไม่ละลาย	วัสดุนาโนที่ละลายได้น้อย หรือไม่ละลาย และไม่จัดอยู่ในกลุ่มของเส้นใยนาโน หรือ CMAR
สารที่ละลายได้	วัสดุนาโนที่ละลายได้ และไม่จัดอยู่ในกลุ่มของเส้นใยนาโน หรือ CMAR

9.1.2 การประเมินควรพิจารณาจัดกลุ่มวัสดุนาโนลงในกลุ่มข้างต้นนี้ก่อน แล้วตรวจสอบว่ามีข้อมูลหรือองค์ความรู้ใดที่เกี่ยวข้องกับสารในกลุ่มนี้บ้าง เพื่อนำไปใช้ในการประเมินอันตราย (ความเป็นพิษ) ของวัสดุนาโน โดยเปรียบเทียบกับสารชนิดเดียวกันที่มีอนุภาคใหญ่หรือกับวัสดุนาโนชนิดอื่น ๆ

9.1.3 วัสดุนาโนทุกกลุ่มข้างต้นนั้น สามารถคาดคะเนได้ว่าวัสดุนาโนเหล่านี้อาจมีอันตรายมากกว่าสารชนิดเดียวกันที่มีอนุภาคใหญ่กว่า

9.2 การประเมินการรับสัมผัส

9.2.1 หัวใจสำคัญสำหรับขั้นตอนนี้ คือการจำแนกลักษณะของการรับสัมผัสโดยการรวบรวม และวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อการจำแนกลักษณะของการรับสัมผัสควรประกอบด้วย

(1) รายงานเกี่ยวกับจุดประสงค์ ขอบเขต รายละเอียด และวิธีการปฏิบัติในการประเมิน

(2) ประเมินการรับสัมผัสและปริมาณที่รับสัมผัสของแต่ละวิธี สำหรับทั้งแต่ละบุคคลและกลุ่มประชากร

(3) การประเมินคุณภาพในภาพรวมทั้งหมดสำหรับวิธีการประเมินการรับสัมผัสที่ใช้ และการประเมินระดับความเชื่อมั่นของการประเมินการรับสัมผัสและการสรุปผล

9.2.2 ความเสี่ยงนั้นเกี่ยวข้องกับธรรมชาติของวัสดุและการรับสัมผัสซึ่งคนมีโอกาสรับสัมผัสสารนั้นได้ ดังนั้นข้อมูลที่อาจจำเป็นต้องรวบรวมเพื่อช่วยในการประเมินการรับสัมผัส ได้แก่

(1) งานในส่วนใดที่พนักงานสามารถได้รับการรับสัมผัสต่อวัสดุนาโน เช่น กระบวนการผลิต การทำความสะอาด งานซ่อมบำรุง การขนส่ง และการจัดเก็บ

(2) ใครบ้างที่สามารถเกิดการรับสัมผัสได้ในขณะปฏิบัติงาน เช่น พนักงานที่ทำงานอยู่โดยตรง พนักงานที่ทำงานอยู่พื้นที่ใกล้เคียง คนที่เข้ามาเยี่ยมชม พนักงานรับจ้าง/ผู้รับเหมา ผู้จัดการ และบุคคลอื่น

(3) ช่องทางที่อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการรับสัมผัสสู่ร่างกายมนุษย์ เช่น การสูดดม การรับประทาน และการซึมผ่านผิวหนัง

(4) กิจกรรมอะไรที่สามารถก่อให้เกิดโอกาสในการรับสัมผัส พิจารณาจากงานที่ทำประจำ จากการเกิดอุบัติเหตุ และการซ่อมบำรุง (พิจารณาจากเหตุการณ์ที่ไม่ใช่เหตุการณ์ปกติ)

(5) ความถี่ในการรับสัมผัส (ตลอดระยะเวลาการทำงานทั้งกะ ชั่วระยะเวลาหนึ่ง หรือนาน ๆ เกิดครั้งหนึ่ง) ตาม มอก. 2535

(6) ระดับการรับสัมผัสอยู่ในระดับใดและระยะเวลานานเท่าไร อาจต้องมีการเฝ้าระวังด้านสุขภาพ (ดูรายละเอียดในข้อ 11.) และตาม มอก. 2535

(7) วัสดุนาโนสามารถปรากฏอยู่ในอากาศที่ล้อมรอบ หรือบนพื้นผิวของสถานที่ทำงานได้หรือไม่ หรืออยู่ในสถานที่ซึ่งคนมีโอกาสเกิดการรับสัมผัสได้

(8) ควรใช้เครื่องมือ/กระบวนการควบคุมแบบใดในงานแต่ละประเภท อาจรวมถึงการแยกคนออกจากแหล่งที่อาจเกิดการรับสัมผัสโดยสร้างเป็นระบบปิด หรือพัฒนาระบบหมุนเวียนอากาศ การฝึกอบรมให้ความรู้แก่พนักงาน และส่งเสริมการใช้ PPE

นอกจากนี้ ควรรวบรวมข้อมูลมาตรฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องไว้ด้วยเช่นกัน

9.2.3 จากข้อจำกัดของความรู้เกี่ยวกับอนุภาคนาโน จึงเป็นไปได้ว่าข้อมูลที่รวบรวมข้างต้นอาจได้รับการพิจารณาว่ายังมีไม่เพียงพอ ซึ่งเมื่อความไม่แน่นอนของระดับการรับสัมผัสสูงขึ้น การประเมินความเสี่ยงต้องทำด้วยความระมัดระวังที่สูงขึ้นด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำค่าผิดพลาดมาประกอบการพิจารณาเมื่อมีข้อสงสัยเกิดขึ้น จากการประเมินตามพื้นฐานที่ได้กล่าวมา ทำให้ต้องมีการวางแผนจัดลำดับการเก็บรวบรวมข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับระดับการรับสัมผัส รวมถึงโปรแกรมการวัดระดับการรับสัมผัส (ซึ่งสรุปไว้ในข้อ 12.)

9.3 การประเมินความเสี่ยง

9.3.1 ขั้นนี้ เป็นการระบุ และประเมินโอกาสการรับสัมผัสสำหรับอันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้ การประเมินความเสี่ยงพิจารณาจากอันตรายและระดับการรับสัมผัสที่อาจเกิดขึ้น และผลที่ได้จากการประเมินจะนำไปสู่การตัดสินใจเกี่ยวกับการดำเนินการเพื่อควบคุมความเสี่ยงดังกล่าว หากความเสี่ยงใด ๆ มีนัยสำคัญ หรืออาจพัฒนาไปเป็นความเสี่ยงที่มีนัยสำคัญ จำเป็นต้องได้รับการพิจารณาอย่างระมัดระวัง

9.3.2 อันตรายที่เกิดขึ้นนั้นบางครั้งก็ไม่สามารถแก้ได้ทันทีทันใด จึงจำเป็นต้องทำการประมวลผลอันตรายตามลำดับความสำคัญ โดยการประมวลผลตามลำดับความสำคัญนั้นต้องอยู่บนพื้นฐาน ดังนี้

(1) ความเสี่ยงต่อสุขภาพที่ร้ายแรงที่สุด

(2) ความเสี่ยงที่มีโอกาสเกิดในระยะเวลาอันใกล้ที่สุด

(3) ความเสี่ยงที่สามารถจัดการได้เร็วที่สุด

สิ่งที่สำคัญที่สุด คือ ความร้ายแรงของความเสี่ยง ซึ่งหากความเสี่ยงใด ๆ มีผลเสียร้ายแรงมากควรจัดการกับความเสี่ยงนั้นโดยทันที แต่ไม่ควรเพิกเฉยต่อความเสี่ยงที่มีผลไม่รุนแรงนัก เพราะหากกำจัดความเสี่ยงแต่เนิ่น ๆ อาจสามารถจัดการได้ง่ายกว่าและทำได้เร็วกว่า โดยเกณฑ์ในการจัดระดับความรุนแรงของสารเคมีอันตรายที่มีผลกระทบต่อสุขภาพ ตาม มอก. 2535 หรือ ตามระเบียบกรมโรงงานอุตสาหกรรม ว่าด้วยหลักเกณฑ์การชี้บ่งอันตราย การประเมินความเสี่ยง และการจัดทำแผนงานบริหารจัดการความเสี่ยง (พ.ศ. 2543) ได้ระบุถึงความรุนแรงของเหตุการณ์ต่าง ๆ ว่าสามารถก่อให้เกิดผลกระทบต่อบุคคล ชุมชน ทรัพย์สินหรือสิ่งแวดล้อมมากน้อยเพียงใด โดยได้จัดระดับความรุนแรงเป็น 4 ระดับ

9.4 การยืนยันด้วยเอกสารและการตรวจสอบข้อมูล

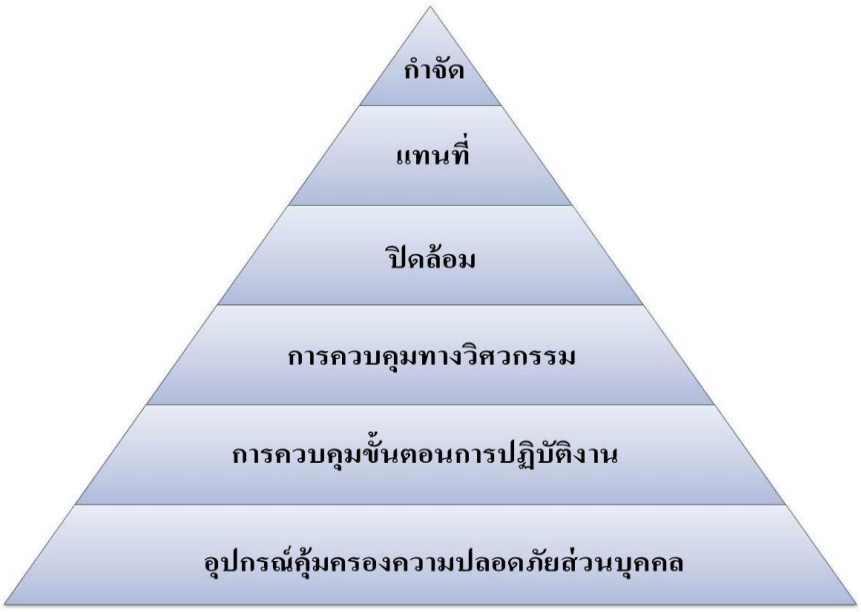
9.4.1 ความสำคัญในการประเมินความเสี่ยง คือ การจดบันทึกทันทีเมื่อมีการประเมินเกิดขึ้น หรือเร็วที่สุดเท่าที่สามารถทำได้ภายหลังจากการประเมิน ในบางกรณีการประเมินความเสี่ยงไม่ได้เกิดขึ้นพร้อมกัน เนื่องจากบางครั้งต้องหาข้อมูลที่สำคัญบางประการเพิ่มเติมก่อนประเมิน เช่น การทำการทดสอบล่วงหน้าที่ช่วงระยะเวลาหนึ่งก่อนการประเมินที่สมบูรณ์แบบ หรือการรอผลการเก็บข้อมูลของอากาศ โดยการบันทึกเหตุการณ์เหล่านี้ต้องทำให้ครบถ้วนหรือเพิ่มเติมข้อมูลใหม่ทันทีที่หาข้อมูลได้

9.4.2 การให้ข้อมูลสถานการณ์ที่เกิดขึ้นใหม่ จากความรู้เกี่ยวกับการประเมินความเสี่ยงของวัสดุนาโนนั้น ความรู้ใหม่ที่สำคัญนี้อาจใช้ได้ทันเหตุการณ์ในบางเวลา ดังนั้นการประเมินความเสี่ยงต้องมีการตรวจสอบ/ทบทวนข้อมูลทุกปี เพื่อให้มีข้อมูลและองค์ความรู้ใหม่ ๆ อยู่เสมอ และผู้ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการนั้นควรมีส่วนร่วมในการดำเนินการตรวจสอบและทบทวนข้อมูลการประเมินความเสี่ยง เพื่อให้มั่นใจว่าความรู้ที่เขามีอยู่นั้นทันต่อเหตุการณ์

10. การควบคุมการรับสัมผัส

10.1 ลำดับขั้นการควบคุม

ในทางปฏิบัตินั้นการป้องกันการรับสัมผัสสามารถทำได้โดยการหลีกเลี่ยง ออกห่าง หรือใช้สารอื่นทดแทนการใช้สารอันตราย หรือตัด/ลดกระบวนการที่เสี่ยงต่อสุขภาพออก แต่หากไม่สามารถทำได้ ให้มีมาตรการป้องกันที่เหมาะสมในการปฏิบัติงาน และการจัดทำลำดับในการควบคุมการรับสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การจัดลำดับขั้นการควบคุม

(ข้อ 10.1)

10.2 การควบคุมการรับสัมผัส

หากไม่สามารถหลีกเลี่ยงการรับสัมผัสได้ ควรใช้มาตรการการควบคุมที่เพียงพอ โดยลำดับของมาตรการควบคุมความเสี่ยงจากการรับสัมผัสทางการหายใจ และทางผิวหนัง ประกอบด้วย

10.2.1 กำจัด

หลีกเลี่ยงการใช้สารอันตรายหรือกระบวนการที่นำไปสู่การรับสัมผัส มาตรการนี้อาจไม่สามารถทำได้ในกรณีที่วัสดุนาโนถูกนำมาใช้เพื่อสมบัติบางประการที่จำเพาะ อย่างไรก็ตาม ควรต้องพิจารณาความสำคัญระหว่างสมบัติที่ได้รับจากวัสดุนาโนกับความเสี่ยงที่เพิ่มขึ้นจากการใช้งาน

10.2.2 แทนที่

เปลี่ยนวัสดุนาโน หรือกระบวนการไปยังวัสดุหรือกระบวนการทางเลือกที่มีความเสี่ยงน้อยกว่า หากไม่สามารถใช้วัสดุอื่นทดแทนได้ อาจลดโอกาสการรับสัมผัสให้น้อยลงแทน เช่น รวมวัสดุนาโนที่เป็นผงในตัวกลางที่เป็นของเหลวหรือของแข็ง ควรพิจารณาใช้วัสดุนาโนอยู่ในรูปแบบของการกระจายตัว ครีม หรือการอัดเม็ด แทนที่แบบผง หากสามารถทำได้

10.2.3 ปิดล้อม

การปฏิบัติงานที่มีการปลดปล่อยวัสดุนาโนไปในอากาศต้องทำในสถานที่ปิด หรือแยกห่างจากผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งรวมถึงกระบวนการผลิตวัสดุนาโนที่อยู่ในสภาวะเป็นแก๊ส การทำแห้งแบบพ่นฝอย กระบวนการอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการใช้วัสดุนาโนในรูปแบบแห้งควรทำในระบบปิด

10.2.4 การควบคุมทางวิศวกรรม

ทุกกระบวนการหรือขั้นตอนของการปฏิบัติงานที่ก่อให้เกิดฝุ่นควรมีระบบกรองระบายอากาศ ณ สถานที่นั้น ๆ ด้วย ซึ่งระบบกรองระบายอากาศนี้รวมถึงตู้ดูดควัน และเครื่องกรองฝุ่น โดยการเลือกระบบการควบคุมที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับระดับความเสี่ยงของการทำงาน และต้องมีการบำรุงรักษาและทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์อย่างสม่ำเสมอ สำหรับอากาศที่หมุนเวียนเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ต้องทำให้บริสุทธิ์ก่อน ส่วนการลดการรับสัมผัสทางผิวหนังสามารถทำได้ด้วยการปรับโครงสร้างกระบวนการทำงานใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงการสาดกระเด็น หรือการจุ่ม

10.2.5 การควบคุมขั้นตอนการปฏิบัติงาน

ในบางกรณี ผลจากการประเมินความเสี่ยงอาจระบุว่าการควบคุมขั้นตอนการปฏิบัติงานเพียงอย่างเดียวนั้นเพียงพอต่อการควบคุม แต่ควรพิจารณาให้มีการควบคุมขั้นตอนการปฏิบัติงานควบคู่ไปกับการควบคุมทางวิศวกรรมด้วย การควบคุมขั้นตอนการปฏิบัติงานรวมถึง การลดจำนวนบุคลากรที่รับสัมผัสหรือเวลาในการปฏิบัติงานในบริเวณนั้น และจำกัดกระบวนการทำงานในพื้นที่ควบคุม และห้ามไม่ให้ผู้ที่ไม่เกี่ยวข้องเข้าไปในพื้นที่ดังกล่าว ผู้เกี่ยวข้องควรได้รับข้อมูลเกี่ยวกับข้อกำหนดของอันตรายที่เกิดจากวัสดุนาโน มาตรการป้องกันที่จำเป็น และผลจากการรับสัมผัสฝุ่นละอองที่มีต่อสุขภาพ รวมถึงข้อมูล

ที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนการปฏิบัติงานด้วย การตรวจสุขภาพและการเฝ้าระวังทางการแพทย์อย่างสม่ำเสมอถือเป็นสิ่งจำเป็น เสื้อคลุมที่ใช้ปฏิบัติงานควรทำความสะอาดและเก็บแยกต่างหากจากเสื้อผ้าปกติ และสำหรับสถานที่ปฏิบัติงานควรจัดให้มีตารางทำความสะอาดเป็นประจำด้วย

10.2.6 PPE

อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล เป็นทางเลือกสุดท้าย หรือเป็นทางเลือกเสริมให้กับการควบคุมการรับสัมผัสอื่นๆ

10.2.6.1 การป้องกันการรับสัมผัสทางการหายใจ

ในเอกสารของ HSE (HSG53) ได้ระบุข้อมูลเกี่ยวกับการเลือกและใช้หน้ากากป้องกันแก๊สพิษ ซึ่งขึ้นอยู่กับผลการประเมินความเสี่ยง โดยชนิดของอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันระบบทางเดินหายใจ (respiratory protective equipment: RPE) ที่เหมาะสมนั้นได้แก่ หน้ากากแบบใช้แล้วทิ้ง หมวกหรือหน้ากากป้องกันแบบเต็มส่วน-ครึ่งส่วน เครื่องดูดควัน หมวกนิรภัย ชุด และเสื้อคลุม ซึ่งควรเลือกใช้ระบบกรองแบบที่มีประสิทธิภาพสูง (ชนิด P3 และ FFP3) ผู้ที่ใช้อุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจควรตรวจสอบว่าสวมใส่ได้ถูกต้องเหมาะสม และพอดีกับใบหน้าหรือไม่ ควรมีการฝึกอบรม การแนะนำ และการดูแลรักษา PPE โดยเฉพาะที่ใช้ป้องกันระบบทางเดินหายใจ หากการเลือกใช้ PPE ที่ไม่ถูกต้อง หรือไม่พอดีกับสรีระร่างกาย หรือขาดประสิทธิภาพนั้น ส่งผลต่อระดับการป้องกัน

10.2.6.2 การป้องกันการรับสัมผัสทางผิวหนัง

การประเมินความเสี่ยงอาจบ่งชี้ได้ถึงความจำเป็นในการใช้ถุงมือป้องกัน แว่นตานิรภัยที่มีการป้องกันบริเวณด้านข้าง และชุดป้องกัน เป็นต้น การเลือกถุงมือป้องกันสำหรับการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมมีเกณฑ์ดังต่อไปนี้

(1) ถุงมือต้องเหมาะสมกับความเสี่ยงและสภาวะในระหว่างการใช้งาน

(2) ถุงมือต้องเหมาะสมกับสรีระและสภาพของผู้ใช้งาน

(3) ถุงมือที่เลือกใช้ต้องเหมาะกับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน

(4) ถุงมือต้องป้องกันการรับสัมผัสได้โดยไม่เพิ่มความเสี่ยงอื่นๆ ต่อผู้สวมใส่

ทั้งนี้ ในทางปฏิบัติ ต้องใส่ถุงมือและดูแลรักษาในระหว่างการใช้งานอย่างถูกต้องและเหมาะสม การพัฒนาระบบการจัดการถุงมือเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ช่วยให้การป้องกันมีประสิทธิภาพเพียงพอและสร้างความมั่นใจให้กับผู้ใช้ได้มากขึ้น ระบบการจัดการถุงมือนั้นพิจารณาจากความสำคัญในองค์ประกอบหลักต่าง ๆ เช่น การประเมินการทำงาน และการรับสัมผัสที่อาจเกิดขึ้น การเลือกประเภทวัสดุของถุงมือ การฝึกอบรมทั้งผู้จัดการและผู้ปฏิบัติงาน การติดตามตรวจสอบระบบ การจัดเก็บ การบำรุงรักษา และการกำจัด

10.3 การเลือกระดับการควบคุม

10.3.1 จุดประสงค์ของการควบคุม คือเพื่อให้แน่ใจได้ว่าการทำงานที่ต้องมีการรับสัมผัสนั้นส่งผลกระทบต่อผู้ปฏิบัติงานน้อยที่สุด โดยทั่วไปแล้วคำแนะนำคือการเลือกระดับการควบคุมที่สูงที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ทั้งในด้านเทคนิคและด้านงบประมาณที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามต้องมีความสมดุลกันของระดับการควบคุมที่ต้องการเพื่อความปลอดภัยในการทำงานและเพื่อประสิทธิภาพของมาตรการควบคุมด้วย การประเมินความเสี่ยงสามารถช่วยในการตัดสินใจเลือกการควบคุมที่เหมาะสม ความจำเป็น ความสามารถในการปฏิบัติงาน และต้นทุน

10.3.2 ปัจจุบันนี้ยังไม่มีข้อมูลที่น่าเชื่อถือเกี่ยวกับการควบคุมอย่างไรจึงจะได้ผลดีที่สุด รวมถึงอันตรายของวัสดุนาโนเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นเพื่อช่วยให้สามารถเลือกระดับการควบคุมที่เหมาะสมได้ อาจอาศัยการจำแนกชนิดของอันตรายที่เกิดจากวัสดุนาโนเป็น 4 ประเภทตามข้อ 9.1.1 โดยการจัดจำแนกดังกล่าว มีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยกำหนดระดับอันตรายได้อย่างสมเหตุสมผล ควบคู่กับความระมัดระวัง นอกจากนี้ การจัดจำแนกที่ใช้ในแต่ละกรณีนั้นอยู่บนสมมุติฐานที่ว่า โอกาสของอันตรายที่เกิดจากอนุภาคนาโนนั้นมากกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ แต่ข้อสมมุติฐานนี้ใช้ได้ในบางกรณีเท่านั้น แม้ว่าเกณฑ์มาตรฐานของระดับการรับสัมผัสดังกล่าวมีความเชื่อมโยงกับค่าขีดจำกัดการรับสัมผัสที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน แต่ไม่ได้มีการพัฒนาอย่างเต็มรูปแบบ การใช้ค่าดังกล่าวจึงสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการปฏิบัติเท่านั้น แต่ไม่ควรนำมาใช้กำหนดเป็นค่า WEL ที่ปลอดภัยได้

10.3.2.1 เส้นใยนาโน

ค่าขีดจำกัดการรับสัมผัสสำหรับเส้นใยในอากาศที่อ้างอิงจากค่าจำกัดของแร่ใยหิน ซึ่งระบุไว้ใน BS PD 6699-2:2007 มีค่าเท่ากับ 0.01 fibers/ml จากการวัดค่าโดยใช้เทคนิค SEM หรือ TEM ทั้งนี้เส้นใยต้องเป็นอนุภาคที่มีความยาวมากกว่า 5 000 nm และมีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง มากกว่า 3:1

10.3.2.2 วัสดุนาโน CMAR

ความสามารถในการละลายที่สูงขึ้นของวัสดุนาโน CMAR อาจทำให้มีชีวปริมาณออกฤทธิ์ที่สูงขึ้น ดังนั้น เพื่อเพิ่มระดับความปลอดภัย จึงแนะนำให้กำหนดค่าการรับสัมผัสที่ 0.1 x material WEL ซึ่งนิยมแสดงค่าเป็นความเข้มข้นโดยมวล

10.3.2.3 วัสดุนาโนที่ไม่ละลายน้ำ

ค่าขีดจำกัดการรับสัมผัสของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 0.1 μm ซึ่งระบุไว้ใน BS PD 6699-2:2007 มีค่าเท่ากับ 1.5 mg/m^3 สำหรับกรณีที่เป็นผงละเอียดมาก ให้กำหนดค่าขีดจำกัดการรับสัมผัสที่ 0.1 mg/m^3 ตาม time weighted average (TWA = ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของสารเคมีในอากาศสำหรับการทำงาน 8 h 1 d หรือ 40 h/w ซึ่งผู้ปฏิบัติงานเกือบทั้งหมด

สามารถรับสัมผัสซ้ำ ๆ หลายวัน โดยปราศจากอันตรายต่อสุขภาพ) ในกรณีที่ไม่มีวิธีการอื่น ๆ นอกเหนือจากที่กล่าวมาข้างต้นนี้อาจเป็นการเหมาะสมที่จะใช้เป็นเกณฑ์ตัดสินวัสดุนาโนชนิดอื่นด้วย ตามเกณฑ์ดังกล่าวแนะนำให้ใช้ค่าเท่ากับ 0.066 x WEL ซึ่งนิยมแสดงค่าเป็นความเข้มข้นโดยมวล

10.3.2.4 วัสดุนาโนที่ละลายน้ำ

สำหรับวัสดุนาโนที่ละลายได้ดี รูปแบบของวัสดุนาโนมักไม่ส่งผลต่อระดับการดูดซึมของร่างกายให้สูงขึ้น และไม่ส่งผลต่อชนิดของผลกระทบที่เกิดขึ้น ค่ามาตรฐานการรับสัมผัสของวัสดุนาโนในกลุ่มนี้อยู่ที่ 0.5 x WEL

10.3.3 สำหรับงานทั่วไปที่มีระดับการรับสัมผัสเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานนั้นวิธีการควบคุมขั้นต่ำได้ระบุไว้ดังตารางที่ 1 อย่างไรก็ตามปัจจุบันยังไม่มีข้อมูลที่เพียงพอเกี่ยวกับการประเมินประสิทธิภาพของวิธีการเหล่านี้ การใช้มาตรการควบคุมทั้งหมดควรมีการวัดค่าการรับสัมผัสร่วมด้วยทุกครั้งเท่าที่สามารถทำได้

10.4 ข้อมูล คำแนะนำ และการฝึกอบรม

การบริหารจัดการที่ถูกต้อง ทำให้ได้มาตรการควบคุมที่เหมาะสมและใช้งานได้เต็มที่ การแบ่งความรับผิดชอบด้านการบริหารจัดการและการตรวจสอบที่ชัดเจนเป็นสิ่งที่สำคัญ ซึ่งการบริหารจัดการได้แก่การฝึกอบรมหรือฝึกอบรมทบทวนให้กับบุคคลที่เกี่ยวข้องกับการบังคับใช้มาตรการควบคุมและการดำเนินงานเพื่อให้การควบคุมได้ผลตามที่ควรเป็นทุกคนที่เกี่ยวข้องหรือผู้ที่อาจได้รับผลกระทบควรได้รับการอบรมตามระดับชั้นการอบรมเพื่อความปลอดภัยในการปฏิบัติงานของตนเองและผู้อื่น ที่สำคัญพนักงานหรือเจ้าหน้าที่ทุกคนควรได้รับทราบถึงขั้นตอนการประเมินความเสี่ยงในที่ทำงานด้วยมาตรการที่จำเป็นในการประเมินความเสี่ยงอาจไม่สมบูรณ์หากพนักงานขาดข้อมูลและไม่ให้ความร่วมมือ ดังนั้นสิ่งที่พนักงานทุกคนจำเป็นต้องทราบ คือ

(1) ชื่อของสารที่มีโอกาสรับสัมผัส และเสี่ยงต่อสุขภาพจากการรับสัมผัส

(2) ค่า WEL หรือ ค่ามาตรฐานอื่นที่คล้ายกันสำหรับการรับสัมผัสสารนั้น

(3) ข้อมูลใน SDS ที่เกี่ยวข้องกับสารนั้น

(4) ข้อมูลที่พบจากการประเมินความเสี่ยง

(5) ข้อควรระวังเบื้องต้นเพื่อการป้องกันตนเองและพนักงานที่เกี่ยวข้อง

(6) ผลของการตรวจติดตามการรับสัมผัสโดยเฉพาะถ้าผลที่ได้มีค่าเกิน WEL

(7) ผลการตรวจสุขภาพและการวิเคราะห์ที่รวบรวมไว้ (ดูตามหัวข้อ 11.)

ตารางที่ 1 แนวทางการควบคุมสำหรับใช้งานทั่วไป

(ข้อ 10.3.3)

พิจารณาการฟุ้งกระจายในอากาศ เช่น อุตสาหกรรมการผลิต การเคลือบแบบพ่น

เส้นใยนาโน และวัสดุนาโน CMAR	กระบวนการนี้ควรทำในที่ปิดหรือแยกห่างจากบุคลากร
วัสดุนาโนที่ไม่ละลาย/ละลายได้	กระบวนการนี้ควรทำในที่ปิดหรือแยกห่างจากบุคลากร ถึงแม้ว่ามีการควบคุมการระบายอากาศ เช่น ห้องแยกสารละลายหรือการดูดอากาศอย่างเพียงพอก็ตาม

การขนย้าย การผสม การเติม การตวง (สำหรับวัสดุแห้ง)

เส้นใยนาโนและวัสดุนาโน CMAR	กระบวนการนี้ควรกระทำในที่ปิดหรือแยกห่างจากบุคลากร
วัสดุนาโนที่ไม่ละลาย/ละลายได้	กระบวนการนี้ควรกระทำในที่ปิดหรือแยกห่างจากบุคลากร ถึงแม้ว่ามีการควบคุมการระบายอากาศ เช่น ห้องแยกสารละลายหรือการดูดอากาศอย่างเพียงพอก็ตาม แต่ถ้าสารมีจำนวนน้อย เช่น มีจำนวนเป็นมิลลิกรัม ใช้แค่การแยกหรืออุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันระบบทางเดินหายใจก็เพียงพอ

การขนย้าย การผสม การเติม (สำหรับสารแขวนลอย)

เส้นใยนาโนและวัสดุนาโน CMAR	กระบวนการนี้ควรทำในที่ปิดหรือแยกห่างจากบุคลากร อย่างไรก็ตาม โดยส่วนใหญ่ควรมีการควบคุมการระบายอากาศอย่างเพียงพอ แต่ถ้าสารมีจำนวนน้อย เช่น มีจำนวนเป็นมิลลิกรัมใช้แค่การแยกหรืออุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันระบบทางเดินหายใจก็เพียงพอ
วัสดุนาโนที่ไม่ละลาย/ละลายได้	ควรมีการควบคุมการระบายอากาศ เช่น ห้องแยกสารละลายหรือการดูดอากาศอย่างเพียงพอ แต่ถ้าสารมีจำนวนน้อย เช่น มีจำนวนเป็นมิลลิกรัม ใช้แค่การแยกหรืออุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันระบบทางเดินหายใจก็เพียงพอ

การบำรุงรักษาและการทำความสะอาด

เส้นใยนาโนและวัสดุนาโน CMAR	อาณาบริเวณซึ่งสามารถคุมอยู่ในระบบปิดได้ควรมีการขยายให้กว้าง ในทางปฏิบัติควรใช้อุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันระบบทางเดินหายใจที่เหมาะสม และอุปกรณ์ป้องกันผิวหนังที่มีประสิทธิภาพ การทำความสะอาดไม่ควรก่อให้เกิดการฟุ้งกระจายในอากาศ
วัสดุนาโนที่ไม่ละลาย/ละลายได้	ควรใช้อุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันในระบบทางเดินหายใจและอุปกรณ์ป้องกันผิวหนังที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ การทำความสะอาดไม่ควรก่อให้เกิดการฟุ้งกระจายในอากาศ

11. การเฝ้าระวังด้านสุขภาพ

เกณฑ์การตรวจสุขภาพพิจารณาเบื้องต้นได้จาก ความน่าจะเป็นของโรค หรือการเจ็บป่วยที่เกิดจากการรับสัมผัสสารที่จำเพาะระหว่างการทำงาน โดยสามารถตรวจวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคซึ่งได้รับการยอมรับทางการแพทย์ อย่างไรก็ตาม ยังไม่พบว่ามีการตรวจวัดผลกระทบต่อสุขภาพที่จำเพาะต่อการรับสัมผัสกับวัสดุนาโนในปัจจุบัน ทำให้การเฝ้าระวังด้านสุขภาพที่จำเพาะกับวัสดุนาโนยังไม่สามารถทำได้อย่างเหมาะสม ณ เวลาปัจจุบัน แนวทางที่ทำได้ดีที่สุดคือการเก็บรวมรวมข้อมูลเท่าที่สามารถทำได้เกี่ยวกับวัสดุที่ใช้และระยะเวลาการใช้ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวมีประโยชน์ในการจัดทำรายละเอียดของโอกาสการรับสัมผัสซึ่งมีความสำคัญหากมีผลกระทบใดๆ ต่อสุขภาพที่เกิดขึ้นภายหลัง

12. วิธีการตรวจวัดสำหรับประเมินการควบคุม

12.1 สิ่งจำเป็นสำหรับการตรวจวัด

การสุ่มตัวอย่าง และการวัดอนุภาคเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการทำความเข้าใจการรับสัมผัส และความเสี่ยงในสถานที่ทำงาน การตรวจวัดอนุภาคสามารถใช้สนับสนุนกิจกรรมต่าง ๆ ดังนี้

(1) การระบุแหล่งที่มีการปล่อยวัสดุนาโน

(2) การประเมินประสิทธิภาพของมาตรการควบคุมที่มีการใช้งานอยู่

(3) การทำให้เกิดความมั่นใจว่าปริมาณอนุภาคสอดคล้องตาม WEL หรือเกณฑ์มาตรฐานการรับสัมผัสที่กำหนดขึ้นเอง

(4) การระบุหาข้อบกพร่อง และการด้อยประสิทธิภาพของมาตรการควบคุม ซึ่งสามารถส่งผลร้ายแรงต่อสุขภาพ

วิธีและกิจกรรมต่าง ๆ เหล่านี้ต้องใช้เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบที่มีความเฉพาะเจาะจงแตกต่างกัน เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบต่าง ๆ ที่มีอยู่ตามรายละเอียดในข้อ 12.2 และแนวทางการใช้งานตามข้อ 12.3

12.2 การเลือกใช้เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบ

รายละเอียดของเครื่องมือและวิธีการวัดจำนวน มวล และพื้นที่ผิวโดยตรง แสดงไว้ในตารางที่ 2 ส่วนการวัดทางอ้อมที่อาศัยข้อมูลของขนาดร่วมกับสมมุติฐานเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าเหล่านี้ แสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบสำหรับวัดความเข้มข้นโดยจำนวน มวล และพื้นที่ผิวโดยตรง

(ข้อ 12.2 และ 12.3.1)

หน่วยวัด	เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบ	หมายเหตุ
ความเข้มข้นโดยจำนวน (ได้จากการวัด)	CPC	ใช้วัดจำนวนอนุภาคแบบเรียลไทม์ ภายใต้ระดับเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคที่เครื่องทำได้ การวัดอาศัยหลักการควบแน่นของไอบนตัวอย่างอนุภาค และติดตาม/นับจำนวนหยดน้ำที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปใช้ช่องคัดขนาด 1 000 nm และสามารถติดตามอนุภาคที่มีขนาดเล็กได้ถึง 10 nm
	DMPS	ใช้วัดความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคตามขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลางขณะเคลื่อนที่) แบบเรียลไทม์ โดยให้ค่าความเข้มข้นและการกระจายตัวของอนุภาคขนาดต่าง ๆ
	SEM และ TEM	ใช้วัดความเข้มข้นเชิงจำนวนตามขนาดอนุภาคที่อยู่ในรูปละอองในอากาศ
ความเข้มข้นโดยมวล (ได้จากการวัด)	เครื่องไซส์ซีเล็คทีฟสแตติกแซมเปลอร์ (Size selective static sampler)	ใช้วัดมวลอนุภาคโดยสุ่มตัวอย่างตามขนาดที่มีค่าไม่เกิน 100 nm และวิเคราะห์ตัวอย่างการชั่งน้ำหนัก หรือการวิเคราะห์ทางเคมี แม้ว่าไม่มีอุปกรณ์เครื่องมือนี้จำหน่ายทางการค้า แต่สามารถใช้เครื่องแคสเคดอิมแพ็คเตอร์ (Berner-type low pressure impactors หรือ microorifice impactors) ในช่วง 100 nm วิเคราะห์ได้
	TEOM	ใช้วัดความเข้มข้นเชิงมวลของอนุภาคนาโนละอองลอย แบบเชื่อมต่อกับระบบ (on-line) เป็นการวัดแบบเรียลไทม์ความไวสูง สามารถใช้ร่วมกับช่องคัดขนาด (size-selective inlet)
ความเข้มข้นโดยพื้นที่ผิว (ได้จากการวัด)	เครื่องแพร่ประจุ (diffusion charger)	ใช้วัดพื้นที่ผิวแบบไวงานของละอองลอยแบบเรียลไทม์ ในกรณีที่พื้นที่ผิวสูงกว่า 100 nm อาจไม่สามารถวัดผลได้โดยตรง เครื่องแพร่ประจุบางรุ่นไม่สามารถวัดพื้นที่ผิวที่ต่ำกว่า 100 nm ได้ เครื่องแพร่ประจุ จึงใช้ได้กับอนุภาคนาโนที่ผ่านช่องคัดขนาดมาแล้วเท่านั้น
	ELPI	ใช้วัดความเข้มข้นเชิงพื้นผิวแบบเรียลไทม์ตามขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลางแอโรไดนามิก) ในกรณีที่พื้นที่ผิวสูงกว่า 100 nm อาจไม่สามารถวัดผลได้โดยตรง
	SEM และ TEM	สามารถให้ข้อมูลพื้นที่ผิวของอนุภาคได้ และเป็นการวิเคราะห์แบบไม่เชื่อมต่อกับระบบ (off-line) การวิเคราะห์โดย TEM สามารถให้ข้อมูลโดยตรงของอนุภาคในบริเวณพื้นที่ที่วิเคราะห์ซึ่งเกี่ยวข้องกับพื้นที่ที่มีรูปทรงต่างกัน

ตารางที่ 3 เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบสำหรับวัดความเข้มข้นโดยจำนวน มวล และพื้นที่ผิวทางอ้อม

(ข้อ 12.2 และ 12.3.1)

หน่วยวัด	เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบ	หมายเหตุ
ความเข้มข้นโดยจำนวน (จากการคำนวณ)	ELPI	ใช้วัดขนาดจำเพาะแบบเรียลไทม์ (เส้นผ่านศูนย์กลางแอโรไดนามิก) ความเข้มข้นของพื้นที่ผิวแบบไวงาน และสามารถบอกการกระจายตัวของขนาดละอองลอยได้ ข้อมูลเกิดจากการประมวลผลปริมาณความเข้มข้น ตัวอย่างขนาดอนุภาคสามารถวิเคราะห์ได้โดยไม่ต้องเชื่อมต่อกับระบบ (off-line)
ความเข้มข้นโดยมวล (จากการคำนวณ)	ELPI	ใช้วัดขนาดจำเพาะแบบเรียลไทม์ (เส้นผ่านศูนย์กลางแอโรไดนามิก) ความเข้มข้นของพื้นที่ผิวแบบที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา และสามารถบอกการกระจายตัวของขนาดละอองลอยได้ ความเข้มขนมวลละอองลอยสามารถคำนวณได้หากทราบประจุอนุภาค และ ความหนาแน่นของตัวอย่าง ขนาดอนุภาคสามารถวิเคราะห์ได้โดยไม่ต้องเชื่อมต่อกับระบบ (off-line)
	DMPS	ใช้วัดขนาดอนุภาคแบบเรียลไทม์ (เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่เคลื่อนที่) โดยแสดงผลการกระจายตัวของขนาดละอองลอย ความเข้มข้นของมวลละอองลอยสามารถคำนวณได้จากรูปร่าง และความหนาแน่นของอนุภาค
ความเข้มข้นโดยพื้นที่ผิว (จากการคำนวณ)	DMPS	ใช้วัดขนาดอนุภาคแบบเรียลไทม์ (เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่เคลื่อนที่) โดยแสดงผลการกระจายตัวของขนาดละอองลอย ความเข้มข้นของมวลละอองลอยสามารถคำนวณได้จากรูปร่าง และความหนาแน่นของอนุภาค
	DMPS ใช้ร่วมกับ ELPI	ใช้วัดความแตกต่างระหว่างการวัดอนุภาคชนิดแอโรไดนามิกและแบบเคลื่อนที่ สามารถใช้เป็นหลักในการคำนวณค่าต่างเชิงมิติ ซึ่งทำให้สามารถคำนวณพื้นที่ผิวได้

12.3 กลยุทธ์ในการสุ่มตัวอย่าง

12.3.1 ปัจจุบันยังไม่มีวิธีสุ่มตัวอย่างใดเพียงวิธีเดียวที่สามารถนำมาใช้แสดงการรับสัมผัสอนุภาคละอองลอยนาโนในอากาศได้ ดังนั้น การวัดการรับสัมผัสในสถานที่ปฏิบัติงานต้องใช้การสุ่มตัวอย่างหลายเทคนิคที่ระบุไว้ในตารางที่ 2 และ 3 ร่วมกัน ทั้งนี้อาจวัดจากลักษณะเฉพาะที่สัมพันธ์กับการรับสัมผัสวัสดุนาโนและใช้กลยุทธ์การสุ่มตัวอย่างที่สอดคล้องกับลักษณะเฉพาะนั้น ๆ เพื่อวิเคราะห์ระดับการรับสัมผัสในสถานที่ทำงาน

12.3.2 ในลำดับแรกของการดำเนินการ เกี่ยวข้องกับการระบุแหล่งที่มีการปลดปล่อยวัสดุนาโน โดย CPC เป็นเครื่องมือที่เหมาะสำหรับการดำเนินการดังกล่าว ในการวัดปริมาณอนุภาคนั้น จำเป็นต้องวัดปริมาณอนุภาคในบรรยากาศปกติ หรือสัญญาณรบกวนพื้นหลังก่อนการวัดอนุภาคระหว่างการผลิต หรือแปรรูปที่มีอนุภาคนาโนเป็นส่วนประกอบ หากต้องการตรวจวัดวัสดุนาโนชนิดใดชนิดหนึ่งอย่างจำเพาะ ให้สุ่มตัวอย่างด้วยแผ่นกรองที่เหมาะต่อการนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน การใช้ TEM ในการวิเคราะห์ทำให้สามารถระบุชนิดของอนุภาค และคาดคะเนการกระจายตัวของขนาดอนุภาคได้

12.3.3 เมื่อทราบแหล่งของการปล่อยอนุภาคแล้ว ควรดำเนินการตรวจวัดพื้นที่ผิวของอนุภาคละอองลอยด้วยเครื่องแพร่ประจุแบบพกพา (portable diffusion charger) และการกระจายตัวของขนาดวัสดุนาโนด้วย SMPS หรือ ELPI ในการวิเคราะห์พื้นที่นั้น เครื่องมือวัดพื้นที่แบบพกพาขนาดเล็กสามารถนำมาใช้กับพนักงานหรือเจ้าหน้าที่ระหว่างปฏิบัติงานได้ แม้ว่าอาจทำให้การปฏิบัติงานขาดความคล่องตัวไปบ้าง นอกจากนั้นควรประมวลผลการสูญเสียของอนุภาคละอองลอยในหลอดสุ่มตัวอย่างด้วย และควรพิจารณาสถานที่ติดตั้งเครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบเหล่านี้อย่างรอบคอบ ซึ่งแนวทางปฏิบัติที่ดีที่สุดคือควรวางเครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบใกล้กับบริเวณปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ อย่างไรก็ดีควรคำนึงถึงขนาดของเครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบและตำแหน่งของปลั๊กไฟด้วย

12.3.4 ควรใช้แผ่นกรอง หรือตะแกรงจับอนุภาคในการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน หรือด้วยวิธีทางเคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการตรวจวัดการรับสัมผัสวัสดุนาโนชนิดใดชนิดหนึ่งที่สนใจ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสามารถใช้เพื่อระบุชนิดของอนุภาคและสามารถให้ข้อมูลประเมินการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่สนใจ การใช้เครื่องเพอร์ซันนอลแคสเคดอิมแพ็คเตอร์ (personal cascade impactor) หรือเครื่องเรสไปเรเบิลไซโคลนแซมเปลอร์ (respirable cyclone sampler) ด้วยตัวกรอง แม้ว่าอาจมีข้อจำกัดอยู่บ้าง แต่สามารถช่วยในการคัดกรองอนุภาคขนาดใหญ่ที่ไม่ต้องการออกไปได้ และทำให้การตรวจวิเคราะห์แม่นยำยิ่งขึ้น การวิเคราะห์ด้วยการกรองสำหรับการปนเปื้อนของฝุ่นละอองในอากาศสามารถช่วยในการระบุแหล่งของการแพร่กระจายของอนุภาคเหล่านั้นได้ และควรปฏิบัติตามวิธีตรวจวิเคราะห์ทางเคมีตามมาตรฐานทั่วไป

12.3.5 การใช้วิธีตรวจวิเคราะห์แบบบูรณาการด้วยเทคนิคเหล่านี้ช่วยให้สามารถตรวจหาการรับสัมผัสกับวัสดุนาโนในกลุ่มผู้ปฏิบัติงานได้ ซึ่งนำไปสู่การจำแนกชนิดและวัดปริมาณของวัสดุนาโนต่อไป อย่างไรก็ตามวิธีนี้สามารถใช้ได้เฉพาะบริเวณที่จำเพาะหรือบริเวณสุ่มตัวอย่างเท่านั้น ซึ่งยังมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถยืนยันผลตรวจวิเคราะห์การปนเปื้อนในกลุ่มผู้ปฏิบัติงานได้ทั้งหมด

12.4 ข้อจำกัด

12.4.1 การวัดจำนวนอนุภาคในพื้นที่จำเพาะนั้น บางครั้งอาจให้ข้อมูลที่คลาดเคลื่อนได้ ทั้งนี้เนื่องจากผลของการวัดจำนวนปริมาณอนุภาคที่ได้นั้น โดยมากมักเป็นการประเมินช่วงการกระจายตัวของอนุภาค (จาก

ต่ำสุด ถึง สูงสุด) ของเครื่อง ดังนั้นความเข้าใจในการอ่านค่าผลรายงานจึงเป็นสิ่งสำคัญมาก เช่น ความแม่นยำอาจลดลงหากใช้เครื่องวัดความหนาแน่นอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 nm ถึง 20 nm ดังนั้นการวัดปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคด้วยเครื่องที่มีความสามารถในการวัดขนาดที่แตกต่างกัน จึงให้ผลแตกต่างกันอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากอนุภาคที่วัดนั้นมีค่ากลาง (median) ของเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 10 nm ถึง 20 nm นี้ ทำให้การวัดปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคละอองลอยนาโนต่ำกว่าความเป็นจริงอย่างมีนัยสำคัญ

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

12.4.3 อีกวิธีหนึ่งคือการใช้ค่าความแตกต่างขององค์ประกอบเชิงเคมี เพื่อแยกความแตกต่างระหว่างอนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นในสถานที่ปฏิบัติงาน และละอองลอยนาโนจากสภาพแวดล้อม

13. การรั่ว และฟุ้งกระจายของวัสดุนาโนโดยอุบัติเหตุ

13.1 เนื่องจากวัสดุนาโนสามารถเกิดการรั่วและฟุ้งกระจายโดยไม่ตั้งใจได้ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญที่นายจ้างต้องมีนโยบายที่เป็นเอกสารทางการและวิธีปฏิบัติในการป้องกันอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นได้ในสถานปฏิบัติงาน

13.2 การป้องกันความเสี่ยง และแนวปฏิบัติที่รัดกุมและมีประสิทธิภาพ จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการป้องกันการรั่วและฟุ้งกระจายของวัสดุนาโน วิธีและแนวปฏิบัติที่ใช้ควรสอดคล้องกับระดับของอันตรายและปริมาณของวัสดุนาโนที่รั่วไหล การทำความสะอาดและกำจัดวัสดุนาโน ควรปฏิบัติจนแน่ใจว่ามีวัสดุนาโนที่ฟุ้งกระจายปนเปื้อนอยู่มีปริมาณต่ำที่สุดเท่าที่ทำได้ เจ้าหน้าที่ที่ได้รับมอบหมายให้ดำเนินการดังกล่าว ควรมีประสบการณ์ได้รับการฝึกปฏิบัติ รู้วิธีปฏิบัติกับวัสดุนาโนที่รั่วไหลและฟุ้งกระจาย และควรได้รับข้อมูลที่เพียงพอ ทั้งยังต้องสามารถประเมินได้ว่าพื้นที่ปนเปื้อนฟุ้งกระจายของวัสดุนาโนนั้นสะอาดปลอดภัยแล้วหรือไม่ ควรสวมใส่ชุดป้องกันการปนเปื้อน และ PPE ตลอดเวลา ตลอดจนควรทราบแนวิธีปฏิบัติการจัดการของเสียฝุ่นละอองด้วย

13.3 เมื่อมีเหตุการณ์รั่วและฟุ้งกระจายของวัสดุนาโนเกิดขึ้น เจ้าหน้าที่ในบริเวณนั้นควรแจ้งขอบเขตบริเวณที่อาจเกิดการฟุ้งกระจายให้ทุกคนทราบและปิดพื้นที่บริเวณนั้น พร้อมนำคนที่ไม่เกี่ยวข้องออกจากพื้นที่โดยเร็ว

ควรดำเนินการตามมาตรการต่าง ๆ โดยเร่งด่วนทันทีเพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายของอนุภาค นาโนไปยังบริเวณอื่น เช่น การติดตั้งแผ่นรองซับฝุ่นในบริเวณทางออกของพื้นที่ที่เกิดการรั่วฟุ้งกระจาย เป็นต้น

13.4 ในสถานการณ์ที่เจ้าหน้าที่ในพื้นที่จำเป็นต้องจัดการกับการรั่วไหลของวัสดุนาโน ในเบื้องต้นอาจดำเนินการโดยใช้อุปกรณ์ทำความสะอาดที่เปียกมากวาดบริเวณดังกล่าวด้วยความระมัดระวังเพื่อลดปริมาณการฟุ้งกระจายวัสดุนาโนไปยังบริเวณอื่น และใช้เครื่องดูดฝุ่นที่ติดตั้ง HEPA ที่ผ่านการรับรองแล้ว เก็บฝุ่นละอองที่ยังคงหลงเหลือจากการทำความสะอาดไปแล้วในเบื้องต้น และควรหลีกเลี่ยงการใช้อุปกรณ์ปัดกวาดที่แห้ง อย่างไรก็ดีเมื่อใช้ HEPA ควรตรวจสอบประสิทธิภาพอย่างสม่ำเสมอ และปฏิบัติตามคำแนะนำคู่มือการใช้แผ่นกรองจากผู้ผลิตที่ได้มาตรฐาน และเพื่อเป็นแนวปฏิบัติที่ดีควรบันทึกชนิดของวัสดุนาโนที่เก็บกวาดไว้ และหลีกเลี่ยงการปะปนกันของวัสดุที่เข้ากันไม่ได้ในเครื่องดูดฝุ่น หรือแผ่นกรองเดียวกัน

13.5 นายจ้างควรพิจารณาและทำบันทึกแจ้งให้เจ้าหน้าที่ หรือพนักงานทราบในสถานการณ์ที่ควรอพยพออกจากพื้นที่ที่เกิดการรั่วฟุ้งกระจายปนเปื้อน การพิจารณาถึงความรุนแรงที่เกิดขึ้นจากการรั่วฟุ้งกระจายร่วมกับความสามารถของเจ้าหน้าที่ที่ปฏิบัติงานในพื้นที่ว่าสามารถจัดการได้เองหรือไม่ หรือต้องมีเจ้าหน้าที่จากที่อื่น เช่น พนักงานหน่วยฉุกเฉิน เจ้าหน้าที่ที่มีประสบการณ์เกี่ยวกับการควบคุมมลพิษ และสิ่งแวดล้อมเข้ามาร่วมตรวจสอบด้วย

13.6 ขยะหรือกากที่หลงเหลือจากการทำความสะอาดฝุ่นวัสดุนาโนที่เกิดการรั่วฟุ้งกระจาย (เช่น แผ่นกรองอากาศ อุปกรณ์ทำความสะอาด แผ่นรองซับฝุ่น และวัสดุอื่น ๆ) ควรปฏิบัติเช่นเดียวกับการกำจัดขยะวัสดุนาโน ซึ่งระบุไว้ในข้อ 14.

14. ขั้นตอนการจัดการของเสีย

14.1 การวางแผนการจัดเก็บ และกำจัดวัสดุนาโน

14.1.1 การจัดการของเสียที่ระบุไว้ในข้อนี้ ใช้ได้กับของเสียที่ปนเปื้อนวัสดุนาโน (ทั้งของแข็งและของเหลว) ซึ่งได้แก่

(1) วัสดุนาโนบริสุทธิ์

(2) วัสดุที่ปนเปื้อนวัสดุนาโน เช่น ภาชนะบรรจุ ผ้าหรืออุปกรณ์ทำความสะอาด และชุดปฏิบัติงาน PPE ที่ใช้ครั้งเดียว

(3) สารแขวนลอยที่มีวัสดุนาโนเป็นองค์ประกอบ

(4) ของแข็งที่สามารถแตกหักได้ ซึ่งมีวัสดุนาโนเป็นองค์ประกอบ หรือมีโครงสร้างนาโนที่ยึดติดอยู่กับพื้นผิวและมีโอกาสที่หลุดออกมา หรือกรองออกเมื่อสัมผัสกับอากาศและน้ำ หรือเมื่อได้รับแรงกระแทก

14.1.2 แผนงานสำหรับการจัดเก็บ และการกำจัดวัสดุนาโนหรือกากของเสียที่มีวัสดุนาโนปนเปื้อน ควรได้รับการพัฒนา และพิจารณาถึงความเป็นพิษ และปริมาณความเข้มข้นที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษด้วย วัสดุใดก็ตามที่สัมผัสกับวัสดุนาโนสังเคราะห์ที่ฟุ้งกระจายออกมา (ซึ่งยังไม่ได้รับการกำจัดสิ่งปนเปื้อน) ควรได้รับการพิจารณาเฉกเช่นเดียวกับของเสียที่ปนเปื้อนวัสดุนาโน ซึ่งรวมถึงเสื้อคลุม PPE ที่ใช้แล้วทิ้ง อุปกรณ์ทำความสะอาด กระดาษซับกรอง และวัสดุอุปกรณ์วิจัยที่ใช้แล้วทิ้ง ซึ่งวัสดุที่ปนเปื้อนด้วยวัสดุนาโนไม่ควรกำจัดลงในถังขยะทั่วไป หรือทิ้งลงในท่อน้ำทิ้ง การปนเปื้อนที่พื้นผิวควรได้รับการประเมินและกำจัดทันที อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตหรือขนส่งวัสดุนาโนควรได้รับการกำจัดสิ่งปนเปื้อนหรือทำความสะอาดก่อนทิ้งหรือนำกลับมาใช้ใหม่ ของเสีย (จากน้ำยาทำความสะอาด น้ำทิ้ง ผ้าขี้ริ้ว หรือชุดเสื้อคลุมอุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล) ที่เกิดจากการทำความสะอาดควรได้รับการกำจัดและจัดการเช่นเดียวกับของเสียที่ปนเปื้อนวัสดุนาโน

14.2 การจัดเก็บของเสียวัสดุนาโนก่อนนำไปกำจัด

การเก็บรวบรวมและจัดเก็บของเสียวัสดุนาโนก่อนการกำจัดมีวิธีปฏิบัติ ดังนี้

14.2.1 การจัดเก็บในภาชนะบรรจุของเสีย

ควรจัดเก็บของเสียที่ปนเปื้อนวัสดุนาโนควรจัดเก็บในภาชนะที่เหมาะสม เช่น ในภาชนะที่อยู่ในสภาพดี ปิดสนิท มีขนาดใหญ่เพียงพอเพื่อป้องกันการเล็ดลอดและรั่วซึมได้ ควรติดฉลากที่ภาชนะของเสีย และควรมีรายละเอียดของข้อมูลที่ได้รับการวิเคราะห์และสมบัติของวัสดุให้ชัดเจน

14.2.2 การจัดเก็บในถุงพลาสติก

ควรเก็บรวบรวมกระดาษทิ้ง อุปกรณ์ทำความสะอาด ชุดเสื้อคลุม PPE ตลอดจนวัตถุอื่นที่ได้รับการปนเปื้อนในถุงพลาสติกหรือภาชนะที่ปิดสนิท และจัดเก็บไว้ในตู้ปฏิบัติงานสารเคมีในห้องปฏิบัติการ และเมื่อถุงพลาสติกเต็มควรปิดให้สนิทและใส่ถุงพลาสติกซ้อนอีกชั้นหนึ่งเพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากด้านนอก จากนั้นนำออกจากตู้สารเคมีด้วยความระมัดระวัง และติดฉลากด้านนอกของถุงขยะให้ถูกต้องและชัดเจน

14.3 การกำจัดของเสียวัสดุนาโน

14.3.1 กรณีที่รัดกุมที่สุดคือการพิจารณาของเสียวัสดุนาโนทั้งหมดให้เป็นวัสดุอันตราย เพื่อให้การปฏิบัติกับกากของเสียวัสดุนาโน เป็นไปในแนวทางเดียวกับวัตถุอันตรายอื่นๆ ซึ่งมีการกำจัดเช่นเดียวกับการกำจัดขยะสารเคมี

14.3.2 การกำจัดของเสียวัสดุนาโนโดยประเมินจากชนิดของวัสดุอันตราย ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว โดยวัสดุอันตรายมีรหัสกำกับเป็น HA นอกจากนี้ให้พิจารณาประกอบกับข้อมูลใน SDS

14.3.3 การกำจัดวัสดุนาโนสู่สิ่งแวดล้อมจากกระบวนการผลิต การแปรรูป การเก็บรักษา การขนส่งและการจัดการของเสีย

15. การป้องกันการเกิดเพลิงไหม้และการระเบิด

15.1 วิธีการควบคุมวัสดุนาโนจากการเกิดเพลิงไหม้ การระเบิด และการทำปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพนั้น ยังไม่ได้มีการกำหนดและประเมินอย่างจริงจัง ผลิตภัณฑ์ที่มีอนุภาคนาโนเป็นองค์ประกอบบางชนิดมีความสามารถในการกระจายตัวได้ดีกว่า และมีการกระจายตัวที่คงตัวกว่าผลิตภัณฑ์ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่เป็นองค์ประกอบ กลุ่มอนุภาคผงฝุ่นนาโนที่หนาแน่นอาจสังเกตได้ลำบาก ในขณะที่อนุภาคฝุ่นแขวนลอยชนิดเดียวกัน มีปริมาณความเข้มข้นเท่ากันแต่มีขนาดใหญ่กว่าสามารถสังเกตเห็นได้ง่ายกว่า หลักการที่ใช้กับการบริหารจัดการทั้งผงอนุภาคขนาดเล็ก ฝุ่นหรือวัสดุที่ฟุ้งกระจาย ควรนำมาประยุกต์กับวัสดุนาโนเช่นกัน อย่างไรก็ดี ควรเพิ่มการระมัดระวังเป็นพิเศษในกรณีที่เป็นผงฝุ่นโลหะที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเมื่อสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ มาตรการป้องกันการระเบิดได้ระบุไว้สำหรับการจัดการกับการกระจายของฝุ่น และได้กำหนดปริมาณที่อาจก่อให้เกิดอันตรายสำหรับวัตถุที่มีขนาดใหญ่ด้วยและยังสามารถใช้กับการจัดการวัสดุนาโนที่ง่ายต่อการระเบิด ควรหลีกเลี่ยงและป้องกันการรับสัมผัสของวัสดุนาโนที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาหรือเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยากับสารชนิดอื่นที่ไม่เข้ากัน

15.2 การป้องกันการเกิดเพลิงไหม้สามารถใช้แนวทางตามคู่มือการจัดการความปลอดภัย : โรงงานที่มีฝุ่นระเบิดได้ (สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม 2553)

15.3 ควรให้ความสำคัญกับข้อกำหนดของระบบไฟฟ้า เพื่อป้องกันการเกิดเพลิงไหม้ การเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ทางไฟฟ้าให้เป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรม โดยการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าควรคำนึงถึงการป้องกันฝุ่นจากวัสดุนาโนที่มีความละเอียดและมีความสามารถในการกระจายตัวในอากาศได้ในระยะเวลานาน และควรเพิ่มความระมัดระวังให้มากขึ้น หากวัสดุนาโนนั้นสามารถติดไฟได้

15.3 การเลือกสารดับเพลิงควรพิจารณาถึงความเข้ากันได้หรือเข้ากันไม่ได้ของวัสดุนาโนกับน้ำ ฝุ่นโลหะบางชนิดอาจทำปฏิกิริยากับน้ำ และให้สารหลายชนิดรวมทั้งแก๊สไฮโดรเจนซึ่งติดไฟง่าย สารดับเพลิงประเภทผงเคมีสามารถใช้ในการดับเปลวเพลิงจากผงฝุ่นโลหะได้ อย่างไรก็ตาม วิธีนี้อาจทำให้เกิดการฟุ้งกระจายซึ่งอาจทำให้เปลวเพลิงลุกลามยิ่งขึ้นได้ ดังนั้นวิธีในการลดความเสี่ยงจากการเกิดเพลิงไหม้ และการลุกลามของเปลวเพลิง จึงอาจจำเป็นต้องมีการควบคุมสภาวะบรรยากาศในกระบวนการผลิต และกระบวนการเก็บรักษาโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน หรือแก๊สเฉื่อยชนิดอื่น ซึ่งวิธีนี้เองก็อาจทำให้เกิดอันตรายจากสภาวะการขาดออกซิเจน

15.4 การป้องกันการเกิดระเบิดและเพลิงไหม้ของฝุ่น เครื่องจักรและอุปกรณ์ไฟฟ้าในบริเวณผลิตต้องต่อสายดินเพื่อป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิต และควรสวมรองเท้าป้องกันไฟฟ้าสถิตตลอดเวลาในพื้นที่ปฏิบัติงานที่มีการเก็บรักษาวัสดุนาโน เพื่อป้องกันการก่อตัวของประจุไฟฟ้าสถิตซึ่งอาจก่อให้เกิดการติดไฟได้