สมอ./ศน.พว./CDV

มีนาคม 2557

ห้ามใช้หรือยึดถือร่างนี้เป็นมาตรฐาน

มาตรฐานฉบับสมบูรณ์จะมีประกาศในราชกิจจานุเบกษา

ร่าง

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

ข้อปฏิบัติเกี่ยวกับสุขภาพและความปลอดภัย สำหรับผู้มีอาชีพที่เกี่ยวข้องกับนาโนเทคโนโลยี

NANOTECHNOLOGIES – HEALTH AND SAFETY PRACTICES IN OCCUPATIONAL SETTINGS RELEVANT TO NANOMATERIALS

สำหรับเสนอคณะกรรมการวิชาการพิจารณาร่างมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

กระทรวงอุตสาหกรรม ถนนพระรามที่ 6 กรุงเทพฯ 10400

โทรศัพท์ 0 2202 3439

ฉบับร่างเพื่อการพิจารณาเท่านั้น

คณะผู้จัดทำร่างมาตรฐาน

มาตรฐานข้อปฏิบัติเกี่ยวกับสุขภาพและความปลอดภัยสำหรับผู้มีอาชีพที่เกี่ยวข้องกับนาโนเทคโนโลยี

ที่ปรึกษา

นายชัยณรงค์ เชิดชู	ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ
นายศิรศักดิ์ เทพาคำ	ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ

ประธาน

นางฉลอง เลาจริยกุล	ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ

รองประธาน

นายประสงค์ นรจิตร์	กรมโรงงานอุตสาหกรรม

กรรมการ

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

กรรมการและเลขานุการ

นายณัฐพันธุ์ ศุภกา	ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ

ร่างเพื่อรับฟังความคิดเห็น

การพัฒนาทางด้านนาโนเทคโนโลยีมีการเติบโตอย่างรวดเร็ว และอาจส่งผลกระทบต่อภาคอุตสาหกรรมและสังคมทั่วโลก การมาตรฐานด้านนาโนเทคโนโลยีระดับสากลควรนำมาซึ่งความตระหนักถึงศักยภาพของนาโนเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาเศรษฐกิจที่ดีขึ้นอย่างยั่งยืนทั่วโลก การพัฒนาคุณภาพชีวิต รวมทั้งการสาธารณสุขและสิ่งแวดล้อมที่ดีขึ้น เราสามารถคาดการณ์ได้ว่าอาจมีการนำวัสดุนาโนใหม่หลายชนิดมาใช้ในทางการค้า และในสถานที่ทำงาน อันนำมาซึ่งคำถามที่เกี่ยวข้องกับประเด็นด้านอาชีวอนามัยและความปลอดภัย มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้จึงได้มีการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้เป็นแหล่งความรู้ สำหรับให้แนวทางในการปฏิบัติด้านอาชีวอนามัยและความปลอดภัยด้านนาโนเทคโนโลยี

ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบด้านอาชีวอนามัยและความปลอดภัย เช่น ข้อมูลการรับสัมผัสของมนุษย์ และสภาวะการทำงานนั้นมีอยู่อย่างจำกัด เนื่องจากการพัฒนาด้านนาโนเทคโนโลยียังอยู่ในระยะเริ่มต้น ส่งผลให้ความสามารถในการทำนายผลกระทบด้านสุขภาพของพนักงานที่ได้รับสัมผัสกับวัสดุนาโนมีข้อจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้อจำกัดของเทคโนโลยีปัจจุบันที่สามารถนำมาในการวัดอนุภาคนาโนในสถานที่ทำงาน ความท้าทายที่เกิดขึ้นนั้นเนื่องมาจากสมบัติของวัสดุนาโนซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างมากเช่นเดียวกับโครงสร้างทางเคมีและองค์ประกอบทางเคมีที่ใช้กันมาอย่างยาวนาน การวัดสมบัติเพิ่มเติมเหล่านี้มีความจำเป็นต้องมีความแม่นยำเพื่อนำมาใช้ในการประเมินวัสดุนาโนในสถานที่ทำงาน นอกจากนี้ ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับความสามารถของร่างกายในการจดจำและตอบสนองอย่างเหมาะสมต่อวัสดุนาโนส่วนมากนั้นยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด ยกเว้นกรณีของ คาร์บอนแบล็ก (carbon black) และซิลิกาอสัณฐานสังเคราะห์ (synthetic amorphous silica)

ในปัจจุบันยังขาดข้อมูลทางวิทยาศาสตร์อีกจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับ การบ่งชี้ การแสดงและประเมินแนวโน้มการรับสัมผัสกับวัสดุนาโนในสถานที่ทำงาน การดำเนินการกับความไม่สมบูรณ์ของข้อมูลดังกล่าวอย่างดีที่สุด คือการบูรณาการองค์ความรู้ในหลากหลายสาขาวิชาเข้าด้วยกัน นักวิทยาศาสตร์ แพทย์ผู้เชี่ยวชาญด้านอาชีวอนามัยและด้านพิษวิทยา รวมถึง นักวิทยาศาสตร์การแพทย์ และนักวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มีบทบาทสำคัญด้านการดูแลสุขภาพ ในสภาวะที่มีการการเปลี่ยนแปลงด้านนาโนเทคโนโลยีอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ควรศึกษาค้นคว้าร่วมกันในระดับนานาชาติเป็นสิ่งจำเป็นที่ทำให้ได้ข้อมูลสำคัญที่ต้องการในช่วงเวลาที่หมาะสม

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ จัดทำขึ้นตามความร่วมมือด้านการกำหนดมาตรฐานระหว่างสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกับศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และใช้เอกสารต่อไปนี้เป็นแนวทาง

ISO/TR 12885:2008	Nanotechnologies – health and safety practices in occupational settings relevant to nanotechnologies
ISO7708:1995	Air quality – Particle size fraction definition for health-related sampling
ISO/TR 13121:2011	Nanotechnologies-Nanomaterial risk evaluation

ISO/TS 27687:2008 Nanotechnologies-Terminology and definitions for nano-objects - Nanoparticle, nanofibre and nanoplate

ISO/TS 80004-1:2010 Nanotechnologies-Vocabulary -Part 1: Core terms

EPA620/K-09/011 Nanomaterial Research Strategy

มอก.2198-2547 อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ : ศัพท์บัญญัติ

มอก.2574-2555 การเก็บและวิเคราะห์อนุภาคแขวนลอยในอากาศในสภาวะแวดล้อมการทำงาน

มอก.18001-2554 ระบบการจัดการอาชีวอนามัยและความปลอดภัย : ข้อกำหนด

Guidance for handling and use of nanomaterials at the workplace, Occupational Safety and Health and German, Association of the Chemical Industry และ German Association of the Chemical Industry

U.S. EPA, Nanotechnology white paper, 2007. Available at http://www.epa.gov/OSA/nanotech.htm (Accessed on Jan, 2014)

ฉบับร่างเพื่อรอมความคิดเห็น

สารบัญ

	หน้า
1. ขอบข่าย	1
2. บทนิยาม	1
3. อักษรย่อ	3
4. วัสดุนาโน และกระบวนการผลิต	6
5. อันตรายจากวัสดุนาโน	7
6. การประเมินการรับสัมผัสกับวัสดุนาโน	9
7. การประเมินความเสี่ยงด้านอาชีวอนามัย	14
8. แนวทางการจัดการ	21
ภาคผนวก ก. แนวทางการจัดจำแนกวัสดุนาโนจากการผลิต	50
ภาคผนวก ข. กระบวนการผลิตวัสดุนาโน	56
ภาคผนวก ค. อันตรายของวัสดุนาโนต่อสุขภาพ (รายละเอียดเพิ่มเติม)	58
ภาคผนวก ง. วิธีการวัดการรับสัมผัสวัสดุนาโนผ่านทางการหายใจ	68
ภาคผนวก จ. การวัดการรับสัมผัสวัสดุนาโนผ่านทางผิวหนัง	84

ฉบับร่างเพื่อระดมความคิดเห็น

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
ข้อปฏิบัติเกี่ยวกับสุขภาพและความปลอดภัย
สำหรับผู้มีอาชีพที่เกี่ยวข้องกับนาโนเทคโนโลยี

1. ขอบข่าย

1.1. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ให้แนวทางการปฏิบัติด้านอาชีวอนามัยและความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องกับนาโนเทคโนโลยี โดยมุ่งเน้นไปยังอาชีวอนามัยการผลิตและการใช้งานวัสดุนาโน

1.2. ผู้ใช้งานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ ได้แก่ บริษัท นักวิจัย ผู้ปฏิบัติงาน และกลุ่มคนอื่น ๆ ที่ต้องการป้องกันผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพและความปลอดภัยที่เกิดระหว่างการผลิต การจัดการ การใช้งาน และการกำจัดวัสดุนาโน ครอบคลุมวัสดุนาโนและการใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ

1.3. ข้อมูล และคำศัพท์ที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ จัดทำขึ้นโดยอาศัยข้อมูลที่มีอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งอาจจำเป็นต้องมีการปรับปรุงให้ทันสมัยเมื่อมีข้อมูลมาตรฐานด้านความปลอดภัยใหม่เกิดขึ้น

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 nanotubes)*

2.3 แท่งนาโน (nanorod) หมายถึง เส้นใยนาโนที่เป็นของแข็ง

2.4 นาโนเทคโนโลยี (nanotechnology) หมายถึง การประยุกต์ใช้ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ในการจัดการและควบคุมสสารในระดับนาโนสเกล เพื่อใช้ประโยชน์จากสมบัติหรือปรากฏการณ์ที่ขึ้นกับขนาดหรือโครงสร้างของสสาร โดยสมบัติหรือปรากฏการณ์ดังกล่าวแตกต่างจากที่พบในอะตอม หรือโมเลกุล หรือวัสดุขนาดใหญ่

หมายเหตุ *การจัดการและควบคุมนั้นรวมถึงการสังเคราะห์วัสดุด้วย*

2.5 นาโนสเกล (nanoscale) หมายถึง ขนาดในช่วง 1 nm ถึง 100 nmโดยประมาณ

หมายเหตุ 1 *ในกรณีที่วัสดุสามารถแสดงสมบัติใหม่ (ที่ไม่สามารถอาศัยการคาดการณ์ หรือเทียบบัญญัติไตรยางค์จากวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่าได้) ในช่วงนาโนสเกลนี้ สามารถอนุโลมให้คำจำกัด ความของนาโนสเกลเป็น"ค่าโดยประมาณ" ระหว่าง 1* nm *ถึง100* nm *ได้*

หมายเหตุ 2 *การกำหนดให้ขอบเขตล่างของนาโนสเกลมีค่าเท่ากับ 1* nm *มีวัตถุประสงค์เพื่อหลีกเลี่ยงการกำหนดอะตอมหรือกลุ่มอะตอม ว่าเป็น "วัตถุนาโน" หรือธาตุองค์ประกอบของโครงสร้างนาโน*

2.6 แผ่นนาโน (nanoplate) หมายถึง วัตถุนาโนที่มีมิติภายนอกจำนวน 1 มิติอยู่ในระดับนาโนสเกล ส่วนมิติภายนอกที่ 2 และ 3 มีขนาดใหญ่กว่าอย่างมีนัยสำคัญ

หมายเหตุ 1 *มิติภายนอกที่เล็กที่สุด คือ ความหนาของแผ่นนาโน*

หมายเหตุ 2 *มิติภายนอก 2 มิติต้องมีขนาดใหญ่กว่ามิติที่เล็กที่สุดมากกว่า 3 เท่า*

หมายเหตุ 3 *มิติภายนอกที่มีขนาดใหญ่กว่าไม่จำเป็นต้องอยู่ในระดับนาโน*

2.7 ฟูเลอรีนส์ (fullerenes) หมายถึง โมเลกุลที่ประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอนทั้งหมดซึ่งสร้างเป็นรูปแบบของระบบของพอลิไซคลิก (polycyclic) ที่มีการล้อมวงแหวนคล้ายกรงปิดประกอบด้วยวงแหวนห้าเหลี่ยม 12 วง และที่เหลือเป็นวงแหวนหกเหลี่ยม

หมายเหตุ 1 *ดัดแปลงมาจากคำนิยามในระบบการเรียกชื่อคำศัพท์สารเคมีของ IUPAC (IUPAC Compendium of chemical terminology)*

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

2.8 เฟสนาโน (nanophase) หมายถึง บริเวณที่มีสมบัติทางฟิสิกส์หรือทางเคมีที่ชัดเจน หรือบริเวณที่มีสมบัติทางฟิสิกส์เหมือนกันอยู่รวมกันในเนื้อวัสดุ โดยบริเวณดังกล่าวมีมิติภายนอกอย่างน้อย 1 มิติอยู่ในระดับนาโนสเกล

หมายเหตุ *วัตถุนาโนที่ฝังตัวอยู่ในเฟสอื่นของวัสดุทำให้เกิดเป็นเฟสนาโน*

2.9 ลวดนาโน (nanowire) หมายถึง เส้นใยนาโนที่มีสมบัติเป็นตัวนำหรือกึ่งตัวนำไฟฟ้า

2.10 วัตถุนาโน (nano-object) หมายถึง วัสดุที่มีมิติภายนอกหนึ่ง สอง หรือสามมิติ อยู่ในระดับนาโนสเกล

2.11 วัสดุโครงสร้างนาโน (nanostructured material) หมายถึง วัสดุที่มีโครงสร้างภายในอยู่ในระดับนาโนสเกล หรือมีโครงสร้างพื้นผิวอยู่ในระดับนาโนสเกล

หมายเหตุ *หากวัสดุมีมิติภายนอกมิติใดมิติหนึ่งอยู่ในระดับนาโนสเกล แนะนำให้ใช้คำว่า "วัตถุนาโน"*

2.12 วัสดุเชิงประกอบนาโน หรือนาโนคอมโพสิต (nanocomposite) หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยเฟสที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 เฟสขึ้นไปโดยมีอย่างน้อย 1 เฟส เป็นเฟสนาโน

หมายเหตุ 1 *ไม่รวมถึงเฟสนาโนที่อยู่ในสถานะแก๊ส*

หมายเหตุ 2 *วัสดุที่มีเฟสในระดับนาโนสเกลที่เกิดขึ้นโดยการตกกะกอนเพียงอย่างเดียวไม่จัดว่าเป็นวัสดุเชิงประกอบนาโน*

2.13 วัสดุนาโน (nanomaterial) หมายถึง วัสดุที่มีมิติภายนอกอยู่ในระดับนาโนสเกล หรือวัสดุที่มีโครงสร้างภายใน หรือมีโครงสร้างพื้นผิวอยู่ในระดับนาโนสเกล

2.14 วัสดุนาโนจากการผลิต (manufactured nanomaterial) หมายถึง วัสดุนาโนที่ผลิตขึ้นสำหรับใช้วัตถุประสงค์ทางการค้าเพื่อให้มีสมบัติหรือองค์ประกอบที่จำเพาะ

2.15 เส้นใยนาโน (nanofibre) หมายถึง วัตถุนาโนที่มีมิติภายนอกอยู่ในระดับนาโนสเกลจำนวน 2 มิติ ส่วนมิติภายนอกที่ 3 มีขนาดใหญ่กว่าอย่างมีนัยสำคัญ

หมายเหตุ 1 *เส้นใยนาโนสามารถมีความยืดหยุ่นหรือไม่ยืดหยุ่น*

หมายเหตุ 2 *มิติภายนอกที่อยู่ในระดับนาโนสเกลทั้ง 2 มิติมีขนาดแตกต่างกันไม่เกิน 3 เท่า และมิติภายนอกที่ 3 ใหญ่กว่าทั้ง 2 มิติมากกว่า 3 เท่า*

หมายเหตุ 3 *มิติภายนอกที่ 3 ไม่จำเป็นต้องอยู่ในระดับนาโนสเกล*

2.16 อนุภาคเกาะก้อนแบบแน่น (aggregate) หมายถึง อนุภาคเดี่ยวที่ยึดติดกันด้วยพันธะที่แข็งแรง หรืออนุภาคหลายอนุภาคที่หลอมรวมกัน และส่งผลให้พื้นที่ผิวภายนอกลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับผลรวมพื้นที่ผิวของแต่ละอนุภาคทั้งหมดรวมกัน

หมายเหตุ 1 *แรงยึดเหนี่ยวที่เชื่อมยึดอนุภาคเกาะก้อนแบบแน่นเข้าด้วยกันเป็นแรงที่แข็งแรง เช่น พันธะโคเวเลนท์ หรือผลจากการเผาเพื่อผนึก หรือการพัวพันทางกายภาพของอนุภาคอย่างซับซ้อน*

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

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

หมายเหตุ 1 *แรงยึดเหนี่ยวที่เชื่อมยึดอนุภาคเกาะก้อนแบบหลวมเข้าด้วยกันเป็นแรงแบบอ่อน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ หรือการพัวพันทางกายภาพของอนุภาคอย่างง่าย*

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

2.18 อนุภาคนาโน (nanoparticle) หมายถึง วัตถุนาโนที่มีมิติภายนอกอยู่ในระดับนาโนสเกลทั้ง 3 มิติ

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

3. อักษรย่อ

3.1 กรดดีออกซีไรโบนิวคลีอิก (deoxyribonucleic acid; DNA)

3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM)

3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด-ส่องผ่าน (scanning transmission electron microscopy; STEM)

3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope; TEM)

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

3.6 การระบายอากาศเฉพาะพื้นที่ (local exhaust ventilation; LEV)

3.7 ขนาดของอนุภาคที่มีความสามารถทะลุทะลวงได้มากที่สุด (most penetrating particle size; MPPS)

3.8 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเรขาคณิต (geometric standard deviation; GSD)

3.9 ค่าระดับการป้องกัน (assigned protection factor; APF)

3.10 เครื่องบลูเนอรเอลเม็ท เทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller; BET)

3.11 เครื่องแยกอนุภาคที่เคลื่อนที่ด้วยไฟฟ้า (differential electrical mobility sizer; DEMS)

3.12 เครื่องวัดการกระจายขนาดอนุภาค (electrical low pressure impactor; ELPI™)

3.13 เครื่องวัดการกระจายขนาดอนุภาคชนิดความดันต่ำ (low pressure impactor; LPI)

3.14 เครื่องวัดความเข้มข้นโดยจำนวนอนุภาค (condensation particle counter; CPC)

3.15 เครื่องวัดมวลระดับไมโครแบบเทเปอร์อีเลเมนต์ออสซิลเลติง (tapered element oscillating microbalance; TEOM)

3.16 เครื่องวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางไฟฟ้า (differential mobility analysing system; DMAS)

3.17 เครื่องอัดประจุด้วยวิธีการแพร่ (diffusion charger; DC)

3.18 ดัชนีชี้วัดการรับสัมผัสทางชีวภาพ (biological exposure index; BEI)

3.19 ตู้ชีวนิรภัย หรือตู้ปลอดเชื้อ (biological safety cabinet; BSC)

3.20 ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube; CNT)

3.21 ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดี่ยว (single-wall carbon nanotube; SWCNT)

3.22 ปริมาณของสารเคมีที่ทำให้เกิดการตอบสนอง (response) ที่ 5% หรือ 10% โดยการคำนวณจากสัตว์ทดลองที่เหมาะสม (benchmark dose; BMD)

3.23 ปริมาณของสารเคมีที่มากที่สุดซึ่งได้รับทุกวันแล้วไม่ทำให้เกิดความเป็นพิษหรือผลเสียใด ๆ ต่อร่างกาย (no-observed-adverse-effect level; NOAEL)

3.24 แผ่นกรองที่มีประสิทธิภาพสูง (แผ่นกรองเฮปา) (high efficiency particulate air filter; HEPA)

3.25 พอลิเตตระฟลูออโรเอธิลีน หรือแทฟล่อน (Teflon) (polyetrafluoroethylene; PTFE)

3.26 มาตรฐานการปฏิบัติงาน (standard operating procedures; SOP)

3.27 ระบบให้ความร้อน ระบบระบายอากาศ และระบบปรับอากาศ (heating, ventilation and air conditioning; HVAC)

3.28 โรคภูมิคุ้มกันบกพร่อง หรือโรคเอดส์ (acquired immune deficiency syndrome; AIDS)

3.29 วัตถุนาโน และกลุ่มของวัตถุนาโนที่เกาะเป็นก้อนแบบแน่น/แบบหลวม (nano-objects and their aggregates and agglomerates; NOAA)

3.30 สถาบันอาชีวอนามัยและความปลอดภัยแห่งชาติสหรัฐอเมริกา (US. National Institute for Occupational Safety and Health; US. NIOSH)

3.31 สเปกโตรสโคปีการสูญเสียพลังงานอิเล็กตรอน (electron energy loss spectroscopy; EELS)

3.32 สภาสากลว่าด้วยนาโนเทคโนโลยี (International Council on Nanotechnology; ICON)

3.33 สมาคมนักสุขศาสตร์อุตสาหกรรมภาครัฐบาลแห่งสหรัฐอเมริกา (American Conference of Governmental Industrial Hygienists; ACGIH)

3.34 สำนักงานบริหารความปลอดภัย และอาชีวอนามัยแห่งสหรัฐอเมริกา (U.S. Occupational Safety and Health Administration; U.S. OSHA)

3.35 สำนักงานมาตรฐานแห่งประเทศ (German Institute for Standardization (Deutsches Institut für Normung; DIN)

3.36 สิ่งแวดล้อม สุขภาพ และความปลอดภัย (environment, health and safety; EHS)

3.37 เส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์ค่ามัธยฐาน (mass median aerodynamic diameter; MMAD)

3.38 เส้นใยนาโนคาร์บอน (carbon nanofibre; CNF)

3.39 หน่วยงานทางด้านพลังงานแห่งสหรัฐอเมริกา (U.S. Department of Energy; U.S. DOE)

3.40 หน่วยบัญชาการการวิจัย พัฒนา และวิศวกรรม (research, development and engineering command; RDECOM)

3.41 ห้องปฏิบัติการสุขภาพและความปลอดภัยแห่งสหราชอาณาจักร (UK Health and Safety Laboratory; UK HSL)

3.42 องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (U.S. Environmental Protection Agency; U.S. EPA)

3.43 องค์การเพื่อความร่วมมือทางเศรษฐกิจและการพัฒนา (Organization for Economic Cooperation and Development; OECD)

3.44 องค์การมาตรฐานสากล หรือองค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (International Organization for Standardization; ISO)

3.45 องค์การอนามัยโลก (World Health Organization; WHO)

3.46 อันตรายที่มีผลต่อชีวิตและสุขภาพร่างกายอย่างทันทีทันใด (immediately dangerous to life or health; IDLH)

3.47 อินดักทีพลี คัพเพิล พลาสมา แมสสเปกโตรเมทรี (inductively coupled plasma mass spectrometry; ICP-MS)

3.48 อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล (personal protective equipment; PPE)

3.49 อุปกรณ์ปกป้องการรับสัมผัสทางผิวหนัง (skin protective equipment; SPE)

3.50 อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจประเภททำให้อากาศสะอาดชนิดใช้แบตเตอรี่ (powered air-purifying respirator; PAPR)

3.51 อุปกรณ์ปกป้องระบบทางเดินหายใจ (respiratory protection equipment; RPE)

3.52 อุปกรณ์ปกป้องระบบทางเดินหายใจชนิดถังบรรจุอากาศแบบพกพา (self-contained breathing apparatus; SCBA)

3.53 อุปกรณ์ปกป้องระบบทางเดินหายใจประเภทจัดส่งอากาศสำหรับการหายใจ (supplied-air respirator; SAR)

3.54 อุปกรณ์ปกป้องระบบทางเดินหายใจประเภททำให้อากาศสะอาด (air-purifying resprirator; APR)

3.55 เอกสารข้อมูลความปลอดภัย (safety data sheet; SDS)

3.56 เอกสารความปลอดภัยทางเคมีที่จัดทำขึ้นโดยองค์การอนามัยโลก (International Chemical Safety Cards; ICSC)

4. วัสดุนาโน และกระบวนการผลิต

4.1 วัสดุนาโน

วัสดุนาโน หมายถึง วัสดุที่มีมิติภายนอก หรือโครงสร้างภายใน หรือโครงสร้างที่พื้นผิวอยู่ในระดับนาโนสเกล (ช่วง 1 nm ถึง 100 nmโดยประมาณ) ทั้งนี้ วัสดุนาโนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ตามแหล่งกำเนิด คือ วัสดุนาโนจากธรรมชาติ และวัสดุนาโนจากการผลิต วัสดุนาโนจากธรรมชาติ เป็นวัสดุนาโนที่เกิดจากกระบวนการทางธรรมชาติ กระบวนการให้ความร้อน และการดำเนินการอื่น ๆ ซึ่งก่อให้เกิดวัสดุนาโนอย่างไม่ตั้งใจ ส่วนวัสดุนาโนจากการผลิต เป็นวัสดุนาโนที่ผลิตขึ้นสำหรับใช้ในวัตถุประสงค์ทางการค้าเพื่อให้มีสมบัติหรือองค์ประกอบที่จำเพาะ โดยสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยตามโครงสร้างได้ 2 กลุ่ม คือ วัตถุนาโน และวัสดุที่มีโครงสร้างนาโน

- วัตถุนาโน (nano-object) หมายถึงวัสดุที่มีมิติภายนอก 1 มิติ (แผ่นนาโน) 2 มิติ (แท่งนาโน) หรือ 3 มิติ (อนุภาคนาโน) ในระดับนาโนสเกล
- วัสดุโครงสร้างนาโน (nanostructured material) หมายถึง วัสดุที่มีโครงสร้างภายในอยู่ในระดับนาโนสเกล หรือมีโครงสร้างพื้นผิวอยู่ในระดับนาโนสเกล เช่น นาโนคอมโพสิต (nanocomposites) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีวัตถุนาโนฝังตัวอยู่ภายในเมทริกซ์ที่เป็นของแข็ง หรือเป็นวัตถุนาโนที่ยึดเกาะกันด้วยการจัดเรียงตัวแบบสุ่มง่าย ๆ ในรูปแบบของอนุภาคเกาะก้อนแบบแน่น และอนุภาคเกาะก้อนแบบหลวม หรือจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบในรูปแบบของผลึก เช่น กลุ่มผลึกของฟูเลอรีนส์ หรือ กลุ่มของCNT

นอกจากนี้ยังสามารถจัดจำแนกวัสดุนาโนออกเป็นกลุ่มได้จากการพิจารณาจำนวนมิติและองค์ประกอบพื้นฐานทางเคมี ตามภาคผนวก ก. แนวทางการจัดจำแนกวัสดุนาโนจากการผลิต อย่างไรก็ตาม การจัดจำแนกวัสดุนาโนออกเป็นกลุ่มนั้นยังคงมีข้อจำกัด เนื่องจากมีวัสดุนาโนหลายชนิดที่ไม่สามารถจัดเข้ากลุ่มได้ หรืออาจมีสมบัติที่สอดคล้องกับหลายกลุ่มของการจัดจำแนก เช่น วัสดุนาโนในรูปแบบง่าย แต่มีการเคลือบผิวและมีโครงสร้างทางฟิสิกส์-เคมีที่ซับซ้อน ดังนั้นการจัดจำแนกวัสดุนาโนในภาคผนวก ก. จึงมีไว้เพื่อใช้เป็นกรอบทั่วไปในการจัดจำแนกสำหรับองค์กรเท่านั้น

4.2 กระบวนการผลิตวัสดุนาโน

วัสดุนาโนนั้นมีความหลากหลาย และสามารถผลิตได้โดยใช้วิธีการที่แตกต่างกัน วิธีการทั่วไปที่ใช้ในการผลิตวัสดุนาโน ได้แก่ การผลิตละอองลอย (aerosol) การสะสมด้วยไอ (vapour deposition) การสังเคราะห์

ในวัฏภาคของเหลว (liquid phase methods) การเกิดพอลิเมอร์ด้วยไฟฟ้าและการสะสมสารด้วยไฟฟ้า (electropolymerization และ electrodeposition) การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า (electro-spinning) และกระบวนการทางกล (mechanical processes) ซึ่งรายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ข. กระบวนการผลิตวัสดุนาโน

5. อันตรายจากวัสดุนาโน

5.1 อันตรายของวัสดุนาโนต่อสุขภาพ

โดยทั่วไป แนวโน้มของความเสี่ยงต่อสุขภาพของสาร มีความเกี่ยวข้องกับปริมาณและระยะเวลาของการรับสัมผัสสารนั้น การคงอยู่ของสารในร่างกาย ความเป็นพิษของสาร และความไวต่อการรับสัมผัสหรือสภาวะร่างกายของบุคคลที่รับสัมผัส สำหรับผลกระทบต่อสุขภาพของวัสดุนาโนนั้นยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด เนื่องจากนาโนเทคโนโลยีเป็นสาขาความรู้ที่ใหม่ ทำให้เกิดข้อจำกัดในแง่ของความรู้ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่จำเป็นสำหรับการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ เช่น ช่องทางการรับสัมผัส การเคลื่อนที่ของวัสดุนาโนเมื่อเข้าสู่ร่างกาย และปฏิกิริยาของสารกับระบบชีววิทยาของร่างกาย เป็นต้น

ผลของการศึกษาการรับสัมผัสและตอบสนองต่ออนุภาคในระดับนาโนสเกล หรืออนุภาคที่หายใจเข้าไปได้ รวมถึงข้อมูลพิษวิทยาที่มีอยู่เกี่ยวกับสารขนาดใหญ่ในหลอดทดลอง ในสัตว์ทดลอง และในมนุษย์นั้น เป็นการประเมินผลกระทบเบื้องต้นที่อาจเกิดขึ้นต่อสุขภาพจากการรับสัมผัสกับวัสดุที่มีลักษณะเหมือนกันในระดับนาโนสเกล อย่างไรก็ตามสิ่งที่ควรระลึกไว้เสมอ คือ ความไม่แน่นอนและความแปรปรวนอย่างมีนัยสำคัญในการคาดการณ์ผลกระทบที่อาจเกิดกับมนุษย์จากผลการศึกษาในสัตว์ทดลองมักเกิดขึ้นได้เสมอ ดูรายละเอียดเพิ่มเติมในภาคผนวก ค. อันตรายของวัสดุนาโนต่อสุขภาพ (รายละเอียดเพิ่มเติม) ในปัจจุบันวิธีการทดสอบโดยเลี้ยงเซลล์ในหลอดทดลองนั้นนิยมใช้กันมากเพื่ออธิบายกลไกความเป็นพิษ โดยทั่วไปแล้วข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในหลอดทดลองนั้นไม่สามารถใช้ประเมินกับมนุษย์โดยไม่มีข้อมูลเพิ่มเติม เช่น ข้อมูลจากการทดสอบในสัตว์ทดลอง เป็นต้น การศึกษาในสัตว์ทดลองได้แสดงให้เห็นการตอบสนองทางชีววิทยา (ไม่ว่าด้านบวกหรือด้านลบ) ต่ออนุภาคนาโนนั้นมีมากกว่าการตอบสนองต่ออนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าที่มีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกันและมวลเท่ากัน นอกเหนือจากจำนวนอนุภาคและพื้นที่ผิวรวมแล้วนั้น ลักษณะเฉพาะอื่น ๆ ของอนุภาคอาจมีอิทธิพลต่อการตอบสนองทางชีววิทยาด้วยเช่นกัน ตัวอย่างเช่น ความสามารถในการละลาย รูปร่าง ประจุและเคมีพื้นผิว สมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การดูดซับมลพิษ (เช่น โลหะหนัก หรือเอนโดทอกซิน) รวมไปถึงระดับการเกาะก้อนแบบหลวมของอนุภาค

มักมีการเคลือบพื้นผิวของอนุภาคนาโน หรือเพิ่มหมู่ฟังก์ชันเพื่อป้องกันการจับตัวเป็นก้อน ให้ได้สมบัติตามต้องการ เช่น ใช้ประโยชน์ทางเภสัชกรรม รวมถึงการปนเปื้อนของพื้นผิวอนุภาคด้วยสิ่งเจือปนสามารถนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงการตอบสนองทางชีววิทยาได้ ยังมีงานวิจัยจำนวนมากที่อยู่ระหว่างการศึกษาถึงผลกระทบจากสมบัติของอนุภาคต่อสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ และผลกระทบเชิงลบที่อาจเกิดขึ้น

หมายเหตุ รายละเอียดเพิ่มเติมสำหรับ (1) ข้อมูลผลกระทบต่อสุขภาพของอนุภาคนาโนและเส้นใยนาโนจากอุบัติการณ์ที่เกิดขึ้นโดยไม่ตั้งใจ (2) ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นพิษกับพื้นผิว เคมีพื้นผิว และ

จำนวนอนุภาค (3) ปฏิกิริยาการอักเสบจากอนุภาคนาโน (4) ข้อสังเกตจากการศึกษาระบาดวิทยาที่เกี่ยวกับอนุภาคระดับนาโนสเกลและอนุภาคขนาดเล็กละเอียด และ (5) ผลการศึกษาทางพิษวิทยาของวัสดุนาโนในเซลล์และในสัตว์ทดลองสำหรับวัสดุนาโน แสดงไว้ในภาคผนวก ค. อันตรายของวัสดุนาโนต่อสุขภาพ (รายละเอียดเพิ่มเติม)

5.2 อันตรายทางกายภาพของวัสดุนาโน: อัคคีภัย

แม้ว่าข้อมูลที่มีอยู่นั้นจะยังไม่เพียงพอในการคาดการณ์โอกาสของความเสี่ยงที่เกิดอัคคีภัยและการระเบิดซึ่งมาจากวัตถุนาโนในรูปแบบผง วัสดุที่ติดไฟได้ง่ายในระดับนาโนสเกลอาจมีความเสี่ยงสูงกว่าวัสดุที่มีขนาดหยาบในปริมาณที่เท่ากัน เนื่องจากการคายความร้อนจากปฏิกิริยาที่อาศัยตัวเร่ง หรือเนื่องจากอุณหภูมิจุดระเบิดที่ลดลง การลดลงของขนาดของวัสดุที่ติดไฟได้ง่ายจะทำให้ลดพลังงานต่ำสุดที่ใช้ในการจุดติดไฟและเพิ่มอัตราการเผาไหม้ให้สูงขึ้น ซึ่งมีโอกาสที่จะทำให้วัสดุที่ไม่ติดไฟหรือวัสดุเฉื่อยเกิดการติดไฟได้ การกระจายตัวของวัสดุนาโนที่ติดไฟได้ในอากาศจะทำให้เกิดความเสี่ยงสูงกว่า การกระจายของวัสดุขนาดไมโครเมตร หรือวัสดุขนาดใหญ่มาก ๆ ที่มีองค์ประกอบเหมือนกัน การระเบิดของฝุ่น พลังงานในการจุดติดไฟที่ต่ำที่สุด และอุณหภูมิในการจุดติดไฟที่ต่ำที่สุดเป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องกับฝุ่น

มีการใช้อนุภาคนาโนและวัสดุรูพรุนที่มีโครงสร้างนาโนมานานหลายปีแล้วเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการเพิ่มอัตราในการเกิดปฏิกิริยา หรือการลดอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดขึ้นในของเหลวหรือแก๊สได้ วัสดุนาโนบางชนิดอาจทำให้เกิดแรงปฏิกิริยาและเพิ่มแนวโน้มให้เกิดการระเบิดและอัคคีภัยได้นั้น อาจไม่ได้เกิดขึ้นเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับทั้งองค์ประกอบและโครงสร้างของวัสดุนาโนนั้น ๆ

นอกจากนี้ วัสดุนาโนบางชนิดได้รับการออกแบบเพื่อให้สามารถสร้างความร้อนได้ ผ่านการเกิดปฏิกิริยาแบบก้าวหน้าในระดับนาโนสเกล วัสดุเหล่านี้อาจมีลักษณะการเกิดอัคคีภัยที่จำเพาะกับวัสดุนาโน ความสามารถในการทำปฏิกิริยาของวัสดุนาโนที่เพิ่มมากขึ้นนั้นเกิดเป็นพื้นฐานความรู้สำหรับงานวิจัยด้านพลังงานนาโน เช่น สารเทอร์ไมท์อะลูมิเนียมและโมลิบดีนัมออกไซด์ (Al/MoO_3) ที่มีขนาดระดับนาโนสเกลสามารถติดไฟได้เร็วกว่าวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดระดับไมโครเมตรถึง 300 เท่า

5.3 ข้อควรพิจารณาด้านความปลอดภัยในการผลิตวัสดุนาโน

การผลิตวัสดุนาโนและวัสดุอื่น ๆ ขึ้นมาใหม่นั้น สามารถทำได้ทั้งการผลิตระดับต้นแบบ ซึ่งเป็นกิจกรรมในการวิจัยและพัฒนา ไปจนถึงการผลิตในสเกลขนาดใหญ่ ในปัจจุบันการผลิตวัสดุนาโนประกอบด้วยกระบวนการที่ใช้พลังงานสูงหลายชนิด เช่น การแยกสลายด้วยเปลวไฟ การแยกสลายด้วยความร้อนจากเลเซอร์ การทำให้เป็นไอด้วยเลเซอร์ (laser vaporisation) การสังเคราะห์ด้วยพลาสมาความร้อน (thermal plasma) ไมโครเวฟพลาสมา (microwave plasma) กระบวนการสปัตเตอริง (sputtering) และการระเหิดด้วยเลเซอร์ (laser ablation) ซึ่งต้องมีประเด็นความปลอดภัยที่เฉพาะเจาะจง อันตรายที่มีผลกระทบต่อความปลอดภัยของกระบวนการเหล่านี้ประกอบด้วย การทำงานกับถังทรงกระบอกที่อัดความดันสูง เครื่องมือที่ใช้

ความดันต่ำ แก๊สพิษ และแก๊สเฉื่อย วัสดุที่มีอุณหภูมิสูง การทำงานกับไฟฟ้าแรงสูง เครื่องมือที่ปลดปล่อยรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า เลเซอร์ และแหล่งกำเนิดแสงที่มีความเข้มแสงสูง เช่น รังสีอัลตราไวโอเลต รังสีอินฟราเรด และแสงที่ตามองเห็น เป็นต้น การทำงานภายใต้สภาวะที่เป็นอันตรายเหล่านี้ต้องการการฝึกปฏิบัติงานที่เหมาะสมและเป็นไปตามแนวทางการทำงานที่ปลอดภัยในห้องปฏิบัติการ

6. การประเมินการรับสัมผัสกับวัสดุนาโน

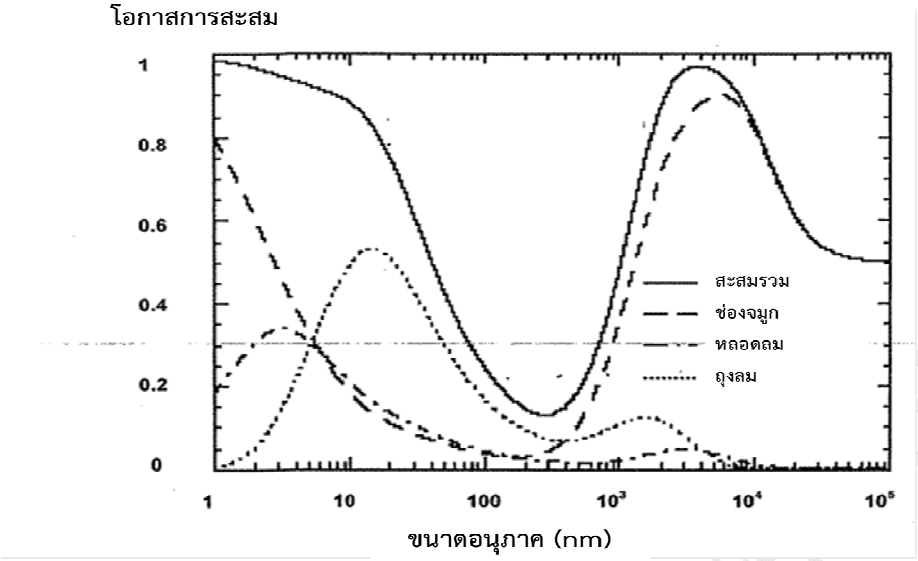
6.1 ช่องทางการรับสัมผัส

ช่องทางในการรับสัมผัสกับวัสดุนาโนของผู้ปฏิบัติงานนั้นประกอบด้วย 3 ช่องทางหลัก คือ ทางการหายใจ ทางปาก และทางผิวหนัง โดยมีรายละเอียดดังนี้

6.1.1 การรับสัมผัสทางการหายใจ

การรับสัมผัสทางการหายใจ เป็นเส้นทางหลักที่วัสดุนาโนเข้าสู่ร่างกายของผู้ปฏิบัติงาน เนื่องจากอนุภาคส่วนใหญ่ในสถานที่ปฏิบัติงานอยู่ในรูปแบบอิสระ และลอยอยู่ในอากาศ อนุภาคนาโนที่เข้าสู่ร่างกายผ่านทางการหายใจจะสะสมบริเวณทางเดินหายใจซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค โดยทั่วไปแล้วอนุภาคนาโนจะตกค้างในทุกส่วนของระบบทางเดินหาย โดยมีสัดส่วนการสะสมในบริเวณต่าง ๆ ได้แก่ ช่องจมูก (nasopharyngeal) หลอดลม (tracheobronchial) และถุงลม (alveolar region) ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งได้จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคาดการณ์ (ตามคณะกรรมาธิการนานาชาติว่าด้วยการป้องกันอันตรายจากรังสี (International Commission on Radiological Protection; ICRP)) โดยพบว่าโอกาสที่อนุภาคขนาด 1 nm สามารถสะสมอยู่ในช่องจมูกมีมากถึง 80% ในหลอดลม 20% และในถุงลมน้อยกว่า 1% สำหรับอนุภาคที่มีขนาด 20 nm พบว่ามีโอกาสสะสมในถุงลม 50% และในช่องจมูกและหลอดลมในสัดส่วนที่เท่ากัน คือ 25%

ฉบับร่างเพื่อรับฟังความคิดเห็น



รูปที่ 1 แนวโน้มการสะสมของอนุภาคโดยรวม และตามบริเวณทางเดินหายใจของมนุษย์ที่สัมพันธ์กับขนาดของอนุภาค

(ข้อ 6.1.1)

6.1.2 การรับสัมผัสทางปาก

ในสถานที่ปฏิบัติงานนั้น วัสดุนาโนในรูปของอนุภาคสามารถเข้าสู่ร่างกายทางปาก จากการกลืนเมือก (หรือน้ำมูก) ที่สะสมอยู่ในระบบทางเดินหายใจ จากการบริโภคอาหารหรือน้ำที่ปนเปื้อนอนุภาคนาโน หรือจากการได้รับเข้าทางปากผ่านมือหรือผิวหนังที่ปนเปื้อน ทั้งนี้ การศึกษาเรื่องการตกค้างของอนุภาคนาโนในระบบทางเดินอาหารนั้นยังมีจำนวนน้อยมาก

6.1.3 การรับสัมผัสทางผิวหนัง

ในสถานที่ปฏิบัติงานนั้น ผู้ปฏิบัติงานอาจเกิดการรับสัมผัสทางผิวหนังกับวัสดุนาโนในระหว่างกระบวนการผลิต หรือใช้งาน หรือโดยการรับสัมผัสกับพื้นผิวที่ปนเปื้อนวัสดุนาโน อย่างไรก็ดี ในปัจจุบันยังคงเป็นที่ถกเถียงว่าอนุภาคนาโนสามารถทะลุผ่านเข้าทางผิวหนังปกติ และทำให้เกิดผลร้ายหรือไม่ และในปริมาณเท่าใดที่จะทำให้เกิดลักษณะนั้น งานวิจัยส่วนใหญ่ศึกษาการรับสัมผัสทางผิวหนังปกติกับวัสดุนาโนเฉพาะชนิด เช่น TiO_2 และ ZnO ยังไม่มีการศึกษาถึงผลกระทบต่อผิวหนังในลักษณะต่าง ๆ เช่น การทะลุผ่านผิวหนังที่ได้รับบาดเจ็บ อีกทั้งมีการศึกษาถึงบทบาทของตัวทำละลายในการดูดซึมอนุภาคนาโนผ่านทางผิวหนังในขณะที่ปฏิบัติงานด้วยแล้วบทบาทของตัวทำละลายในการได้รับอนุภาคนาโนผ่านผิวหนังในการประกอบอาชีพนั้นยังไม่ได้มีการศึกษาเต็มที่ ส่วนการรับสัมผัสผ่านทางการฉีดเข้าสู่ส่วนต่าง ๆ ของร่างกายสามารถเกิดขึ้นในสถานที่ปฏิบัติงานได้นั้นส่วนใหญ่เนื่องจากอุบัติเหตุ

6.2 การประเมินปริมาณการรับสัมผัส

6.2.1. การประเมินการรับสัมผัสจากการวิเคราะห์ตัวอย่างจากภายในร่างกาย

การวิเคราะห์ตัวอย่างจากภายในร่างกาย เช่น เนื้อเยื่อ ของเหลวจากร่างกาย และอากาศที่หายใจเข้าไป อาจมีความยุ่งยาก ซึ่งในทางอาชีวอนามัยสามารถใช้วิธีการที่ง่ายขึ้นโดยใช้ตัวอย่างจาก ผม ปัสสาวะ และอากาศที่หายใจออกมาแทน การระบุปริมาณที่รับเข้าสู่ร่างกายทำได้โดยใช้การวัดปริมาณวัสดุนาโนที่สนใจ และหรือเมทาบอไลท์ของวัสดุนาโน นอกจากนี้ยังมีการใช้ “ตัวชี้วัดทางชีวภาพ” (biomarker) ซึ่งเป็นสารที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาระหว่างสารพิษกับระบบในร่างกายมนุษย์เป็นหลักฐานในการแสดงถึงการได้รับสัมผัสสารพิษของร่างกายหากตัวชี้วัดนั้น ๆ มีความสัมพันธ์อย่างจำเพาะกับสารพิษที่ได้รับเข้าสู่ร่างกาย โดยการวัดปริมาณตัวชี้วัดทางชีวภาพมีข้อดีคือสามารถให้ข้อมูลการรับสัมผัสได้ไม่ว่าการรับสัมผัสนั้นจะเกิดขึ้นผ่านทางเส้นทางใด การวัดปริมาณตัวชี้วัดยังสามารถนำมาใช้สำหรับการตรวจคัดกรองและตรวจติดตามพนักงานที่ทำงานกับวัสดุนาโนได้ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลการศึกษาตัวชี้วัดทางชีวภาพสำหรับการรับสัมผัสวัสดุนาโนนั้นยังอยู่ในช่วงเริ่มต้น และมีความซับซ้อนอันสืบเนื่องมาจากความหลากหลายทางฟิสิกส์และเคมีของวัสดุนาโน ซึ่งส่งผลให้การตอบสนองทางชีวภาพมีความหลากหลายไปด้วย จากการศึกษาการรับสัมผัสวัสดุนาโนที่มีความเป็นพิษต่ำและความสามารถในการละลายต่ำผ่านทางการหายใจ พบว่าเป็นสาเหตุให้เกิดการอักเสบ ตัวอย่างเช่น มีการเสนอให้ไนตริกออกไซด์ในลมหายใจออกของมนุษย์เป็นตัวชี้วัดทางชีวภาพของการเกิดกระบวนการอับเสบในร่างกาย

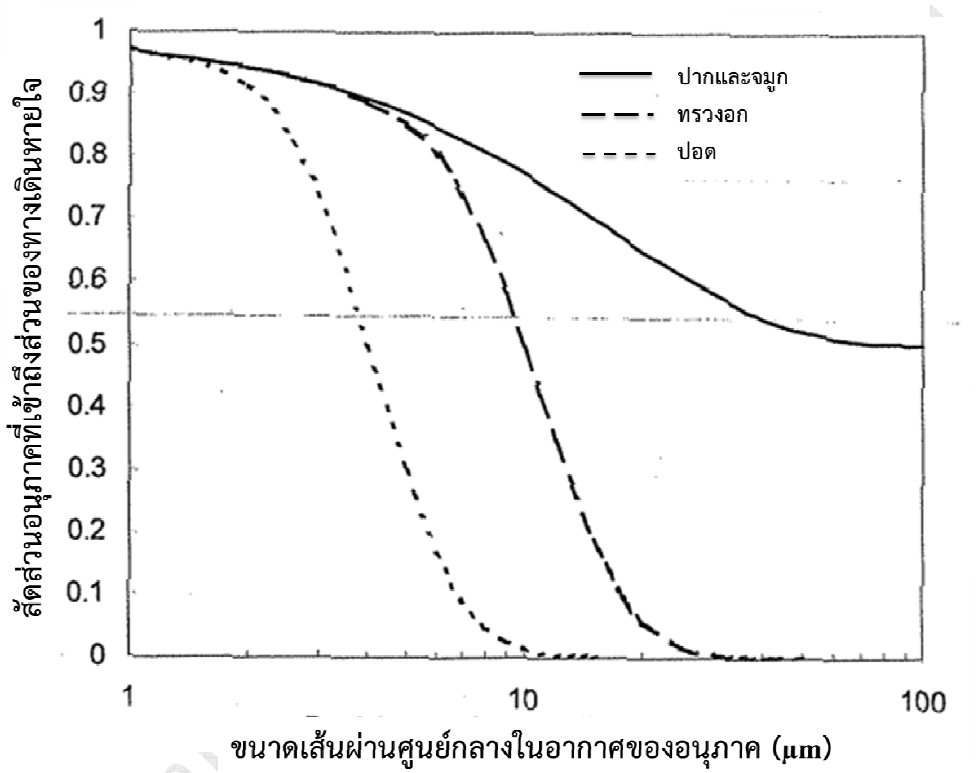
6.2.2. การประเมินการรับสัมผัสจากวัสดุนาโนในอากาศ

การประเมินการรับสัมผัสของผู้ปฏิบัติงาน ทำได้โดยการวัดความเข้มข้นโดยมวลของอนุภาคที่มีผลต่อสุขภาพที่ระดับหายใจของผู้ปฏิบัติงาน (worker’s breathing zone) ตามมอก.2574-2555 และวิเคราะห์ส่วนประกอบของสารเคมีนั้น ส่วนของละอองลอยที่มีผลต่อสุขภาพนั้นสัมพันธ์กับโอกาสในการทะลุผ่านของอนุภาคไปยังส่วนต่าง ๆ ของระบบทางเดินหายใจ และใช้แสดงข้อกำหนดสำหรับคุณลักษณะของเครื่องมือที่ใช้สุ่มตัวอย่าง (รูปที่ 2) ส่วนที่หายใจเข้าไปได้ผ่านจมูกและปาก (inhalable convention) เป็นสัดส่วนมวลของอนุภาคในอากาศทั้งหมดที่เข้าสู่จมูกหรือปากขณะหายใจ ส่วนที่อยู่ในทรวงอก (thoracic convention) เป็นสัดส่วนมวลของอนุภาคที่หายใจเข้าไปแล้วทะลุผ่านเส้นระบบทางเดินหายใจเข้าไปยังกล่องเสียง โดย 50% ที่ผ่านเข้าไปที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลอากาศพลศาสตร์ (aerodynamic equivalent diameter (Da)) เป็น 11.64 μm (ซึ่งเท่ากับ 10 μm เมื่อแสดงในรูปของสัดส่วนของละอองลอยทั้งหมด) และส่วนที่ถูกหายใจผ่านระบบทางเดินหายใจ (respirable convention) เป็นสัดส่วนมวลของอนุภาคที่หายใจเข้าไปแล้วผ่านไปยังถุงลมของปอดได้ โดย 50% ที่ผ่านเข้าไปมีค่า Da เป็น 4.25 μm (ซึ่งเท่ากับ 4 μm เมื่อแสดงในรูปของสัดส่วนของละอองลอยทั้งหมด)

ข้อยกเว้นหลักสำหรับวิธีการนี้คือ การวัดอนุภาคนาโนโดยอิงกับจำนวนอนุภาคในการได้รับนั้นให้ใช้สำหรับเส้นใย เช่น แร่ใยหินที่เป็นอนุภาคที่อยู่ในอากาศ (มีความยาวมากกว่า 5 μm กว้างน้อยกว่า 3 μm

และอัตราส่วนความยาว : ความกว้างมากกว่าหรือเท่ากับ 3:1 ซึ่งสะสมในแผ่นกรองเมมเบรนเก็บตัวอย่าง และให้นับจำนวนด้วยกล้องจุลทรรศน์เชิงแสง หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสำหรับจุลินทรีย์ โดยวิธีการมาตรฐานที่ใช้ในการรวบรวมจุลินทรีย์ทำโดยการเพาะในตัวกลางและนับจำนวนของโคโลนี

หมายเหตุ *คำนิยามและวิธีการเก็บตัวอย่างสำหรับเส้นใยแร่ใยหินสามารถผันแปรไปตามการตัดสินใจที่แตกต่างกัน โดยคำนิยมของเส้นใยนี้อ้างอิงตามคำนิยามของ WHO*



รูปที่ 2 สัดส่วนของละอองลอยในที่ปฏิบัติงานที่เข้าสู่ส่วนต่าง ๆ ของระบบทางเดินหายใจที่สัมพันธ์กับขนาดของอนุภาค

(ข้อ 6.2.2)

อย่างไรก็ตาม หลักฐานทางพิษวิทยา ได้ระบุว่า ผลกระทบต่อสุขภาพที่อาจเกิดขึ้นซึ่งเกี่ยวข้องกับการหายใจเอาละอองลอยนาโน (ซึ่งหมายถึงอนุภาคนาโนในอากาศและอนุภาคของวัสดุโครงสร้างนาโน) อาจจะไม่เกี่ยวข้องกับมวลของอนุภาค งานวิจัยหลายเรื่องระบุว่าความเป็นพิษของวัสดุที่ไม่ละลายน้ำเพิ่มขึ้นถ้าลดขนาดของอนุภาคลงโดยอ้างอิงมวลต่อมวล กลไกที่ว่าวัสดุที่มีความเป็นพิษในระดับสูงเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลงได้อย่างไรนั้นมีการอธิบายไว้แล้วโดยมีหลายสมติฐานในการอธิบาย งานวิจัยหลายเรื่องได้ระบุว่าการตอบสนองทางชีวภาพนั้นขึ้นอยู่กับบริเวณพื้นที่ผิวของอนุภาคนาโนที่ตกค้างในปอด ทั้งนี้เนื่องจากขนาดที่เล็กมากของอนุภาคนาโนทำให้อนุภาคนั้นสามารถทะลุผ่านเซลล์เยื่อบุผิวหนังเข้าสู่

กระแสเลือดในปอด และยังสามารถทะลุผ่านเข้าสู่สมองโดยผ่านทางเส้นประสาทในการรับกลิ่น เมื่อวัสดุที่มีขนาดระดับนาโนนั้นมีร้อยละของพื้นผิวต่ออะตอมสูง และแสดงลักษณะสมบัติทางโครงสร้างของสารเคมีที่เฉพาะตัว ซึ่งคาดว่าอาจส่งผลให้อนุภาคนาโนนั้นแสดงพฤติกรรมทางชีวภาพที่เกี่ยวเนื่องกับเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค พื้นที่ผิว และการทำปฏิกิริยาพื้นผิว

จากการอธิบายข้างต้นนี้เห็นได้ชัดเจนว่าการวัดการรับสัมผัสละอองลอยนาโนในขอบเขตของความเข้มข้นมวลเพียงอย่างเดียวนั้นไม่เพียงพอต่อการประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพที่อาจเกิดขึ้นได้ นอกจากนี้ยังมีหลักฐานที่น่าเชื่อถือแสดงให้เห็นว่าการปฏิบัติงานที่รับสัมผัสกับละอองลอยนาโนนั้นควรตรวจดูพื้นที่ผิวด้วย อย่างไรก็ตาม ในบริบทนี้พื้นที่ผิวละอองลอยนั้นไม่ได้มีการอธิบายไว้ชัดเจนและยังขึ้นอยู่กับวิธีการวัดที่ใช้ พื้นที่ผิวรูปทรงเรขาคณิตนั้นมักอ้างอิงถึงพื้นที่ผิวทางกายภาพของวัตถุและขึ้นอยู่กับสเกลความยาวที่ใช้ในการวัด การวัดโดยใช้สเกลความยาวนั้นมีการกำหนดขนาดของขอบบนซึ่งไม่สามารถตรวจพบด้วยวิธีการวัดนั้น ๆ เช่น วิธีการที่ใช้การดูดซับพื้นผิวของโมเลกุลโดยมีการประมาณว่าสเกลความยาวมีค่าใกล้เคียงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับนั้น ในลักษณะเดียวกัน พื้นที่ผิวที่เกี่ยวกับทางชีวภาพนั้นจะถูกประมาณโดยโมเลกุลทางชีวภาพที่เล็กที่สุดที่ทำปฏิกิริยากับอนุภาคภายในร่างกายนั้น

ในขณะที่การวัดที่น่าเชื่อถือมากที่สุดเป็นการวัดโดยใช้พื้นที่ผิวของละอองลอยในการคำนวณการรับสัมผัสสาร สิ่งที่จำเป็นในการพิจารณาคือการจำแนกลักษณะการรับสัมผัสมวลละอองลอยและค่าความเข้มข้นจนกว่าข้อมูลที่น่าเชื่อถือนั้นมีมากเพียงพอ

ในกรณีที่วัสดุนาโนมีองค์ประกอบที่สอดคล้องกันในเรื่องของขนาดและรูปร่างทำให้สามารถวัดพื้นที่ผิวเฉพาะและสามารถเชื่อมโยงพื้นที่ผิวกับความเข้มข้นมวลได้ อย่างไรก็ตามสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์นั้นไม่สามารถถ่ายโอนจากวัสดุนาโนหนึ่งไปยังวัสดุอื่น ๆ ที่มีองค์ประกอบรวมทั้งขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันได้ การคำนวณการรับสัมผัสแต่ละวิธี โดยเฉพาะการวัดความเข้มข้นมวลนั้น จำเป็นต้องมีช่องทางในการเลือกขนาดของอนุภาคที่แน่ใจได้ว่าอนุภาคที่มีช่วงขนาดที่มีความสัมพันธ์กันเท่านั้นที่นำมาเป็นตัวอย่างขนาดตัด (cut size) ที่แท้จริงของการเลือกอนุภาคซึ่งควรมีการจัดทำขึ้นเพื่อประเมินผลกระทบที่อาจเกิดต่อสุขภาพของมนุษย์นั้น ยังเปิดกว้างให้มีการถกเถียงและขึ้นอยู่กับพฤติกรรมของอนุภาคและผลกระทบต่อชีวภาพ ในขณะนี้ขนาดตัดของอนุภาคนาโนคือ 100 nm แม้ว่าขนาดของอนุภาคนาโนนี้ไม่ได้มาจากพฤติกรรมของอนุภาคในระบบทางเดินหายใจที่มีการตกค้างของอนุภาคอยู่และไม่รวมถึงวัสดุนาโนที่เป็นอนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งคาดว่ามีสมบัติแตกต่างจากวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่า เช่น มีความเป็นไปได้ในการอธิบายความสัมพันธ์ต่อสุขภาพของอนุภาคนาโนโดยอ้างอิงจากการตกค้างที่มีโอกาสเกิดขึ้นในปอด (รูป 2) ประสิทธิภาพการสะสมของอนุภาคในระบบทางเดินหายใจมีค่าต่ำสุดเมื่ออนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 200 nm ถึง 300 nm และประสิทธิภาพการสะสมมีค่าเพิ่มขึ้นในอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่านอกจากนี้เมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลง ทำให้ความ

โค้งของพื้นผิว การจัดวางเรียงตัว (และร้อยละ) ของอะตอมบนพื้นผิวของอนุภาคและผลควอนตัมที่ขึ้นอยู่กับขนาดนั้น มีบทบาทอย่างมีนัยสำคัญที่เพิ่มขึ้นในการประเมินพฤติกรรมทางฟิสิกส์-เคมีของวัสดุ ยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่า การตกค้างในระบบทางเดินหายใจของอนุภาคนาโนที่แยกโดดสามารถมีผลกระทบทางชีววิทยาที่แตกต่างหรือเหมือนกับผลกระทบของอนุภาคเกาะก้อนแบบแน่น/ อนุภาคเกาะก้อนแบบหลวม ปัจจัยหลายชนิดที่ส่งผลต่อการตอบสนองทางชีววิทยา เริ่มแรกคือตำแหน่งของการสะสมซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคเชิงอากาศพลศาสตร์ซึ่งเปลี่ยนไปตามระดับการเกาะก้อนแบบแน่น/ แบบหลวม เมื่อเกิดการแยกจากการเกาะก้อนแบบแน่น/ แบบหลวม ออกจากกันโดยสิ้นเชิงและทำให้เกิดการสะสมตามมา ทำให้เข้าใจได้ว่าผลที่ตามมาของผลกระทบทางชีวภาพอาจเหมือนกับการรับสัมผัสที่เท่ากันของอนุภาคนาโนที่แยกจากกัน นอกจากนี้ถ้าการตอบสนองทางชีวภาพนั้นเกี่ยวข้องกับพื้นที่ผิวของละอองลอยที่สะสมอยู่ตามปริมาตรของสารนั้น ๆ การตอบสนองต่อการเกาะก้อนแบบแน่น/ แบบหลวม ของสารที่สะสมอยู่โดยมีโครงสร้างที่มีรูปทรงเรขาคณิตเหมือนกันทำให้เชื่อได้ว่าเหมือนกับการตอบสนองของรูปร่างของสารที่มีปริมาณเทียบเท่ากับอนุภาคที่แยกจากกัน อย่างไรก็ตามถ้าอนุภาคโครงสร้างนาโนนั้นไม่แยกจากการเกาะก้อนแบบหลวม ดังนั้นสารเหล่านี้มีแนวโน้มไม่เคลื่อนย้ายไปสู่อวัยวะอื่น ๆ ในร่างกายเหมือนกับอนุภาคที่แยกจากกันและผลกระทบทางชีวภาพอาจแตกต่างกันไปด้วย ดังนั้นความรู้ว่าอนุภาคสามารถเกิดการแยกจากการเกาะก้อนแบบหลวมต้องทราบก่อนตัดสินใจว่าอนุภาคขนาดใดเป็นขนาดที่ไม่ต้องการ (อนุภาคก้อนรวมที่ไม่ได้เป็นวัสดุโครงสร้างนาโน) และอาจแตกต่างกันในส่วนของสมบัติของอนุภาค

หมายเหตุ *รายละเอียดเพิ่มเติมสำหรับวิธีการวัดการรับสัมผัสวัสดุนาโนผ่านทางการหายใจ แสดงไว้ในภาคผนวก ง.*

7. การประเมินความเสี่ยงด้านอาชีวอนามัย

7.1 บทนำ

เนื้อหาส่วนนี้จะกล่าวถึงสถานะปัจจุบันของการประเมินความเสี่ยงในการผลิตและกระบวนการแปรรูปวัสดุนาโน ซึ่งจะเน้นเฉพาะปัจจัยที่เกี่ยวข้องด้านอาชีวอนามัย เช่น โรงงานผลิต ห้องทดลองหรือห้องปฏิบัติการ แต่ไม่ได้พิจารณารวมถึงความปลอดภัยของผู้บริโภค หรือความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม

วัสดุนาโนที่มีลักษณะเป็นอนุภาคนาโนอิสระหรืออนุภาคนาโนที่เกาะเป็นกลุ่ม ล้วนแล้วแต่เกี่ยวข้องกับอาชีวอนามัยและความปลอดภัย วัสดุที่มีโครงสร้างนาโนสเกล ชั้นนาโน หรือของแข็งที่มีอนุภาคนาโนฝังตัวอยู่ เช่น สารประกอบพอลิเมอร์ สารเคลือบหรือสารตกแต่ง สามารถก่อให้เกิดการรับสัมผัสได้และมีผลกระทบเมื่อมีการรับสัมผัส จากการศึกษาภาคสนามพบว่ากระบวนการแปรรูปวัสดุด้วยวิธีทำลายของสารประกอบพอลิเมอร์ที่มีวัสดุนาโนฝังอยู่จะทำให้เกิดละอองลอยของเส้นใยนาโนที่เกาะแน่นแต่ไม่ปล่อยอนุภาคนาโนชนิดเกาะหลวม ซึ่งละอองลอยนี้อาจเป็นส่วนผสมของอนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นโดยไม่ตั้งใจและ

อนุภาคนาโนที่สร้างขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของละอองลอยอย่างถูกต้องและเหมาะสม

ในขณะที่อันตรายทางกายภาพซึ่งมาจากการแปรรูปด้วยวิธีการเฉพาะ เช่น การให้ความร้อนสูง การให้ศักย์ไฟฟ้าสูง เป็นต้น มักใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนาโน เนื้อหาในส่วนนี้มุ่งเน้นอันตรายที่เกิดจากความเป็นพิษมากกว่าอันตรายจากอัคคีภัยและระเบิด โดยทั่วไปแล้วผลกระทบแบบเฉียบพลันสามารถหลีกเลี่ยงได้โดยใช้หลักการพื้นฐานและข้อกำหนดขั้นต้นของอาชีวอนามัยและความปลอดภัยในกรณีที่มีข้อมูลพิษวิทยาของวัสดุนาโนนั้น ๆ อย่างไรก็ตามความเสี่ยงต่อสุขภาพเนื่องจากการรับสัมผัสวัสดุนาโนในปริมาณที่ต่ำแบบสะสมนั้นประเมินได้ยากและท้าทายต่อการกำหนดแนวทางการปฏิบัติการประเมินความเสี่ยงมักดำเนินการโดยผู้เชี่ยวชาญร่วมกับผู้มีอำนาจตัดสินใจในการจัดทำข้อกำหนดในการจัดการความเสี่ยง การประเมินความเสี่ยงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลอย่างละเอียดทั้งของผลิตภัณฑ์และของกระบวนการแปรรูป

7.2 การประเมินความเสี่ยงสำหรับวัสดุนาโน (risk assessment for nanomaterials)

การประเมินความเสี่ยงเป็นการวิเคราะห์ผลกระทบเชิงลบต่อสุขภาพที่อาจเกิดขึ้นทั้งในปัจจุบันและอนาคตอันเกิดจากสารเคมีอันตรายโดยปราศจากการกระทำใด ๆ ที่จะควบคุมหรือลดการรับสัมผัสสารเคมีนั้น การประเมินความเสี่ยงในการประกอบอาชีพนั้นประกอบด้วย การระบุความเป็นอันตราย การประเมินอันตราย การประเมินการปลดปล่อยและการจำแนกความเสี่ยง ซึ่งเป้าหมายของการประเมินความเสี่ยงคือเพื่อประเมินว่าความเสี่ยงที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อมของสถานที่ทำงานนั้นอยู่เหนือระดับการยอมรับได้หรือไม่ เพื่อเป็นข้อมูลให้กับผู้มีอำนาจในการตัดสินใจเพิ่มความเข้มงวดในการจัดการความเสี่ยงต่อไป

กระบวนการประเมินความเสี่ยงประกอบด้วย

- การระบุอันตราย เป็นการระบุชนิดสารที่เป็นอันตรายเมื่อได้รับและมีความเสี่ยง
- การประเมินการตอบสนองจากการรับสัมผัสต่ออันตราย เป็นการระบุผลกระทบเชิงลบต่อสุขภาพที่อาจเกิดขึ้นจากสารอันตรายในสถานที่ปฏิบัติงานที่ได้มีการระบุไว้
- การประเมินการรับสัมผัสสารอันตรายเป็นการประเมินวิธีที่บุคคลมีโอกาสรับสัมผัสกับสารอันตรายที่มีอยู่ในสถานที่ปฏิบัติงาน
- การวิเคราะห์ความเสี่ยงร่วมกับข้อมูลที่ได้จากข้อ 4 ถึงข้อ 6 ข้างต้นมาพิจารณาร่วมกันเพื่อประเมินความเสี่ยงในแต่ละสถานที่ปฏิบัติงาน

การประเมินความเสี่ยงในสถานที่ปฏิบัติงานมักเริ่มจากการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการประเมินอันตราย จากนั้นจึงใช้กระบวนการตรรกะในการประเมินปริมาณการรับสัมผัสและการเข้าถึงสารอันตราย ดังนั้นการประเมินความเสี่ยงจึงเป็นการสังเคราะห์ข้อมูลของอันตรายและการรับสัมผัส

ทั้งนี้วิธีในการประเมินความเสี่ยงของวัสดุนาโนให้เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนาโนเทคโนโลยี – การประเมินความเสี่ยงของวัสดุนาโน ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (ในกรณีที่ยังมิได้มีการประกาศกำหนดมาตรฐานดังกล่าว ให้เป็นไปตาม ISO/TR 13121:2011)

7.2.1 การประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ (quantitative and qualitative risk assesment)

7.2.1.1 การประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณ

การประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณขึ้นอยู่กับข้อมูลที่มีของการรับสัมผัสเชิงปริมาณซึ่งแสดงถึงโอกาส หรือระดับการรับสัมผัส และขีดจำกัดของปริมาณการรับสัมผัส ขีดจำกัดของการรับสัมผัสพัฒนามาจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการรับสัมผัสและการตอบสนอง และระดับของ การรับสัมผัสที่มีความเสี่ยงเชิงลบต่อสุขภาพแม้ว่าจะมีค่าต่ำกว่าระดับที่ยอมรับได้ก็ตาม ส่วนประกอบอื่นของการประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณได้แก่ การวัด การประมาณค่าการรับสัมผัสที่แท้จริง หรือโอกาสการรับสัมผัสในสถานที่ปฏิบัติงาน

7.2.1.2 การประเมินความเสี่ยงเชิงคุณภาพ

ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลสำหรับใช้ในการประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณ ข้อมูลที่ขาดไปนี้สามารถทดแทนได้โดยการใช้ข้อมูลอื่น ๆ ประกอบ ได้แก่ ความเห็นของผู้เชี่ยวชาญและการประมาณการจากข้อมูลที่มีอยู่ของวัสดุที่คล้ายกัน ในการประเมินความเสี่ยงเชิงคุณภาพแบบนี้จำเป็นต้องมีความเห็นของผู้เชี่ยวชาญด้านความปลอดภัยเพื่อประเมินความเสี่ยงและข้อแนะนำในการลดปริมาณการรับสัมผัส

โดยวิธีการที่เป็นรูปแบบ “การสอบถามผู้เชี่ยวชาญ” เป็นกระบวนการที่เป็นระบบในการจัดทำระเบียบและการแสดงจำนวนความเห็นของผู้เชี่ยวชาญเกี่ยวกับปริมาณที่ไม่ทราบค่า ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการจัดกลุ่มวัสดุนาโนตามลักษณะความเป็นอันตรายและโอกาสการรับสัมผัส การจัดสารอันตรายเป็นกลุ่มจะช่วยให้เกิดการพัฒนาเทคนิคในการควบคุมเพื่อประเมินความเสี่ยงและแนะนำเทคนิคในการจัดการความเสี่ยงอย่างเหมาะสม

ส่วนประกอบที่สำคัญอื่นๆ ของการประเมินความเสี่ยงเชิงคุณภาพได้แก่ การประเมินข้อมูลอันตรายและการรับสัมผัสที่มีอยู่อย่างสม่ำเสมอ

7.2.2 การชี้บ่งอันตราย (hazard identification)

การชี้บ่งอันตรายทำเพื่อระบุและติดตามอันตรายของสารที่อาจส่งผลกระทบรุนแรงต่อการรับสัมผัสและความเสี่ยง ในกรณีนี้มุ่งเน้นการจัดทำรายการของอันตรายที่เกิดจากความเป็นพิษ (สารเคมี หรือวัสดุนาโน) และอันตรายทางกายภาพ (เช่น สนามแม่เหล็กไฟฟ้า แหล่งกำเนิดแสงที่มีความเข้มแสงสูง เสียงที่มีความเข้มสูง วัสดุติดไฟและวัตถุระเบิด ความดันสูง หรือสุญญากาศ เป็นต้น) แม้ว่าจะมีกระบวนการ

ควบคุมทางวิศวกรรมโอกาสได้รับสารต่ำหรือระดับความอันตรายต่ำ ก็ยังจำเป็นต้องทำการชี้บ่งอันตรายทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการรับสัมผัสจากการปฏิบัติงาน

ข้อมูลที่ใช้สำหรับการชี้บ่งอันตรายได้แก่ บทความวิชาการ เอกสารความปลอดภัย (SDS) เอกสารความปลอดภัยทางเคมี (ICSC) ข้อมูลจากผู้ผลิต ประกาศกฎกระทรวง และข้อมูลผลการทดสอบ อย่างไรก็ตามข้อมูลในเอกสารต่าง ๆ มักไม่ระบุข้อมูลเฉพาะของวัสดุนาโนหรือเกณฑ์ปริมาณสารที่รับได้ ดังนั้นข้อมูลจากเอกสารข้างต้นอาจไม่เพียงพอต่อการวิเคราะห์อันตรายของวัสดุนาโน ในกรณีนี้สามารถทำการทดสอบเพื่อใช้เป็นข้อมูลได้

ขั้นต่อไปประกอบด้วยการวิเคราะห์ปริมาณวัสดุหรือสารเคมีที่เป็นอันตราย ปริมาณวัสดุหรือสารเคมีที่ใช้หรือมีอยู่ในสถานที่ปฏิบัติงานเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อโอกาสในการรับสัมผัส สถานที่ปฏิบัติงานซึ่งมีปริมาณของวัสดุเพียงเล็กน้อย ควรที่มีโอกาสในการรับสัมผัสต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสถานที่ปฏิบัติงานที่มีการใช้วัสดุในปริมาณมาก การวิเคราะห์สถานที่ปฏิบัติงานจะช่วยในการประเมินโอกาส การรับสัมผัสของผู้ปฏิบัติงานในหน้าที่หรือในสถานที่ดังกล่าวได้ ซึ่งนำไปสู่การระบุกลุ่มประชากรที่เป็นเป้าหมาย

การชี้บ่งอันตรายประกอบด้วยการสำรวจสถานที่ปฏิบัติงาน ขั้นตอนการทำงาน กระบวนการผลิต และการวัดความปลอดภัยในสถานที่ปฏิบัติงาน รวมถึงการใช้ระบบงานควบคุมทางวิศวกรรมและ PPE เพื่อใช้ในการอธิบายถึงการรับสัมผัสและการชี้บ่งโอกาสในการรับสัมผัสสารเคมีที่เป็นอันตรายของผู้ปฏิบัติงานทั้งในหน้าที่และในสถานที่ หากผลการสำรวจเบื้องต้นระบุว่ามีโอกาสของการรับสัมผัสจะต้องทำการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประเมินการรับสัมผัสในสถานที่ปฏิบัติงานดังกล่าว ข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้แก่ ความเข้มข้นมวลจำนวนอนุภาคการกระจายตัวของขนาดอนุภาค พื้นที่ผิว และข้อมูลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมี

7.2.3 การประเมินการตอบสนองต่อการรับสัมผัส (exposure-response assessment)

7.2.3.1 อันตรายทางพิษวิทยา

ในการจัดการด้านอาชีวอนามัยนั้น การป้องกันผลกระทบจากความเป็นพิษสามารถทำได้โดยการลดปริมาณการรับสัมผัสสารที่เป็นพิษให้ต่ำกว่าค่าปริมาณที่ระดับปลอดภัย ซึ่งอยู่ในระดับความเสี่ยงที่ยอมรับได้ ผลกระทบจากความเป็นพิษสามารถจำแนกได้ 2 แบบคือชนิดมีเกณฑ์ (threshold) และชนิดไม่มีเกณฑ์ (nontreshold) ชนิดมีเกณฑ์สามารถระบุเกณฑ์การรับสัมผัสที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ ส่วนชนิดไม่มีเกณฑ์คือไม่สามารถระบุเกณฑ์การรับสัมผัสที่ส่งผลต่อสุขภาพได้เลย ในการระบุเกณฑ์ปลอดภัยจำเป็นต้องวิเคราะห์เชิงปริมาณดังนี้

(1) หาค่า NOAEL หรือ BMD โดยใช้ข้อมูลตอบสนองต่อการรับสัมผัสในสัตว์หรือมนุษย์

(2) ประมาณเกณฑ์สำหรับมนุษย์จากเกณฑ์ของสัตว์ (พิจารณาค่าความไม่แน่นอนประกอบ) โดยใช้แบบจำลองเช่น แบบจำลองปอดมนุษย์ ในการประมาณความเข้มข้นที่ได้รับตลอดอายุการทำงาน

(3) คำนวณขีดจำกัดของการรับสัมผัสจากการปฏิบัติงานโดยคำนึงถึงความเป็นไปได้ทางเทคนิค ความแปรปรวนและความไม่แน่นอนของแบบจำลอง การประมาณการ และระบบความเสี่ยงที่ยอมรับได้

สมบัติความเป็นพิษของวัสดุนาโนอาจเกิดจากองค์ประกอบเคมีที่อยู่ภายในของวัสดุ ได้แก่ ส่วนประกอบในสารตั้งต้น ได้มีการศึกษาทางพิษวิทยาของวัดสุนาโน เช่น CNT ซึ่งมีลักษณะแตกต่างจากคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่

นิยาม วิธีการและมาตรฐานสำหรับการทดสอบพิษวิทยาของวัสดุนาโนอยู่ในระหว่างการพัฒนา ควรตรวจสอบมาตรฐานสากลที่สามารถอ้างอิงได้ เช่นมาตรฐานของ OECD เพื่อใช้เป็นแนวทางการปฏิบัติ นอกจากนี้การวิเคราะห์ทางพิษวิทยาของวัสดุนาโนนั้น จำเป็นต้องระบุการกระจายตัวของอนุภาคนาโน เนื่องจากวัสดุนาโนที่ความเข้มข้นสูงจะเกิดการเกาะหลวมอย่างรวดเร็วอันเป็นผลจากการเคลื่อนที่แบบบราวน์และแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคนาโน ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในระหว่างกระบวนการผลิตและกระบวนการบรรจุบรรจุภัณฑ์ ดังนั้นการรับสัมผัสจึงอาจเกิดจากอนุภาคนาโน หรือเกิดจากอนุภาคเกาะก้อนแบบหลวม

รายงานผลการศึกษาทางพิษวิทยาจำนวนหนึ่ง มีผลการศึกษาที่พบว่าบางครั้งความเป็นพิษได้มาจากวัสดุทดสอบที่ไม่ทราบสมบัติอย่างชัดเจนเนื่องจากข้อจำกัดทางเทคนิคดังนั้นในปัจจุบันจึงมีข้อมูลอันตรายที่ทวนสอบจากผลการศึกษาพิษวิทยาสำหรับอาชีวอนามัยอยู่อย่างจำกัด และเชื่อว่าในอนาคตจะมีเกณฑ์การรับสัมผัสของวัสดุนาโนที่สร้างขึ้นเพียงไม่กี่ชนิดเท่านั้น ตัวอย่างรายงานผลการวิเคราะห์ความเสี่ยงของวัสดุนาโนได้แก่ TiO_2 คาร์บอน และอนุภาคที่เกิดจากท่อไอเสียเครื่องยนต์ดีเซล

จากข้อมูลที่มีไม่มากนักในปัจจุบันพบว่าข้อมูลความเป็นอันตรายจากความเป็นพิษของวัสดุนาโนนั้นไม่ได้มีการประเมินอย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามสิ่งที่ควรพิจารณาในปัจจุบันประกอบด้วย

- พิษวิทยาของวัสดุนาโนนั้นไม่สามารถคาดการณ์จากพิษวิทยาของสารนั้น ๆ ที่มีขนาดใหญ่ได้เสมอไป
- สำหรับวัสดุนาโนบางชนิด มวลไม่ใช่ปริมาณที่เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การรับสัมผัส และได้มีการเสนอให้ใช้พื้นที่ผิวของวัสดุนาโนและจำนวนของอนุภาคนาโนในการวิเคราะห์แทน

ดังนั้นขีดจำกัดของการรับสัมผัสในสถานที่ปฏิบัติงาน (occupational exposure limit) สำหรับวัตถุขนาดใหญ่ที่มีลักษณะเป็นฝุ่นผงอาจไม่สามารถใช้สำหรับวัสดุนาโนที่มีส่วนประกอบทางเคมีเหมือนกันได้

7.2.3.2 อันตรายทางกายภาพ

อันตรายจากอัคคีภัยและระเบิดอันเนื่องจากวัสดุนาโนนั้นมีรายงานน้อยมาก หากอนุภาคนาโนก่อให้เกิดเหตุอัคคีภัยและระเบิดได้ จะมีความรุนแรงมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่หรือวัสดุขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบเพิ่มเติมเพื่อประเมินสมบัติการติดไฟ การระเบิด และการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุนาโน ขั้นตอนการทดสอบอันตรายเหล่านี้มีอยู่แล้วสำหรับการทดสอบวัสดุขนาดใหญ่ที่เป็นฝุ่นผงและสามารถนำมาใช้กับวัสดุนาโนได้ ขั้นตอนดังกล่าวประกอบด้วย การวัดอัตราการเผาไหม้ อุณหภูมิในการจุดติดไฟและสมบัติความเป็นระเบิด การลุกติดไฟของวัสดุนาโนนั้นประเมินตามมาตรฐาน ASTM E-918-83 Standard Practice for Determining Limits of Flammability of Chemicals at Elevated Temperature and Pressure สมบัติความเป็นระเบิดวิเคราะห์จากผลการทดสอบ Fallhammer และ Koenen ดังนั้นเมื่อมีข้อมูลอันตรายจากลักษณะทางกายภาพแล้วก็สามารถประเมินความเสี่ยงอันเกิดจากเหตุอัคคีภัยและการระเบิดได้โดยใช้เทคนิคที่มีอยู่ เนื่องจากข้อมูลความเป็นอันตรายของวัสดุนาโนมีอยู่อย่างจำกัด การแบ่งกลุ่มความเป็นอันตรายของวัสดุนาโนจึงอ้างอิงตามความเห็นของผู้เชี่ยวชาญ ระบบการติดฉลากระบุระดับอันตรายในสหภาพยุโรปจะประกอบด้วยข้อมูลดังนี้

(1) ระดับความรุนแรงของอันตราย ประกอบด้วย เป็นพิษมาก เป็นพิษ อันตราย กัดกร่อน และระคายเคือง

(2) ระดับความเสี่ยง เพื่ออธิบายระดับความเป็นอันตราย

ข้อมูลเกี่ยวกับการจำแนกความเป็นอันตรายนั้นสามารถดูได้จากหัวข้อที่ 5 อันตรายจากวัสดุนาโนและภาคผนวก ค. อันตรายของวัสดุนาโนต่อสุขภาพ (รายละเอียดเพิ่มเติม)

7.2.4 การประเมินการรับสัมผัส (exposure assessment)

การรับสัมผัสวัสดุนาโนเกิดขึ้นได้จากการรับสัมผัสโดยตรง ในกรณีของอนุภาคนาโนจะต้องพิจารณาแนวโน้มการปลดปล่อยของอนุภาคนาโนด้วย ซึ่งสามารถหาได้จากความสามารถของอนุภาคนาโนแต่ละชนิดที่เกิดการรับสัมผัสโดยตรงกับผิวหนังของมนุษย์หรืออวัยวะอื่น ๆ ได้ เช่น ปอด ปัจจัยที่ต้องพิจารณาสำหรับการปลดปล่อยอนุภาคนาโนในอากาศ ได้แก่ สมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ และกระบวนการแปรรูป ซึ่งสมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ประกอบด้วยขนาด การเคลือบผิว ประจุ การฟุ้งกระจาย เป็นต้น ในการพิจารณาวิธีการวิเคราะห์ ควรตรวจสอบว่าสถานะของวัสดุนั้น ๆ ด้วยว่าอยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลวหรือของแข็ง กระบวนการเชิงกล ได้แก่ การกวน การเจาะ การเลื่อย การบด การครูด และการตัด อาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอนุภาคนาโนและอนุภาคของวัสดุที่มีโครงสร้างนาโนสเกลกระบวนการอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อการรับสัมผัสได้แก่การฉีดเสปรย์ของเหลวที่มีส่วนประกอบของวัสดุนาโน กระบวนการที่ให้พลังงานสูงแก่วัสดุนาโนหรือวัสดุที่ก่อให้เกิดโครงสร้างนาโนเสกลได้ เช่น การใช้เลเซอร์สำหรับเจาะ การเชื่อมด้วยพลาสมา นอกจากนี้กระบวนการทางวิศวกรรมทั้งที่อยู่ในระบบปิด

และระบบเปิดล้วนแล้วแต่มีโอกาสในการรับสัมผัสวัสดุนาโนทั้งสิ้น ความเสี่ยงของการรับสัมผัสเกิดจากปัจจัยต่าง ๆ เช่นการใช้งานที่ไม่ถูกต้อง เครื่องมือทำงานผิดปกติ ความรู้เท่าไม่ถึงการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน และการขาดประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน

ในการประเมินการรับสัมผัสจำเป็นต้องเข้าใจภาพรวมของการรับสัมผัสที่เกิดขึ้นจริง การสูดดมและการซึมผ่านผิวหนังเป็นช่องทางทั่วไปของการรับสัมผัสในสถานที่ปฏิบัติงาน ส่วนการรับสัมผัสทางปากนั้นเกิดขึ้นน้อยมาก (แม้ว่าการบริโภคเป็นสวนหนึ่งของการรับสัมผัสทางการหายใจจากการกลืนเสมหะและการกลืนอนุภาคนาโนจากการหายใจเข้าไป) การรับสัมผัสทางปากมักเกิดอย่างไม่ตั้งใจจากมือที่สัมผัสกับวัสดุนาโน การรับสัมผัสผ่านทางกรรมพันธุ์นั้นมักเกิดด้วยอุบัติเหตุ (เช่น ทางเข็มฉีดยา) ผลการศึกษารายงานว่าอนุภาคนาโนไม่สามารถทะลุผ่านผิวหนังชั้นในของหมูได้ในขณะที่งานวิจัยอื่น ๆ แสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนสามารถผ่านหนังกำพร้าชั้นสตราตัม คอร์เนียม (stratum corneum) และเข้าสู่ชั้นผิวหนัง และ ชั้นผิวหนังบนสุดของหมูและมนุษย์ได้

การรับสัมผัสทางการหายใจสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีการวัด เช่นการนับจำนวนอนุภาค การวัดขนาด ในขณะที่การรับสัมผัสทางผิวหนังสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ตัวอย่างของกระดาษเช็ดมือ ทำการทดสอบทางเคมีและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ซึ่งวิธีการเหล่านี้มีความยุ่งยาก เช่น การทวนสอบ การสอบเทียบ และการประมาณค่าความไม่แน่นอน อย่างไรก็ตามขนาดอนุภาค จำนวน และการกระจายตัวเป็นปัจจัยที่สำคัญที่จำเป็น รวมถึงพื้นที่ผิวหรือข้อมูลสมบัติทางเคมี

ในกรณีที่ข้อมูลการรับสัมผัสไม่เพียงพอ สามารถนำเทคนิคเชิงคุณภาพมาใช้ประเมินได้ เช่น ใช้สมบัติการฟุ้งกระจายในการกำหนดโอกาสในการรับสัมผัส 3 ระดับ คือ ต่ำ ปานกลาง และสูง

การประเมินปริมาณการได้รับเข้าสู่ร่างกายนั้นเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ตัวอย่างจากภายในร่างกาย เช่น เนื้อเยื่อ ของเหลวจากร่างกาย และอากาศที่หายใจเข้าไป ในทางอาชีวอนามัยจึงกำหนดให้มีวิธีการที่ง่ายขึ้นโดยใช้ตัวอย่างจาก ผม ปัสสาวะ และอากาศที่หายใจออกมาแทน

การระบุปริมาณที่รับเข้าสู่ร่างกายทำได้โดยใช้การวัดปริมาณวัสดุนาโนที่สนใจ และหรือเมทาบอไลท์ของวัสดุนาโน นอกจากนี้ยังมีการใช้ “ตัวบ่งชี้ทางชีวภาพ” (biomarker) ซึ่งเป็นสารที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาระหว่างสารพิษกับระบบในร่างกายมนุษย์เป็นหลักฐานในการแสดงถึงการได้รับสัมผัสสารพิษของร่างกายหากตัวชี้วัดนั้น ๆ มีความสัมพันธ์อย่างจำเพาะกับสารพิษที่ได้รับเข้าสู่ร่างกาย โดยการวัดปริมาณตัวชี้วัดทางชีวภาพมีข้อดีคือสามารถให้ข้อมูลการรับสัมผัสได้ไม่ว่าการรับสัมผัสนั้นจะเกิดขึ้นผ่านทางเส้นทางใด การวัดปริมาณตัวชี้วัดยังสามารถนำมาใช้สำหรับการตรวจคัดกรองและตรวจติดตามพนักงานที่ทำงานกับวัสดุนาโนได้ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลการศึกษาตัวชี้วัดทางชีวภาพสำหรับการรับสัมผัสวัสดุนาโนนั้นยังอยู่ในช่วงเริ่มต้น และมีความซับซ้อนอันสืบเนื่องมาจากความหลากหลายทางฟิสิกส์และเคมีของวัสดุนาโน ซึ่งส่งผลให้การตอบสนองทางชีวภาพมีความหลากหลายไปด้วย จากการศึกษาการรับสัมผัสวัสดุนาโนที่มีความเป็นพิษต่ำและความสามารถในการละลายต่ำผ่านทาง

การหายใจ พบว่าเป็นสาเหตุให้เกิดการอักเสบ เช่น มีการเสนอให้ไนตริกออกไซด์ในลมหายใจออกของมนุษย์เป็นตัวชี้วัดทางชีวภาพของการเกิดกระบวนการอับเสบในร่างกาย

7.2.5 การอธิบายลักษณะของความเสี่ยง

การอธิบายลักษณะของความเสี่ยง ประกอบด้วย การทบทวนและการรวมข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนการชี้บ่งอันตราย การประเมินการตอบสนองต่อการรับสัมผัส และการประเมินการรับสัมผัส ค่าประมาณการความเสี่ยงเชิงปริมาณนั้นประเมินได้จากความไม่แน่นอนทางสถิติและทางชีวภาพ การอธิบายลักษณะของความเสี่ยงนั้นใช้ในการประเมินอันตรายและการรับสัมผัส ณ สถานที่ใด ๆ ว่ามีความเสี่ยงเกินเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และมีประชากรกลุ่มเสี่ยงหรือไม่ การจัดการความเสี่ยงอาจนำมาใช้เพื่อลดระดับ ความเสี่ยงให้ต่ำกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้มาตรการในการลดความเสี่ยงนั้นอาจเป็นการแนะนำให้กำจัดอนุภาคนาโนที่เป็นอันตรายหรือใช้สารอื่นทดแทน รวมถึงการปรับปรุงกระบวนการผลิต และ/หรือ การใช้การควบคุมทางวิศวกรรม มาตรการระดับองค์กร เช่น คู่มือความปลอดภัย PPE และ SOP

7.3 บทสรุป

การประเมินความเสี่ยงของการรับสัมผัสวัสดุนาโนในสถานที่ปฏิบัติงานนั้นประกอบด้วยการประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณและ/หรือเชิงคุณภาพ ในกรณีที่มีข้อมูลวิชาการจำกัดหรือวัสดุนั้นมีลักษณะเฉพาะ อาจทำการประเมินเชิงคุณภาพเพียงอย่างเดียวหากมีข้อมูลการรับสัมผัสและการตอบสนอง (เช่น พิษวิทยา และระบาดวิทยา) อาจสามารถทำการประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณได้ ในปัจจุบันข้อมูลการรับสัมผัสและอันตรายเชิงปริมาณสำหรับวัสดุนาโนมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้น ดังนั้นการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพสำหรับสถานที่ปฏิบัติงานในปัจจุบันจึงขึ้นอยู่กับความเห็นของผู้เชี่ยวชาญในการชี้บ่งอันตราย โอกาสการรับสัมผัสและการนำมาตรการความปลอดภัยที่เหมาะสมไปใช้งาน

8. แนวทางการจัดการ

8.1 บทนำ

เนื้อหาส่วนนี้กล่าวถึงวิทยาการที่มีในปัจจุบันเรื่องการควบคุมเพื่อลดหรือป้องกันการรับสัมผัสวัสดุนาโนสังเคราะห์ในสถานที่ปฏิบัติงาน โดยจะไม่กล่าวถึงสุขภาพและความปลอดภัย หรือข้อปฏิบัติที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนาโนที่เกิดจากกระบวนการทางธรรมชาติ อนุภาคนาโนที่เกิดโดยไม่ตั้งใจ เช่น ในกระบวนการเชื่อมหรือการใช้งานของผู้บริโภค แม้ว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้อาจเกี่ยวข้องกับวัสดุต่าง ๆ ข้างต้น การควบคุมการปลดปล่อยอนุภาคนาโนอยู่ในการปฏิบัติงานที่จัดทำขึ้นเพื่อป้องกันและควบคุมการรับสัมผัส เช่น ควันไฟจากกระบวนการเชื่อม และไอเสียจากเครื่องยนต์ดีเซล (อนุภาคนาโนที่เกิดโดยไม่ตั้งใจ) นั้นมีมานานแล้ว แต่การควบคุมสำหรับวัสดุนาโนจากการผลิตเป็นเรื่องใหม่ ซึ่งสามารถใช้วิธีการควบคุมอนุภาคขนาดเล็ก รวมทั้งอนุภาคนาโนที่เกิดโดยไม่ตั้งใจได้

แม้ว่าวิธีการควบคุมที่อธิบายในหัวข้อนี้เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันการรับสัมผัสอนุภาคนาโนจากการผลิตในสถานการณ์ที่ระบุไว้ แต่หลักฐานที่ใช้ยืนยันประสิทธิภาพของวิธีการควบคุมนั้นมีอยู่

อย่างจำกัด ดังนั้น ข้อแนะนำเกี่ยวกับวิธีการควบคุมที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันการรับสัมผัสที่กล่าวไว้นั้น จึงอยู่บนพื้นฐานข้อมูลและความรู้ที่มีอยู่ในปัจจุบัน

การนำข้อมูลวิธีการควบคุมเหล่านี้ไปใช้ช่วยให้บริษัท นักวิจัย และประชาชน สามารถป้องกันผลกระทบที่อาจเกิดต่อสุขภาพและความปลอดภัยซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการผลิต การจัดการ การใช้งาน และการกำจัดวัสดุนาโนจากการผลิต โดยครอบคลุมวัสดุนาโนและการใช้งานวัสดุนาโน

8.2 ความเกี่ยวข้องของการประเมินความเสี่ยงกับวิธีการควบคุม

ในการพิจารณาแนวทางการควบคุมที่เหมาะสมสำหรับอนุภาคนาโนในสถานที่ปฏิบัติงานจำเป็นจะต้องพิจารณาระดับความเสี่ยงของกิจกรรมในสถานที่ปฏิบัติงานเป็นอันดับแรก การประเมินความเสี่ยงได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 7. การประเมินความเสี่ยงด้านอาชีวอนามัย ซึ่งแนวทางการควบคุมควรสอดคล้องกับความเสี่ยงที่ทราบ ซึ่ง COSHH ได้แบ่งกลุ่มการควบคุมตามแถบควบคุม (Control Banding) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้เทคโนโลยีเดี่ยวในการควบคุมกลุ่มของอันตรายที่กำหนด โดยมีการพัฒนาการควบคุมสำหรับการรับสัมผัสสารเคมีผ่านทางการสูดดม ไว้ 4 กลุ่ม หรือ 4 แถบ ดังนี้

(1) ใช้แนวปฏิบัติงานที่ถูกสุขลักษณะในการทำงาน และมีระบบระบายอากาศแบบทั่วไป

(2) ใช้ระบบระบายอากาศแบบเฉพาะที่

(3) ใช้ระบบปิดในการปฏิบัติงาน

(4) ปฏิบัติตามคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญ

สมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ของวัสดุนาโนจากการผลิตอาจนำมาซึ่งความเสี่ยงต่อสุขภาพหากมีโอกาสได้รับในระหว่างปฏิบัติงาน นอกจากนี้ยังมีความเสี่ยงที่จะเกิดอัคคีภัยหรือระเบิดได้ในระหว่างกระบวนการผลิต การจัดการ การเก็บรักษา และการใช้งานวัสดุนาโนจากการผลิต อย่างไรก็ตามในปัจจุบันความเสี่ยงต่อสุขภาพและความปลอดภัยในการทำงานกับอนุภาคนาโนมีความไม่แน่นอน ดังนั้นจึงอาจไม่สามารถใช้ความเสี่ยงมากำหนดแนวทางการควบคุมได้ นอกจากนี้ในปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานในการกำหนดการรับสัมผัสในสถานที่ปฏิบัติงานสำหรับวัสดุนาโนแต่ละชนิดเพื่อใช้ในการกำหนดวิธีการปฏิบัติในการควบคุมได้

8.2.1 แนวทางการควบคุม

หากเราใช้หลักการป้องกันกับวัสดุนาโน มาตรการจัดการเพื่อป้องกันและลดความเสี่ยงที่มีประสิทธิภาพก็สามารถทำได้แม้ว่าวิทยาการเกี่ยวกับความเสี่ยงต่อสุขภาพและความปลอดภัยสำหรับวัสดุนาโนจากการผลิตจะมีไม่มาก ซึ่งเป็นวิธีการที่พึงปฏิบัติเพื่อควบคุมกระบวนการผลิต การใช้งาน การเก็บรักษา และการจัดการ โดยเฉพาะเมื่อความเสี่ยงต่อสุขภาพและความปลอดภัยมีความไม่แน่นอน และไม่มีมาตรฐานเรื่องการรับสัมผัสอนุภาคนาโนในสถานที่ปฏิบัติงาน ในพ.ศ. 2547 UK Royal Society and Royal Academy of Engineering ได้แนะนำให้ห้องปฏิบัติการวิจัยและโรงงานอุตสาหกรรมปฏิบัติต่ออนุภาคนาโนจากการผลิตและท่อนาโนเสมือนสารอันตราย กระบวนการป้องกันที่เข้มงวดควรนำมาใช้เพื่อป้องกันอนุภาคนาโนหลุดไปยังสภาพแวดล้อมในสถานที่ปฏิบัติงาน รวมถึงสภาพแวดล้อมภายนอก

และควรมีโปรแกรมการประเมินความเสี่ยงเพื่อลดการรับสัมผัสและจำนวนผู้ปฏิบัติงานที่ได้รับวัสดุนาโน ซึ่งหลักการป้องกันนี้ไม่ได้มีวัตถุประสงค์ให้เลิกใช้อนุภาคนาโนจนกว่าจะทราบอันตรายต่อสุขภาพและความปลอดภัยอย่างแท้จริง แต่ต้องการให้ผู้ปฏิบัติงานมีการป้องกันอย่างเหมาะสม

การเลือกแนวทางการควบคุมนั้นอยู่บนพื้นฐานความเข้าใจถึงความแตกต่างระหว่างอนุภาคนาโนและอนุภาคขนาดใหญ่ และข้อมูลเฉพาะของอนุภาคนาโนในกรณีที่มีข้อมูลวิธีการดำเนินการที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับกระบวนการที่ใช้และจุดมุ่งหมายของงานนั้น ๆ ยุทธศาสตร์การควบคุมอาจมาจากวิธีการที่ใช้สำหรับควบคุมอนุภาคนาโนที่เกิดโดยไม่ได้ตั้งใจ

ผลการวิจัยระบุว่าพื้นที่ผิวทั้งหมดของอนุภาคที่อยู่ในปอดเป็นปัจจัยหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณถึงความเป็นพิษของฝุ่นที่มีการละลายต่ำ หลักฐานเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนอาจเกิดปฏิกิริยาทางชีวภาพได้รุนแรงกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีองค์ประกอบทางเคมีต่อมวลที่เหมือนกัน ดังนั้นจึงอาจก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพมากกว่าเมื่อมีการสูดดมเข้าไป ผลการศึกษาจากสัตว์ทดลองพบว่าพยาธิสภาพในปอดได้แก่ มะเร็ง การอักเสบ การเกิดก้อนเนื้อ เส้นใย และการหายใจลำบาก อาจเกิดขึ้นเมื่อมีการรับสัมผัส CNT และฝุ่นผงของโลหะออกไซด์ กระบวนการทางเคมีหลายอย่างถูกเร่งปฏิกิริยาโดยใช้สารเคมีในปริมาณน้อย ซึ่งประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของสารนั้น ๆ ดังนั้นวัสดุนาโนซึ่งมีพื้นที่ผิวต่อมวลมากจึงมีความเป็นไปได้ที่จะมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาให้มีความรุนแรงและเร็วขึ้น หรือถึงขั้นทำให้เกิดการระเบิดได้ นั่นคือวัสดุนาโนหรือวัสดุทโครงสร้างนาโนจะมีอันตรายจากการติดไฟและระเบิดได้มากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกัน อย่างไรก็ตามในการพิจารณาความเสี่ยงจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุชนิดขนาดใหญ่ด้วย

เนื่องจากวัสดุนาโนไม่ได้ประกอบด้วยวัตถุเพียงชนิดเดียว แต่ประกอบไปด้วยวัตถุที่มีรูปร่าง ขนาด และองค์ประกอบที่มีความหลากหลาย ทำให้วัสดุนาโนมีสมบัติที่หลากหลาย เช่น ความเป็นพิษทางเคมี รูปร่าง ขนาด พื้นที่ผิว และความไวปฏิกิริยาของพื้นผิว ดังนั้นวัตถุนาโนหนึ่งอาจมีอันตรายต่อสุขภาพและความปลอดภัยมากกว่าวัตถุนาโนอื่น

ในอนาคตเมื่อความเข้าใจเรื่องความเสี่ยงต่อสุขภาพและความปลอดภัยมีมากขึ้น อาจมีการปรับมาตรการป้องกันเพื่อใช้กับวัสดุนาโนอย่างเฉพาะเจาะจงได้ เมื่อมีข้อมูลอันตรายต่อสุขภาพมากขึ้น การจัดกลุ่มความเสี่ยง และการควบคุม ถูกนำมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพโดยพิจารณาร่วมกับอันตรายต่อสุขภาพที่แตกต่างกันไป ดังนั้นในบางกรณีมาตรการควบคุมอาจมีการยืดหยุ่นมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณของวัสดุนาโนในกระบวนการผลิต ใช้งาน เก็บรักษา และจัดการเพิ่มสูงขึ้น ความเสี่ยงของความปลอดภัยอาจเพิ่มสูงตามไปด้วย

การวัดและการประเมินประสิทธิภาพของแนวทางการป้องกันเป็นแนวทางการควบคุมที่จำเป็นและสำคัญ อย่างไรก็ตามความสามารถในการวัดและประเมินประสิทธิภาพในปัจจุบันจำกัดอยู่เฉพาะอนุภาคนาโนบางชนิดเท่านั้น

8.3 การตรวจสอบวิธีการควบคุม

8.3.1 การป้องกันการรับสัมผัส

มาตรการป้องกันการรับสัมผัสและขั้นตอนการปฏิบัติงานที่เหมาะสมนั้นจำเป็นต่ออาชีวอนามัยและความปลอดภัย เนื่องจากกระบวนการผลิตและการใช้งานวัสดุนาโนมักมีความเสี่ยง ดังนั้นผู้บริหาร นักวิจัยและพนักงานอื่น ๆ ควรให้ความสำคัญต่อกระบวนการป้องกันซึ่งออกแบบมาเฉพาะสำหรับบริษัทหรือหน่วยงานวิจัยนั้น ๆ การจัดทำมาตรการป้องกันและการนำไปใช้ควรมีขั้นตอนที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันสุขภาพและความปลอดภัยของพนักงานและบุคคลในสถานที่ปฏิบัติงาน หน่วยงานหลายแห่งได้พัฒนามาตรการเฉพาะในการจัดการวัสดุนาโนขึ้น ซึ่งในการพัฒนามาตรการนั้นผู้บริหารขององค์กรควรระบุให้ชัดเจนถึงหน้าที่ความรับผิดชอบของแต่ละบุคคลในบริษัทเพื่อให้แน่ใจได้ว่าผู้บริหาร ทีมนักวิจัย และห้องปฏิบัติการได้เข้ามามีส่วนร่วม ซึ่งแนวทางการประเมินความเสี่ยงเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องมีโดยต้องพิจารณาวัสดุนาโนแต่ละชนิด รูปแบบ ความเป็นพิษ และอันตรายต่อความปลอดภัย และควรนำไปใช้กับกระบวนการเฉพาะ หน่วยงานที่ได้พัฒนามาตรการจัดการวัสดุนาโนพบว่าการป้องกันการรับสัมผัสขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

- รูปแบบของวัสดุ เช่น ผง ที่แขวนลอยหรืออยู่ในสารละลาย หรือฝังตัวในเมทริกซ์
- อันตรายจำเพาะ ได้แก่ การลุกติดไฟ ความเป็นพิษ สารก่อมะเร็ง หรือไวต่อปฏิกิริยา

มาตรการการป้องกันหรือการจัดการความเสี่ยงของการปลดปล่อยของวัสดุนาโนอาจประกอบด้วย

- การตรวจวัดและบันทึกสมรรถนะและประสิทธิภาพของเครื่องมือควบคุม
- การตรวจวัดการรับสัมผัสอนุภาคนาโนของสถานที่ปฏิบัติงาน
- การพัฒนาหลักเกณฑ์และวิธีการติดตั้งเครื่องควบคุมทางวิศวกรรม เช่น ตู้ครอบเครื่องมือ หรือระบบระบายอากาศ ที่ตำแหน่งซึ่งมีการปลดปล่อยอนุภาคนาโน
- การฝึกอบรมเกี่ยวกับอันตราย วิธีการปฏิบัติงาน คู่มือการใช้เครื่องมือ วิธีการในการจัดการวัสดุนาโน และมาตรการป้องกันที่ได้ผล
- จัดหา SDS จากผู้ผลิตหรือผู้จำหน่ายอนุภาคนาโนที่ใช้งาน SDS นี้ควรบอกถึงอันตรายต่อสุขภาพที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ และมาตรการในการป้องกันในสถานที่ปฏิบัติงาน อย่างไรก็ตามผลการตรวจสอบ SDS ที่มีอยู่สำหรับวัสดุนาโนจากการผลิตพบว่ามีข้อมูลไม่สมบูรณ์ และการนำข้อมูลดังกล่าวเพียงอย่างเดียวไปใช้อาจส่งผลให้มาตรการการป้องกันไม่สมบูรณ์ด้วย
- การพัฒนาขั้นตอนการดำเนินการ โดยอธิบายประเภทของ PPE ที่ควรมี เช่น เสื้อผ้า และอุปกรณ์ช่วยหายใจ เป็นต้น
- พัฒนาขั้นตอนการดำเนินการเพื่อระบุความถี่ในการเปลี่ยนหรือทิ้ง PPE เช่น ถุงมือ และเสื้อคลุม
- บำรุงรักษาอุปกรณ์ช่วยหายใจ รวมถึงทำการเก็บรักษาและเก็บบันทึกอย่างเหมาะสม
- พัฒนาขั้นตอนการทำความสะอาดและกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกจากเครื่องมือและตู้ครอบ

- ขอข้อแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญ เช่น นักอาชีวอนามัย เป็นต้น ในการรับรองสภาพแวดล้อมที่ปลอดภัยในการทำงาน
- ดำเนินโครงการวิจัยด้านความปลอดภัยและสุขภาพกับนาโนเทคโนโลยี (โครงการวิจัยอาจดำเนินการร่วมกับหน่วยงานของภาครัฐ)
- เปรียบเทียบมาตรฐานและการแบ่งปันความรู้ระหว่างหน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวกับวัสดุนาโน

8.3.2 แนวทางการควบคุม

โดยทั่วไปนั้นแนวทางการควบคุมความเสี่ยงประกอบด้วยการกำจัดอันตราย การใช้วัสดุแทนที่ การใช้เทคนิคทางวิศวกรรมในการควบคุม ระบบบริหารควบคุมและการใช้ PPE ซึ่งแนวทางเหล่านี้ควรพิจารณาตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบกระบวนการทางอุตสาหกรรม

เมื่อเรียงลำดับเทคนิคตามความนิยมจากมากไปน้อย ดังนี้ การกำจัด การแทนที่ การควบคุมทางวิศวกรรม การบริหารจัดการ และการใช้ PPE แต่ในทางปฏิบัติ ควรที่จะใช้หลากหลายเทคนิคประกอบกันเพื่อให้ได้แนวทางที่ดีที่สุดเพื่อควบคุมการรับสัมผัสในสถานที่ปฏิบัติงาน

แม้ว่าแนวปฏิบัติในการควบคุมสำหรับลดการหายใจหรือสูดดมฝุ่นในสถานที่ปฏิบัติงานจะเป็นที่ทราบกันดีและมีการใช้งานกันโดยทั่วไป แต่ประสิทธิภาพของวิธีการเหล่านี้ในการควบคุมอนุภาคนาโนและวัสดุโครงสร้างนาโนนั้นยังอยู่ในระหว่างการประเมิน แต่กระบวนการนี้ก็เป็นประโยชน์สำหรับใช้เป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนามาตรการป้องกันองค์กรที่ทำงานกับวัสดุนาโน ซึ่งมักใช้กระบวนการความปลอดภัยในการทำงานกับสารเคมีโดยเพิ่มความเข้มงวดให้มากขึ้น และมีการอ้างอิงถึงพิษวิทยา และสมบัติเคมี-ฟิสิกส์ของวัสดุ เช่นในเอกสาร ICON ได้มีการระบุชนิดของถุงมือให้เลือกใช้ตามชนิดของตัวทำละลาย

8.3.3 การกำจัดอันตรายด้วยการออกแบบอย่างมีประสิทธิภาพ

การออกแบบกระบวนการที่มีประสิทธิภาพส่งผลกระทบอย่างมากต่อการป้องกันการปลดปล่อยอนุภาคนาโนในสถานที่ปฏิบัติงาน ในบางครั้งอาจจำเป็นต้องปรับปรุงระบบภายหลังเพื่อให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ในการออกแบบควรคำนึงถึงตำแหน่งที่ตั้งของโรงงาน การติดตั้ง กระบวนการการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ และสถานที่ทำงาน โดยผู้ออกแบบสามารถสร้างผลกระทบได้ดังนี้

- จำแนกปัจจัยความเสี่ยงของการรับสัมผัสเฉพาะกระบวนการผลิต แล้วจึงออกแบบเพื่อกำจัดหรือลดความเสี่ยงนั้น ๆ
- ออกแบบและแนะนำมาตรการควบคุม

กิจกรรมที่พิจารณาในการออกแบบประกอบด้วยการสร้างแบบอาคาร การวางแผนจัดซื้อ การผลิต การบรรจุภัณฑ์ โกดังสินค้า การขนส่งทางเรือ และอื่น ๆ นอกจากนี้ควรพิจารณาถึงข้อกำหนดตามระเบียบและข้อบังคับควรออกแบบเพื่อกำจัดสภาวการณ์ที่มีความเสี่ยง การออกแบบที่มีประสิทธิภาพจะช่วยป้องกันการเกิดฝุ่นและละอองลอยได้

ในส่วนของการออกแบบระบบควบคุมทางวิศวกรรมนั้นกระบวนการที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดอนุภาคนาโนที่มีขนาดต่างกันซึ่งอาจไม่ได้มีเฉพาะอนุภาคนาโนแต่รวมไปถึงอนุภาคของวัสดุโครงสร้างนาโน เช่น อนุภาคเกาะก้อนแบบหลวม ความเร็ว (ในการตกกระทบ ตรวจจับ และเคลื่อนที) โดยขึ้นอยู่กับธรรมชาติของกระบวนการและขนาดอนุภาคที่เกิดขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวระบบควบคุมทางวิศวกรรมจึงจำเป็นต้องมีการป้องกันหรือจำกัดการปลดปล่อย หรือการสะสมของอนุภาคนาโนในสภาวะแวดล้อมการทำงาน ดังนั้นตู้ครอบและระบบระบายอากาศควรออกแบบตามลักษณะสมบัติและสถานะของอนุภาคนาโนและอนุภาคของวัสดุโครงสร้างนาโน

หลักการพื้นฐานของการออกแบบที่ดีคือการหลีกเลี่ยงสถานการณ์ที่เกิดระเบิดได้ หลีกเลี่ยงฝุ่นที่มีโอกาสระเบิด ในกรณีเลวร้ายสุดจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ป้องกันการระเบิดพร้อมใช้งาน นอกจากนี้ควรออกแบบอาคารโดยแยกพื้นที่ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุอันตรายออกไป

8.3.4 การหาวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์ การแปรรูป และเครื่องมือแทนที่

การแทนที่โดยทั่วไปแล้วเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่งในการลดความเสี่ยงต่อสุขภาพและความปลอดภัยในสถานที่ปฏิบัติงาน แม้ว่าสมบัติเฉพาะทางเคมี-ฟิสิกส์ของอนุภาคนาโนแต่ละชนิดจะมีความจำเพาะและทำให้การแทนที่ด้วยวัสดุอื่นทำได้ยากแต่ความจำเพาะนี้ทำให้วัสดุนาโนสามารถใช้งานและมีประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ การทดแทนวัสดุนาโนในกระบวนการแปรรูปมีดังนี้

(1) การแทนที่วัตถุดิบที่เป็นพิษมากด้วยวัตถุดิบที่เป็นพิษน้อยกว่า

(2) การแทนที่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นพิษมากด้วยผลิตภัณฑ์ที่เป็นพิษน้อยกว่า

(3) การเปลี่ยนลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์หรือวัตถุดิบ เช่น ใช้ในรูปแขวนลอยครีมเม็ดเล็ก ๆ หรือวัสดุเชิงประกอบ แทนการใช้ผงฝุ่นหรือละอองลอย

(4) การเปลี่ยนวิธีการแปรรูปเป็นวิธีการควบคุมความเสี่ยงที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด เช่น เปลี่ยนกระบวนการแปรรูปแบบแห้งมาเป็นการแปรรูปแบบเปียก และการใช้น้ำเพื่อลดการปลดปล่อยฝุ่นจากวัสดุแห้งที่หลุดออกมาในกระบวนการแปรรูปหรือการขนถ่าย

(5) การแทนที่เครื่องมือที่ต้องใช้วัสดุที่เป็นพิษหรือทำให้เกิดวัสดุที่เป็นพิษ ด้วยเครื่องมือที่ใช้วัสดุที่เป็นพิษหรือทำให้เกิดวัสดุที่เป็นพิษในปริมาณน้อยลง หรือมีความเป็นพิษน้อยลง

(6) การเปลี่ยนเครื่องมือเพื่อลดหรือเลี่ยงการปลดปล่อย

(7) การปรับปรุงอนุภาค เช่น การเคลือบหัวหมุดควอนตัมซึ่งจากการศึกษาพบว่าไม่ปรากฏความเป็นพิษทางพันธุกรรมของหัวหมุดควอนตัมเมื่อเคลือบด้วยซิลิกา อีกทั้งสามารถป้องกันการทำปฏิกิริยากับ แคดเมียม สังกะสี ซิลีเนียม และซัลเฟอร์ กับโปรตีน และ DNA ในนิวเคลียสได้อย่างมีประสิทธิภาพ

(8) การพิจารณาว่าวัสดุนาโนนานั้น ๆ จำเป็นต่อการใช้งานหรือการผลิตหรือไม่

8.3.5 เทคนิคการควบคุมทางวิศวกรรม

สำหรับสถานที่ปฏิบัติงานโดยทั่วไปควรเลือกเทคนิคการควบคุมโดยพิจารณาจากระดับความเสี่ยง COSHH ได้แนะนำแนวทางในการควบคุมสิ่งปนเปื้อนในอากาศไว้ดังนี้

(1) ความเสี่ยงสูงสุดให้ขอคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญ

(2) ความเสี่ยงสูงให้จำกัดบริเวณ

(3) ความเสี่ยงน้อยให้ ใช้การควบคุมทางวิศวกรรม เช่น ระบบระบายอากาศ

(4) ความเสี่ยงต่ำสุดให้การใช้ระบบระบายอากาศทั่วไป

ในปัจจุบันความเข้าใจเกี่ยวกับระดับความเสี่ยงของอนุภาคนาโนจากการผลิตและวัสดุโครงสร้างนาโนส่วนใหญ่มีอย่างจำกัดซึ่งได้แนะนำไปแล้วว่าในกรณีที่มีความไม่แน่นอนในความเสี่ยง ควรนำหลักปลอดภัยไว้ก่อนมาประยุกต์

ระบบการควบคุมทางวิศวกรรมสามารถนำมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพในการควบคุมฝุ่นผงและแก๊ส และใช้กันโดยทั่วไปในอุตสาหกรรมเคมีและอุตสาหกรรมอื่น ๆ การควบคุมทางวิศวกรรมนั้น มีการใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อลดการรับสัมผัสควันจากการเชื่อม วิธีการกำจัดควันจากการเชื่อมได้แก่ การแยกโต๊ะ การแยกห้อง การจัดทำระบบระบายอากาศ และการแยกแบบ on-gun extraction เป็นต้น การระบายอากาศโดยทั่วไป เช่น การระบายอากาศโดยการเจือจาง หรือการระบายอากาศด้วยการเคลื่อนที่ ควรนำมาใช้ในการกำจัดควันจากการเชื่อมเพื่อลดระดับควันในพื้นที่ลง ระดับของการป้องกันของวิธีการเหล่านี้จะแตกต่างกันไปและขึ้นอยู่กับการใช้งานและการบำรุงรักษาที่เหมาะสม การควบคุมทางวิศวกรรมในลักษณะนี้มักนำมาใช้กับอุตสาหกรรมผลิตคาร์บอนแบล็ก

การควบคุมทางวิศวกรรมที่ใช้กันในหน่วยงานที่ทำงานกับวัสดุนาโนนั้นมีรายงานในผลการสำรวจของ ICON พบว่าโดยวิธีการควบคุมทั้งหมดไม่ได้ทำเพื่อลดการรับสัมผัสอนุภาคนาโนของผู้ปฏิบัติงาน แต่ทำเพื่อรักษาความสะอาดของวัสดุ วิธีการควบคุมที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นเทคโนโลยีที่มีจำหน่าย

8.3.5.1 การจัดทำระบบปิดสำหรับกระบวนการแปรรูป (ตู้ครอบและการแยกส่วน)

การจัดทำตู้ครอบและการแยกส่วนของกระบวนการสามารถลดการปลดปล่อยอนุภาคเข้าสู่สภาวะแวดล้อมในสถานที่ปฏิบัติงานในระหว่างกระบวนการผลิตหรือการใช้งานได้ วิธีการนี้ควรนำไปใช้ในกระบวนการที่มีความเสี่ยงสูงต่อสุขภาพและความปลอดภัย โดยสามารถควบคุมการปลดปล่อยอนุภาคได้ดีกว่าการทำงานในระบบเปิด แต่ยังคงต้องมีอุปกรณ์สำหรับบำบัดของเสียในกรณีที่จำเป็น

แม้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเสี่ยงกับวิธีการจัดการวัสดุนาโนนั้นมีความไม่ชัดเจน แต่สำหรับวัสดุที่มีหลักฐานบ่งชี้ว่าควรหลีกเลี่ยงการรับสัมผัสนั้น จะต้องนำวิธีการจำกัดบริเวณมาประยุกต์ การดำเนินการทำได้โดยจัดให้วัสดุอยู่ในบริเวณเฉพาะมีระบบระบายอากาศเพื่อป้องกันการปนเปื้อนกับส่วนงานอื่น ตัวอย่างการแยกส่วนงานได้แก่ การใช้ระบบปิดแบบครบวงจร การใช้หุ่นยนต์และทำตู้ครอบเครื่องมือ ในบางสถานการณ์ที่กระบวนการแปรรูปมีมลพิษสูง ควรแยก

ผู้ปฏิบัติงานออกจากสถานีและทำการควบคุมระบบแบบรีโมทแทน ผู้ปฏิบัติงานควรอยู่ในพื้นที่หรือห้องควบคุมที่มีคุณภาพอากาศดีเพื่อสุขภาพและความปลอดภัย

การป้องกันสภาวะแวดล้อมและผู้ปฏิบัติงานขั้นสูงสุดสามารถทำได้โดยใช้ตู้ปลอดเชื้อระดับ 3 (BSC Class III) ซึ่งออกแบบมาสำหรับการทำงานกับสารติดเชื้อทางจุลชีววิทยาและกระบวนการที่อันตราย ตู้ปลอดเชื้อนี้มีลักษณะเป็นระบบปิดที่อัดอากาศไม่มีหน้าต่างที่เปิดได้การนำวัสดุเข้าไปในตู้ปลอดเชื้อนี้จะต้องทำผ่านถังบรรจุของเหลวซึ่งเข้าถึงได้ทางพื้นตู้ หรือตู้ที่มีประตูสองชั้น (เช่น เครื่องอบความร้อนฆ่าเชื้อ) เพื่อป้องกันการปนเปื้อนขณะใช้งาน และสามารถนำวัสดุจากในตู้ปลอดเชื้อออกมาภายนอกได้อย่างปลอดภัย อากาศที่ผ่านเข้าและออกจากห้องปลอดเชื้อจะผ่านแผ่นกรอง HEPA ก่อน โดยอากาศที่ปล่อยออกจากตู้จะผ่านแผ่นกรอง HEPA 2 ตัว หรือแผ่นกรอง HEPA 1 ตัวกับเตาเผาอากาศ การไหลของอากาศควบคุมด้วยระบบไอเสียแบบเฉพาะที่เป็นอิสระเพื่อรักษาความดันภายในตู้ให้ต่ำกว่าภายนอก ถุงมือยางชนิดใช้กับงานหนักจะมีติดอยู่กับตู้เพื่อใช้ในการจัดการวัสดุภายในตู้ แม้ว่าจะสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างจำกัดในขณะที่ใช้ถุงมือ แต่ก็เป็นการป้องกันผู้ใช้จากการสัมผัสวัสดุอันตรายโดยตรงและทำให้เกิดความปลอดภัยสูงสุด

โดยทั่วไปการปิดล้อมแหล่งกำเนิด (เช่น การแยกแหล่งกำเนิดออกจากผู้ปฏิบัติงาน) ควรมีประสิทธิภาพในการจับวัสดุนาโนในอากาศ โดยพิจารณาจากการเคลื่อนที่และพฤติกรรมของอนุภาคนาโนในอากาศ

วัสดุต่าง ๆ ได้แก่ คาร์บอนแบล็ก ควันซิลิกา TiO_2 ที่เป็นนาโนสเกล โลหะและโลหะออกไซด์ที่เป็นนาโนสเกล เกิดขึ้นในกระบวนการที่เป็นระบบปิดและมีการใช้ตู้ครอบและแยกส่วนการทำงานอย่างชัดเจน รายงานของ ICON ระบุว่าองค์กรหลายแห่งที่ทำงานเกี่ยวกับวัสดุ นาโน มีรายงานการใช้ห้องสะอาด (clean room) โดยแยกส่วนของระบบ HVAC ออกจากกัน นอกจากนี้ยังรายงานถึงการใช้ถุงควบคุมบรรยากาศ (glove bag) และกล่องควบคุมบรรยากาศ (glove box) และระบบท่อปิด ในการแยกวัสดุตกค้างไปเก็บในระบบแยกเก็บ ปัญหาที่มักพบเมื่อใช้ถุงควบคุมบรรยากาศ คือการเกิดไฟฟ้าสถิต จึงอาจก่อให้เกิดการติดไฟ หรือระเบิดได้ข้อมูลเกี่ยวกับการควบคุมและการแยกส่วนนั้นรวบรวมไว้ในตารางที่ 1

เมื่อการปิดล้อมเกิดการรั่วไหล อนุภาคนาโนสามารถหลุดออกไปสู่ภายนอกและกระจายไปทั่วโรงงานได้ ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาสมบัติทางอากาศพลศาสตร์ (aerodynamic property) ของอนุภาคนาโนว่ามีความคล้ายกับสมบัติของแก๊สมากเพียงใด จากผลการศึกษาพบว่าอนุภาคขนาด 10 nm มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำกว่าโมเลกุลของไนโตรเจนหรือออกซิเจนซึ่งมีขนาดประมาณ 0.3 nm

เมื่อกระบวนการแพร่เกิดขึ้น อนุภาคจะเกาะกันแบบหลวมทำให้การกระจายตัวในอากาศลดลง อย่างไรก็ตามการรับสัมผัสทางการหายใจของอนุภาคเกาะก้อนแบบหลวมยังอาจเกิดขึ้นได้ในระหว่างกระบวนการกู้คืนอนุภาคนาโน การบรรจุ และการบำรุงรักษาและทำความสะอาด

ตารางที่ 1 รายละเอียดของการควบคุมด้วยการปิดล้อมและแยกส่วนโดยใช้อุปกรณ์เสริม (ข้อ 8.3.5.1)

การควบคุม	รายละเอียด
ใช้ถังปิดผนึกสนิทสำหรับเก็บวัสดุนาโนจากถังปฏิกรณ์	ถังปฏิกรณ์ทำงานภายใต้สุญญากาศ และมีการเก็บแบบอัตโนมัติภายในระบบปิดล็อคอากาศ (air lock) ระบบล็อคอากาศจะทำให้อนุภาคตกค้างถูกกำจัดได้ด้วยสุญญากาศ ระบบนี้จะต้องสร้าง ณ สถานที่ปฏิบัติงาน
สังเคราะห์วัสดุนาโนในระบบปิด	มีการระบายอากาศอัตโนมัติก่อนเปิดและมีระบบทำความสะอาดด้วยตัวเองเพื่อกำจัดวัสดุตกค้าง ระบบนี้เหมาะกับการใช้ในตู้ดูดควัน
ปรับความดันห้องให้มีความดันมากกว่าภายนอก	ห้องสะอาดที่มีค่าผลต่างความดันเป็นบวกจะสามารถระบายอากาศออกไปยังพื้นที่ที่มีความดันต่ำกว่าได้
ใช้เครื่องสูบแบบพกพาสำหรับดูดของเหลวเข้าถังเก็บของเสีย	เพื่อป้องกันการรั่วไหลและลดการเกิดละอองลอยของวัสดุ เครื่องสูบของไหลแบบบีบจะทำให้เกิดละอองลอยน้อยกว่าเครื่องความดันสูง
การใช้ระบบการกลั่นเพื่อระเหยตัวทำละลายในคอลลอยด์ในระบบปิดที่ป้องกันการระเบิด	ระบบปิดล้อมนี้ออกแบบมาโดยคำนึงถึงโอกาสการระเบิดของวัสดุนาโน
ใช้อุปกรณ์สำหรับกระจายเพื่อเปิดบรรจุภัณฑ์ของอนุภาคนาโนและนำวัสดุเข้าถังปฏิกรณ์	เพื่อลดการจัดการวัสดุที่ส่งผล อุปกรณ์กำจัดบรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้วโดยการส่งไปยังถังของเสีย เมื่อใช้อุปกรณ์นี้ร่วมกับแผ่นกรอง HEPA ทำให้ได้กระบวนการที่ปลอดจากการรับสัมผัสและการปลดปล่อย
การใช้ระบบควบคุมแบบรีโมทกับเครื่องผลิตวัสดุนาโน	วิธีการนี้จะทำให้เครื่องมือสามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมที่แยกสัดส่วน เป็นระบบปิดที่มีระบบระบายอากาศเข้า-ออกเพื่อทำ ความสะอาดหรือการบำรุงรักษาจะอนุญาตให้ทำได้เฉพาะบุคคลที่ผ่านการฝึกอบรมและสวมเครื่องช่วยหายใจเท่านั้น
การใช้ระบบเตือนภัยในกระบวนการผลิตวัสดุนาโน	ภายในระบบปิดจะมีอุปกรณ์รับรู้ (sensor) 2 ชุดสำหรับวัดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจนและความดัน ถ้าอุปกรณ์รับรู้ตัวใดตัวหนึ่งถูกกระตุ้นระบบจะหยุดการทำงานเพื่อป้องกันการหลุดรอดของวัสดุนาโนเนื่องจากความผิดพลาดของเครื่องมือหรืออุบัติเหตุ

8.3.5.2 การตรวจจับแหล่งที่มาของมลพิษ

ในกรณีที่ไม่สามารถใช้ระบบปิดได้ ควรหลีกเลี่ยงกิจกรรมที่ทำให้เกิดฝุ่นหรือละอองลอย อย่างไรก็ตามในบางกระบวนการอาจไม่สามารถหลีกเลี่ยงการเกิดฝุ่นและละอองลอยได้ การตรวจจับแหล่งที่มาของมลพิษเหล่านี้ เช่น การใช้ LEV จึงเป็นทางเลือกที่สามารถป้องกันการแพร่กระจายของวัสดุดังกล่าวในสถานที่ปฏิบัติงาน การปนเปื้อนในพื้นที่ทำงาน และการสูดดมโดยผู้ปฏิบัติงานได้

ประสิทธิภาพของระบบ LEV สัมพันธ์กับคุณภาพและประสิทธิภาพของการออกแบบ การบำรุงรักษาและความถี่ในการใช้งาน ระบบระบายอากาศจะต้องผ่านการออกแบบ ทดสอบ และบำรุงรักษาอย่างเหมาะสมตามแนวทางที่แนะนำ เช่น แนวทางที่สอดคล้องตาม ACGIH กำหนดไว้ว่าระบบการกักเก็บที่มีประสิทธิภาพต้องผ่านการตรวจสอบและจดบันทึกทุกวัน ควรติดตั้งระบบการตรวจวัดในกระบวนการที่สำคัญ (เช่น หลังตู้ดูดควัน ผิวหน้าของแผ่นกรอง) ควรตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบระบายอากาศเมื่อติดตั้งใหม่เพื่อให้เกิดความมั่นใจ กระบวนการที่แตกต่างกันทำให้เกิดอนุภาคที่มีขนาดต่าง ๆ กัน โดยอาจมีขนาดนาโนสเกลถึงอนุภาคเกาะก้อนแบบหลวมขนาดใหญ่ ความเร็ว (ในการตกกระทบ ตรวจจับและเคลื่อนที่) ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของกระบวนการและขนาดอนุภาคที่เกิดขึ้น ระบบที่ออกแบบมาดีจะใช้งานได้ดีกับวัสดุนาโนสังเคราะห์ในอากาศ อย่างไรก็ตามหากความเร็วปะทะสูงมาก อาจส่งผลให้เกิดความแปรปรวนของอากาศ ซึ่งทำให้วัสดุสามารถหลุดออกจากตู้ดูดควันได้ และเกิดความเสี่ยงในการรับสัมผัสทางลมหายใจ และวัสดุนาโนที่อยู่ในรูปฝุ่นผงหลุดไปยังระบบระบายอากาศเสียได้ดังนั้นก่อนที่จะทำการบำรุงรักษาเครื่องมือ ควรทำความสะอาดด้วยสุญญากาศที่มีระบบการกรองประสิทธิภาพสูงและควรเช็ดทำความสะอาดแบบเปียก

การลดมลภาวะโดยการตรวจจับแหล่งกำเนิดด้วยระบบความดันเป็นลบเป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสำหรับใช้ในการทำงานในระบบวงจรเปิดได้แก่ กระบวนการผสม การคืนกลับการบรรจุภัณฑ์ หรือการชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ การตรวจจับแหล่งกำเนิดมักใช้กับการเชื่อม การตัดและการพ่นโลหะ กระบวนการเหล่านี้ใช้กันมานานมากและมักก่อให้เกิดอนุภาคที่มีขนาดนาโนสเกลในปริมาณมาก

จากผลการสำรวจของ ICON ตู้ดูดควันเป็นการควบคุมทางวิศวกรรมที่มีการนำมาใช้งานมากที่สุดสำหรับจัดการวัสดุนาโนตู้ดูดควันถูกนำมาใช้กับวัสดุนาโนหลายชนิด ได้แก่ ผงนาโน CNT การกระจายตัวแบบคอลลอยด์ ฟูเลอรีนส์ หัวหมุดควอนตัม พอลิเมอร์ ลวดนาโน ผลึกนาโน และคาร์บอนแบล็ก ระบบกรองอากาศเสียนิยมใช้ในตู้ดูดควัน แผ่นกรองมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ได้แก่ ชนิด HEPA ชนิด non-HEPA ตัวดูดซับเพื่อดูดวัสดุเคมีอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ และไส้กรองขนาดเล็กกว่าไมโครเมตรสำหรับกันอนุภาคนาโนที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 nm

BSC ได้รับการออกแบบมาเพื่อป้องกันอันตรายจากสารเคมีอันตราย และมีการนำไปใช้ในองค์กรที่มีการใช้วัสดุนาโน BSC Class I และ Class II ใช้ในการสกัดร่วมกับแผ่นกรอง HEPA ลักษณะของ BSC แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบลักษณะของ BSC

(ข้อ 8.3.5.2)

BSC Class	ความเร็วตกกระทบ ($m\ s^{-1}$)	รูปแบบการไหลของอากาศ	การใช้งาน	
			สารเคมีเป็นพิษที่ไม่ระเหย และนิวไคลด์กัมมันตรังสี	สารเคมีเป็นพิษที่ระเหย และนิวไคลด์กัมมันตรังสี
I	0.381	เข้าด้านหน้าผ่าน HEPA ไปสู่ภายนอก หรือจากภายในห้องโดยผ่าน HEPA	ใช่	เมื่อระบายอากาศเสียสู่ภายนอก
II, A1	0.381	หมุนเวียนภายใน 70%โดยผ่าน HEPA และอีก 30% ปล่อยผ่าน HEPA กลับไปในห้องหรือโดยปล่องควัน	ใช่ (ในปริมาณน้อย)	ไม่ใช่
II, B1	0.508	หมุนเวียนภายใน 30% และระบายออกอีก 70% อากาศที่ออกจากตู้จะต้องผ่าน HEPA	ใช่	ใช่ (ในปริมาณน้อย)[ก,ข]
II, B2	0.508	ไม่มีการหมุนเวียนอากาศ อากาศทั้งหมดจะระบายสู่ภายนอกโดยผ่าน HEPA	ใช่	ใช่ (ในปริมาณน้อย)[ก,ข]
II, A2	0.508	เหมือน II,A1 แต่ความเร็วของอากาศเข้าเป็น 0.508 m/s และความดันภายในตู้ต้องต่ำกว่าความดันในห้อง อากาศเสียส่งออกข้างนอกโดยปล่องควัน	ใช่	เมื่อปล่อยอากาศเสียสู่ภายนอก (เดิมเป็น“B3”) (ในปริมาณน้อย)[ก,ข]
III	N/A	อากาศเข้าต้องผ่านการกรองด้วย HEPA อากาศเสียต้องผ่าน HEPA 2 ชั้นซ้อนกัน	ใช่	ใช่ (ในปริมาณน้อย)[ก,ข]
[ก] การติดตั้งต้องมีท่อชนิดพิเศษที่เชื่อมต่อภายนอก มีตลับกรองถ่าน และมอเตอร์ป้องกันไฟ (ป้องกันระเบิด) และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ภายในตู้ ไม่ควรระบายอากาศจาก BSC Class I หรือ Class II(A2) ไปในห้องเมื่อใช้สารระเหย				
[ข] ไม่ควรให้ความเข้มข้นของสารเคมีเข้าใกล้เกณฑ์ต่ำสุดที่จะเกิดการระเบิดของสารเคมีนั้น ๆ				

ตู้ที่มีอากาศไหลแบบเรียบ (laminar flow) ไม่จัดว่าเป็น BSC เนื่องจากไม่ได้ถูกออกแบบให้สามารถปกป้องผู้ปฏิบัติงานหรือสภาวะแวดล้อมจากสารเคมีอันตรายได้ แต่ออกแบบมาเพื่อรักษาความสะอาดให้กับวัสดุ โดยอากาศที่ผ่านการกรองด้วยแผ่นกรอง HEPA จะผ่านไปยังวัสดุแล้วไหลออกทางด้านหน้าตู้ซึ่งเป็นบริเวณที่ผู้ปฏิบัติงานอยู่

8.3.5.3 การระบายอากาศทั่วไป

การระบายอากาศทั่วไปคือการเจือจางอากาศในสภาวะแวดล้อมที่ทำงานและนำสิ่งปนเปื้อนออกไปสู่ภายนอก หากใช้การระบายอากาศแบบทั่วไปสำหรับควบคุมทางวิศวกรรมเพียงอย่างเดียวจะทำให้ผู้ปฏิบัติงานได้รับวัสดุนาโนในขณะทำงานได้ หากไม่สามารถใช้ระบบ LEV ในกระบวนการที่เป็นระบบเปิดได้ ควรนำระบบการระบายอากาศแบบแทนที่ (displacement ventilation) มาใช้เพื่อลดระดับของวัสดุนาโนในพื้นที่โดยมีการสกัดที่ระดับความสูงหลังคาหรือเพดาน

8.3.5.4 การหมุนเวียนและการกรองอากาศ

การกรองมีบทบาทสำคัญในการควบคุมการรับสัมผัสอนุภาคในอากาศ การควบคุมทางวิศวกรรมมักใช้แผ่นกรอง HEPA เพื่อทำความสะอาดอากาศก่อนที่อากาศนั้นจะหมุนเวียนกลับไปในสถานที่ปฏิบัติงาน หรือก่อนระบายออกสู่บรรยากาศ แผ่นกรองเหล่านี้เป็นการกรองเชิงกล จากผลการศึกษาพบว่าระบบระบายอากาศที่ออกแบบมาอย่างดีและมีแผ่นกรอง HEPA สามารถกำจัดอนุภาคนาโนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ถ้ามีการใช้แผ่นกรอง HEPA ในระบบเก็บกักฝุ่นต้องใช้ร่วมกับเครื่องกรองอากาศ หากแผ่นกรองติดตั้งไม่ดีทำให้อนุภาคเคลื่อนที่โดยไม่ผ่านแผ่นกรอง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกรองต่ำกว่าที่ควรจะเป็น

ในบางกระบวนการที่จำเป็นต้องใช้อากาศใหม่ ต้องมีการดูดเอาอากาศบางส่วนที่ใช้ในการเก็บและการกรองออกไป และอากาศที่ระบายออกไปนี้ต้องผ่านการกรองหลายขั้นด้วยตัวดูดซับแบบเปียกหรือตัวตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิต การตรวจจับที่ใช้หลักการดึงดูดด้วยไฟฟ้าสถิตนั้นสามารถใช้กับอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ การทำความสะอาดแผ่นเก็บทำได้โดยการฉีดของเหลวลงบนแผ่นเก็บด้วยความแรง

การกรองประกอบด้วยกลไกหลายอย่าง โดยมีการจับอนุภาคโดยเส้นใยของแผ่นกรองซึ่งเป็น การแยกอนุภาคออกจากอากาศที่มีประสิทธิภาพ เมื่อละอองลอยเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในแผ่นกรองโดยการเคลื่อนที่ของอนุภาคอาจอยู่ในแนวลมหรือแตกต่างจากแนวลม (เช่น โดยการแพร่) การจับอนุภาคเชิงกลสามารถเกิดขึ้นได้โดย

(1) การสกัดกั้นโดยตรง เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ในทิศของลมส่งผลให้มีการจับอนุภาคโดยเส้นใยแผ่นกรองเมื่ออนุภาคนั้นตกกระทบ

(2) การตกกระทบด้วยแรงเฉื่อย เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่แตกต่างจากทิศของลมเกิดการจับอนุภาคโดยแรงเฉื่อยของอนุภาคเอง

(3) การสะสมจากการแพร่ เป็นผลจากทิศของลมและการเคลื่อนที่แบบบราวน์ ส่งผลให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปปะทะกับเส้นใยของแผ่นกรอง

(4) การตกตามแรงโน้มถ่วง

แผ่นกรองบางชนิดจับอนุภาคด้วยแรงศักย์ไฟฟ้า สำหรับการกรองด้วยแผ่นกรองเดี่ยวนั้น มีการกักเก็บอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 300 nm ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดอันเกิดจากการปะทะการกีดขวาง และการตกตามแรงโน้มถ่วง ในขณะที่อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 300 nm สามารถกักด้วยกระบวนการแพร่หรือการดึงดูดด้วยไฟฟ้าสถิต อนุภาคขนาด 100 nm ถึง 300 nm จะสามารถไหลผ่านแผ่นกรองได้โดยไม่ถูกกักไว้ ซึ่งเป็นขนาดที่สามารถทะลุผ่านได้มากที่สุด (MPPS) และมีประสิทธิภาพในการกรองต่ำที่สุด การกรองเชิงกลสำหรับอนุภาคที่มีขนาดในช่วงดังกล่าวต้องอาศัยการแพร่และการกีดขวาง ส่วนการปะทะมีบทบาทน้อย ช่วง MPPS อาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ชนิดของแผ่นกรองและความเร็วการไหล เป็นต้น

สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 300 nm การเคลื่อนที่แบบบราวน์เป็นกลไกเชิงกลหลักที่ทำให้เกิดการปะทะของอนุภาคกับเส้นใยของแผ่นกรอง ประสิทธิภาพในการกรองเนื่องจากการเคลื่อนที่แบบบราวน์เพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคลดลง การเคลื่อนที่แบบบราวน์เกิดจากการชนกันระหว่างอนุภาคและโมเลกุลของอากาศทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบสุ่ม การเคลื่อนที่แบบสุ่มสามารถเพิ่มโอกาสที่อนุภาคเกิดการรับสัมผัสกับส่วนต่าง ๆ ของแผ่นกรองและเกิดการยึดติดไว้ที่ผิวของแผ่นกรองด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์

การรับรองแผ่นกรอง HEPA ไม่จำเป็นต้องทำการทดสอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กกว่า 100 nm ซึ่งมาตรฐานด้านพลังงานของสหรัฐอเมริกา DOE HEPA Filter Test Program ระบุว่าแผ่นกรองต้องผ่านการทดสอบด้วยละอองลอยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแอโรไดนามิค 300 nm โดยจะต้องสามารถกักอนุภาคนาโนได้มากกว่า 99.97%

ตามที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น การเคลื่อนทีแบบบราวน์ทำให้ประสิทธิภาพในการกรองเพิ่มสูงขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคเล็กลง ผลการวิจัยระบุว่าการกรองด้วยแผ่นกรองสามารถลดขนาดอนุภาคที่สามารถทะลุผ่านแผ่นกรองได้ถึง 2.5 nm เมื่อเทียบกับการกรองแบบทั่วไป เมื่ออนุภาคมีขนาดเข้าใกล้ขนาดโมเลกุล (เล็กกว่า 2 nm) อนุภาคนั้นไม่สามารถยึดติดกับเส้นใยของแผ่นกรอง แต่สามารถสะท้อนกลับเนื่องจากความร้อน อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของการกรองยังคงสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคแบบผกผัน ในทางปฏิบัตินั้นการสะท้อนกลับเนื่องจากความร้อนอาจไม่มีนัยสำคัญต่อการกรองอนุภาคนาโนหากแผ่นกรองมีการออกแบบเพื่อให้มั่นใจว่ามีการชนกันของอนุภาคมากพอ

8.3.6 การบริหารจัดการสำหรับการควบคุมการรับสัมผัสในสถานที่ปฏิบัติงาน

การบริหารจัดการสำหรับการควบคุมการรับสัมผัสในสถานที่ปฏิบัติงานเป็นวิธีการเพิ่มเติมจากกระบวนการทางวิศวกรรม แต่ไม่สามารถใช้แทนกระบวนการทางวิศวกรรมได้ การควบคุมด้วยระบบบริหารจัดการช่วยในการรับรองทางสุขศาสตร์อุตสาหกรรมของสภาพแวดล้อมในการทำงาน และในกรณีที่จำเป็นบริษัทและหน่วยงานวิจัยควรขอคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญด้านอาชีวอนามัยวิธีการบริหาร

จัดการเมื่อทำงานกับอนุภาคนาโนขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคนาโนและวัสดุอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง รวมถึงลักษณะการทำงาน

มาตรการทางวิศวกรรมนั้นอาจมีขีดจำกัดในบางกรณี เนื่องจากการควบคุมทางวิศวกรรมนั้นอาจมีเทคนิคที่ยังไม่ก้าวหน้าเพียงพอ หรือไม่สามารถนำมาใช้ได้เนื่องจากราคาแพง ในกรณีเหล่านี้สามารถนำวิธีการบริหารจัดการเพื่อจำกัดความเสี่ยงในการรับสัมผัสอนุภาคนาโนในสถานที่ทำงานมาใช้ได้โดยประกอบด้วย

(1) การปรับปรุงวิธีปฏิบัติงาน
(2) ลดจำนวนผู้ปฏิบัติงานที่มีโอกาสสัมผัสกับสาร
(3) จำกัดสิทธิการเข้า-ออกพื้นที่และลดปริมาณการเข้า-ออก
(4) จัดให้มีการตรวจสุขภาพส่วนบุคคลที่มีประสิทธิภาพ
(5) เก็บ กวาด และทำความสะอาดเป็นประจำ และทำความสะอาดวัสดุนาโนเมื่อมีการรั่วไหล
(6) ทำการบำรุงรักษาแบบป้องกัน เพื่อลดความเสี่ยงของการหยุดกระบวนการผลิตนอกแผนงานและเป็นการประกันความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน

8.3.6.1 การเก็บรักษาบันทึก

การเก็บรักษาบันทึกที่มีประสิทธิภาพมีส่วนช่วยให้สถานที่ปฏิบัติงานมีความปลอดภัย และถูกสุขลักษณะ วิธีการเก็บรักษาบันทึกกำหนดไว้ในเอกสารวิธีการปฏิบัติในการจัดการสารอันตรายและวัตถุอันตราย บันทึกที่ควรเก็บรักษามีดังนี้

(1) แผนการฝึกอบรม
(2) การประเมินความเสี่ยง
(3) การให้บริการและการทดสอบเครื่องมือ (รวมถึงอุปกรณ์ดับเพลิง)
(4) การตรวจสอบสถานที่ปฏิบัติงาน
(5) การตรวจสุขภาพ (รายงานผลการตรวจให้เก็บเป็นความลับ)
(6) อันตรายที่เกิดขึ้นและเหตุการณ์เกือบเกิดอุบัติเหตุ (near miss)
(7) การบาดเจ็บและการเจ็บป่วยเนื่องจากการปฏิบัติงาน
(8) การบำรุงรักษาระบบควบคุมทางวิศวกรรมในสถานที่ปฏิบัติงาน การตรวจสภาพประจำวันและผลการตรวจสอบ
(9) บันทึกการกำจัดของเสีย

โดยทั่วไปบันทึกควรจัดเก็บไว้ในสถานที่ที่ผู้จัดการ พนักงาน ตัวแทนพนักงาน และเจ้าหน้าที่ภาครัฐสามารถเข้าถึงข้อมูลได้สะดวก (ยกเว้นบันทึกลับ เช่น ผลการตรวจสุขภาพ) เจ้าหน้าที่ภาครัฐอาจกำหนดช่วงเวลาในการเก็บบันทึกและการดำเนินงานในกรณีที่บริษัทเปลี่ยนเจ้าของหรือขายทอดตลาด

8.3.6.2 การฝึกอบรม

การฝึกอบรมและการแนะนำวิธีการปฏิบัติงานเป็นการสร้างความมั่นใจในสุขภาพและความปลอดภัยเมื่อทำงานกับวัสดุนาโน หัวข้อที่ควรทำการฝึกอบรมในองค์กรที่ใช้วัสดุนาโน ได้แก่

(1) การจัดการวัสดุนาโนอย่างปลอดภัยและ SOP
(2) อันตรายและความเป็นพิษ
(3) PPE
(4) การควบคุมทางวิศวกรรมและการบำรุงรักษาเครื่องมือ
(5) ขั้นตอนฉุกเฉิน
(6) การจัดการของเสีย
(7) นิยามของอนุภาคนาโน
(8) การปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม การขนส่ง และการปกป้องผู้บริโภค
(9) การตรวจสอบการรับสัมผัส
(10) ระเบียบข้อกำหนด

แหล่งข้อมูลและแนวทางในการฝึกอบรม ได้แก่ข้อมูลจากหน่วยงานภาครัฐ (เช่น NIOSH, OSHA และ EPA ในสหรัฐอเมริกา คณะกรรมการจัดการสุขภาพและความปลอดภัยแห่งสหราชอาณาจักร และ the Industrial Technology Research Institute ของประเทศไต้หวัน) บทความวิชาการ และการศึกษาพิษวิทยา ฐานข้อมูลทางอินเทอร์เน็ต การประชุมวิชาการ SDS จากโรงงานและผู้จำหน่าย และ ICSC

8.3.6.3 การลดเวลาในการทำงาน

การลดเวลาในการทำงานอาจนำมาใช้ได้ดีในบางกรณี เช่น เมื่อการทำงานอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ร้อน (เพื่อหลีกเลี่ยงความเครียดจากความร้อน) หรือในสถานการณ์ที่ไม่สามารถควบคุมความเสี่ยงด้วยเทคนิคทางวิศวกรรมได้ วิธีการนี้ไม่นิยมใช้ในการจัดการวัสดุนาโน

8.3.6.4 สุขอนามัยส่วนบุคคล

สุขอนามัยส่วนบุคคลที่ดีเป็นสิ่งจำเป็นในการป้องกันสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งเมื่อบุคคลได้รับวัสดุนาโน จะต้องหาข้อมูลว่า (ก) สารนั้นเป็นอันตราย หรือ (ข) สารนั้นอาจเป็นอันตราย แม้ว่าในสถานที่ปฏิบัติงานจะมีวิธีทางวิศวกรรมที่มีประสิทธิภาพ แต่ผู้ปฏิบัติงานก็ยังมีโอกาสได้รับอนุภาคนาโน เช่น ในระหว่างการทำความสะอาดหรือบำรุงรักษา การจัดการสุขอนามัยที่ดีใน การทำงานกับอนุภาคนาโนนั้นมีการกล่าวถึงในส่วนถัดไป ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในหลายองค์กรแต่ยังไม่ได้ประเมินประสิทธิภาพของวิธี

อ่างล้างหน้าและฝักบัวเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับสถานที่ปฏิบัติงานเพื่อใช้ในการชำระล้างผิวหนังบริเวณที่สัมผัสกับฝุ่นหรือของเหลวก่อนออกจากสถานที่ปฏิบัติงาน ฝักบัวฉุกเฉินจะต้องอยู่ในสภาพพร้อมใช้งานเมื่อพบว่าอาจมีการหกหรือกระจายของสารพิษ

ห้ามสูบบุหรี่ ดื่มน้ำ และรับประทานอาหารในสถานที่ปฏิบัติงาน ยกเว้นในห้องสะอาดที่จัดไว้เพื่อกิจกรรมเหล่านี้ (โดยแยกบริเวณจากส่วนที่มีวัสดุนาโน) หากมีบาดแผลควรทำแผลและปิดปากแผลให้เรียบร้อยเพื่อป้องกันการดูดซึมของวัสดุนาโนผ่านผิวหนัง

ควรจัดพื้นที่สำหรับเปลี่ยนเสื้อผ้า โดยเตรียมชุดปฏิบัติงานที่สะอาดไว้ให้ใช้งาน ควรแยกเก็บเสื้อผ้าส่วนตัวออกจากชุดปฏิบัติงาน และใช้ตู้เก็บ 2 ตู้ในกรณีที่ใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นพิษสูงเพื่อแยกเก็บเสื้อผ้าส่วนตัวและชุดปฏิบัติงานอย่างชัดเจน อีกทั้งไม่ควรนำชุดปฏิบัติงานออกจากสถานที่ปฏิบัติงานเพื่อหลีกเลี่ยงความเสี่ยงจากการปนเปื้อนสู่ภายนอก และหลีกเลี่ยงการทำความสะอาดชุดปฏิบัติงานนั้นห้ามใช้ลมเป่า และควรทำความสะอาดชุดปฏิบัติงานด้วยตัวเอง

นอกจากนี้ควรวางแผ่นกาวรองเหยียบ (sticky mat) ไว้บริเวณทางเข้า-ออกพื้นที่ปฏิบัติงานเพื่อป้องกันวัสดุนาโนที่ติดมากับรองเท้าของผู้ปฏิบัติงานออกสู่นอกอาคาร

8.3.6.5 การทำความสะอาดสถานที่ปฏิบัติงานปกติ และเมื่อวัสดุนาโนหกรั่วไหล

ในขณะที่ยังไม่มีข้อกำหนดที่เกี่ยวกับการทำความสะอาดวัสดุนาโน แนะนำให้ใช้มาตรการทำความสะอาดแบบเดียวกับวัสดุที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามควรมีการให้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับความเสี่ยงของการรับสัมผัสวัสดุนาโน รวมไปถึงข้อมูลอื่น ๆ ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของช่องทางการรับสัมผัสวัสดุนาโนเพื่อใช้ในการตัดสินใจในการทำความสะอาด ซึ่งรูปแบบการทำความสะอาดพื้นที่บริเวณปฏิบัติงานในภาวะปกติ และเมื่อมีวัสดุนาโนหกรั่วไหลนั้นมีหลายวิธี (เช่น การทำความสะอาดโดยการเช็ดแบบเปียก หรือใช้การทำความสะอาดแบบสุญญากาศ (vacuum cleaning)) ขึ้นอยู่กับชนิดและเฟสของวัสดุนาโน การทำความสะอาดพื้นที่บริเวณปฏิบัติงานนั้นต้องกำจัดฝุ่นผงที่ติดค้างบนพื้น ผนัง และพื้นผิวในการทำงาน ซึ่งควรทำความสะอาดเป็นประจำเพื่อหลีกเลี่ยงการสะสมและความเสี่ยงของการฟุ้งกระจายของอนุภาคนาโนในอากาศหรือการระเบิด (ฝุ่นผงอาจเกิดระเบิดขึ้นได้ ในกรณีที่มีผงโลหะเป็นองค์ประกอบ) รวมถึงการทำความสะอาดอุปกรณ์ทั้งหมดอย่างละเอียดก่อนนำไปซ่อมบำรุง

วิธีทำความสะอาดวัสดุนาโนที่ได้รับความนิยม ได้แก่ การเช็ดแบบเปียก การเช็ดแบบแห้ง และการทำความสะอาดโดยเครื่องทำความสะอาดสุญญากาศ ซึ่งส่วนใหญ่การทำความสะอาดวัสดุนาโนมักใช้การเช็ดแบบเปียก และการทำความสะอาดโดยใช้เครื่องทำความสะอาดสุญญากาศที่มีแผ่นกรองแบบ HEPA หรืออาจใช้ทั้งสองวิธีร่วมกันเพื่อเพิ่มประสิทธิในการทำความสะอาดวัสดุนาโน ซึ่งวิธีการเช็ดแบบเปียกมักผสมสบู่หรือน้ำมันเพื่อช่วยในการทำความสะอาดด้วย ในปัจจุบันมีการจำหน่ายผ้าไมโครไฟเบอร์แบบเปียกหรือแบบไฟฟ้าสถิต (electrostatic microfiber) เพื่อใช้ใน

การกำจัดอนุภาคนาโนได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งยังสามารถลดการฟุ้งกระจายของอนุภาคนาโนในอากาศ ส่วนการทำความสะอาดโดยการเช็ดแบบแห้งนั้นใช้สำหรับการทำความสะอาดสารละลายต่าง ๆ เท่านั้น ถ้าหากใช้วิธีทำความสะอาดแบบสุญญากาศ ควรมีการตรวจสอบแผ่นกรอง HEPA ว่าติดตั้งได้อย่างถูกต้อง และได้มีการเปลี่ยนถุงกรองและตัวกรองตามคำแนะนำของผู้ผลิต ควรมีการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องทำความสะอาดแบบสุญญากาศที่ใช้แผ่นกรอง HEPA อย่างสม่ำเสมอเพื่อให้แน่ใจว่ามีการปิดผนึกที่ดี รวมทั้งการทดสอบในส่วนอื่น ๆ ด้วย สำหรับวิธีมาตรฐานในการทำความสะอาดวัสดุนาโนที่เป็นผงและของเหลวที่หกรั่วไหลมักใช้เครื่องทำ ความสะอาดแบบสุญญากาศที่มีแผ่นกรอง HEPA การเช็ดผงแบบเปียก การใช้ผ้าชื้นในการเช็ดผงอนุภาคออกไป และการใช้วัสดุหรือของเหลวดูดซับวัสดุนาโนที่หกรั่ว

ควรหลีกเลี่ยงการทำความสะอาดด้วยการกวาดแบบแห้งหรือการใช้ลมเป่า ถ้าหากหลีกเลี่ยงไม่ได้ ควรทำความสะอาดด้วยความระมัดระวังเพื่อให้แน่ใจว่าอนุภาคนาโนที่แขวนลอยนั้นถูกกรองด้วยแผ่นกรอง HEPA ในการทำความสะอาดควรหาวิธีที่ป้องกันผู้ปฏิบัติงานจากการรับสัมผัสกับของเสีย และการกำจัดวัสดุของเสียทุกชนิดให้เป็นไปตามระเบียบที่กำหนด นอกจากนี้ยังพบว่ามีเพียงไม่กี่หน่วยงานที่รายงานว่าได้เก็บวัสดุนาโนที่หกรั่วแยกไว้ในถังที่มีการปิดผนึก ซึ่งการให้ความรู้เกี่ยวกับอันตรายของวัสดุนาโนนั้นยังไม่กว้างขวางดังนั้นการเช็ดทำความสะอาดวัสดุนาโนควรตระหนักเหมือนกับการทำความสะอาดของเสียอันตราย และไม่ควรทำให้แห้ง หรือนำผ้าเช็ดที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ เพราะอาจทำให้เกิดการกระจายของอนุภาคอีกครั้ง

เมื่อมีการพัฒนาวิธีทำความสะอาดของการหกรั่วไหลวัสดุนาโนหรือพื้นผิวที่ปนเปื้อน ควรเพิ่มการพิจารณาการได้รับสัมผัสอนุภาคนาโนระหว่างทำความสะอาด ซึ่งมีโอกาสได้รับสัมผัสจากการหายใจและทางผิวหนัง จากการพิจารณาดังกล่าวทำให้สามารถกำหนดระดับที่เหมาะสมของการใช้ PPEได้ สำหรับการรับสัมผัสทางการหายใจนั้นการรับสัมผัสจากฝุ่นมีแนวโน้มเกิดขึ้นได้มากกว่าการรับสัมผัสจากของเหลว แต่ในขณะเดียวกันของเหลวอาจทำให้เกิดความเสี่ยงที่สูงกว่าวัสดุนาโนและโครงสร้างนาโน ที่มีการห่อหุ้มหรือการตรึง ความเสี่ยงจากการรับสัมผัสจากของเหลวอาจเกิดจากการที่ของเหลวกลายเป็นละอองลอยของวัสดุ โดยมีรายงานถึงการใช้เครื่องช่วยหายใจขณะทำความสะอาดวัสดุนาโนที่หกรั่วไหลด้วย

8.3.6.6 การกำจัดของเสีย

การกำจัดของเสียที่มีวัสดุนาโนนั้น ส่วนใหญ่ทำโดยใช้บริษัทจัดการของเสียซึ่งบางแห่งได้มีการแยกวัสดุนาโนในถังบรรจุของเสีย การติดฉลากบนถังบรรจุของเสียนั้นควรระบุรายละเอียดให้สอดคล้องกับรหัสฉลากที่มีการจัดทำอยู่แล้ว ซึ่งทำให้มีการใช้งานข้อมูลสำหรับวัสดุนาโนที่เหมาะสม (เช่น ข้อมูลความเป็นอันตรายหาได้จากบทความทางวิชาการ ซึ่งรวมถึงรายงานวิจัยต่าง ๆ) ในการเก็บของเสียวัสดุนาโนนั้น ควรใช้ถังแก้ว ถังโลหะ และถังกลมโลหะปิดผนึก

วิธีการกำจัดวัสดุนาโนซึ่งทำโดยหน่วยงานที่ไม่ได้ส่งของเสียให้กับบริษัทภายนอกจัดการ มีวิธีการดังต่อไปนี้

(1) การบำบัดวัสดุนาโนในบริเวณโรงงานก่อนการกำจัด

(2) การนำวัสดุนาโนมาใช้ใหม่

(3) การเผาวัสดุนาโนในพื้นที่ (สำหรับวัสดุที่มาจากคาร์บอน)

(4) การคืนวัสดุนาโนกลับให้กับผู้จำหน่าย

8.3.6.7 การป้องกันและควบคุมอัคคีภัย การระเบิด และการเร่งปฏิริยา

หลักเกณฑ์ในการจัดการวัสดุนาโนนั้นสามารถใช้เกณฑ์เดียวกับการจัดการผงละเอียด ฝุ่น หรือวัสดุที่เป็นฝุ่น แต่ในกรณีที่เป็นฝุ่นผงโลหะที่สามารถเกิดการออกซิไดส์ได้ง่ายจำเป็นต้องเฝ้าระวังอย่างมาก อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของวิธีการป้องกันและควบคุมอัคคีภัย การระเบิด และการเร่งปฏิริยาของอนุภาคนาโนนั้นยังไม่ได้รับการประเมิน

การจัดการวัสดุนาโนที่อาจเกิดการระเบิดได้นั้น สามารถประยุกต์จากมาตรการป้องกันการระเบิดที่อธิบายไว้สำหรับการแพร่กระจายของฝุ่นละออง (โดย OSHA) และสำหรับวัตถุอันตรายที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ ส่วนการจัดการอนุภาคนาโนที่ติดไฟได้นั้นมีหลายมาตรการที่แนะนำให้ใช้ สำหรับวัสดุนาโนที่ทำปฏิกิริยาได้รวดเร็ว หรือเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ควรป้องกันไม่ให้เกิดการรับสัมผัสกับสารที่เข้ากันไม่ได้

ในการป้องกันอัคคีภัยควรทำตามระเบียบแบบแผนที่มีการกำหนดไว้โดยเฉพาะข้อกำหนดเกี่ยวกับไฟฟ้า ซึ่งการออกแบบการป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าจะต้องมีการออกแบบการป้องกันฝุ่น ดังนั้นควรคำนึงถึงอนุภาคละเอียด และใช้เวลานานในการตกลงมาของอนุภาคนาโนด้วย นอกจากนี้ควรเพิ่มความระมัดระวังเกี่ยวกับอุณหภูมิของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ เนื่องจากอาจมีความเสี่ยงในการลุกติดไฟด้วยตัวเองของอนุภาคนาโน

การเลือกสารเคมีที่เหมาะสมในการดับเพลิงควรพิจารณาถึงความเข้ากันได้หรือเข้ากันไม่ได้ของสารเคมีที่ใช้ในการดับเพลิงและสารเคมีที่อยู่ในบริเวณที่เกิดอัคคีภัย เนื่องจากอาจทำให้เกิดการลุกลามหากเลือกไม่เหมาะสม เช่นฝุ่นโลหะบางชนิดจะทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนและสารอื่น ๆ แก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นสามารถลุกติดไฟได้ง่ายและเผาไหม้อย่างรุนแรง ดังนั้นการดับเพลิงจำพวกฝุ่นโลหะนั้นมักใช้ผงเคมีในการดับเพลิง และในการดับเพลิงที่มาจากผงฝุ่นโลหะ ควรหลีกเลี่ยงการเคลื่อนที่ของอากาศ เนื่องจากอาจส่งผลต่อการทำให้ผงโลหะแขวนลอยในอากาศและเพิ่มความเสี่ยงที่อาจทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างรุนแรง ดังนั้นเพื่อลดความเสี่ยงของการเกิดอัคคีภัยและการเผาไหม้อย่างรุนแรงนั้น อาจจำเป็นต้องใช้การผลิตที่มีการควบคุมบรรยากาศและกระบวนการเก็บที่ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไนโตรเจน หรือแก๊สเฉื่อย แต่อาจนำไปสู่อันตรายที่เกิดจากการขาดอากาศหายใจ (asphyxiation) หากเกิดการรั่วไหล

เมื่อมีการทำงานกับวัสดุนาโนที่ระเบิดได้นั้น มีการรายงานถึง

(1) การใช้รองเท้าและแผ่นรองป้องกันไฟฟ้าสถิตในบริเวณที่มีการจัดการวัสดุนาโน ซึ่งรองเท้าสามารถช่วยลดการสะสมประจุไฟฟ้าอันเป็นสาเหตุของการลุกไหม้ของวัสดุ

(2) ระบบการกลั่นสำหรับระเหยตัวทำละลายออกจากการกระจายตัวของคอลลอยด์ซึ่งควรติดตั้งระบบอยู่ภายในระบบปิดที่ป้องกันระเบิด ซึ่งออกแบบโดยคำนึงถึงโอกาสการเกิดระเบิดของวัสดุนาโน

8.3.6.8 การเก็บรักษา

การเก็บวัสดุนาโนอาจต้องมีการป้องกันเป็นพิเศษ เพื่อความปลอดภัยต่อสุขภาพและความปลอดภัยในสถานที่ปฏิบัติงาน ซึ่งต้องมีการบันทึกรายละเอียด และวิธีเก็บของวัสดุนาโนที่เหมาะสม

ถังที่ใช้เก็บอนุภาคนาโนและอนุภาคของวัสดุมีโครงสร้างนาโนนั้นต้องมีสมบัติที่เหมาะสม โดยต้องคำนึงถึงลักษณะเฉพาะทางกรานูโลเมตริก (granulometric) ที่แตกต่างกัน และความไวปฏิกิริยาของอนุภาคนาโน โดยเฉพาะอย่างยิ่งอนุภาคที่มีขนาดละเอียดนั้น อาจใช้เวลาในการตกตะกอนที่ยาวนานและอาจเกิดการกระจายตัวใหม่ การเก็บรักษาควรปิดผนึกให้แน่นเพื่อหลีกเลี่ยงการรั่วไหลของผลิตภัณฑ์ หรือหลีกเลี่ยงการปนเปื้อนขณะเกิดการเคลื่อนย้าย ควรจัดเก็บวัสดุนาโนให้เทียบเท่าการกักเก็บแก๊ส

ขนาดของอนุภาคที่เล็กมาก (ซึ่งบางครั้งอาจเกิดเป็นอนุภาคเกาะก้อนแบบหลวม) ทำให้มีพื้นที่ผิวมาก เมื่อสัมผัสกับอากาศอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี มีวิธีการป้องกันที่หลากหลายซึ่งขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่เก็บไว้นั้น ต้องป้องกันการเสื่อมชำรุดเสียหายของผลิตภัณฑ์ ความเสี่ยงต่อการเกิดอัคคีภัยและการระเบิด ทางออกที่ดีคือควรเก็บอนุภาคนาโนไว้ในแก๊สเฉื่อย หรือในสภาวะปราศจากน้ำ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดออกซิเดชันหรือการระเบิด ในกรณีของโลหะบางชนิด อนุภาคนาโนนั้นห้ามสัมผัสอากาศ ในขณะที่ในสภาวะอื่น ๆ ที่ใช้ในการเก็บนั้นอาจต้องเก็บอนุภาคนาโนไว้ในชั้นของเกลือหรือพอลิเมอร์ ซึ่งก่อนนำไปใช้งานควรนำชั้นเหล่านั้นออกไปก่อน

8.3.6.9 มาตรการป้องกันอื่น ๆ

สำหรับมาตรการป้องกันเกี่ยวกับความปลอดภัยจากกระบวนการผลิตนาโน อาจต้องมีการพัฒนาและนำมาใช้เพื่อป้องกันการขาดอากาศหายใจและไฟฟ้าดูด ในกระบวนการผลิตอนุภาคนาโนนั้นมีความเสี่ยงของการขาดอากาศหายใจซึ่งเกิดจากการใช้แก๊สเฉื่อยในปริมาณมาก และอาจมีความเสี่ยงจากไฟฟ้าดูดเนื่องจากการเกิดขึ้นพลาสมาที่ใช้กระแสไฟฟ้าสูง

ในสภาวะฉุกเฉินต้องมีการใช้อุปกรณ์ป้องกันกรณีฉุกเฉิน และควรมีการพัฒนารูปแบบเฉพาะในการปฐมพยาบาลเบื้องต้น

8.3.7 การประเมินสิ่งแวดล้อมในที่ทำงาน

ขอบข่ายการศึกษาและวิธีการประเมินการรับสัมผัสอนุภาคนาโนนั้นสามารถดูรายละเอียดได้ในข้อที่ 6 เรื่องการรับสัมผัสวัสดุนาโน และภาคผนวก ง. วิธีการวัดการรับสัมผัสวัสดุนาโนผ่านทางการหายใจสำหรับการตรวจติดตาม และการประเมินสิ่งแวดล้อมในที่ทำงานเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพนั้นควรปฏิบัติตามแนวทางที่ได้อธิบายไว้ข้อ 8.3.3 ถึง 8.3.6 สิ่งที่ได้จากการประเมินทำให้ทราบว่าต้องมีการใช้ PPE หรือไม่

การวัดอนุภาคนาโนที่ปนเปื้อนในอากาศนั้น ในปัจจุบันการวัดการรับสัมผัสวัสดุนาโนโดยตรงจากบุคคลทำได้ยาก เนื่องจากอุปกรณ์การวัดส่วนใหญ่ไม่ได้ออกแบบให้สามารถพกพาไปกับบุคคลได้ นอกจากการตรวจวัดการรับสัมผัสของบุคคลโดยตรงแล้ว ยังมีวิธีการประมาณค่าทางสถิติในส่วนของความเข้มข้นของการรับสัมผัสส่วนบุคคลจากความเข้มข้นที่สัมผัสในอากาศซึ่งวัดจากสถานที่ปฏิบัติงานในเวลาทั่วไป หรือสุ่มช่วงเวลาในการวัด โดยสามารถอธิบายวิธีการหาค่าประมาณความเข้มข้นเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ (arithmetical average concentration) และขีดจำกัดบนของความเข้มข้นที่รับสัมผัส (upper limiting exposure concentration)

(1) ความเข้มข้นเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ (C1)

ค่าความเข้มข้นนี้บอกถึงความเข้มข้นที่สัมผัสของแต่ละบุคคลที่ปฏิบัติงานเป็นประจำในสถานที่ปฏิบัติงาน ค่าความเข้มข้นนี้หาได้จาก

$$\log C1 = \log Mg + 1.151 \log^2 SDg \qquad (1)$$

Mg = ค่าเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ของความเข้มข้นที่วัดได้

SDg = ค่าเบี่ยงเบนทางคณิตศาสตร์ของความเข้มข้นที่วัดได้

(2) ขีดจำกัดบนของความเข้มข้นที่รับสัมผัส (C2)

ค่าขีดจำกัดบนของความเข้มข้นที่รับสัมผัสหมายถึงระดับที่ 5% ของความเข้มข้นในอากาศทั้งหมดที่วัดได้ในช่วงเวลาใด ๆ และที่ใด ๆ ในสถานที่ปฏิบัติงานซึ่งมากกว่าขีดจำกัดของการรับสัมผัส โดยค่าความเข้มข้นนี้หาได้จาก

$$\log C2 = \log Mg + 1.645 \log SDg \qquad (2)$$

หมายเหตุ *สมมติว่าเป็นการกระจายแบบ lognormal ของความเข้มข้นของอนุภาคในอากาศในสถานที่ปฏิบัติงาน*

การใช้วิธีการเหล่านี้ทำให้สามารถประเมินสิ่งแวดล้อมในสถานที่ปฏิบัติงานได้โดยไม่ต้องวัดความเข้มข้นที่รับสัมผัสของแต่ละบุคคล

8.3.8 PPE

มาตรการป้องกันอันตรายทางวิศวกรรมและการบริหารจัดการนั้นควรใช้ร่วมกับ PPE ได้แก่ การใช้ RPE ถุงมือ แว่นครอบตา และเสื้อคลุมที่ป้องกันทั้งตัว ในทางปฏิบัตินั้นหน่วยงานที่ทำงานด้านนาโนเทคโนโลยีซึ่งสำรวจโดย ICON ได้แนะนำให้ผู้ปฏิบัติงานและนักวิจัยใช้ PPE ซึ่งโดยปกติแล้วการสวมใส่ในห้องปฏิบัติการทั่วไปก็ถือว่าเป็นการป้องกันอันตรายอย่างหนึ่ง

8.3.8.1 การป้องกันการรับสัมผัสทางการหายใจ – การใช้ RPE แบบตัวกรอง และ SAR

การใช้ RPE แบบตัวกรอง (สำหรับกรองอากาศ) หรือ SAR นั้น เป็นเพียงอุปกรณ์เสริมที่ใช้ในการป้องกันการรับสัมผัสทางการหายใจ แต่ไม่สามารถใช้แทนการควบคุมทางวิศวกรรมและการบริหารจัดการได้ เมื่อใดก็ตามที่การควบคุมนั้นไม่ดีพอที่สามารถป้องกันการรับสัมผัสของผู้ปฏิบัติงานจากสารปนเปื้อนในอากาศให้อยู่ในระดับต่ำกว่าที่กำหนด หรือต่ำกว่าเป้าหมายที่ควบคุมภายใน การใช้ RPE เป็นส่วนหนึ่งของการลดการรับสัมผัสทางการหายใจ โดยผลการตรวจสอบเบื้องต้นแสดงให้เห็นถึง RPE สามารถช่วยผู้ปฏิบัติงานในการป้องกันการรับสัมผัสอนุภาคนาโนได้

การป้องกันการรับสัมผัสทางการหายใจนั้น ควรอ้างอิงการประเมินความเสี่ยงหลังจากที่ได้จัดการควบคุมปัจจัยอื่น ๆ หมดแล้ว ส่วนการประเมินความเสี่ยงนั้นยังไม่มีข้อจำกัดในการรับสัมผัสอนุภาคนาโนที่ปนเปื้อนในอากาศ ดังนั้นในการพิจารณานำข้อจำกัดของการรับสัมผัสวัสดุนาโนนั้น สามารถใช้ข้อมูลการประเมินความเสี่ยงของอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมือนกัน และสามารถนำข้อมูลความเป็นพิษของสารนั้นมาใช้ อย่างไรก็ตาม หลักฐานทางวิทยาศาสตร์ได้แสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาทางชีวภาพได้มากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกันและมวลเท่ากัน และอาจนำไปสู่ความเสี่ยงต่อสุขภาพเมื่อมีการหายใจรับวัสดุเข้าไป

ประสิทธิภาพในการควบคุมทางวิศวกรรม การบริหารจัดการ และขั้นตอนในการปฏิบัติงานสามารถประเมินโดยใช้เทคนิคการวัดซึ่งอธิบายไว้ในข้อที่ 6 การรับสัมผัสวัสดุนาโน ถ้าคำนึงถึงการรับสัมผัสอนุภาคนาโนที่ปนเปื้อนในอากาศของผู้ปฏิบัติงานหลังจากที่มีการจัดทำมาตรการต่าง ๆ ในการควบคุมการรับสัมผัสแล้ว การนำ RPE มาใช้เพื่อลดการรับสัมผัสอนุภาคนาโน ในโปรแกรมการป้องกันระบบทางเดินหายใจ ควรประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ต่อไปนี้

(1) การประเมินความสามารถผู้ปฏิบัติงานในการทำงานเมื่อมีการสวมใส่ RPE
(2) การฝึกปฏิบัติเฉพาะบุคคลเป็นประจำ
(3) การตรวจติดตามสิ่งแวดล้อมเป็นระยะ ๆ
(4) การทดสอบประสิทธิภาพการสวมใส่หน้ากาก
(5) การบำรุงรักษา การตรวจสอบ การทำความสะอาด และการเก็บรักษา RPE
(6) การเลือก RPE ซึ่งต้องทำโดยผู้ที่มีความรู้เกี่ยวกับสถานที่ปฏิบัติงานและข้อจำกัดของ RPE แต่ละชนิด
(7) ควรเก็บรายละเอียดของส่วนประกอบต่าง ๆ

ข้อมูลสำหรับพนักงานในการใช้ RPE สามารถดูได้จากมาตรฐาน RPE ของ U.S. OSHA's ตาม 29 CFR 1910.134

RPE มีหลายชนิด แตกต่างกันที่ระดับในการปกป้องซึ่งต้องทำการทดสอบกับผู้ปฏิบัติงานถึงประสิทธิภาพในการสวมใส่ หลายหน่วยงานได้แนะนำให้ใช้เกณฑ์การตัดสินใจเลือก RPE ตามค่า APF แสดงในภาคผนวก จ. การวัดการรับสัมผัสวัสดุนาโนผ่านทางผิวหนัง ตาราง จ.2 และข้อดี-ข้อเสียของ RPE แสดงในภาคผนวก จ. ตาราง จ.3

ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคโดยแผ่นกรองนั้นสามารถตรวจสอบรายละเอียดตามข้อ 8.3.5 เทคนิคการควบคุมทางวิศวกรรม ซึ่ง MPPS ของแผ่นกรองส่วนใหญ่อยู่ที่ 300 nm ทั้งนี้ MPPS อาจแปรเปลี่ยนไปตามชนิดตัวกลางของแผ่นกรองที่ใช้ อัตราการไหล และสภาวะที่ใช้ในการป้องกันการหายใจ เช่น MPPS ของแผ่นกรองชนิด HEPA อยู่ระหว่าง 100 nm ถึง 300 nmในขณะที่ APR ชนิด N95 นั้น มีแผ่นกรองที่มีประจุไฟฟ้าสถิตอยู่ขนาดของอนุภาคที่สามารถผ่านได้ประมาณ 30 nm ถึง 70 nm และประมาณ 50 nm ถึง 100 nm โดยประสิทธิภาพในการกรองเพิ่มขึ้นเมื่อมีขนาดอนุภาคเล็กลงเนื่องจากมีการกระจายตัวของอนุภาค แต่ปัจจุบันยังไม่มีวิธีการมาตรฐานในการตรวจสอบแผ่นกรองสำหรับอนุภาคที่มีขนาดต่ำกว่า 100 nm

อนึ่ง มีงานวิจัยระบุว่า RPE สามารถช่วยป้องกันอนุภาคนาโนได้ แต่ยังป้องกันได้ไม่ถึงในระดับที่มากพอเมื่อมีอัตราการหายใจระดับสูง ซึ่งมีการทดสอบโดยการสร้างแบบจำลอง (Manikin-based test) เพื่อทดสอบ RPE แบบครอบกระชับเต็มใบหน้า ชนิด N95 ที่ได้การรับรองโดย NIOSH ผลการทดสอบได้แสดงว่าอนุภาคที่มีขนาดสม่ำเสมอ (monodisperse) ซึ่งมีขนาดประมาณ 30 nm ถึง 70 nm นั้น ทะลุผ่าน RPE ได้มากกว่า 5% ของค่าเริ่มต้น (threshold) ที่อัตราการหายใจสูงสุด การทดลอง RPE แบบครอบกระชับเต็มใบหน้า ชนิด N95 จำนวน 2 ตัวอย่าง ได้ค่าเฉลี่ยของการทะลุผ่านแผ่นกรองที่ 5% และ 6% (โดยมีค่าเบี่ยงเบน 1%) วัดที่อัตราการหายใจ 85 min^{-1} อย่างไรก็ตาม รายงานอีกฉบับหนึ่งได้ทำการเปรียบเทียบการทะลุผ่านของอนุภาคโซเดียมคลอไรด์ (sodium chloride) ผ่าน RPE แบบครอบกระชับเต็มใบหน้า ชนิด N95 ที่รับรองโดย NIOSH จำนวน 5 ตัวอย่าง ที่อัตราการหายใจ 85 min^{-1} โดยแบ่งการทดสอบเป็นสองวิธีคือ การทดสอบโดยใช้ละอองลอยที่มีขนาดสม่ำเสมอ และการทดสอบโดยใช้ละอองลอยที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอ (polydisperse) ซึ่งมีลักษณะการทดสอบเหมือนกับการทดสอบที่รับรองโดย NIOSH ค่าการทะลุผ่านเริ่มต้นของการทดสอบละอองลอยที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอ อยู่ในช่วง 0.61% ถึง 1.24% ส่วนการทะลุผ่านของละอองลอยที่มีขนาดสม่ำเสมอ จะเป็นไปตามทฤษฎีการกรองของเส้นใยเดี่ยว ค่า MPPS อยู่ที่ประมาณ 40 nm จากตัวอย่างทั้ง 5 ชนิดมีค่าการทะลุผ่านอยู่ในช่วง 1.4% ถึง 5.2% โดยมี 2 ตัวอย่างที่มีค่าเกิน 5% จากผลการทดสอบทั้งสองวิธี ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยการทะลุผ่านของละอองลอยที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอและสม่ำเสมอ มีขนาดอนุภาค 40 nm 100 nm 200 nm และ 300 nm มีค่าเท่ากับ 0.945, 0.979, 0.996 และ 0.994 ตามลำดับ

จากผลการศึกษา พบว่าหากขนาดของอนุภาคนาโนเล็กลงถึง 20 nm การทะลุผ่านของอนุภาคผ่าน RPE แบบครอบกระชับเต็มใบหน้า ชนิด N95 ชนิด P100 และแผ่นกรองแบบตลับ (ของทั้งสองรุ่น รุ่นละ 4 แผ่นกรอง) มีแนวโน้มเป็นดังนี้

(1) ค่าการทะลุผ่านนั้นมีค่าแตกต่างกันภายในกลุ่ม RPE เช่น ในการทดสอบกลุ่มของแผ่นกรอง P100 และในการทดสอบภายในกลุ่มของแผ่นกรอง N95

(2) ค่า MPPS ของแผ่นกรองแบบตลับชนิด P100 อยู่ระหว่าง 100 nm ถึง 200 nm และอาจเลื่อนไปสู่ระดับค่าที่ต่ำกว่าของช่วงเมื่อเพิ่มอัตราการไหล สำหรับค่า MPPS ของแผ่นกรองแบบตลับชนิด N95 นั้นอยู่ระหว่าง 50 nm ถึง100 nm สำหรับทุกสภาวะการไหล และค่า MPPS สำหรับ RPE ของ P100 และ N95 นั้นอยู่ระหว่าง 50 nm ถึง 100 nm

(3) สำหรับอนุภาคขนาด 50 nm ที่อัตราการไหล 85 min^{-1} ค่าเฉลี่ยการทะลุผ่าน เฉลี่ยอยู่ในช่วง <0.0001% ถึง0.002%, 0.7% ถึง 8.8%, 0.01% ถึง 0.048% และ 2.8% ถึง 9.7% สำหรับแผ่นกรองแบบตลับชนิด P100 แผ่นกรองแบบตลับชนิด N95 RPE แบบครอบกระชับเต็มใบหน้าชนิด P100 และRPE แบบครอบกระชับเต็มใบหน้าชนิด N95 ตามลำดับ

การเลือกใช้ RPE ชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานที่จำเพาะเจาะจงและวัสดุที่ต้องจัดการ โดยมีการรายงานว่ามีข้อกำหนดของแผ่นกรองหลายชนิดได้นำมาใช้โดยหน่วยงานที่ต้องทำงานกับวัสดุนาโน หลายหน่วยงานได้นำหน้ากากกรองแก๊สและไอระเหยชนิดตลับกรองสารเคมี (cartridge respirator) ทั้งแบบที่เป็นหน้ากากครอบเต็มใบหน้และแบบครึ่งหน้ามาใช้จำนวนมาก บางหน่วยงานระบุว่า RPE แบบใช้แล้วทิ้งนั้นควรให้พนักงานนำไปใช้ขณะที่มีการปฏิบัติงานกับวัสดุนาโน โดยRPE แบบใช้แล้วทิ้งบางชนิด เช่น RPE ชนิด N/R/P95/99/100 ที่ได้รับการรับรองมาตรฐานจาก U.S. NIOSH ในขณะที่หน้ากากที่มีราคาถูกบางชนิดมักไม่ได้รับการทดสอบและไม่ได้รับการรับรองจากหน่วยงานมาตรฐานใด ๆ ดังนั้น หน้ากาก และ RPE ที่ไม่ได้รับการรับรองนั้นไม่ควรนำมาใช้ในการป้องกันการรับสัมผัสอนุภาคนาโน เนื่องจากผู้ใช้งานไม่สามารถมั่นใจได้ว่าพวกเขาได้รับการป้องกันในระดับที่เหมาะสม

ควรนำ RPE มาใช้ทุกครั้งเมื่อมีการจัดการกับฝุ่นผง (โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องทำงานกับฝุ่นผงในปริมาณมาก) และใช้สำหรับงานบำรุงรักษาเครื่องจักรในการผลิต ตัวอย่างของการใช้ RPE ในการเก็บตัวอย่างและรวบรวมข้อมูลระหว่างการทำงานเกี่ยวกับการผสมวัสดุแสดงในรูปที่ 3 RPE ของแต่ละบุคคลที่ใช้ในแต่ละตำแหน่งซึ่งมีการผลิตวัสดุนาโนในรูปของฝุ่นผงนั้นควรมีประสิทธิภาพที่สูง โดยบางหน่วยงานแนะนำให้มีการสวมใส่หน้ากากแบบเต็มหน้าซึ่งควรมีแผ่นกรองที่มีประสิทธิภาพสูง (มากกว่า 99.97%)

รูปที่ 3 การใช้ RPE สำหรับการเก็บตัวอย่างและการรวบรวมข้อมูลระหว่างการทำงานเกี่ยวกับการผสมวัสดุ (ข้อ 8.3.8.1)

ความถี่ในการเปลี่ยนหน้ากากกรองแก๊สและไอระเหยชนิดตลับกรองสารเคมี และ/หรือ การกำจัดหน้ากากปกป้องระบบทางเดินหายใจนั้นควรพิจารณาอย่างระมัดระวังและควรดำเนินการก่อนที่ผู้ปฏิบัติงานรู้สึกหายใจลำบาก หรือก่อนได้กลิ่นไอของสารเคมี หรือเกิดการอุดตันของตัวกรอง ตารางการเปลี่ยนหรือการกำจัดหน้ากากเหล่านี้ควรทำบ่อยครั้งขึ้นเมื่อมีการผลิตวัสดุนาโนในปริมาณที่สูงขึ้นและเมื่อหน่วยงานต้องมีการปฏิบัติงานกับวัสดุนาโนที่เป็นฝุ่นผงแห้ง

ปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของ RPE ต่อฝุ่นผงคือการที่ฝุ่นผงไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นกรองไปได้เลย อย่างไรก็ตามอาจมีรอยรั่วทางอ้อมจากผนึกที่ปิดหน้าอยู่ของอุปกรณ์ รอยรั่วจากผนึกที่ปิดหน้านั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ความพอเหมาะของหน้ากากกับใบหน้าช่วงเวลาในการใส่ และกิจกรรมในการปฏิบัติงาน ความสะดวกของผู้สวมใส่และการบำรุงรักษาอุปกรณ์นั้นมักเป็นประเด็นสำคัญของ RPE ด้วยเช่นกัน เนื่องจากอนุภาคนาโนละอองลอยนั้นสามารถเคลื่อนที่ได้เร็ว ดังนั้นโอกาสในการรั่วออกมาอาจเกิดขึ้นได้ถึงแม้ว่าอาจเกิดน้อยกว่าแก๊สก็ตาม ทั้งนี้อนุภาคละอองลอยนั้นมักยึดติดแน่นบนพื้นผิวที่เกาะอยู่ ซึ่งมีงานวิจัยจำนวนมากศึกษาเกี่ยวกับรอยรั่วของหน้ากากของอนุภาคขนาดใหญ่และแก๊สหรือไอต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น งานวิจัยที่ทำโดย RDECOM ซึ่งทำบนแบบจำลองของศีรษะแสดงให้เห็นถึงรอยรั่วของหน้ากาก (ซึ่งจำลองโดยใช้ปัจจัยของการสวมใส่ที่พอดีของ RPE) ที่วัดโดยใช้ละอองลอยขนาดเล็กมากต่ำกว่าไมโครเมตร (ใช้อนุภาคพอลิสไตรีนขนาด 720 nm) ซึ่งเป็นตัวแทนของไอต่าง ๆ เช่น ซัลเฟอร์ เฮกซะฟลูออไรด์ (sulfur hexafluoride) และไอโซเอมิล อะซีเตต (isoamyl acetate)

การป้องกันในระดับสูงขึ้นนั้นทำได้โดยใช้ PAPR ซึ่งประกอบด้วยตัวกรองที่มีประสิทธิภาพสูงและมีเครื่องสูบอากาศที่ช่วยกรองอากาศที่เข้าสู่หน้ากากแบบเต็มหน้า กระแสอากาศที่เกิดขึ้น

ด้านหน้าของผู้สวมหน้ากากอาจเพิ่มระดับการป้องกันด้วยการควบคุมความดันบวกภายในหน้ากาก ซึ่งจะทำให้ผู้สวมใส่รู้สึกสบายมากขึ้นและลดการรับสัมผัสเมื่อหน้ากากนั้นมีรอยรั่วหรือช่องว่างอยู่ ในกรณีที่ APF ของ PAPR นั้นไม่เพียงพอหรือเมื่อความเข้มข้นอนุภาคละอองลอยนั้นมีผลในแบบ IDLH จำเป็นต้องใช้ RPE ชนิดที่มีการใช้สายส่งอากาศ (airline respirators) หรือชนิดที่แหล่งส่งอากาศติดที่ตัวผู้สวมใส่ (self-contained breathing apparatus)

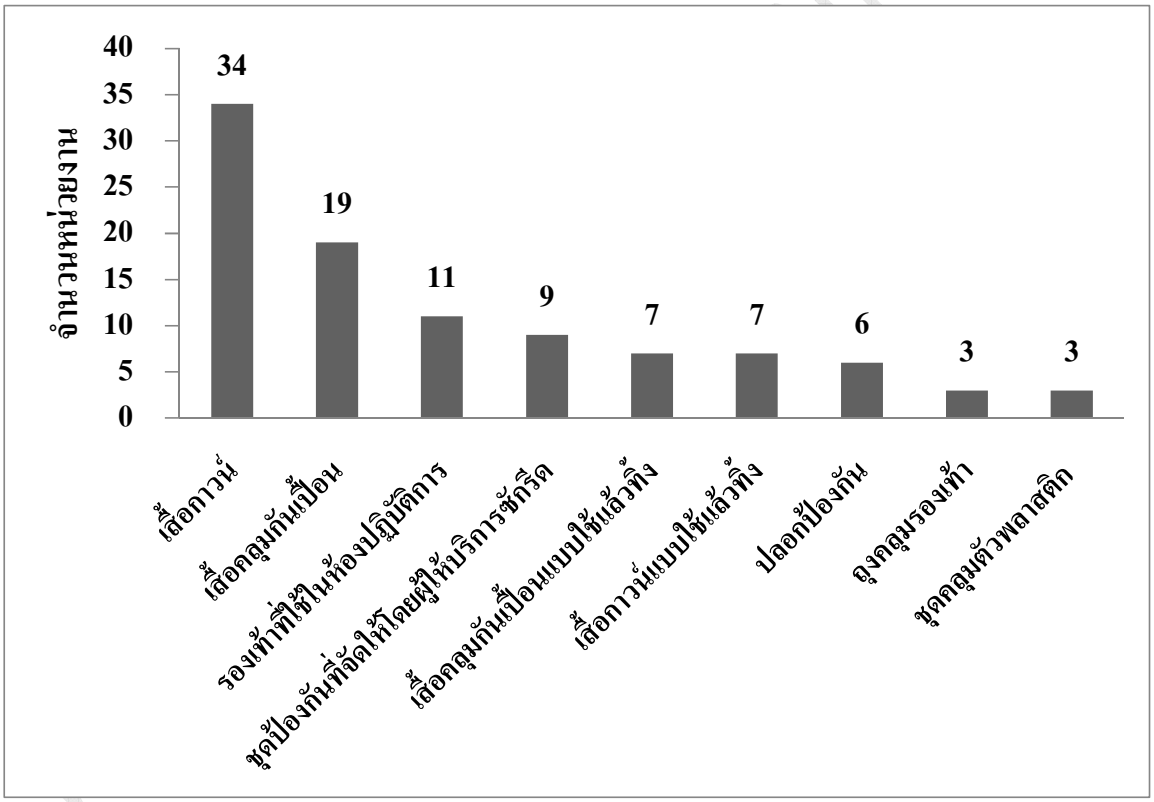
8.3.8.2 การป้องกันการรับสัมผัสทางผิวหนัง

การรับสัมผัสผ่านทางผิวหนังอาจเกิดขึ้นระหว่างการผลิต ใช้งาน และจัดการกับวัสดุนาโน สำหรับการผลิตวัสดุนาโนนั้น การรับสัมผัสมีแนวโน้มเกิดขึ้นในขั้นตอนการเก็บกู้และบรรจุหีบห่อผลิตภัณฑ์ และจากการที่มีวัสดุนาโนปนเปื้อนบนพื้นผิว เช่นระหว่างกระบวนการบำรุงรักษาสถานที่ทำงานและเครื่องจักร จึงจำเป็นต้องมีการใช้อุปกรณ์ป้องกันผิวหนังเมื่อไม่สามารถหลีกเลี่ยงการรับสัมผัสได้ตลอดเวลา อุปกรณ์ป้องกันผิวหนังจำเป็นต้องมีประสิทธิภาพในการป้องกันผิวหนังจากวัสดุนาโนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก เช่น จากการทดลองภายใต้โครงการ EU Nanosafe2 พบว่าอนุภาคนาโนสามารถทะลุผ่านถุงมือที่มีจำหน่ายทางการค้า ดังนั้นจึงแนะนำให้ใช้ถุงมืออย่างน้อย 2 ชั้น นอกจากนี้ยังพบว่าผ้าไม่ทอ (non-woven fabrics) มีแนวโน้มในการป้องกันการทะลุผ่านของอนุภาคนาโนได้มีประสิทธิภาพกว่า และไม่แนะนำให้ใช้ชุดป้องกันที่ทำจากผ้าฝ้าย

อนุภาคนาโนที่ละลายได้สามารถทะลุผ่านผิวหนังโดยการแตกตัวและดูดซึม อย่างไรก็ตามอนุภาคนาโนที่ไม่ละลายบางชนิดก็สามารถทะลุผ่านผิวหนังชั้นกำพร้า และมีโอกาสเดินทางเข้าสู่กระแสโลหิตซึ่งแพร่กระจายไปทั่วร่างกายได้ เนื่องจากในปัจจุบันยังขาดข้อมูลความรู้เกี่ยวกับแนวโน้มความเสี่ยงของวัสดุนาโนต่อสุขภาพ และไม่มีมาตรฐานการได้รับวัสดุนาโนผ่านทางผิวหนังกำหนดไว้ จึงแนะนำให้มีการนำมาตรการควบคุมเพื่อแยกหรือจำกัดระดับของการรับสัมผัสทางผิวหนังที่อาจเกิดขึ้นได้ไว้ก่อน เช่นเดียวกับการรับสัมผัสผ่านทางการหายใจ COSHH ได้ให้กรอบความคิดในด้านยุทธศาสตร์การป้องกัน หรือควบคุมการรับสัมผัสผ่านทางผิวหนังไว้ เช่น มาตรการควบคุมการรับสัมผัสทางการหายใจ ให้พิจารณาการใช้ผนังปิดล้อมกระบวนการเป็นลำดับแรก และกระบวนการที่มีการจัดการกับผงสามารถทำในระบบปิดอย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัตินั้นสิ่งที่ควรเน้นย้ำคือการลงทุนในด้านการออกแบบการป้องกันสิ่งไม่พึงประสงค์ไว้ล่วงหน้า ระหว่างการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์โดยเฉพาะอย่างยิ่งในผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่อยู่ในสถานะของการพัฒนา ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวอาจช่วยลดค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการใช้มาตรการควบคุมและกระบวนการอัตโนมัติที่มีความซับซ้อนสำหรับจัดการงานที่เกี่ยวข้อง เช่น การเก็บเกี่ยววัสดุนาโน และการบรรจุวัสดุนาโน ถึงแม้ว่าจะมีการใช้กระบวนการต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วเพื่อควบคุมการรับสัมผัส แต่เมื่อมีการชำรุดหรือการซ่อมบำรุงอุปกรณ์ใด ๆ เกิดขึ้น ควรให้ความสำคัญเสมอว่าเรา

ไม่สามารถหลีกเลี่ยงการรับสัมผัสได้ตลอดเวลา จึงควรใช้อุปกรณ์ป้องกันการรับสัมผัสด้วยทุกครั้ง เช่น การสวมชุดป้องกัน ถุงมือ และชิ้นส่วนป้องกันร่างกายอื่น ๆ

ชุดป้องกันที่องค์กรที่ทำงานกับวัสดุนาโนแนะนำให้พนักงาน หรือนักวิจัยในองค์กรใช้ แสดงดังรูปที่ 4 โดยวัสดุที่ใช้อาจทำจาก ฝ้าย ไนล่อน และวัสดุใช้แล้วทิ้ง สำหรับงานที่ต้องมีการรับสัมผัสในปริมาณที่สูง แนะนำให้ใช้ชุดที่ใช้แล้วทิ้ง สำหรับวัสดุที่ใช้ทำถุงมือนั้นมีความหลากหลาย แต่ที่นิยมใช้ คือ ไนไตรล์ ลาเท็กซ์ และยางกับวัสดุอื่น ๆ เช่น พีวีซี โพลีเอทิลีน นีโอพรีน และหนัง ซึ่งรูปแบบการใช้ถุงมืออาจเป็นถุงมือที่มีความยาวคลุมข้อมือ สวมสองชั้น หรือมีสายรัดข้อมือ องค์กรส่วนใหญ่เลือกใช้ถุงมือโดยดูจากตัวทำละลายที่ใช้งานอยู่ ร่วมกับความเข้ากันได้ทางเคมีกับงานที่ใช้อยู่ นอกจากนี้ยังมีการใช้อุปกรณ์ป้องกันอื่น ๆ เช่น หมวกคลุมผม รองเท้ากันไฟฟ้าสถิต ในบริเวณที่ทำงานกับวัสดุนาโนที่มีสมบัติที่ระเบิดได้



รูปที่ 4 ประเภทของชุดป้องกันที่องค์กรแนะนำให้ใช้เมื่อทำงานกับวัสดุนาโน

(ข้อ 8.3.8.2)

การบำรุงรักษาอุปกรณ์ป้องกันผิวหนังเป็นสิ่งสำคัญที่ควรมีการพิจารณา ถ้าในการปฏิบัติงานนั้นพบว่าการบำรุงรักษาและการทำความสะอาดอุปกรณ์ป้องกันผิวหนังนั้นมีความยุ่งยาก ดังนั้นจึงควรเลือกใช้เสื้อผ้าแบบใช้แล้วทิ้ง เช่น เสื้อคลุมที่มีที่คลุมศีรษะ ผ้ากันเปื้อน และผ้าคลุมรองเท้า ซึ่งสามารถป้องกันผิวหนังได้เป็นอย่างดี หลักการนี้สามารถประยุกต์กับถุงมือได้เช่นเดียวกัน ซึ่งถุงมือมีอยู่หลายแบบทั้งขนาดที่หลากหลายและสามารถทนต่อสารเคมีหลายชนิดได้ รวมทั้งทนต่อการขาดและการเกิดเป็นรู โดยทั่วไปแล้วการเสื่อมสภาพของถุงมือเกิดขึ้นได้ขณะใช้งานจึงต้องมีการเปลี่ยนถุงมือเป็นปกติ โดยต้องมีวิธีการกำจัด PPE (เช่น ถุงมือและเสื้อคลุม) รวมทั้งควรมีการระบุถึงความถี่ของการเปลี่ยนและวิธีการทำความสะอาดของ PPE ที่ไม่ได้อยู่ในกลุ่มใช้แล้วทิ้งด้วย

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ป้องกันผิวหนังแล้ว ได้มีการอธิบายกลไกการเกิดการปนเปื้อนทางผิวหนังขณะเมื่อใช้อุปกรณ์ป้องกันผิวหนังไว้แล้ว กลไกนี้ได้แก่ 1) การทะลุผ่าน หรือการซึมผ่านของวัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์ป้องกันผิวหนัง 2) การถ่ายเทของสารระหว่างผิวของอุปกรณ์ป้องกันผิวหนังและผิวหนังของคน 3) การถ่ายเทของสารผ่านการรับสัมผัสโดยตรงของผิวหนังของคนกับพื้นผิวที่มีการปนเปื้อน 4) การกระจายซ้ำของสารโดยการรับสัมผัสจากผิวสู่ผิว เช่น ผลจากการเอามือที่เปื้อนสารไปสัมผัสกับใบหน้า เป็นต้น การถ่ายเทของสารปนเปื้อนโดยการซึมผ่านเสื้อผ้านั้นเกิดขึ้นโดยการผ่านทะลุของละอองลอยและการซึมผ่านของของเหลว ความดันอากาศภายนอกและการเกิดผลกระทบเบลโล “bellows effect” (เช่นการขับออกและการเข้ามาระหว่างการเคลื่อนที่ของอากาศ) จัดเป็นแรงขับดันในการทะลุผ่านของละอองลอยผ่านเส้นใยผ้าได้ ในขณะที่กลไกของการเคลื่อนที่ของของเหลวเกิดจากการทะลุผ่านด้วยแรงดึงตามรูเล็ก (capillary penetration) การทะลุผ่านด้วยความดัน (pressure penetration) การเคลื่อนที่ผ่านด้วยแรงปะทะหรือแรงกระแทก (impact penetration) และการระเหย-การควบแน่น (evaporation-condensation) การเคลื่อนที่ของมวลผ่านเสื้อผ้าที่ไม่สามารถซึมผ่านได้นั้นเป็นกระบวนการแพร่ที่มาจากความเข้มข้นของสาร

การทดสอบในประเทศสหภาพยุโรป สำหรับการรับรอง PPE ที่มีต่อการรับสัมผัสทางผิวหนังนั้นคำนึงถึงเฉพาะการซึมผ่านและการทะลุผ่านของวัสดุเท่านั้น อย่างไรก็ตามได้มีการนำเสนอการทดสอบแบบใหม่โดยคำนึงถึงปัจจัยจากบุคคลด้วย เช่น การทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ป้องกันผิวหนังในสถานที่ปฏิบัติงานจริง และ/หรือ การจำลองสถานที่ปฏิบัติงาน

เป็นที่ยอมรับว่าอุปกรณ์ป้องกันผิวหนังนั้นมีข้อจำกัดในส่วนของประสิทธิภาพในการลดหรือควบคุมการรับสัมผัสทางผิวหนังแม้ว่าผงจะมีขนาดมากกว่า 100 nm ก็ตาม โดยมีการประเมินประสิทธิภาพในการทะลุผ่าน เช่น ประเมินเป็นแบบร้อยละการทะลุผ่าน เป็นต้น สำหรับผ้าที่แตกต่างกัน 10 ชนิด (เช่น ผ้าใยถักทอ ผ้าใยสังเคราะห์ และผ้าที่มีชั้นบางซ้อนกัน) โดยทดสอบการทะลุผ่านของละอองลอยของยางพอลิสไตรีนแบบทรงกลมซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 477 nm ผล

การตรวจวัดการทะลุผ่านของอนุภาคนาโนพบว่ามีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0% ถึง 54% สำหรับผ้าทั้ง 3 ชนิด พบว่ามีการลดลงของความดันอย่างมีนัยสำคัญ เช่น มีความสามารถการซึมผ่านของอากาศน้อยที่สุด เป็นต้น ซึ่งทำให้มีระดับการทะลุผ่านในระดับที่น้อยกว่า 1% ทั้งนี้ยังไม่มีข้อมูลในส่วนของประสิทธิภาพของอุปกรณ์ป้องกันผิวหนังต่อการทะลุผ่านของอนุภาคโดยตรง หรือข้อมูลที่ระบุถึงผลกระทบของอนุภาคต่อโอกาสการที่อุปกรณ์ป้องกันผิวหนังนั้นไม่มีประสิทธิภาพเนื่องจากปัจจัยจากบุคคล อย่างไรก็ตามมาตรฐานของเสื้อผ้าที่มีอยู่ในปัจจุบันได้รวมการทดสอบกับอนุภาคนาโน และได้ให้ข้อมูลที่บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของเสื้อผ้าในการป้องกันอนุภาคนาโน ตัวอย่างเช่น มาตรฐานของ ASTM F1671-03 (American Society for Testing and Materials) ระบุให้มีการใช้ไวรัสทำลายแบคทีเรีย (bacteriophage) ที่มีขนาด 27 nm เพื่อประเมินความทนทานของวัสดุที่ใช้ทำเสื้อผ้าเพื่อป้องกันการทะลุผ่านของเชื้อโรคที่ถ่ายทอดผ่านทางเลือด

การทะลุผ่านอุปกรณ์ป้องกันผิวหนังด้วยอนุภาคนาโนนั้นมีโอกาสเกิดได้มากกว่าการทะลุผ่านของอนุภาคขนาดใหญ่ เนื่องจากการที่อนุภาคนาโนมีโอกาสเล็ดลอดเข้าไปในสถานที่ปฏิบัติงานได้นั้น สามารถเกิดการกระจายอนุภาคไปในวงกว้าง จึงมีการเสนอว่าส่วนประกอบของปัจจัยที่มาจากบุคคลนั้นจะมีความสำคัญมากกว่าปัจจัยที่มีต่ออนุภาคขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังทำให้อุปกรณ์ป้องกันผิวหนังมีประสิทธิภาพในการป้องกันเมื่อสัมผัสกับอนุภาคนาโนน้อยกว่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์ป้องกันผิวหนังเมื่อสัมผัสกับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่

8.3.8.3 การป้องกันดวงตา

การป้องกันดวงตาเมื่อมีโอกาสการรับสัมผัสวัสดุนาโน อุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการทำงาน ได้แก่ ครอบตานิรภัย (goggles) แว่นตานิรภัย และชุดกระบังหน้าแบบเต็มหน้า ไม่นิยมใช้ชุดกระบังหน้ากับการจัดการวัสดุนาโน เนื่องจากมีโอกาสในการรับสัมผัสตัวทำละลายหรือวัสดุที่ร้อน โดยมีหน่วยงานหนึ่งได้รายงานว่าไม่อนุญาตให้สวมคอนแทคเลนส์ในห้องปฏิบัติการ

เครื่องป้องกันการหายใจแบบเต็มหน้านั้นมีส่วนของการป้องกันดวงตาอยู่ด้วยซึ่งในกรณีนี้ผู้ปฏิบัติงานสามารถใช้แว่นสายตา หรือคอนแทคเลนส์ได้

8.3.8.4 การป้องกันการรับสัมผัสทางปาก

การรับสัมผัสทางปากที่อาจเกิดขึ้นได้ในสถานที่ปฏิบัติงานนั้นมาจากมือที่สัมผัสสารนั้นเข้าสู่ปาก หรืออาจเกิดจากกลไกการโบกพัดชั้นเยื่อเมือก (mucociliary escalator) ของระบบทางเดินหายใจดักจับอนุภาคนาโน แล้วขับออกในรูปของเสมหะซึ่งอาจเกิดการรับสัมผัสโดยการบริโภคจากการกลืนเสมหะเข้าไป แนวทางปฏิบัติเพื่อลดการรับสัมผัสของอนุภาคนาโนในสถานที่ปฏิบัติงานนั้น ให้ปฏิบัติตามมาตรการการป้องกันการรับสัมผัสผ่านทางผิวหนัง

8.4 การตรวจสุขภาพ

ควรมีการตรวจสุขภาพให้กับผู้ปฏิบัติงานที่มีความเสี่ยงในการรับสัมผัสกับอนุภาคนาโน และเมื่อมีตัวชี้วัดทางชีวภาพที่สัมพันธ์กับการรับสัมผัสสาร และโปรแกรมการตรวจสุขภาพนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งในกรณีที่อนุภาคนาโนมีองค์ประกอบเป็นสารเคมีที่มีแนวทางอาชีวอนามัยปัจจุบันแนะนำไว้ให้มีการตรวจสุขภาพ การรับสัมผัสวัสดุนาโนที่ความเข้มข้นต่ำมาก อาจสามารถวัดได้จากระดับของตัวชี้วัดทางชีวภาพที่เปลี่ยนแปลงไปจากเส้นฐาน (baseline) แทนที่ การเปรียบเทียบปริมาณทั้งหมดของสารในร่างกายกับ BEI เนื่องจากในปัจจุบันยังคงมีข้อจำกัดของวิธีการที่ใช้วัดความเข้มข้นของอนุภาคนาโนในอากาศ ดังนั้นการใช้ตัวชี้วัดทางชีวภาพจึงอาจเป็นแนวทางที่เป็นประโยชน์สำหรับประเมินประสิทธิภาพของมาตรการควบคุมที่นำมาใช้

ในสถานะปัจจุบันถ้าข้อมูลผลกระทบของอนุภาคนาโนต่อสุขภาพยังคงไม่ชัดเจนนั้น การตรวจสุขภาพอย่างต่อเนื่องนับเป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยติดตามผลกระทบใด ๆ ที่เกิดจากอนุภาคนาโน และบันทึกการตรวจสุขภาพเป็นหลักฐานสำคัญในการบ่งชี้ผลกระทบต่อสุขภาพ โดยโปรแกรมการตรวจสุขภาพพื้นฐานควรประกอบด้วยการจัดการขั้นต่ำ ดังต่อไปนี้

(1) การระบุพนักงานที่รับสัมผัสวัสดุนาโนสังเคราะห์ที่อาจยังไม่ทราบผลกระทบที่อาจเกิดต่อสุขภาพ

(2) ดำเนินการระบุลักษณะของสถานที่ทำงาน และประเมินการรับสัมผัสของผู้ปฏิบัติงาน

(3) จัดให้มีการตรวจสุขภาพให้กับพนักงานที่ทำงานกับวัสดุนาโน เพื่อใช้เป็นเส้นฐาน

(4) จัดให้มีการตรวจสุขภาพประจำทั่วไปสำหรับพนักงานที่ทำงานกับวัสดุนาโน

ต้องมั่นใจว่าพนักงานที่ทำงานกับวัสดุนาโนได้รับการตรวจสุขภาพตามระยะเวลา และอาจรวมถึงการทดสอบประจำ เช่น การทดสอบการทำงานของปอด ไต ตับ และการสร้างเม็ดเลือด

8.5 การดูแลผลิตภัณฑ์

ข้อมูลแนะนำที่องค์กรผู้ส่งมอบวัสดุนาโนควรมีให้กับลูกค้า แสดงตามรายการด้านล่าง ซึ่ง SDS เป็นเอกสารแนะนำทั่วไปที่ควรมี

(1) SDS

(2) เอกสารข้อมูลผลิตภัณฑ์

(3) วิธีการใช้งานเชิงเทคนิค

(4) สิ่งที่อาจเกิดกับผู้ใช้งาน

(5) จดหมายแนบ

(6) เอกสารข้อมูลเชิงเทคนิค

(7) เอกสารข้อกำหนดผลิตภัณฑ์

(8) เอกสารรับรองการวิเคราะห์

(9) คู่มือการปฏิบัติงาน

ภาคผนวก ก.
แนวทางการจัดจำแนกวัสดุนาโนจากการผลิต
(ข้อ 4.1)

ก.1 ทั่วไป

การจัดจำแนกชนิดของวัสดุนาโน สามารถทำได้โดยอาศัยการจัดกลุ่มตามจำนวนมิติ ได้แก่ หัวหมุดควอนตัม และฟูเลอรีนส์จัดเป็นวัสดุโครงสร้างนาโน 3 มิติ ส่วนท่อนาโน ลวดนาโน เส้นใยนาโน และนาโนไฟบริล จัดเป็นวัสดุโครงสร้างนาโนอย่าง 2 มิติ และแผ่นเคลือบพื้นผิวนาโนสเกล แผ่นฟิล์มบาง และชั้นฟิล์ม จัดเป็นวัสดุโครงสร้างนาโน 1 มิติ

การจัดจำแนกตามองค์ประกอบเคมีพื้นฐานของวัสดุนาโน ได้แก่ วัสดุนาโนที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ (เช่น ฟูเลอรีนส์ และ CNT) วัสดุนาโนที่มีออกไซด์เป็นองค์ประกอบ (เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) TiO_2 และซิงค์ออกไซด์ (ZnO)) วัสดุนาโนโลหะ (เช่น ทอง) วัสดุนาโนที่เป็นสารกึ่งตัวนำ (เช่น หัวหมุดควอนตัม) วัสดุนาโนพอลิเมอร์อินทรีย์ (เช่น เดนดริเมอร์) และวัสดุนาโนชีวภาพ (เช่น อนุภาคนาโนมีเปลือกหุ้ม (capsid nanoparticles))

การจำแนกประเภทต่อไปนี้เป็นการจัดจำแนกวัสดุนาโนตามองค์ประกอบทางเคมีพื้นฐาน โดยเรียงจากวัสดุนาโนที่มี 3 มิติ ไปยัง 1 มิติ ตามลำดับ

ก.2 วัสดุนาโนที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ

ก.2.1 ฟูเลอรีนส์

ฟูเลอรีนส์เป็นกลุ่มของสารเคมีที่มีลักษณะคล้ายกรงทรงกลม เกิดจากอะตอมของคาร์บอนสร้างพันธะเคมีกับคาร์บอนสามอะตอมที่อยู่ติดกัน ตัวอย่างของฟูเลอรีนส์ที่เป็นที่รู้จักกันดีที่สุด คือ ฟูเลอรีนส์ C_{60} ซึ่งมีรูปร่างคล้ายลูกฟุตบอล โมเลกุลของฟูเลอรีนส์ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนตั้งแต่ 28 อะตอม จนถึงมากกว่า 100 อะตอม จากรายงานผลการศึกษาทดลองบางฉบับพบว่าโมเลกุลของฟูเลอรีนส์ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนได้ถึง 1 500 อะตอม โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลเท่ากับ 8.2 nm การตั้งสมมติฐานจากทฤษฎียืนยันว่ามีฟูเลอรีนส์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าอยู่จริง ฟูเลอรีนส์ที่มีผนังหลายชั้นคล้ายอนุภาคนาโน หรือที่เรียกกันว่า คาร์บอนนาโนออเนียนส์ (carbon nano-onions) มีขนาดอยู่ระหว่าง 4 nm ถึง 36 nm พบว่ามีการใช้งานฟูเลอรีนส์อย่างกว้างขวาง เช่น แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน เซลล์ไฟฟ้าแสงอาทิตย์ เซลล์เชื้อเพลิง วัสดุสำหรับกักเก็บแก๊สออกซิเจนและแก๊สมีเทน สารเติมแต่งในพลาสติก น้ำมันยาง และใช้เพื่อบำบัดรักษามะเร็งและ AIDS

ก.2.2 คาร์บอนแบล็ก

คาร์บอนแบล็ก ประกอบด้วยวัสดุที่มีบางส่วนเป็นอสัณฐาน มีประเภทที่จัดเรียงตัวของอนุภาคทรงกลมหรืออนุภาคที่ใกล้เคียงทรงกลมที่รวมกันเป็นอนุภาคเกาะก้อนแบบแน่น หรืออนุภาคเกาะก้อนแบบ

หลวม และท้ายที่สุดมักรวมเป็นก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น คาร์บอนแบล็ก 98% ของการผลิตทั่วโลกมาจากการเผาในเตาหลอมและอยู่ในรูปแบบของอนุภาคเกาะก้อนแบบแน่นซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยระหว่าง 80 nm ถึง 500 nm และมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิเฉลี่ยที่ 11 nm ถึง 95 nm การใช้งานคาร์บอนแบล็กในภาคอุตสาหกรรม ได้แก่ เม็ดสี และสารเสริมแรงสำหรับอุตสาหกรรมยาง โดยเฉพาะยางรถยนต์

ก.2.3 เส้นใยนาโนคาร์บอน (CNF)

CNF มีโครงสร้างเป็นรูปทรงกระบอกหรือทรงกรวยโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 2 nm ถึง 100 nm และมีความยาวอยู่ในช่วงน้อยกว่าไมโครเมตรถึงหลายมิลลิเมตร โครงสร้างภายในประกอบด้วย ชั้นแกรไฟต์หลายชั้นซ้อนกัน หรือแผ่นกราฟีนหลายแผ่นซึ่งมีรูปร่างเป็นรูปกรวย (โครงสร้างรูปแฉกเป็นรูปตัววี) รูปถ้วย (โครงสร้างแบบไม้ไผ่) รูปแท่ง (โครงสร้างของแข็ง) หรือรูปท่อ (โครงสร้างเป็นโพรง) ลักษณะเฉพาะที่เป็นเอกลักษณ์ของ CNF ที่แตกต่างจาก CNT คือการซ้อนกันของแผ่นกราฟีนโดยทำมุมกับแกนของ CNF ซึ่งมีค่าไม่เท่ากับ 0° แต่เมื่อแผ่นกราฟีนวางตัวเป็นแนวขนานกับแกนเส้นใยจะมีรูปร่างเป็น CNT เนื่องจากการมีองค์ประกอบที่จัดเรียงตัวทั้งในระนาบและระหว่างระนาบของการขนส่งและสมบัติเชิงกลตามแกนเส้นใย ตลอดจนการมีพันธะที่ไม่อิ่มตัวที่คล้ายกับแกรไฟต์ ทำให้ลักษณะเฉพาะของ CNF แตกต่างจาก CNT

CNF เกิดขึ้นในช่วงที่มีการสะสมไอระเหย (vapour deposition) ของแก๊สที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบจำนวนมาก เช่น ไฮโดรคาร์บอน กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะ การควบคุมเพื่อให้เกิดโครงสร้างและองค์ประกอบที่เป็น CNF สามารถทำได้ด้วยการใช้พลาสมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยากระตุ้นให้เกิดไอระเหยของสาร CNF ที่ผลิตได้จากอุตสาหกรรมนั้นนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งในพอลิเมอร์ วัสดุสำหรับกักเก็บแก๊ส และวัสดุสำหรับการยึดเกาะของตัวเร่งปฏิกิริยา

ก.2.4 CNT

CNT เป็นหนึ่งในตัวอย่างของวัสดุหลาย ๆ กลุ่มที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่ง CNT เกิดจากการเรียงตัวของแผ่นกราฟีนที่ม้วนเป็นท่อ CNT อาจเกิดจากกราฟีนเพียงแผ่นเดียว (SWCNT) หรือเกิดจากกราฟีนหลายแผ่น (MWCNT) CNT ผนังเดี่ยวสามารถเปิดหรือปิดที่ปลายท่อ ขึ้นอยู่กับว่า CNT เหล่านั้นจะหุ้มด้วยฟูเลอรีนส์ครึ่งหนึ่งที่ปลายแต่ละด้านหรือไม่ CNT อาจมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กเพียง 0.4 nm และมีความยาวท่อได้หลายเซนติเมตร MWCNT อาจมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้ถึง 100 nm SWCNT มีสมบัติเป็นโลหะ หรือสารกึ่งตัวนำได้โดยขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของแผ่นกราฟีน และการตอบสนองทางอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งสามารถปรับได้โดยการแทนที่ธาตุ CNT อาจมีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กถึง 60 เท่าในขณะที่มีน้ำหนักเบากว่าเหล็กถึง 6 เท่า นอกจากนี้ CNT ยังมีสมบัติเป็นตัวนำความร้อนที่ดีมาก มีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลได้ดีมาก อีกทั้งมีความเสถียรทางเคมีและความร้อนสูง

ในปัจจุบันมีการนำ CNT มาใช้งานหลากหลาย เช่น เป็นวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์ ฉนวนป้องกันแม่เหล็กไฟฟ้า ตัวปล่อยสนามอิเล็กตรอน ตัวเก็บประจุยิ่งยวด แบตเตอรี่ วัสดุสำหรับเก็บแก๊สไฮโดรเจน และคอมโพสิตโครงสร้าง วิธีการในการสังเคราะห์ CNT แบ่งออกเป็นสองวิธี วิธีที่หนึ่งคือการทำให้ธาตุคาร์บอนกลายเป็นไอด้วยการใช้เลเซอร์ (laser) หรืออาร์กไฟฟ้า (electric arc) และวิธีที่ 2 คือ การแยกคาร์บอนที่อุณหภูมิต่ำจากแหล่งคาร์บอนร่วมกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือพลาสมา

การผลิตและการจัดส่ง CNT ในเชิงพาณิชย์ที่มีอัตรากำลังการผลิตในสเกลขนาดใหญ่นั้นมีการดำเนินการในหลายประเทศ

ก.2.5 แผ่นนาโนกราฟีน (graphene nanosheet)

แผ่นนาโนกราฟีน คือวัสดุที่มีโครงสร้างของแกรไฟต์ แบบชั้นเดียว โดยที่พันธะของกลุ่มคาร์บอนสามอะตอมไปสร้างพันธะกับกลุ่มคาร์บอนสามอะตอมข้างเคียง จนมีลักษณะเชื่อมต่อกันเป็นหกเหลี่ยม เป็นแผ่นขนาดเล็กแบบหยาบตลอดทั้งแผ่น ทำให้แผ่นกราฟีนมีความหนาประมาณ 1 nm กราฟีนมีสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ทั้งทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ แม่เหล็ก เชิงแสง และเชิงกล และมีการประยุกต์ในเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ที่แบน ยืดหยุ่นและใช้ในการเคลือบ ในปัจจุบันการผลิตแผ่นนาโนกราฟีนใช้วิธีการแยกเชิงกลระดับจุลภาค (micromechanical cleavage)

ก.3 วัสดุนาโนโลหะออกไซด์

วัสดุที่มีโครงสร้างระดับนาโนของโลหะออกไซด์ที่อยู่ในรูปแบบของอนุภาคเกาะก้อนแบบแน่น และอนุภาคเกาะก้อนแบบหลวม นิยมนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยใช้เป็นสารเติมแต่งในการผลิตสีและผลิตภัณฑ์ป้องกันแสงแดด และนิยมนำไปใช้เคลือบพื้นผิววัสดุเพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการ วิธีการผลิตส่วนใหญ่ใช้การเผาหรือแยกสลายโดยการใช้ละอองความร้อน (spray pyrolysis) การระเหิดด้วยเลเซอร์ (laser ablation) และการสังเคราะห์ในวัฏภาคสารละลาย (solution phase synthesis)

วัตถุนาโนโลหะออกไซด์ มีรูปร่างหลายแบบ เช่น แท่งนาโน ท่อนาโน เกล็ดหรือแผ่นนาโน (nanoflakes) และโครงสร้างที่มีความซับซ้อนมากขึ้น เช่น แปรงนาโน (nanobrushes) สปริงนาโน (nanosprings) และสายเข็มขัดนาโน (nanobelts) โครงสร้างนาโนเหล่านี้มีสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นเอกลักษณ์และสามารถนำมาใช้กับอุปกรณ์ประเภทออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (optoelectronics) หรืออุปกรณ์ที่เปลี่ยนแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าหรือเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นแสง สามารถประยุกต์ได้กับอุปกรณ์รับสัญญาณหรืออุปกรณ์รับรู้ ตัวแปรสัญญาณ และยารักษาโรค

ซิลิกาอสัณฐานสังเคราะห์ (synthetic amorphous silica) นั้นสามารถผลิตให้มีโครงสร้างระดับนาโนได้ โดยใช้วิธีการการสังเคราะห์ในวัฏภาค แก๊ส (gas phase synthesis) หรือกระบวนการทางเคมีแบบเปียก (wet chemical process) เช่น การตกตะกอน หรือกระบวนการผลิตแบบโซล-เจล (sol-gel process) วัสดุโครงสร้างระดับนาโนนั้นประกอบด้วยอนุภาคปฐมภูมิที่มีขนาดระหว่าง 5 nm ถึง 10 nm รวมตัวกันเป็นอนุภาคเกาะก้อนแบบแน่นที่มีขนาด 1 μm ถึง 40 μm เนื่องจากอนุภาคปฐมภูมิไม่สามารถแยกอยู่อย่างอิสระได้ แต่มัก

รวมกันเป็นอนุภาคเกาะก้อนแบบหลวมมากกว่า ซึ่งเป็นรูปแบบหลักของการรวมตัวกันของอนุภาค มีการนำเอาซิลิกาอสัณฐานสังเคราะห์มาใช้กันอย่างแพร่หลายในเชิงอุตสาหกรรม โดยมักใช้กับอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการเสริมความแข็งแรงให้กับวัสดุพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นคล้ายยางธรรมชาติ (elastomers) การเพิ่มความหนืดให้กับของเหลว การเพิ่มสมบัติการไหลให้กับผงวัสดุ หรือส่วนประกอบของวัสดุปูพื้น ตัวดูดซับ และวัสดุที่เป็นฉนวนกันความร้อน

ก.4 วัสดุนาโนโลหะ

อนุภาคนาโนทอง เป็นวัสดุนาโนโลหะที่ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวาง การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนทองทำได้โดยการเรโซแนนซ์เชิงแสงให้เห็นชัดเจน ในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น ซึ่งมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อม ขนาด และรูปร่างของอนุภาค รวมถึงการทำปฏิกิริยาเชิงแสงในระบบเรโซแนนซ์ โดยสมบัติเฉพาะพิเศษของอนุภาคนาโนทองนี้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ต่าง ๆ มากมาย เช่น ใช้ทำเครื่องหมายเชิงแสง (optical markers) และการรักษามะเร็งด้วยความร้อนเฉพาะที่ในวงการแพทย์

อนุภาคนาโนเงิน เป็นวัสดุนาโนโลหะที่มีปริมาณการผลิตสูงสุด และมีการใช้ประโยชน์ที่หลากหลาย ได้แก่ ใช้เป็นองค์ประกอบในผ้าปิดแผล ใช้เป็นสารฆ่าเชื้อในเครื่องล้างอุปกรณ์ เนื่องจากอนุภาคนาโนเงินมีสมบัติในการยับยั้งแบคทีเรีย อนุภาคนาโนโลหะที่มีขนาดและรูปร่างตามที่ต้องการสามารถสังเคราะห์ขึ้นโดยใช้ปฏิกิริยารีดักชั่นในวัฏภาคสารละลาย

ลวดนาโนโลหะ (metal nanowires) เช่น โคบอลต์ ทอง และทองแดง สามารถเป็นได้ทั้งวัสดุตัวนำไฟฟ้าหรือวัสดุกึ่งตัวนำ และใช้เป็นตัวเชื่อมต่อเพื่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในอุปกรณ์นาโนอิเล็กทรอนิกส์ (nanoelectronics devices) ลวดนาโนผลิตโดยวิธีการสร้างแม่แบบแล้วประจุไอระเหยของสารเคมีเข้าไปให้เต็ม และทำให้เกิดการขึ้นรูปเป็นเส้นลวดนาโน กระบวนการสะสม (deposition processes) ที่ใช้ในปัจจุบันประกอบด้วย การสะสมทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical deposition) และการสะสมไอระเหยของสารเคมี (chemical vapour deposition) การทำแม่แบบสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การกัดกร่อน (etching) หรือการใช้วัสดุนาโนชนิดอื่น ๆ เช่น ท่อนาโน

ก.5 หัวหมุดควอนตัม

หัวหมุดควอนตัม คือผลึกนาโนรูปทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 1 nm ถึง 10 nm หัวหมุดควอนตัมประกอบด้วยวัสดุกึ่งตัวนำซึ่งมีสมบัตินำแสงแบบพิเศษเนื่องจากปรากฏการณ์ควอนตัม ทำให้สารนี้ถูกเรียกว่า “หัวหมุดควอนตัม” ด้วยจำนวนอะตอมในหัวหมุดควอนตัมทำให้หัวหมุดควอนตัมไม่มีลักษณะโครงสร้างเป็นของแข็งที่ขยายตัวได้และไม่เป็นโมเลกุล แสงที่คายออกมาสามารถปรับความยาวคลื่นตามต้องการได้โดยการเปลี่ยนขนาดมิติทั้งหมด

หนึ่งในการใช้งานหัวหมุดควอนตัม คือ การใช้เป็นโพรบเรืองแสง (fluorescent probes) สำหรับการถ่ายภาพเพื่อการวินิจฉัยทางการแพทย์ และในการรักษาโรค โดยการใช้ตามวัตถุประสงค์เหล่านี้เนื่องจากหัวหมุด

ควอนตัมมีสมบัติเชิงแสงที่เหมาะกับการใช้งาน และสามารถเคลือบ หรือดัดแปลงพื้นผิวของหัวหมุดควอนตัมด้วยเพปไทด์ แอนติบอดี กรดนิวคลีอิก และโมเลกุลทางชีวภาพที่สำคัญอื่น ๆ ได้

วิชาเคมีวิทยา ฟิสิกส์ และวัสดุศาสตร์ ให้ข้อมูลวิธีการผลิตหัวหมุดควอนตัม ซึ่งวิธีเหล่านั้นทำให้สามารถควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ได้ เช่น ขนาดและการเพิ่มขนาดของอนุภาค ความสามารถในการละลาย และสมบัติของการปล่อยพลังงาน โดยวิธีที่นิยมใช้ในการผลิตหัวหมุดควอนตัมมากที่สุด คือ กระบวนการผลิตคอลลอยด์แบบเคมีเปียก (wet chemical colloidal processes)

ก.6 วัสดุนาโนพอลิเมอร์อินทรีย์ (organic polymeric nanomaterials)

ก.6.1 เดนดริเมอร์

เดนดริเมอร์ เป็นพอลิเมอร์กลุ่มใหม่ที่มีกิ่งก้านสาขามากและมีการควบคุมโครงสร้างให้มีขนาดมิติอยู่ในระดับนาโนสเกล โดยสามารถควบคุมการสังเคราะห์โครงสร้างนาโนในระดับอะตอมอย่างแม่นยำให้มีขนาด รูปร่าง และเคมีพื้นผิว เป็นไปตามที่ต้องการ เดนดริเมอร์สามารถแสดงลักษณะเฉพาะเป็นได้ทั้งวัสดุที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และสามารถรองรับหมู่ฟังก์ชัน (functional groups) ได้หลากหลายสำหรับการนำมาใช้งานในทางการแพทย์ โดยเดนดริเมอร์สามารถนำมาใช้ได้ทั้งในทางการแพทย์และในทางชีวการแพทย์ (biomedical field) วิธีที่นิยมใช้สังเคราะห์เดนดริเมอร์ เป็นวิธีที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงแบบซ้ำไปซ้ำมาใน การทำปฏิกิริยาเพื่อขยายขนาด และปฏิกิริยาการกระตุ้น (activation reaction) ซึ่งวิธีที่ใช้กันทั่วไป เช่น ปฏิกิริยาไมเคิลแบบดั้งเดิม (Michael reaction) การสังเคราะห์อีเทอร์แบบวิลเลียมสัน(Williamson ether systhesis) การสังเคราะห์วัฏภาคของแข็งแบบใหม่ (modern solid-phase synthesis) เคมีโลหะอินทรีย์ (organic-metallic chemistry) เคมีซิลิคอนอินทรีย์ (organo-silicon chemistry) และเคมีฟอสฟอรัสอินทรีย์ (organo-phosphorus chemistry)

ก.6.2 เส้นใยนาโน

เส้นใยนาโนสามารถสร้างขึ้นได้โดยใช้วัสดุพอลิเมอร์หลายชนิด โดยเทคนิคที่นิยมใช้ในการผลิตคือการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (electrospinning) และการเป่าด้วยแก๊ส (gas-blowing) เทคนิคดังกล่าวสามารถควบคุมองค์ประกอบทางเคมีและพารามิเตอร์ทางฟิสิกส์ เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและความยาวของเส้นใยได้อย่างดี เส้นใยนาโนสแคฟโฟลด์ (scaffolds) สามารถใช้งานได้หลายอย่าง เช่น อุปกรณ์รับสัญญาณ และเครื่องกรองของเหลวและแก๊สรุ่นพิเศษ (ultrafiltration devices for liquid and gas phase) การประยุกต์ส้นใยนาโนพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติในทางการแพทย์มีได้หลายทาง เช่น วิศวกรรมเนื้อเยื่อหรือเนื้อเยื่อเทียม การควบคุมการปลดปล่อยตัวยาในอวัยวะเป้าหมาย ผ้าปิดแผล การแยกโมเลกุล (molecular separation) และการฟื้นฟูกระดูก (bone restoration)

ก.6.3 วัสดุนาโนชีวภาพ (bio-inspired nanomaterials)

วัสดุนาโนชีวภาพ คือวัสดุที่มาจากการที่สารทางชีวภาพนั้นถูกกักเก็บ ห่อหุ้มไว้ในแคปซูล (encapsulated) หรือดูดซับบนพื้นผิว วัสดุนาโนเหล่านี้เป็นสารหลากหลายชนิดที่เป็นหน่วยโครงสร้าง

ทางชีวภาพ เช่น ไขมัน เพปไทด์ และพอลิแซ็กคาไรด์ ซึ่งใช้เป็นตัวนำส่งยา ตัวรับสาร กรดนิวคลิอิก และสารสร้างภาพ เช่น ไมเซลล์จากพอลิเมอร์ (polymeric micelles) กรงกักเก็บโปรตีน (protein cage architectures) อนุภาคนาโนมีเปลือกหุ้มที่มาจากกลุ่มไวรัส (viral-derived capsid nanoparticles) พอลิเพล็กซ์ (polyplexes) และไลโปโซม (liposomes) ซึ่งใช้เป็นท่อลำเลียงและนำยาไปยังอวัยวะเป้าหมาย ปัจจุบันอยู่ระหว่างการพัฒนาคิดค้นสูตรจำนวนมากเพื่อนำยาผ่านไปยังระบบทางเดินอาหาร ระบบทางเดินหายใจ และทางผิวหนัง

ไมเซลล์มีรูปแบบเป็นก้อนผลึกแข็งในสารละลายโดยโมเลกุลแอมฟิฟิลิก (amphiphilic molecules) มีการจัดเรียงเป็นโครงสร้างคล้ายทรงกลมโดยมีส่วนแกนเป็นโมเลกุลไม่ชอบน้ำและหันส่วนที่ชอบน้ำออกด้านนอก มีลักษณะคล้ายเปลือกหุ้มล้อมรอบส่วนที่ไม่ชอบน้ำ เป็นระบบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 50 nm มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เพื่อใช้ส่งยาที่ไม่ละลายในน้ำ ยาหรือสารมีสีที่ช่วยทำให้เห็นความแตกต่าง (contrast agents) มีการกักเก็บไว้ภายในแกนที่เป็นโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ หรือเชื่อมกันด้วยพันธะโคเวเลนท์ กับโมเลกุลที่เป็นส่วนประกอบของไมเซลล์

ไลโปโซมมีลักษณะเป็นถุงเล็ก ๆ ปิดด้วยไขมันสองชั้น (closed lipid bilayer vesicles) ที่เกิดจากการระเหยของฟอสโฟลิพิดแบบแห้ง (dry phospholipids) โมเลกุลของยาอาจละลายในบริเวณที่มีน้ำหรือแทรกเข้าไปในชั้นไขมันสองชั้นของไลโปโซม ขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะทางฟิสิกส์และเคมีของยา พื้นผิวของไลโปโซมนั้นสามารถเปลี่ยนไปด้วยลิแกนด์เป้าหมายและพอลิเมอร์ได้

พอลิเพล็กซ์ (polyplexes) เป็นการรวมตัวกันของสารที่เกิดขึ้นได้เองระหว่างกรดนิวคลิอิกและพอลิแคตไอออน (polycation) หรือไลโปโซมประจุบวก (cationic liposomes) (หรือพอลิแคตไอออนจับคู่กับลิแกนด์เป้าหมาย (targeting ligands) หรือพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ (hydrophilic polymers)) และใช้ในการเป็นต้นแบบของการทรานสเฟกชัน (transfection) รูปร่าง การกระจายตัวของขนาด และความสามารถในการทรานสเฟกชันของสารชนิดนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและอัตราส่วนประจุของกรดนิวคลิอิกต่อไขมันหรือพอลิเมอร์ที่มีประจุบวก ตัวอย่างของพอลิแคตไอออนที่มีการนำมาใช้ในการถ่ายทอดยีนหรือเป็นต้นแบบในการทำยีนบำบัด รวมทั้งพอลิแอลไลซีน (poly-L-lysine) พอลิเอทธิลีนอิมีนแบบเส้นตรงหรือแบบกิ่งก้าน(linear- and branched-poly(ethylenimine)) พอลิอะมิโดเอมีน (poly(amidoamine)) พอลิเบต้าอะมิโนเอสเทอร์ (poly-β-amino esters) และไซโคลเด็กซตรินประจุบวก (cationic cyclodextrin)

โครงสร้างการเรียงตัวของโปรตีนแบบกรงและอนุภาคนาโนมีเปลือกหุ้มที่มาจากกลุ่มไวรัสนั้นเป็นการจัดเรียงตัวเอง (self-assembly) ของโปรตีนหน่วยโครงสร้างของวัสดุนาโนที่มาจากชีวภาพนี้ได้มาจากวัสดุทางธรรมชาติ และใช้เทคนิคทางจุลชีววิทยาสังเคราะห์ (synthetic microbiology techniques) ในขณะที่การจัดเรียงตัวเองนั้นเกิดขึ้นในวัฏภาคของเหลว

ภาคผนวก ข.

กระบวนการผลิตวัสดุนาโน

(ข้อ 4.2)

ข.1 วิธีการผลิตละอองลอย (aerosol generation methods)

วิธีการผลิตละอองลอยเป็นวิธีที่ใช้ผลิตวัสดุนาโนหลายชนิด วิธีการนี้ทำโดยการที่นิวเคลียสชนิดเดียวกันของไอของสารอิ่มตัวแบบยิ่งยวดรวมตัวกันเอง และเกิดการเติบโตของอนุภาคโดยการควบแน่นจนตกตะกอนและจับตัวกัน การควบแน่นให้เกิดไอระเหยนั้นทำได้โดยใช้ถังเร่งปฏิกิริยาและเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเรื่อย ๆ จนของแข็งเกิดการอิ่มตัวอย่างยิ่งยวดและทำให้เย็นลงอีกครั้งจนละอองของแข็งแขวนลอยคล้ายแก๊ส วิธีการผลิตวัสดุนาโนโดยปกติใช้กระบวนการให้ความร้อนหรือกระบวนการระเหยให้กลายเป็นไอ ซึ่งประกอบด้วย

- การแยกสลายด้วยเปลวไฟ
- เตาปฏิกรณ์ที่ร้อน หรือถังปฏิกิริยาที่มีผนังร้อน (furnace/hot wall reactors)
- การแยกสลายด้วยเลเซอร์ (laser induced pyrolysis)

ข.2 วิธีการสะสมด้วยไอ (vapour deposition methods)

วิธีการนี้เป็นที่รู้จักและเป็นที่ยอมรับอย่างดีสำหรับการผลิตสารกึ่งตัวนำ โดยกระบวนการนี้เกิดจากการผลิตไอสารในห้องปฏิกิริยา (reaction chamber) ด้วยปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยความร้อน (pyrolysis) ปฏิกิริยารีดักชัน (reduction) ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) และไนตริเดชัน (nitridation) ขั้นตอนแรกเป็นการสะสมอะตอม 2-3 อะตอม โดยอะตอมแรกจะก่อตัวเป็นก้อนและกระจายตัวเชื่อมต่อกันเป็นฟิล์มต่อเนื่อง จากนั้นเกิดการขยายมากขึ้นต่อเนื่องจนกระทั่งเกิดเป็นฟิล์มหนา

วิธีการเหล่านี้ได้นำมาใช้ในการผลิตเป็นนาโนฟิล์ม ได้แก่ TiO_2 ZnO และ ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) นอกจากนี้กระบวนการสะสมด้วยไอโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวช่วยมักใช้ในการผลิต CNT

ข.3 วิธีการผลิตอนุภาคขนาดคอลลอยด์ หรือการจัดเรียงตัวเอง (colloidal/self-assembly methods)

วิธีการผลิตอนุภาคขนาดคอลลอยด์นี้เป็นกระบวนการตกตะกอนแบบเคมีเปียก (wet chemistry precipitation processes) ในสารละลายเข้มข้นที่มีไอออนแตกต่างกันและผสมกันภายใต้การควบคุมอุณหภูมิและความดันจนได้ตะกอนที่ไม่ละลายน้ำ

ปัจจุบันมีการพัฒนาวิธีการผลิตอนุภาคขนาดคอลลอยด์ ด้วยการนำวิธีเคมีคลื่นเสียง (sonochemistry) มาใช้เป็นตัวควบคุมกระบวนการ โดยโมเลกุลของสารตั้งต้นเกิดปฏิกิริยาเคมีเนื่องจากการใช้แสงอัลตราซาวด์ (ultrasound radiation) ส่วนสำคัญของกระบวนการนี้คือการสร้าง การขยายตัว และการยุบตัวของฟองขนาดเล็กที่เกิดขึ้นในของเหลวจากการใช้คลื่นเสียง โดยการใช้อุณหภูมิที่สูงและอัตราการเย็นตัวที่สูงร่วมกับการยุบตัวของฟองและการเกิดศูนย์กลางของนิวเคลียสซึ่งมีการจำกัดการขยายตัวโดยการยุบตัวลงของฟองอย่างรวดเร็ว

ตัวอย่างของสารที่ผลิตโดยใช้วิธีการผลิตอนุภาคขนาดคอลลอยด์ ได้แก่ สารประกอบในกลุ่มของชาลโคเจนไนด์ (chalcogenide) โลหะ และโลหะผสม เช่น ทอง โคบอลต์ และนิกเกิล รวมไปถึง CNT และท่อนาโนไทเทเนียม (titania nanotubes)

ข.4 การสะสมด้วยไฟฟ้า (electrodeposition)

เส้นใยนาโนพอลิเมอร์ และฟิล์มลวดนาโนโลหะสามารถสร้างบนซับสเตรต ด้วยวิธีการเกิดพอลิเมอร์ด้วยไฟฟ้า (สำหรับพอลิเมอร์) หรือการสะสมด้วยไฟฟ้า (สำหรับโลหะ)

ข.5 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า (electro-spinning)

วิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้านี้เป็นวิธีการหลักที่ใช้ในการผลิตเส้นใยนาโนพอลิเมอร์ วิธีการนี้ใช้แรงไฟฟ้าในการผลิตเส้นใยพอลิเมอร์จากสารละลายพอลิเมอร์หรือสารพอลิเมอร์ที่หลอมละลายได้

ข.6 วิธีการลดขนาด (attrition methods)

วิธีการลดขนาด ใช้วิธีการเจียนและการบดในการผลิตวัสดุ เช่น ดินเหนียว ถ่านหิน และโลหะ โดยอัตราการผลิตอยู่ในระดับหลายตันต่อชั่วโมง

ฉบับร่างเพื่อรอมความคิดเห็น

ภาคผนวก ค.

อันตรายของวัสดุนาโนต่อสุขภาพ (รายละเอียดเพิ่มเติม)

(ข้อ 5.1 และข้อ 7.2.3.2)

ค.1 หลักการพื้นฐานและความไม่แน่นอน

ผลงานวิจัยเกี่ยวกับอนุภาคและเส้นใยที่มีอยู่ เป็นข้อมูลพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ในการประเมินแนวโน้มของอันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากอนุภาคนาโน ในขณะที่สมบัติของอนุภาคนาโนนั้นสามารถแปรผันได้อย่างมาก หลักการพื้นฐานทางฟิสิกส์-เคมี และพิษจลนศาสตร์ นั้นได้มาจากการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับความเข้าใจถึงพิษวิทยาที่อาจเกิดขึ้นของอนุภาคนาโน ตัวอย่างเช่น จากการศึกษาในมนุษย์ทำให้รู้ว่าอนุภาคนาโนที่หายใจเข้าไปนั้น ส่วนมากอาจไปตกค้างและสะสมอยู่ในพื้นที่ถุงลมปอดของระบบทางเดินหายใจซึ่งมีปริมาณมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามต้องตระหนักว่าอนุภาคนาโนอาจรวมตัวกันอย่างหลวม ๆ และ การรวมกันของอนุภาคนาโนนี้สามารถไปสะสมในพื้นที่อื่น ๆ ของระบบทางเดินหายใจจนทำให้ไม่สามารถหายใจเข้าได้เลย นอกจากนี้จากการศึกษาในสัตว์ทดลองพบว่าอนุภาคนาโนหลังจากการได้รับสัมผัสเข้าสู่ร่างกายแล้วสามารถเคลื่อนไปยังอวัยวะอื่น ๆ ในร่างกายได้ แม้ว่ายังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัดว่าเคลื่อนไปในลักษณะนี้มีอิทธิพลมาจากสมบัติทางฟิสิกส์-เคมีของอนุภาคนาโนอย่างไร นอกจากนี้ความยากในการคาดการณ์ถึงผลกระทบที่เกิดต่อสุขภาพของมนุษย์โดยอ้างอิงจากการศึกษาในสัตว์ทดลองนั้นควรพิจารณาถึง ความไม่แน่นอนที่เพิ่มขึ้นด้วย แนวโน้มสำหรับการได้รับสัมผัสอนุภาคนาโนในปริมาณมากผ่านทางผิวหนังและระบบทางเดินอาหารนั้นอาจเกิดขึ้นได้เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า หลักฐานจากการศึกษาทางพิษวิทยานาโน (ทั้งในหลอดทดลอง และในสัตว์ทดลอง) พบว่าการรับสัมผัสกับอนุภาคนาโนนั้นอาจทำให้เกิดความเป็นพิษต่อเซลล์ หรือต่อเนื้อเยื่อ หรือทั่วทั้งร่างกายได้ เนื่องจากการที่อนุภาคนาโนมีขนาดเล็กมากทำให้มีโอกาสผ่านเยื่อหุ้มเซลล์และทำปฏิกิริยากับโครงสร้างภายในเซลล์ได้ เช่น ไมโตคอนเดรีย และนิวเคลียส (และอนุภาคนาโนบางชนิดได้ทำให้เซลล์ได้รับ ความเสียหายจากภาวะออกซิเดชัน และทำให้การทำงานของเซลล์เสียไป) การศึกษาในสัตว์ทดลองนั้นได้บ่งชี้ว่าอนุภาคนาโนบางชนิดสามารถทำงานกับระบบชีววิทยาได้ดีกว่าสารเคมีชนิดเดียวกันที่มีอนุภาคขนาดใหญ่กว่า เนื่องจากอนุภาคนาโนมีพื้นที่ผิวต่อมวลมากกว่าเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของการตอบสนองต่อปริมาณสารในรูปของมวล การที่อนุภาคนาโนมีพื้นที่ผิวต่อมวลที่มากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่นั้นเป็นสาเหตุพื้นฐานที่ส่งผลให้มีความไวปฏิกิริยาทางเคมีที่ดีกว่ามากและทำให้สามารถนำอนุภาคนาโนไปใช้งานได้ทั้งในภาคอุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์ และการแพทย์ได้ อย่างไรก็ตามได้ทำให้มีความกังวลมากขึ้นเกี่ยวกับผลกระทบเชิงลบที่อาจเกิดกับสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานที่มีโอกาสรับสัมผัสกับอนุภาคนาโนเช่นกัน

ค.2 ข้อมูลผลกระทบต่อสุขภาพของอนุภาคนาโนและเส้นใยนาโนจากอุบัติการณ์ที่เกิดขึ้นโดยไม่ตั้งใจ

งานวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบต่อสุขภาพของอนุภาคนาโนยังมีไม่มากนัก ส่วนมากนั้นเกี่ยวกับผลกระทบต่อสุขภาพจากอุบัติการณ์ที่เกิดขึ้นโดยไม่ตั้งใจ เช่น อนุภาคที่เกิดจากการปล่อยไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล และไอควันหรือฟูมจากการเชื่อม เป็นต้น แต่กลไกทางชีววิทยาต่อการตอบสนองของปอดจากการรับสัมผัสอนุภาคนาโนอาจปรากฏในลักษณะที่สอดคล้องกับการตอบสนองของปอดต่อการหายใจเข้าไปโดยไม่ตั้งใจของอนุภาคนาโน (การตอบสนอง เช่น ความเครียดจากภาวะออกซิเดชัน การอักเสบ และการผลิตของไซโตไคน์ คีโมไคน์ หรือไซโตไคน์ที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของเซลล์ และสารเร่งการเจริญเติบโตของเซลล์) นอกจากนี้สิ่งปนเปื้อน เช่น โลหะทรานซิชัน อาจนำไปสู่การตอบสนองของปอดได้เช่นกัน แม้ว่าองค์ประกอบและลักษณะเฉพาะทางฟิสิกส์-เคมีของอนุภาคนาโนจากการผลิตและอนุภาคนาโนที่เกิดโดยไม่ตั้งใจนั้นแตกต่างกันมาก อย่างไรก็ตามหลักการทางพิษวิทยาและการเปรียบเทียบปริมาณที่ได้จากการศึกษาของอนุภาคนาโนที่เกิดโดยไม่ตั้งใจอาจสัมพันธ์กับการประเมินผลกระทบทางสุขภาพที่มาจากอนุภาคนาโนจากการผลิต

งานวิจัยจำนวนมากที่เกี่ยวกับผลกระทบต่อสุขภาพจากการหายใจเอาเส้นใยเข้าไปเช่น ข้อมูลที่ทราบกันดีคือรูปแบบเฉพาะของแร่ใยหินเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดมะเร็งเยื่อหุ้มปอดเมโสเธลิโอมาที่เป็นอันตรายร้ายแรงต่อสุขภาพอนามัย และทำให้เกิดโรคเกี่ยวกับปอดชนิดอื่น ๆ เช่น โรคพังผืดระหว่างปอด โรคเยื่อหุ้มปอดมีหินปูนเกาะจับ และโรคเยื่อหุ้มปอดหนาตัว ผลกระทบที่เป็นอันตรายของเส้นใยเกิดขึ้นจากปัจจัยสำคัญสามประการ คือ ความยาว เส้นผ่านศูนย์กลาง และการคงอยู่ ทั้งนี้เป็นการยากในการสรุปผลกระทบต่อสุขภาพของเส้นใยที่มีขนาดในระดับนาโนสเกลโดยอ้างอิงจากการศึกษาแร่ใยหิน แต่ข้อมูลจากการศึกษานี้สามารถบ่งบอกถึงสมบัติของอนุภาคซึ่งได้แก่ ขนาด รูปร่าง และองค์ประกอบ เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความเป็นพิษของอนุภาคนาโน โดยมีการศึกษาระยะสั้นต่อผลกระทบของ SWCNT และ MWCNT ในปอดของหนู (ทำโดยวิธีการหยอดยาเพื่อระงับความรู้สึกทางหลอดลม หรือการสูดลมหายใจทางช่องคอ) การศึกษานี้แสดงถึง การอักเสบที่ผิดปกติและการเกิดพังผืดในปอด ตัวอย่างเช่น การอักเสบแบบชั่วคราวและตามมาด้วยการเกิดพังผืดในช่วงระยะเริ่มแรกในปอดด้วยปริมาณสารที่ต่ำกว่าปริมาณสารที่ทำให้เกิดพังผืดซึ่งมาจากควอตซ์ หรือคาร์บอนแบล็ก

ค.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นพิษกับพื้นผิว เคมีพื้นผิว และจำนวนอนุภาค

ปัจจัยสำคัญที่สุดที่ทำให้วัสดุนาโนเป็นอันตรายเพิ่มขึ้น คือ ปริมาณหรือพื้นผิวสัมผัสกับอนุภาคนาโนที่มากขึ้น เมื่อเทียบกับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าที่มีความเข้มข้นเท่ากัน สมมติฐานนี้มาจากผลกระทบต่อปอดที่สังเกตได้จากการศึกษาในสัตว์ทดลองจำพวกหนู โดยหนูได้รับสัมผัสกับวัสดุโครงสร้างระดับ นาโนที่ละลายน้ำได้ยากหลายชนิดในรูปแบบของอนุภาคนาโนที่รวมกันแบบอนุภาคเกาะก้อนแบบแน่นและอนุภาคเกาะก้อนแบบหลวม หรืออนุภาคที่สามารถหายใจเข้าไปได้ที่มีขนาดใหญ่กว่า (เช่น TiO_2 คาร์บอนแบล็ก แบเรียมซัลเฟต เขม่าดีเซล เถ้าถ่านหิน และผงหมึก) จากการศึกษาพบว่า ที่มวลใด ๆ ของวัสดุโครงสร้าง

ระดับนาโนที่ละลายน้ำได้ยากในรูปแบบของอนุภาคนาโนที่รวมกันแบบอนุภาคเกาะก้อนแบบแน่นและอนุภาคเกาะก้อนแบบหลวมนั้น อาจทำให้เกิดผลกระทบได้ชัดเจนกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติพื้นผิวที่คล้ายกัน ความสัมพันธ์ของปริมาณการตอบสนองต่อสารที่ได้จากการศึกษาในสัตว์ทดลองของอนุภาคที่ละลายน้ำได้ยากและมีความเป็นพิษต่ำนั้นมีลักษณะสอดคล้องกับขนาดของอนุภาคเมื่อปริมาณที่ได้รับนั้นแสดงในรูปของพื้นที่ผิวของอนุภาค กลไกสำหรับการที่วัสดุแสดงความเป็นพิษที่สูงขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลงเมื่อพิจารณามวลเป็นหลักนั้นดูเหมือนว่าสามารถเกี่ยวข้องกับการอักเสบที่ปอด ความเครียดจากภาวะออกซิเดชัน และการบาดเจ็บของเนื้อเยื่อ ฤทธิ์ทางชีวภาพของอนุภาคเป็นผลมาจากปริมาณของอนุภาค รวมทั้งสมบัติทางฟิสิกส์-เคมีของอนุภาค ประกอบด้วย ขนาด พื้นที่ผิว ความสามารถในการละลาย รูปร่าง โครงสร้างผลึก ประจุ ความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยา และเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา

สมบัติของวัสดุนาโนสามารถปรับปรุงได้ด้วยทางวิศวกรรม เช่น การศึกษาในหลอดทดลองแสดงให้เห็นถึงความเป็นพิษของฟูเลอรีนส์ (วัดตามจำนวนเซลล์ที่ตาย) และ CNT สามารถลดความรุนแรงลงได้อย่างมากด้วยการปรับปรุงเคมีพื้นผิวของโมเลกุลของฟูเลอรีนส์ และ CNT เช่น ด้วยปฏิกิริยาไฮดร็อกซิเลชัน การศึกษาความเป็นพิษของหัวหมุดควอนตัมที่มีต่อเซลล์ในหลอดทดลองแสดงให้เห็นว่าชนิดของสารเคลือบผิวส่งผลต่อการเคลื่อนไหวของเซลล์และอัตราการรอดชีวิต

ค.4 ปฏิกิริยาการอักเสบจากอนุภาคนาโน

อนุภาคนาโนหลายชนิดตั้งแต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ของคาร์บอนไปจนถึงโลหะทรานซิชันนั้น เมื่อมีการเข้าสู่เนื้อเยื่อและเซลล์แล้ว สามารถทำให้เกิดการอักเสบทั่วไปและการตอบสนองระยะเฉียบพลันซึ่งร่วมกับการปลดปล่อยของสารสื่อโมเลกุล เช่น คีโมไคน์ ไซโตไคน์ โปรตีนชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นในภาวะอักเสบ (C-reactive protein) และโปรตีนในพลาสมาที่ช่วยทำให้โลหิตแข็งตัว (สารที่จับตัวเป็นก้อน) นอกจากนี้การกระตุ้นของมาโครฟาจ และการกระตุ้นนิวโตรฟิลซึ่งเป็นเม็ดเลือดขาวชนิดหนึ่งทำหน้าที่จับกินทำลายแบคทีเรียนั้นเกี่ยวข้องกับการผลิตสารประกอบที่มีออกซิเจนที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยา มาโครฟาจเป็นเซลล์ควบคุมที่รู้จักดีในเนื้อเยื่อซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับอนุภาคฝุ่นขนาดเล็ก เช่น อนุภาคนาโน ทำให้ออกฤทธิ์ทางชีวภาพขึ้น มีการค้นพบว่าการรับสัมผัสกับอนุภาคนาโนที่แตกต่างกันทำให้ความสามารถของมาโครฟาจที่ทำให้เกิดการอักเสบหรือการต่อต้านปรับเปลี่ยนไปได้หลายทาง โปรตีนพลาสมาและนิวโตรฟิลสามารถเคลื่อนที่จากเลือดไปยังจุดที่เกิดการอักเสบในการตอบสนองต่อไซโตไคน์และคีโมไคน์ บทบาทหนึ่งของนิวโตรฟิลใน การตอบสนองต่อการอักเสบเป็นการทำลายสิ่งแปลกปลอมด้วยการย่อยสลายโปรตีนและรวมทั้งสารประกอบออกซิเจนที่มีความไวต่อปฏิกิริยา อย่างไรก็ตาม หากการต่อต้านต่อสิ่งแปลกปลอมด้วยเซลล์เหล่านี้เกิดขึ้นในระยะเวลาที่ยาวนานและมากเกินไปย่อมส่งผลให้เนื้อเยื่อถูกทำลายไปด้วย เมื่อเกิดกระบวนการการกลืนกินมาโครฟาจและเกิดการสลายตัวของโปรตีน หรือเมื่ออนุภาคนาโนอยู่ภายในของกลุ่มเซลล์ที่ไม่เกี่ยวข้องกับระบบภูมิคุ้มกัน เช่น เซลล์พาเรนไคมา (parenchymal cells) การต่อต้านของ

โมเลกุลที่อยู่ภายในเซลล์เริ่มทำให้เกิดการแสดงออกของยีนควบคุมแบบใหม่ ๆ เมื่อกลไกในการคุ้มกัน เช่น สารต้านอนุมูลอิสระ นั้นหายไป การบาดเจ็บของเนื้อเยื่อและโรคต่าง ๆ อาจเกิดขึ้น จากการทดสอบด้วยเซลล์และสัตว์ทดลองนั้นมีรูปแบบการตอบสนองซึ่งป้องกันภายในเซลล์หลายแบบที่พบว่าเกิดจากการรับสัมผัสกับวัสดุที่มีอนุภาคขนาดเล็ก หรือวัสดุที่เป็นเส้นใย เช่น คาร์บอนแบล็ก CNT ฝุ่นในอากาศ และไทเทเนียมระดับนาโนสเกล ซึ่งการตอบสนองดังกล่าว ได้แก่ ไซโตไคน์ที่กระตุ้นให้เกิดการอักเสบ และยีนที่เกี่ยวข้อง ยีนและโปรตีนที่สามารถเหนี่ยวนำธาตุให้มีการตอบสนองต่อสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant-response element-inducible genes and proteins) และโปรตีนที่ตอบสนองต่อความเครียดหรือความร้อน ดังนั้นผลกระทบที่ตามมาได้แก่ การตอบสนองต่อการอักเสบถาวรและการเหนี่ยวนำยีนซึ่งสามารถเป็นต้นเหตุของการเกิดพยาธิสภาพตามมา จากการทดสอบความเป็นพิษของอนุภาคนาโนสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะ หรือชีวพิษภายในตัวแบคทีเรีย (bacterial endotoxins) ที่เป็นพวกลิโปโพลีแซ็กคาไรด์มีส่วนทำให้เกิดการเหนี่ยวนำการตอบสนองต่อการอักเสบได้ โดยเฉพาะ SWCNT ที่ยังไม่ได้ทำให้บริสุทธิ์นั้นมีเหล็กเป็นองค์ประกอบมากกว่า 20% โดยน้ำหนักซึ่งสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการอักเสบของปอดอย่างรุนแรงมากกว่า CNT ที่บริสุทธิ์ และสูตรปัจจุบันที่ใช้ในการผลิตอนุภาคนาโนทองซึ่งมีสารพิษเจือปนอยู่มากทำให้เกิดการกระตุ้นต่อเซลล์ภูมิคุ้มกันจากการทดสอบในหลอดทดลอง และการปรับปรุงสูตรการผลิตที่มีการลดสารพิษที่เจือปนอยู่ทำให้ลดฤทธิ์ทางชีวภาพลงได้

ค.5 ข้อสังเกตจากการศึกษาระบาดวิทยาที่เกี่ยวกับอนุภาคระดับนาโนสเกลและอนุภาคขนาดเล็กละเอียด

การศึกษาด้านระบาดวิทยาเริ่มต้นในผู้ปฏิบัติงานที่มีการรับสัมผัสกับละอองลอย ซึ่งรวมไปถึงอนุภาคนาโนและอนุภาคขนาดเล็กละเอียดที่เกิดโดยไม่ตั้งใจ ซึ่งมีรายงานว่าทำให้การทำงานของปอดลดลง ทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบหายใจ เกิดโรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง (chronic obstructive pulmonary disease) และการเกิดพังผืด นอกจากนี้ จากงานวิจัยพบว่ามีการเกิดโรคมะเร็งปอดเพิ่มสูงขึ้นในกลุ่มผู้ปฏิบัติงานที่สัมผัสกับอนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นโดยไม่ตั้งใจ เช่น อนุภาคที่เกิดจากการปล่อยไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลและไอควันหรือฟูมจากการเชื่อมโลหะ มีกรณีศึกษาในมนุษย์โดยรายงานถึงอาการบวมน้ำของปอดในผู้ปฏิบัติงานที่สัมผัสไอควันของ PTFE และ การตายโดยอุบัติเหตุในผู้ปฏิบัติงานจากการทำงานที่ผิดพลาดของเครื่องจักรทำให้เรซิน PTFE ได้รับความร้อนมากเกินไปและมีการปลดปล่อยของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการสลายด้วยความร้อน (pyrolysis) ของ PTFE ขึ้นในสถานที่ทำงาน ผลกระทบของอนุภาคนาโนที่ได้จากการศึกษาเหล่านี้มีความไม่แน่นอนอยู่ซึ่งมาจากการที่อนุภาคนาโนมีสมบัติที่แตกต่างกัน

การศึกษาทางระบาดวิทยาในกลุ่มประชากรทั่วไปได้แสดงให้เห็นถึงความเกี่ยวเนื่องกันระหว่างอนุภาคมลพิษในอากาศกับอัตราการเจ็บป่วยและการตายที่เพิ่มขึ้นจากโรคระบบทางเดินหายใจและโรคหัวใจและหลอดเลือด การศึกษาทางระบาดวิทยาพบว่าผลกระทบต่อสุขภาพเกิดเนื่องจากการได้รับสัมผัสอนุภาคนาโนในมลพิษทางอากาศ แม้ว่ายังมีความไม่แน่นอนถึงบทบาทของอนุภาคนาโนกับมลพิษในอากาศชนิดอื่น ๆ ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ การศึกษาที่เกี่ยวข้องนั้นอยู่บนพื้นฐานของการวัดจำนวนอนุภาค

หรือความเข้มข้นโดยมวลของอนุภาคที่มีสัดส่วนขนาดที่แน่นอน เช่น อนุภาคขนาดเล็กกว่า 2.5 μm ในการศึกษาทดลองกับผู้รับการทดลองที่มีสุขภาพแข็งแรง และผู้ที่ป่วยเป็นโรคหอบหืดจากการหายใจเอาอนุภาคคาร์บอนระดับนาโนสเกลเข้าไปนั้น มีการสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงต่อการแสดงออกของโมเลกุลที่ยึดติดกันโดยเม็ดเลือดขาว (blood leukocytes) ซึ่งอาจนำไปสู่การเกิดผลกระทบต่อโรคหัวใจและหลอดเลือดจากการได้รับสัมผัสกับอนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นโดยไม่ตั้งใจนี้ จากการศึกษาเชิงคลินิกที่มีการควบคุมในห้องปฏิบัติการพบว่ามีการสะสมของฝุ่นระดับนาโนสเกลตลอดทั่วแขนงปอด (pulmonary tree) พร้อมกับทำให้เกิดปัญหาโรคระบบหัวใจและหลอดเลือด

การศึกษาผลกระทบอนุภาคนาโนต่อมนุษย์ในเบื้องต้นเป็นการอ้างอิงจากกลุ่มคนที่ได้รับสัมผัสกับไอควันหรือฟูม (เช่น จากการเชื่อมโลหะ) อนุภาคที่เกิดจากการปล่อยไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล หรืออนุภาคเล็ก ๆ จากมลพิษในอากาศ การศึกษาทางระบาดวิทยาได้มุ่งเป้าเฉพาะไปที่อนุภาคนาโนจากการผลิตซึ่งยังไม่มีการศึกษามากนัก ยกเว้นเฉพาะ TiO_2 และคาร์บอนแบล็ก ดังนั้น การนำข้อมูลที่ได้จากมลพิษทางอากาศและฝุ่นที่อาจมีอนุภาคนาโนปนอยู่ด้วยไปใช้กับอนุภาคนาโนจากการผลิตนั้นอาจมีความไม่แน่นอนด้วย อย่างไรก็ตามควรมีการพิจารณาถึงความเสี่ยงจากการได้รับสัมผัสกับวัสดุนาโนรวมไปถึงอาชีวอนามัยร่วมด้วย

ค.6 ผลการศึกษาทางพิษวิทยาของวัสดุนาโนในเซลล์และในสัตว์ทดลองสำหรับวัสดุนาโน

ค.6.1 วัสดุนาโนที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ

วัสดุที่มีคาร์บอนในระดับนาโนสเกลเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ CNT CNF ฟูเลอรีนส์ และคาร์บอนแบล็ก SWCNT คือแผ่นแกรไฟต์ชั้นเดียวที่ม้วนเป็นทรงกระบอก วัสดุชนิดนี้ให้ลักษณะสมบัติที่ดีเยี่ยมทั้งทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ เชิงกล และทางความร้อน เนื่องจากลักษณะสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์และเป็นประโยชน์ทำให้มีการผลิตและการใช้งาน CNT เพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังนั้นจึงทำให้มนุษย์มีโอกาสที่จะรับสัมผัสกับสารนี้มากขึ้น

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มีงานวิจัยด้านพิษวิทยาของ CNT เป็นจำนวนมาก โดยจากงานวิจัยในการเพาะเลี้ยงเซลล์และจากสัตว์ทดลองได้แสดงให้เห็นถึงฤทธิ์ทางชีวภาพต่อ CNT ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้อย่างหลากหลายขึ้นอยู่กับวัสดุและวิธีการที่ใช้ทดสอบ ลักษณะทางธรรมชาติของ CNT นั้นขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้ในการผลิตและการปฏิบัติหลังการผลิตส่งผลให้เกิดสิ่งเจือปนในระดับที่แตกต่างกัน เช่น โลหะ โมเลกุลสารอินทรีย์ คาร์บอนรูปแบบอื่น ๆ วัสดุพยุง เป็นต้น โครงสร้างที่ต่างกัน เช่นโครงสร้างอะตอม จำนวนชั้นของผนัง สภาวะการรวมตัวเป็นก้อน เป็นต้น และรูปทรงเรขาคณิต เช่น เส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว การเปลี่ยนรูป เป็นต้น ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องมีการตรวจวัดและรายงานผลการทดสอบสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุทดสอบพร้อมกับผลการศึกษาอันตรายของวัสดุเหล่านั้นด้วย

การทดสอบในหลอดทดลอง (*in vitro*) พบว่าหลังจากมีบ่มเซลล์ร่วมกับ SWCNT แล้ว ดัชนีชี้วัดสารทางชีวภาพของความเครียดจากภาวะออกซิเดชันนั้นเพิ่มขึ้น SWCNT ที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ด้วยกรดนั้นส่งผลด้านลบต่อเซลล์ เช่น การอักเสบแบบเฉียบพลันซึ่งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และต่อเนื่อง การเกิดพังผืด

และเนื้องอกในปอดของหนูหลังจากการพ่น CNT เข้าไปทางช่องคอเพียงครั้งเดียว ในขณะที่การใช้งานของคาร์บอนแบล็กที่มีปริมาณมวลสารที่ได้รับเท่ากันไม่เหนี่ยวนำให้เกิดเนื้องอก หรือเกิดความหนาของผนังถุงลมปอดเพิ่มขึ้น รวมทั้งการอักเสบของปอดและการทำลายอวัยวะนั้นเกิดขึ้นน้อยกว่า แม้ว่าผลการทดลองเหล่านี้สามารถแสดงให้เห็นได้ถึงแนวโน้มความเป็นอันตรายของ SWCNT ที่เกิดผ่านทางการหายใจก็ตาม แต่ยังไม่มีการทดสอบความเป็นพิษของ SWCNT ที่เกิดขึ้นจากการหายใจในมนุษย์ การทำ MWCNT ให้บริสุทธิ์เพื่อนำมาทำการทดลองโดยใช้ใส่เข้าไปภายในหลอดลมของหนูพบว่ามีความคงตัวทางชีวภาพสูงมาก เนื่องจากสามารถยังสามารถพบ MWCNT ในปอดหลังผ่านไป 60 d และสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการอักเสบและการเกิดปฏิกิริยาไฟโบรติก (fibrotic reactions) การเกิดรอยโรคในปอดจาก CNT โดยการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะ พบรูปแบบของการเกิดเนื้องอกที่มีคอลลาเจนอยู่มาก ซึ่งสาเหตุมาจากการสะสมของ CNT ในรูปแบบของอนุภาคเกาะก้อนแบบหลวมขนาดใหญ่ที่รวมกันในระบบทางเดินอากาศหายใจ CNT แบบบดนั้นสามารถกระจายตัวได้ดีในเนื้อเยื่อแท้ของปอด และสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการอักเสบ และเกิดการตอบสนองแบบไฟโบรติก (fibrotic response) แร่ใยหินประเภทคริโซไทล์ (chrysotile asbestos) และคาร์บอนแบล็กนั้นนำมาใช้เป็นวัสดุอ้างอิงเช่นกันสำหรับทดสอบผลกระทบในหนู โดยแร่ใยหินสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดทั้งการอักเสบและการเกิดปฏิกริยาไฟโบรติก ในขณะที่คาร์บอนแบล็กนั้นแสดงผลการเกิดการอักเสบเท่านั้น

จากการศึกษาผลกระทบของการรับสัมผัส CNT ผ่านทางผิวหนังและดวงตาในหลอดทดลอง พบว่า SWCNT ที่ไม่บริสุทธิ์ ส่งผลให้เกิดการลดลงอย่างมีนัยสำคัญของอัตราการรอดชีวิตรอดของเซลล์ และสารชี้วัดความเครียดจากภาวะออกซิเดชันซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณสารที่ได้รับ รวมถึงการเพิ่มอย่างมีนัยสำคัญของปฏิกิริยาการออกซิเดชันของไขมันในชั้นหนังกำพร้าของมนุษย์ จากการศึกษานี้ได้สรุปว่าการรับสัมผัสกับ SWCNT ทางผิวหนังอาจเป็นพิษต่อผิวหนังของผู้ปฏิบัติงาน นอกจากนี้ยังมีรายงานว่า CNT ที่เคลือบผิวด้วยเพปไทด์สามารถเคลื่อนที่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ผิวหนัง และเซลล์ผิวหนังชั้นหนังกำพร้าในการทดสอบในหลอดทดลองได้ อย่างไรก็ตาม การทดสอบการรับสัมผัสของผิวหนังกับแผ่นกรองที่อิ่มตัวด้วยสารละลายที่มีอนุภาคฟูเลอรีนส์และ SWNT เข้มข้นสูง กลับพบว่าไม่ทำให้เกิดการระคายเคืองหรืออาการแพ้ในอาสาสมัครที่ทำการทดสอบ และการหยอดตากระต่ายด้วยสารแขวนลอย CNT ในการทดสอบความเป็นพิษเฉียบพลันด้วย draize test พบว่า CNT ไม่ก่อให้เกิดการระคายเคือง

สำหรับพิษวิทยาของ CNT ที่มีการดัดแปลงหมู่ฟังก์ชันนั้นพบว่า มีการรายงานผลกระทบทางพิษวิทยาที่แตกต่างกันไปตามลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่ใช้ การทดสอบในหลอดทดลองกับเซลล์เนื้องอกปอดพบว่า MWCNT ที่ไม่บริสุทธิ์ และคาร์บอนแบล็กระดับนาโนสเกลที่ได้มาจากการบดแกรไฟต์ มีความเป็นพิษสูงขึ้นเมื่อเติมหมู่คาร์บอนิล (carbonyl group) หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) และหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ลงบน CNT ในการทดสอบในหลอดทดลองอื่น ๆ ที่อาศัยการทดสอบกับ

เซลล์ผิวหนังของมนุษย์ พบว่าความเป็นพิษของ SWCNT ลดลงเติม หมู่ฟีนิลซัลโฟนิก (phenyl-SO_3H) และหมู่ฟีนิล-คาร์บอกซิลิก (phenyl-$(COOH)_2$) การทดสอบในหนูแสดงให้เห็นว่า SWCNT ที่ละลายน้ำได้ดีและมีการเติมหมู่ ไดเอทิลีนไตรเอมีน เพนตะอะซิเตต (diethylenetriamine pentaacetate) ซึ่งติดเครื่องหมายด้วยธาตุอินเดียม (^{111}In) เพื่อช่วยในการติดตาม SWCNT พบว่าไม่มีการสะสมของ SWCNT ในตับหรือม้าม และถูกกำจัดออกจากระบบการไหลเวียนเลือดอย่างรวดเร็วผ่านเข้าสู่ระบบการขับถ่ายที่ไตหลังจากที่มีการเข้าสู่หลอดเลือดดำแล้ว

ค.6.2 วัสดุนาโนโลหะออกไซด์

การทดสอบในสัตว์ทดลอง แสดงให้เห็นว่า วัสดุนาโนโลหะออกไซด์ที่มีสมบัติการละลายต่ำ และอยู่ในรูปอนุภาคเกาะก้อนแบบแน่น หรืออนุภาคเกาะก้อนแบบหลวม เช่น TiO_2 อะลูมิเนียมออกไซด์ และแมงกานีสออกไซด์ มีแนวโน้มในการทำให้เกิดการอักเสบของปอด การทำลายเนื้อเยื่อ และการเกิดเนื้องอกในปอดได้มากกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า เมื่อใช้สารในปริมาณเท่ากัน สำหรับอนุภาคอื่น ๆ ที่มีสมบัติการละลายต่ำนั้น แสดงความสัมพันธ์การตอบสนองต่อปริมาณ (dose-response relationship) ในรูปแบบที่สอดคล้องกัน เมื่อปริมาณสารแสดงอยู่ในรูปของพื้นที่ผิวของอนุภาค การทดสอบวัสดุนาโนและอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าที่มีสมบัติทางเคมีเดียวกันในสัตว์ทดลอง พบว่า ความเป็นพิษจะเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดลดลงเนื่องจากพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้น นอกจากขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวแล้ว สมบัติทางฟิสิกส์-เคมีอื่น ๆ ต่างส่งผลต่อความเป็นพิษด้วยเช่นกัน เช่น ความสามารถในการละลาย รูปร่าง ความไวต่อปฏิกิริยาของพื้นผิว ประจุ และโครงสร้างผลึก สำหรับอนุภาคที่มีการละลายและความเป็นพิษต่ำ ผลการทดสอบในสัตว์ทดลองได้ระบุถึงปริมาณที่ไม่ส่งผลกระทบเชิงลบต่อสุขภาพ ตัวอย่างเช่น มีรายงานถึงปริมาณของ TiO_2 แบบโครงสร้างนาโนหรือแบบผงละเอียดที่ไม่ส่งผลให้เกิดการตอบสนองในปอดเมื่อทดลองในหนู ขณะที่ซิลิกาส่งผลให้เกิดการตอบสนองในปอดอย่างรุนแรง เมื่อได้รับในปริมาณที่เท่ากัน

ค.6.3 วัสดุนาโนโลหะ

การทดสอบในหลอดทดลองได้บ่งชี้ว่าอนุภาคนาโนโลหะบางชนิดสามารถทำให้เกิดการอักเสบแบบเฉียบพลันในสัตว์ โดยมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการให้อนุมูลอิสระของอนุภาค ความสัมพันธ์ของการตอบสนองต่อปริมาณนั้น แตกต่างกันไปสำหรับโลหะต่างชนิดซึ่งอาจสัมพันธ์กับสมบัติทางฟิสิกส์-เคมี และกลไกทางพิษวิทยา เช่น การศึกษาความเป็นพิษของอนุภาคนาโนเงิน ขนาด 15 nm และ 100 nm ที่ความเข้มข้น 5 µg/ml ถึง 50 µg/ml ในเซลล์ที่ได้มาจากตับของหนู พบว่า อนุภาคนาโนเงินมีความเป็นพิษต่อเซลล์อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่อนุภาคอื่น ๆ เช่น อนุภาคนาโนอลูมิเนียม ขนาด 30 nm และ 130 nm และอนุภาคทังสเตนขนาด 27 µm ไม่มีผลกระทบที่วัดได้ต่อปริมาณสารที่ได้รับเท่ากัน การศึกษาในหลอดทดลอง พบว่าอนุภาคนาโนเงินขนาด 15 nm มีความเป็นพิษกับเซลล์ ใน เซลล์ไลน์สเปอร์มาโทโกเนียของหนูเมาส์ (mouse spermatogonia cell lines) การทดสอบในหลอดทดลอง บ่งชี้ว่า

อนุภาคนาโนโคบอลต์ และอนุภาคนาโนนิกเกิลสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่แวคิวโอลของเซลล์ โดยอนุภาคนาโนโคบอลต์ทำให้เกิดการอักเสบและเกิดความเป็นพิษต่อเซลล์ในขณะที่อนุภาคนาโนนิกเกิลไม่ทำให้เกิดผลกระทบใด ๆ ในทางตรงกันข้าม จากการศึกษาในสัตว์ทดลองพบว่าอนุภาคนาโนนิกเกิลทำให้เกิดความเป็นพิษมากกว่าอนุภาคนาโนโคบอลต์ และความเป็นพิษนั้นเกี่ยวข้องกับอนุมูลอิสระด้วย ในการศึกษาในสัตว์ทดลองอื่น ๆ พบว่าอนุภาคนาโนนิกเกิลมีความเป็นพิษต่อปอดมากกว่าอนุภาคนิกเกิลที่มีขนาดในระดับไมโครเมตรเมื่อได้รับปริมาณที่เท่ากัน และอนุภาคนาโนโคบอลต์มีความเป็นพิษมากกว่าอนุภาคโคบอลต์ในระดับไมโครเมตรเช่นกัน ในการศึกษาการได้รับสารโดยสายยางผ่านทางปากสู่หลอดอาหารนั้น อนุภาคนาโนทองแดงทำให้เกิดความเป็นพิษที่รุนแรงและทำให้เกิดความเสียหายต่อไต ตับ และม้าม ในขณะที่อนุภาคทองแดงในระดับไมโครเมตรนั้นไม่ทำให้เกิดความเป็นพิษใด ๆ อนุภาคนาโนทองคอลลอยด์ซึ่งนิยมใช้ในการรักษาโรคและการตรวจวินิจฉัยโรคนั้นไม่ทำให้เกิดความเป็นพิษต่อหนูเมื่อมีการฉีดอนุภาคเข้าหลอดเลือดดำในระดับที่ใช้ในการรักษาโรค

ค.6.4 หัวหมุดควอนตัม

สมบัติที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของหัวหมุดควอนตัมนี้ ขึ้นกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างทางเคมีและสภาวะสิ่งแวดล้อม ความเป็นพิษนั้นขึ้นกับ ขนาด ประจุ ความเข้มข้น ปฏิกิริยาทางชีวภาพของผิวเคลือบ และความเสถียรต่อการออกซิเดชัน/แสง/เชิงกลของสาร ในกรณีที่ต้องมีการทำลายหรือกำจัดสารที่มีองค์ประกอบของตะกั่ว สารหนู แคดเมียม และแทลเลียม ซึ่งมีความเป็นพิษสูง ควรต้องมีการประเมินความคงตัวของสารในระยะยาวและการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ก่อน การเคลือบสามารถยับยั้งการสลายตัวของหัวหมุดควอนตัม ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยส่วนประกอบที่เป็นพิษ รวมถึงการสูญเสียการเรืองแสงของหัวหมุดควอนตัมในสัตว์ทดลอง

การศึกษาในหลอดทดลอง พบว่า หัวหมุดควอนตัมบางชนิดมีความเป็นพิษต่อเซลล์ตามความสัมพันธ์การตอบสนองต่อปริมาณ เช่น หัวหมุดควอนตัมของแคดเมียมเทลลูเรียม (CdTe) ทำให้เซลล์ฟีโอโครโมไซโตมาของหนูแรทตาย โดยผลการทดสอบในหลอดทดลองพบว่าเกิดการขดตัวของโครมาติน (chromatin condensation) และการนูนออกอย่างไม่สมมาตรของเยื่อหุ้มเซลล์ (membrane blebbing) สำหรับหัวหมุดควอนตัมขนาดเล็กมีความเป็นพิษสูงหัวหมุดควอนตัมที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งมีประจุบวกเท่ากัน โดยหัวหมุดควอนตัมที่มีขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ไปยังนิวเคลียส และหัวหมุดควอนตัมที่มีขนาดใหญ่นั้นอยู่ในไซโตซอล โดยอธิบายได้จากการมีไอออนของแคดเมียม (Cd^{2+}) การเกิดอนุมูลอิสระ หรือการทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบภายในเซลล์ ทำให้องค์ประกอบนั้นสูญเสียความสามารถในการทำหน้าที่ ส่วนการศึกษาในหลอดทดลองในงานวิจัยอื่น ๆ ได้รายงานว่าหัวหมุดควอนตัมของแคดเมียมซีลีเนียม (CdSe) นั้นมีความเป็นพิษต่อเซลล์ตับ และการเกิดออกซิเดชันที่พื้นผิวของหัวหมุดควอนตัมทำให้เกิดไอออนของแคดเมียม (Cd^{2+}) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง การห่อหุ้มหัวหมุดควอนตัมด้วยซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) สามารถลดความเป็นพิษและผลกระทบต่าง ๆ ที่กล่าวมานี้ และผลกระทบเหล่านี้แทบจะหมดไป

ถ้าใช้โบไวน์ซีรั่ม อัลบูมิน (bovine serum albumin) ในการห่อหุ้มหัวหมุดควอนตัม จากการศึกษาความเป็นพิษต่อเซลล์ในหลอดทดลองของไดอาร์เซนิกไดซัลไฟด์ (As_2S_2) ซึ่งเป็นวัสดุกึ่งตัวนำที่ใช้ในการพัฒนาสูตรทางยาชนิดใหม่ ที่มีขนาดเล็ก 100 nm ถึง 150 nm โดยทดสอบกับเซลล์บุผนังหลอดเลือดจากรก (human umbilical vein endothelial cells) พบว่า As_2S_2 มีความเป็นพิษสูงกว่าสารเดียวกันที่มีอนุภาคขนาด 200 nm ถึง 500 nm ความเป็นพิษที่ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของอนุภาคครีอัลการ์นั้นอธิบายได้จากการปลดปล่อยส่วนประกอบที่มีฤทธิ์ออกมาจากอนุภาคไปยังสารตัวกลางที่ใช้ในการบ่ม ซึ่งมีปริมาณสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของอนุภาคนั้น ๆ

การทดสอบในสัตว์ทดลองนั้นไม่พบว่ามีการสังเกตุการณ์ผลกระทบที่ทำให้เกิดอาการเจ็บป่วย เช่น หนูถูกฉีดด้วยหัวหมุดควอนตัมที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์กรดแอมฟิฟิลิก พอลิอะคริลิก (amphiphilic polyacrylic acid) และหัวหมุดควอนตัมที่จับคู่ร่วมกับพอลิเอทิลีนไกลคอล เอมีน (polyethyleneglycol amine) และหนูที่ได้รับสารหัวหมุดควอนตัมของแคดเมียมซีลีเนียมและซิงค์ซัลไฟด์ (CdSe/ZnS)

ค.6.5 วัสดุนาโนพอลิเมอร์อินทรีย์

การสูดดมอนุภาคนาโนอินทรีย์โดยไม่ตั้งใจส่งผลทำให้เกิดความเป็นพิษแบบเฉียบพลันซึ่งเป็นอันตรายต่อมนุษย์ ในกลุ่มของอนุภาคนาโนนั้น ควันไอสดของ PTFE ที่เกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า 425 ºC มีความเป็นพิษต่อปอดสูง PTFE ขนาด 15 nm ก่อให้เกิดภาวะปอดบวมน้ำที่มีเลือดออก (hemorrhagic pulmonary edema) และทำให้หนูตายเมื่อได้รับสารน้อยกว่า 60 $\mu g/m^3$ ในทางตรงข้ามควันไอของ PTFE ที่เกิดขึ้นระยะหนึ่งแล้วมีความเป็นพิษน้อยกว่าและไม่ทำให้เกิดการเสียชีวิตขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงเคมีพื้นผิวและการเพิ่มขนาดของอนุภาคที่รวมกันจนกระทั่งมีขนาดมากกว่า 100 nm ในขณะที่ควันไอของ PTFE นั้นจะแตกต่างไปจากอนุภาคนาโนจากการผลิต ผลการศึกษาเหล่านี้เป็นเพียงตัวอย่างที่ต้องการแสดงถึงสมบัติของอนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นโดยไม่ตั้งใจซึ่งส่งผลให้เกิดความเป็นพิษแบบเฉียบพลันได้

ความเป็นพิษของเดนดริเมอร์นาโนนั้นมีความสัมพันธ์กับธรรมชาติของมอนอเมอร์และวิธีการสังเคราะห์เดนดริเมอร์ จากการทดสอบในหลอดทดลองและในสัตว์ทดลอง พบว่า เดนดริเมอร์นาโนที่มีหมู่ฟังก์ชันประจุบวกที่ผิวซึ่งคล้ายกับโมเลกุลขนาดใหญ่ทางชีววิทยาชนิดอื่น ๆ สามารถทำลายเยื่อหุ้มเซลล์และทำให้เซลล์แตกได้ ดังนั้น จึงสามารถปรับหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของเดนดริเมอร์นาโนได้ เพื่อให้มีการตอบสนองทางชีวภาพในรูปแบบที่ต้องการ ธรรมชาติของแกนภายในเดนดริเมอร์นั้นอาจมีผลกระทบต่อปฏิกิริยาทางชีววิทยาได้เช่นกัน เช่น เดนดริเมอร์ที่มีโครงสร้างภายในเป็นสารอะโรมาติก (aromatic interior) อาจทำให้เกิดการแตกตัวของเม็ดเลือดแดงเมื่อรับสัมผัสกับเยื่อหุ้มเซลล์ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำได้ นอกจากนี้ ยังพบว่าเดนดริเมอร์ที่มีขนาดใหญ่กว่ามีความเป็นพิษที่มากกว่า

ค.6.6 วัสดุนาโนชีวภาพ

วัสดุนาโนชีวภาพสังเคราะห์สามารถส่งผลต่อสุขภาพในรูปแบบต่าง ๆ เช่นเดียวกับวัสดุนาโนชีวภาพที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติซึ่งอาจส่งผลในด้านบวก เช่น ฮอร์โมนอินซูลินและฮอร์โมนควบคุมการเจริญเติบโต ไปจนถึงผลด้านลบและอาจมีอันตรายถึงชีวิต เช่น สารชีวพิษในกลุ่มโปรตีนที่เกิดตามธรรมชาติ

การนำส่งวัสดุนาโนชีวภาพซึ่งมีฤทธิ์ทางชีวภาพไปยังระบบไหลเวียนของโลหิตผ่านทางปากนั้น อาจเกิดขึ้นโดยอาศัยน้ำดี และตัวยับยั้งเอนไซม์โปรทิเนส (proteinase inhibitors) การนำส่งโปรตีนผ่านทางผิวหนังเพื่อการรักษา เช่น อินซูลิน นั้นเป็นไปได้โดยอาศัยเฟจแชพเพอโรน (phage peptide chaperones) ซึ่งกลไกในการซึมผ่านเข้าไปนั้นไม่จำเพาะเจาะจงกับอินซูลินแต่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาระหว่างเฟจเปปไทด์ (phage peptide) และผิวหนัง ซึ่งช่วยทำให้การนำส่งสารผ่านทางรูขุมขนโดยการเคลื่อนที่ของอินซูลินผ่านผิวหนังได้ การประยุกต์ในการนำส่งยานี้อาจทำให้เกิดการได้รับสัมผัสสารอย่างไม่ตั้งใจต่อผู้ปฏิบัติงานระหว่างกระบวนการผลิตยาและการจัดการระบบดูแลสุขภาพ

ฉบับร่างเพื่อระดมความคิดเห็น

ภาคผนวก ง.
วิธีการวัดการรับสัมผัสวัสดุนาโนผ่านทางการหายใจ
(ข้อ 6.2.2 และข้อ 8.3.7)

ง.1 ทั่วไป

วัตถุประสงค์พื้นฐานในการเก็บตัวอย่างนั้นเพื่อการป้องกันผู้ปฏิบัติงานจากการรับสัมผัสอนุภาคนาโน หลักเกณฑ์บางส่วนประกอบด้วย

(1) การประเมินการรับสัมผัสส่วนบุคคลตามข้อควรปฏิบัติ

(2) การประเมินการรับสัมผัสส่วนบุคคลสำหรับเชื่อมต่อกับผลกระทบเชิงลบต่อสุขภาพที่อาจเกิดขึ้นได้ในการศึกษาทางระบาดวิทยา

(3) การระบุถึงแหล่งปลดปล่อยที่สำคัญเพื่อกำหนดแผนการควบคุมมุ่งเป้า

(4) การประเมินประสิทธิภาพระบบควบคุมการใช้งาน

โดยแต่ละข้อข้างต้นต้องการเครื่องมือที่มีความจำเพาะและแตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น การวัดการรับสัมผัสส่วนบุคคลนั้น วิธีการที่ดีที่สุดคือการใช้เครื่องมือเก็บตัวอย่างที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่และมีขนาดเล็ก โดยติดตั้งกับตัวผู้ปฏิบัติงานซึ่งติดตัวผู้ปฏิบัติงานตลอดเวลาที่ทำงาน สำหรับการระบุแหล่งกำเนิดนั้น ควรใช้เครื่องมือวัดแบบพกพา ซึ่งให้การวัดความเข้มข้นที่ต่อเนื่องและเชื่อมโยงกับรายละเอียดของตำแหน่งที่ตั้ง การระบายอากาศ และกระบวนการการทำงานที่จำเพาะที่ต้องดำเนินการ ในการประเมินประสิทธิภาพของมาตรการควบคุมในสถานที่ปฏิบัติงานนั้น สามารถใช้เครื่องมือหลายชนิดที่แตกต่างกันซึ่งรวมไปถึงเครื่องมือที่ตั้งอยู่กับที่ (static) ซึ่งเป็นเครื่องมือหลัก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ต้องการอย่างไรก็ตามในการประเมินการรับสัมผัสวัสดุนาโนที่มนุษย์สร้างขึ้นนั้น ปัจจัยรบกวนที่สำคัญในสถานที่ปฏิบัติงานส่วนใหญ่ คือ ปัจจัยที่เกิดกับอนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นโดยไม่ตั้งใจจากละอองลอยในอากาศที่โดยรอบที่เข้าในสถานที่ปฏิบัติงานในระดับที่แตกต่างกัน และอนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นโดยไม่ตั้งใจที่เกิดจากสถานที่ปฏิบัติงานนั้น ๆ อนุภาคที่เกิดร่วมกันนี้สามารถส่งผลกระทบต่อการวัดหรือการนับจำนวนอนุภาคได้โดยตรง โดยอนุภาคเหล่านี้สามารถรวมกันกับอนุภาคนาโนอื่น ๆ ซึ่งเป็นอนุภาคนาโนที่เราสนใจซึ่งต้องมีออกแบบการทดลองอย่างระมัดระวัง วิธีการที่เป็นไปได้ในการแบ่งแยกการรับสัมผัสอนุภาคนาโนที่มนุษย์สร้างขึ้นกับการรับสัมผัสอนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นเองในบรรยากาศนั้น มีการอธิบายในภายหลัง

ซึ่งการแบ่งแยกนี้ช่วยในการวิเคราะห์การรับสัมผัสการควบคุมที่มีประสิทธิภาพทั้งอนุภาคนาโนที่มนุษย์สร้างขึ้นและอนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นเองนั้นก็จำเป็นต่อการจัดการความปลอดภัยต่อสุขภาพอาชีว อนามัยที่มีประสิทธิภาพ

ตามทฤษฎีแล้ว เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสุขภาวะในการประกอบอาชีพ ควรมีลักษณะดังนี้

- เป็นเครื่องมือที่เคลื่อนย้ายได้
- สามารถวัดลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ของอนุภาคนาโนได้หลากหลาย (การนับจำนวน มวล พื้นที่ผิว ประจุ การกระจายขนาด การแยกอนุภาคนาโนที่มนุษย์สร้างขึ้นออกจากอนุภาคนาโนที่มีอยู่แล้วในพื้นที่ การเปลี่ยนแปลงชั่วคราว เป็นต้น)
- สามารถเก็บตัวอย่างในระดับหายใจ (breathable zone)
- สามารถนำไปใช้งานในระดับอุตสาหกรรมได้
- ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่
- ให้การประมวลผลแบบทันที
- ราคาไม่แพงมากนัก

ซึ่งยังไม่มีเครื่องมือใดที่มีลักษณะครบทุกประการข้างต้น ตาราง ง.1 ได้สรุปเครื่องมือที่มีอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งข้อมูลอาจมีการปรับปรุงให้มีความทันสมัยกว่าที่ปรากฏในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้

ตาราง ง.1 เครื่องมือและเทคนิคในการวัดการรับสัมผัสละอองลอยนาโน

(ข้อ ง.1)

การวัด	เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบ	หมายเหตุ
การวัดมวลโดยตรง	เครื่องไซส์ซีเล็คทีฟสแตติกแซมเปลอร์ (Size selective static sampler)	ใช้วัดมวลอนุภาคจากการสุ่มตัวอย่างตามขนาดที่มีค่าไม่เกิน 100 nm และวิเคราะห์ตัวอย่างการชั่งน้ำหนัก หรือการวิเคราะห์ทางเคมี แม้ว่าไม่มีอุปกรณ์เครื่องมือนี้จำหน่ายทางการค้า แต่สามารถใช้เครื่องแคสเคดอิมแพ็คเตอร์ (Berner-type low pressure impactors หรือ microorifice impactors) ในช่วง 100 nm วิเคราะห์ได้
	TEOM	เป็นเครื่องวัดแบบเรียลไทม์ความไวสูง สามารถใช้ในการวัดความเข้มข้นมวลอนุภาคนาโนละอองลอย และสามารถเชื่อมต่อกับระบบได้ (on-line) โดยอาศัยการเชื่อมต่อระบบที่สามารถเลือกขนาดอนุภาคที่เหมาะสม (size-selective inlet)
การวัดมวลโดยการคำนวณ	เครื่องอิเล็กโตรสแตติกโลวเพรสเซอร์อิมแพคเตอร์: อีแอลพีไอ (ELPI™)	ใช้วัดความเข้มข้นเชิงพื้นผิวแบบเรียลไทม์ตามขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์) ในกรณีที่พื้นที่ผิวสูงกว่า 100 nm อาจไม่สามารถวัดผลได้โดยตรง ความเข้มข้นมวลสำหรับละอองลอยสามารถคำนวณได้ถ้าทราบรูปร่างและความหนาแน่นของอนุภาค (หรือสมมติค่า)
	DMAS	ใช้วัดคัดเลือกขนาดแบบเรียลไทม์ ของความเข้มข้นเชิงมวล โดยให้การกระจายตัวของขนาดละอองลอย ความเข้มข้นมวลของละอองลอยสามารถคำนวณได้ถ้าทราบรูปร่างและความหนาแน่นของอนุภาค (หรือสมมติค่า)

การวัด	เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบ	หมายเหตุ
การวัดจำนวนโดยตรง	CPC	ให้การวัดความเข้มข้นจำนวนอนุภาคแบบเรียลไทม์ ระหว่าง การตรวจวัดเส้นผ่านศูนย์กลางที่กำหนดของอนุภาคเหล่านั้น ถ้าไม่มีการแยกอนุภาคนาโนก่อนการวัด เครื่องวัดนี้ไม่วัดเฉพาะเจาะจงที่ขนาดระดับนาโนเมตร P-Trak มีการคัดขนาดที่มากที่สุดที่ระดับ 1 μm
	DMAS	เครื่องวัดคัดเลือกขนาดแบบเรียลไทม์ ของความเข้มข้นเชิงมวล โดยให้การกระจายตัวอ้างอิงตามจำนวนละอองลอย
การวัดจำนวนโดยตรง	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (electron microscopy)	เป็นการวิเคราะห์แบบไม่เชื่อมต่อกับระบบ (off-line) สามารถให้ข้อมูลของความเข้มข้นเชิงมวลละอองลอยในขนาดที่เจาะจงได้
การวัดจำนวนด้วยการคำนวณ	ELPI™	ใช้วัดขนาดจำเพาะแบบเรียลไทม์ (เส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์) ความเข้มข้นของพื้นที่ผิวแบบไวงาน และสามารถบอกการกระจายตัวของขนาดละอองลอยข้อมูลต้องแปรผลในรูปของความเข้มจำนวนขนาดจำเพาะของตัวอย่าง สามารถวิเคราะห์ได้โดยไม่ต้องเชื่อมต่อกับระบบ (off-line)
การวัดพื้นที่ผิวโดยตรง	DC	ใช้วัดพื้นที่ผิวแบบไวงานของละอองลอยแบบเรียลไทม์ ในกรณีที่พื้นที่ผิวสูงกว่า 100 nm ไม่สามารถวัดผลได้โดยตรง สำหรับอนุภาคที่มีขนาดน้อยกว่า 100 nm เครื่องแพร่ประจุบางรุ่นที่มีการวางตลาดนั้น ไม่สามารถวัดพื้นที่ผิวที่ต่ำกว่า 100 nmได้ เครื่องแพร่ประจุ จึงใช้ได้กับอนุภาคนาโนที่ผ่านช่องคัดขนาดมาแล้วเท่านั้น
	ELPI™	ใช้วัดขนาดจำเพาะแบบเรียลไทม์ (เส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์) ความเข้มข้นของพื้นที่ผิวแบบไวงาน ในกรณีที่พื้นที่ผิวสูงกว่า 100 nm ไม่สามารถวัดผลได้โดยตรง
	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	เป็นการวิเคราะห์แบบไม่เชื่อมต่อกับระบบ (off-line) สามารถให้ข้อมูลพื้นที่ผิวของอนุภาคได้ การวิเคราะห์โดย TEM สามารถให้ข้อมูลโดยตรงของอนุภาคในบริเวณพื้นที่ที่วิเคราะห์ซึ่งเกี่ยวข้องกับพื้นที่ที่มีรูปทรงต่างกัน
การวัดพื้นที่ผิวโดยการคำนวณ	DMAS	ใช้วัดขนาดอนุภาคแบบเรียลไทม์ (เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่เคลื่อนที่) ข้อมูลอาจแปรผลในรูปของพื้นที่ผิวละอองลอยในแต่ละสภาวะ ตัวอย่างได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่หลอมรวมกันที่เคลื่อนที่ซึ่งแสดงความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกันอย่างดีกับพื้นที่ผิวที่ตรวจวัด
	DMAS และ ELPI™ ใช้ควบคู่กัน	ความแตกต่างระหว่างการวัดอนุภาคชนิดอากาศพลศาสตร์ และแบบเคลื่อนที่สามารถใช้เป็นหลักในการคำนวณค่าต่างเชิงมิติ ซึ่งทำให้สามารถคำนวณพื้นที่ผิวได้

1

ง.2 การวัดความเข้มข้นโดยมวล

ความเข้มข้นของมวลสารนั้นสามารถวัดได้โดยใช้เครื่องมือที่ใช้อ่านค่าได้ทันที จากอนุภาคที่สะสมอยู่บนแผ่นกรอง (เครื่องเก็บตัวอย่างละอองลอย เครื่องแคสเคดอิมแพ็คเตอร์ และ เครื่องวัดมวลระบบไมโครแบบออสซิลเลติ้ง และ แบบผลึกเรโซแนนซ์ หรือเครื่องวัดมวลแบบพิโซ (resonator crystals หรือ piezobalance) และสามารถคำนวณค่ามวลโดยใช้เครื่องมือ เช่น ELPI^{TM} และ DMAS (ดูข้อ ง.5 การวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคนาโน)

ง.2.1 การเก็บตัวอย่างด้วยแผ่นกรอง (Filter sampling)

แม้ว่าการออกแบบและการทดสอบอุปกรณ์ให้เหมาะสมนั้นดูเหมือนว่าอาจเป็นไปได้ แต่ในปัจจุบันยังไม่มีอุปกรณ์เก็บตัวอย่างละอองลอยในสถานที่ปฏิบัติงานสำหรับอนุภาคนาโนที่มีขนาดใหญ่กว่า 100 nm ข้อมูลที่มีเกี่ยวกับมวลของอนุภาคนาโนในสถานที่ปฏิบัติงานนั้นมีน้อยมาก โดยมีการคาดการณ์ว่าอัตราการไหลที่มากกว่า 10 min^{-1} ต้องมีการรวบรวมมวลของอนุภาคนาโนในปริมาณที่เพียงพอในระยะเวลา 8 h เพื่อให้สามารถชั่งน้ำหนักได้ ที่อัตราการไหลที่สูงนี้โดยหลักการแล้วคาดว่าอาจทำให้เครื่องมือที่มีอยู่นั้นสามารถทำงานได้ดี เครื่องมือเหล่านี้ได้แก่ แผ่นตกกระทบ (impactors) และไซโคลน ที่ใช้สำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 100 nm

วิธีการวิเคราะห์อื่น ๆ นอกเหนือจากการวิเคราะห์ด้วยแรงตกกระทบ ที่สามารถนำมาใช้ในการจำแนกความเข้มข้นมวลของอนุภาคนาโนได้ ตัวอย่างเช่น ตามวิธีของ NIOSH 7300 สำหรับโลหะโดยใช้เครื่องอินดักทีพลีคัพเพิลอาร์กอนพลาสมา ร่วมกับการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องอะตอมมิกอิมิสชันสเปกโตรสโกปี และวิธี NIOSH 7500 สำหรับซิลิกา โดยการตรวจสอบสสารโดยใช้รังสีเอกซเรย์ (X-ray diffraction)

ง.2.2 เครื่องแคสเคดอิมแพ็คเตอร์

อีกทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์ทั้งในสถานที่ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อม คือ การใช้เครื่องแคสเคดอิมแพ็คเตอร์แบบใช้ความดันต่ำ เช่น ชนิดเบอร์เนอร์ (Berner-type) เป็นต้น หรือการใช้เครื่องแคสเคดอิมแพ็คเตอร์แบบที่มีรูเปิดขนาดไมโครเมตร เครื่องมือทั้งสองชนิดนี้ใช้การตกกระทบด้วยแรงเฉื่อยในการแยกอนุภาคออกจากกันตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์ของอนุภาค และเครื่องมือชนิดนี้มีการทำงานสองหรือสามขั้นสำหรับขนาดของอนุภาคนาโน ในเครื่องมือทั้งสองชนิดนี้มีการชั่งมวลของอนุภาคนาโนบนแผ่นที่รวบรวมอนุภาคทั้งก่อนและหลังการเก็บตัวอย่าง จากนั้นจึงวาดการกระจายขนาดแบบเต็มรูปแบบ และตัดข้อมูลที่ขนาด 100 nm หรือขนาดใด ๆ ก็ตามที่ได้เกี่ยวกับอนุภาคที่มีขนาดโครงสร้างนาโน(ดูข้อ ง.5.2 การวัดโดยอาศัยหลักการตกกระทบตามแรงเฉื่อย)

ง.2.3 เครื่องวัดมวลระดับไมโครแบบออสซิลเลติ้งและเครื่องวัดมวลระดับไมโครแบบพิโซอิเล็กทริก (Oscillating and piezoelectric microbalances)

อีกทางเลือกหนึ่งในการวัดความเข้มข้นของมวลสาร คือการใช้ TEOM โดยหลักการของ TEOM (ซึ่งพัฒนาเริ่มแรกจากการวัดมวลของอนุภาคนาโนอวกาศ) ใช้แผ่นกรองขนาดเล็กซึ่งจะตั้งอยู่บนปลาย

แหลมของท่อแก้วซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเครื่องวัดมวลระดับไมโครแบบออสซิเลชัน (oscillation microbalance) (เครื่องชั่งอนุภาคขนาดเล็ก ที่ใช้หลักการแกว่งให้อนุภาคของสารที่มีขนาดเล็กลอดจากฟิลเตอร์มาสะสมรวมกัน) โดยความถี่ของการสั่น (oscillation) ของเครื่องวัดมวลระดับไมโคร (microbalance) เปลี่ยนแปลงไปตามมวลของอนุภาคที่สะสมอยู่บนแผ่นกรอง เครื่องมือนี้ใช้งานกันอย่างกว้างขวางในหน่วยงานควบคุมคุณภาพอากาศแห่งชาติต่าง ๆ เพื่อเฝ้าระวังคุณภาพอากาศอย่างต่อเนื่องถึงระดับละอองลอยขนาดเล็กกว่า 10 μm และขนาดเล็กกว่า 2.5 μm และมีการพิสูจน์แล้วว่าเครื่องมือนี้ให้ข้อมูลระดับอนุภาคที่น่าเชื่อถือเป็นไปตามคุณภาพอากาศที่ได้กำหนดไว้ เมื่อมีการวัดมวลที่กำหนดไว้ที่ 0.01 μg มีการนำเครื่องมือนี้ไปใช้เพื่อให้ได้การวัดที่แม่นยำ (±5 μg m^{-3}ในช่วงเวลา 10 min และ ± 1.5 μg m^{-3} ในช่วงเวลา 1 h) ในการวัดอนุภาคนาโนในสถานที่ปฏิบัติงาน การใช้เครื่องมือนี้จำเป็นต้องพิจารณาเลือกเครื่องคัดแยก (pre-separator) สำหรับ TEOM ให้เหมาะกับขนาดอนุภาคนาโนที่ศึกษาและเพื่อเปลี่ยนแผ่นกรองที่รวบรวมอนุภาคเป็นแผ่นกรองที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับอนุภาคนาโนนั้น ๆ มีการพัฒนาเครื่องมือ TEOM สำหรับใช้ส่วนบุคคลแล้ว เช่น การเก็บตัวอย่างฝุ่นที่สามารถหายใจเข้าไปได้จากเหมืองถ่านหิน

การทำงานของเครื่องวัดมวลระดับไมโครแบบพิโซอิเล็กทริก (หรือ piezobalance) ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency) ของผลึกพิโซอิเล็กทริก (piezoelectric) ซึ่งแปรผันตามมวล สามารถวัดมวลที่ตกค้างอยู่บนผลึกได้ด้วยข้อมูลความเข้มข้นมวลของอนุภาคจากการตรวจสอบความถี่เรโซแนนซ์ของผลึกชุดที่สองนั้น อนุภาคในอากาศสามารถสะสมอยู่บนพื้นผิวผลึกโดยการตกตะกอนแบบไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitation) หรือโดยการตกกระทบ ประสิทธิภาพในการเก็บตัวอย่างของกลไกทั้งหลายเหล่านี้ เป็นหน้าที่ของฟังก์ชันของขนาดอนุภาคและสมบัติของอนุภาค และควรกำหนดเพื่อให้ได้มาซึ่งการวัดเชิงปริมาณ ผลึกควอตซ์มีความไวในหลายร้อยเฮิรตซ์ต่อไมโครกรัมซึ่งแปรเป็นความสามารถในการวัดความเข้มข้นของมวลละอองลอยในปริมาณ 100 μg/m^3 ภายในเวลาที่ต่ำกว่า 1 min

ง.3 การวัดความเข้มข้นโดยจำนวน

ง.3.1 CPC

CPC เป็นเครื่องมือที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการวัดความเข้มข้นโดยจำนวนของอนุภาคนาโน เครื่องมือนี้ใช้หาการควบแน่นของไอระเหยที่เกาะตัวบนอนุภาคนาโน (หรือใหญ่กว่า) เพื่อให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นในระดับที่สามารถวัดได้โดยเครื่องนับเชิงแสง

เครื่อง CPC ที่ใช้การไหลแบบแผ่บางในการพาความเย็น (convective cooling laminar flow CPC) นั้นนิยมใช้กันมากและมีจำหน่ายโดยผู้ผลิตในหลายรุ่นซึ่งแตกต่างกันในส่วนของการคัดขนาดที่แตกต่างกัน มีการดึงดูดอนุภาคที่อยู่ในอากาศเข้าสู่เครื่องมือที่อัตราการไหลของอากาศคงที่ ซึ่งอิ่มตัวโดยใช้สารที่มีความดันไออุ่น (โดยทั่วไปใช้สารบิวทานอล ไอโซโพรพานอล หรือน้ำ) การไหลที่อิ่มตัวนี้ผ่านเข้าสู่ท่อ

ควบแน่นที่เย็นซึ่งไอนั้นสามารถสลายไปบนพื้นผิวของท่อ อย่างไรก็ตามเนื่องจากการไหลนั้นมีความเย็น ดังนั้นจึงมีบางส่วนของการไหลที่ไอมีการอิ่มตัวอย่างยิ่งยวดและควบแน่นบนอนุภาคซึ่งได้กลายเป็นหยดที่มีขนาดใหญ่ ขีดจำกัดในการวัดวิเคราะห์เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่มีขนาดเล็กขึ้นอยู่กับสมบัติของไอ อุณหภูมิของการทำงาน (ซึ่งใช้ในการอิ่มตัวยิ่งยวด) อัตราการไหล และลักษณะของเครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบ เครื่องมือวัดที่ใช้บิวทานอลนั้นจะสามารถวัดขนาดได้เล็กถึง 3 nm ในขณะที่ไอโซโพรพานอลสามารถใช้กับเครื่องมือที่พกพาได้โดยมีค่าต่ำสุดในการวัดได้ที่ 10 nm และน้ำซึ่งมักใช้ในเครื่องมือที่มีการจำหน่ายนั้นใช้วัดอนุภาคนาโนได้ในระดับเดียวกัน

ง.3.2 อิเล็กโตรมิเตอร์ (Electrometers)

เครื่องอิเล็กโตรมิเตอร์นี้มีความไวต่อการวัดอนุภาคนาโน เป็นเครื่องวัดประจุที่นำพาโดยอนุภาคละอองลอยและการใช้งานของเครื่องมือขึ้นอยู่กับการรู้ถึงประจุของอนุภาคแต่ละชนิดในการไหลของละอองลอย การกระจายประจุรู้ได้จากการใช้เครื่องให้ประจุหรือนิวเทริลไลซ์เซอร์ (neutralizer) ที่ทราบลักษณะเฉพาะเครื่องมือนั้น ๆ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการให้ประจุนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค การใช้เครื่องอิเล็กโตรมิเตอร์เพียงอย่างเดียวจึงยากในการได้ข้อมูลความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ถูกต้อง เครื่องอิเล็กโตรมิเตอร์นี้จึงใช้ร่วมกับเครื่องวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางไฟฟ้า (mobility analyzer) ซึ่งสามารถประเมินการกระจายขนาดของอนุภาคนาโนได้ ในทางปฏิบัติเครื่องอิเล็กโตรมิเตอร์นี้ต้องมีการสอบเทียบกับเครื่องมืออื่น ๆ โดยเฉพาะ CPCs เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีในการวัดอนุภาคในระดับนาโน

ง.4 การวัดความเข้มข้นพื้นที่ผิว (surface area concentration)

การวัดพื้นที่ผิวของอนุภาคในบางครั้งทำได้ด้วยการใช้วิธี BET อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ต้องเก็บรวบรวมอนุภาคนาโนในปริมาณที่มาก (มากถึง 50 mg สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้) และความพรุนของอนุภาคสามารถส่งผลต่อการวัด (ซึ่งอาจสำคัญหรืออาจไม่สำคัญ) และฐานรองที่ใช้ในการเก็บรวบรวมตัวอย่างอนุภาคโดยเฉพาะเมื่อวัสดุที่วิเคราะห์นั้นมีขนาดเล็กมาก

เครื่องอัดประจุแบบ DC นั้นวัดค่าพื้นที่ผิวฟุคส์ (Fuchs surface area) หรือค่าพื้นที่ผิวที่ไวงานของละอองลอยได้จากอัตราการติดผิวของไอออนไม่มีขั้วที่เป็นบวกที่มีต่ออนุภาคละอองลอยนั้นซึ่งมาจากจากอนุภาคที่พื้นที่ผิวของละอองลอยที่สามารถอ้างอิงได้ อย่างไรก็ตามการสูญเสียอนุภาคซึ่งกระทบต่อการวัดและเครื่องมือนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค ซึ่งประเมินได้จากการทดลองและการเปรียบเทียบกับการตอบสนองที่จำเป็น ละอองลอยที่เก็บเป็นตัวอย่างผ่านพลาสมาแบบอ่อน ซึ่งสร้างโดยเครื่องโคโรนาดิสชาร์จ (corona discharge device) ที่ซึ่งอนุภาคตัวอย่างนั้นผสมกับไอออนขั้วเดี่ยวในอากาศซึ่งสร้างโดยโคโรนานั้น ๆ ไอออนในอากาศสามารถแพร่กระจายและยึดติดกับพื้นผิวของอนุภาคที่ได้รับไอออนนั้น ไอออนส่วนเกินจากการยึดติดมีการกำจัดด้วย ขั้วดักจับอนุภาค (collecting electrode) และอนุภาคที่มีประจุยึดเกาะอยู่สามารถเก็บรวบรวมด้วยตัวกรอง HEPA ซึ่งอยู่ในฟาราเดย์คับ อิเล็กโตรมิเตอร์ (Faraday cup electrometer)

กระแสไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นจากอนุภาคที่มีประจุสามารถวัดด้วยอิเล็กโตรมิเตอร์ความไวสูง และมีการเชื่อมโยงความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของอนุภาคตัวอย่างนั้น ๆ การตรวจวัดพื้นที่ผิวที่มีประจุนั้นทำโดยการวัดจำนวนอนุภาคที่มีอยู่และมักอยู่ในช่วง 0 $\mu m^2\ cm^{-3}$ ถึง 2000 $\mu m^2\ cm^{-3}$ และค่าความไว 1 $\mu m^2\ cm^{-3}$

เครื่องมือวัดแบบเรียลไทม์ของสองช่วงเวลานั้นมีการประเมินไม่นานมานี้ โดยได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวไวงานต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่มีขนาดอยู่ในช่วง 20 nm ถึง 100 nm

สำหรับการวัดพื้นที่ผิวไวงานของอนุภาคทรงเรขาคณิตที่มีลักษณะคล้ายตนเอง (fractal-like particles) หรืออนุภาคที่เป็นทรงกลมที่มีขนาดเล็กกว่า 100 nm ด้วย DC พบว่ามีความสัมพันธ์กับการวัดพื้นที่ผิวทางเรขาคณิต ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางไฟฟ้า หรือ DMAS และพื้นที่ผิวประมาณการที่วัดจาก TEM ความท้าทายสำหรับการใช้วิธีการวัดด้วยเครื่องอัดประจุแบบแพร่ คือ เมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่กว่า 100 nm ค่าพื้นที่ผิวที่วัดได้อาจมีค่าที่ต่ำกว่าค่าความเป็นจริง ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาต่อไปว่าระดับที่มีการรายงานผลผิดพลาดนั้นส่งผลกระทบต่อความสัมพันธ์ในด้านการรับสัมผัสวัสดุนาโน และผลกระทบต่อสุขภาพอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่

เครื่องมือใหม่หลายชนิดอาศัยหลักการการอัดประจุให้กับอนุภาคในอากาศเพื่อจำลองปริมาณวัสดุที่แสดงค่าพื้นที่ผิวรับสัมผัสที่สะสมในบริเวณท่อลม หลอดลม และถุงลมในปอด ซึ่งแตกต่างจากเครื่องมือที่กล่าวมาก่อนข้างต้นที่วัดพื้นที่ผิวทั้งหมด เครื่องมือในรูปแบบใหม่ทำงานโดยดูดอนุภาคที่ลอยอยู่ในอากาศผ่านไซโคลนคัดแยกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 μm ส่วนอนุภาคที่เหลือที่ผ่านเข้าสู่เครื่องและผ่านเข้าสู่บริเวณอัดประจุ และชุดคัดแยกอนุภาค ตามลำดับ ในการใช้งานสามารถปรับชุดคัดแยกอนุภาคให้มีค่าศักย์ไฟฟ้าในระดับต่าง ๆ เพื่อให้มีการเก็บตัวอย่างอนุภาคที่มีประจุสูง และอนุภาคที่มีการเคลื่อนที่ทางไฟฟ้า (ขนาดพื้นที่ผิว) สอดคล้องกับอนุภาคส่วนที่มีการสะสมในบริเวณต่าง ๆของปอด หรือที่มีการหายใจเข้าไปได้ และวัดระดับประจุไฟฟ้าของอนุภาคที่ผ่านทะลุเข้าไปด้วยมิเตอร์ไฟฟ้า วิธีการใหม่นี้มีศักยภาพในการวัดค่าที่สัมพันธ์กับพื้นที่ผิวรับสัมผัสของอนุภาคในอากาศที่สะสมในปอด โดยเครื่องที่มีจำหน่ายทางการค้าในปัจจุบันเป็นรุ่นที่ใช้ตรวจวัดในบริเวณปฏิบัติงาน การสอบเทียบเครื่องทำได้ที่สภาวะอ้างอิงหนึ่งเท่านั้น เช่น การหายใจของพนักงานผ่านทางจมูก โดยพนักงานมีระดับกิจกรรมของร่างกายเพียงเล็กน้อย การสอบเทียบกับสภาวะอ้างอิงไม่สามารถรวมปัจจัยอื่น ๆ เข้าร่วมด้วย เช่น ระดับกิจกรรมของพนักงาน อายุ เพศ หรือการมีโรคทางปอดร่วมด้วยซึ่งอาจส่งผลต่อระดับการสะสมของอนุภาคในปอด และอาจไม่สามารถเป็นตัวแทนข้อมูลการรับสัมผัสที่แท้จริงของพนักงานที่ปฏิบัติหน้าที่ที่แตกต่างกันได้ ดังนั้นการนำข้อมูลไปใช้จึงควรดำเนินการด้วยความระมัดระวัง การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องมือกับเครื่องมืออื่น ๆ สามารถทำได้โดยการคำนวณพื้นที่ผิวของอนุภาคที่สะสม (ในแบบจำลองปอดแบบเดียวกัน) ที่ได้จากการวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์แบบวัดการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามไฟฟ้า (electrical mobility spectrometers) ตัวอย่างผลการศึกษาการเปรียบเทียบการวัดอนุภาคไดออกทิลซีบาเคต (dioctyl sebacate) โซเดียมคลอไรด์ หรือเขม่าดีเซล พบว่าให้ผลที่สอดคล้องกัน และไม่พบว่าระดับกิจกรรมหรือ

เพศของผู้ทำการทดสอบมีผลต่อค่าการสะสมและระดับการับสัมผัส แต่ระดับการรับสัมผัสมีค่าความสัมพันธ์กับความถี่ของการหายใจ และปริมาณการหายใจ ดังนั้นระดับการรับสัมผัสเข้าสู่ร่างกายสามารถอนุมานได้จากการวัดการรับสัมผัสที่เป็นผลมาจากรูปแบบการหายใจ ซึ่งอาจใช้ในการวิเคราะห์ระดับการรับสัมผัสเข้าสู่ร่างกายสำหรับพนักงานแต่ละคนได้ ในปัจจุบัน งานวิจัยบ่งชี้ว่าปัจจัยที่ใช้สอบเทียบอาจสามารถนำมาใช้ในการดัดแปลงเครื่องมือให้เหมาะสมกับพฤติกรรมการหายใจ เพศ และอายุ มากกว่าการใช้สภาวะอ้างอิง

ง.5 การวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคนาโน

ง.5.1 การวัดโดยอาศัยหลักการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาค (particle mobility analysis)

เครื่องมือที่ใช้โดยทั่วไปสำหรับวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคนาโนในอากาศ คือเครื่องวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางไฟฟ้า หรือ DMAS ผลที่ได้จากการวิเคราะห์นั้น รายงานเป็นค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (particle mobility diameter) และช่วงการวัดที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 3 nm ถึง 800 nm ทั้งนี้ช่วงการวัดขึ้นกับเครื่องมือแต่ละรุ่น สำหรับการวิเคราะห์นี้ยังคงเป็นสิ่งที่ท้าทายสำหรับอนุภาคนาโนบางชนิดในอากาศ โดยมีกรณีศึกษาดังนี้ เมื่อใช้เครื่องวิเคราะห์การเคลื่อนที่ด้วยไฟฟ้าสำหรับวัดการกระจายตัวของขนาด CNT ที่มีการเกาะก้อนแบบแน่น พบว่า เครื่องรายงานผลเป็นค่าความต่างศักย์ที่สูงผิดปกติ หรือเมื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เคลื่อนที่ทะลุผ่านแผ่นกรองที่ไม่มีขั้นตอนการทำความสะอาดที่ดีพอ พบว่ามีอนุภาคที่ปนเปื้อนและให้ผลที่ไม่ถูกต้อง เป็นต้น ดังนั้นควรใส่ใจเป็นพิเศษเมื่อต้องมีการวิเคราะห์วัสดุที่มีลักษณะเป็นท่อนาโน อนุภาคที่มีความเข้มข้นสูง และอนุภาคเกาะก้อนแบบแน่น/แบบหลวม ด้วยการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ด้วยไฟฟ้า

เครื่อง DMAS ประกอบด้วย ส่วนที่ทำหน้าที่คัดแยกอนุภาคตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางการเคลื่อนที่ด้วยไฟฟ้าที่เรียกว่า DEMS และส่วนมิเตอร์วัดไฟฟ้าที่ทำหน้าที่นับจำนวนอนุภาค หรือ CPC ขั้นตอนการทำงานของ DMAS เริ่มต้นเมื่ออนุภาคในอากาศเคลื่อนที่เข้าสู่เครื่อง ผ่านตัวคัดแยกขั้นต้นเพื่อกำจัดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 μm ออก และอนุภาคที่เหลือผ่านเข้าสู่บริเวณให้ประจุซึ่งมีแหล่งกำเนิดจากสารกัมมันตภาพรังสี ก่อนผ่านเข้าสู่สนามไฟฟ้าของ DEMS และสุ่มนับจำนวนอนุภาคที่บริเวณทางออกจากสนามไฟฟ้าด้วยมิเตอร์วัดไฟฟ้า โดยในการวิเคราะห์นั้นอาศัยการสแกนค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้า อนุภาคกับการเคลื่อนที่ด้วยไฟฟ้า ซึ่งมีความสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาค ทำให้สามารถประมวลผลการกระจายตัวของขนาดอนุภาคในอากาศได้

การสแกนค่าศักย์ไฟฟ้าต้องอาศัยเวลา โดยมีความเร็วสูงสุดโดยประมาณที่ 1 min จึงต้องควบคุมกระบวนการไม่ให้มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการตรวจติดตามในช่วงเวลาดังกล่าว สำหรับกรณีที่มีความผันแปรของอนุภาคนาโนในอากาศอย่างรวดเร็ว อาจใช้ท่อที่มีปริมาตร 2 dm^3 ถึง3 dm^3 เป็นตัวบัฟเฟอร์เพื่อให้ความเข้มข้นอนุภาคมีความคงที่ตลอดการวัด และสำหรับกรณีที่ระยะเวลาของกระบวนการสั้นกว่าระยะเวลาสแกน สามารถหาค่าเฉลี่ยจากการสแกนหลายครั้งอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้การกระจายตัวของขนาดที่คงที่

สำหรับการประยุกต์ใช้ที่ต้องการความรวดเร็วในการวัด สามารถใช้เครื่องวัดการเคลื่อนที่ของอนุภาคอย่างรวดเร็วแบบสเปกโตรสโคปีซึ่งมีการต่อชุดมิเตอร์วัดไฟฟ้าสำหรับนับอนุภาคเข้าไว้ด้วยกัน การวัดอาจกำหนดให้มีความละเอียดของเวลาที่ใช้วัดเป็น 1 s หรือต่ำกว่า และสามารถทำงานในสภาวะความดันปกติเพื่อลดการระเหยของอนุภาคที่ระเหยได้ ไม่ต้องมีสารกัมมันตภาพรังสีเป็นส่วนประกอบการทำงาน ส่วนข้อจำกัดการใช้งานอยู่ที่การใช้เครื่องสำหรับวัดอนุภาคในอากาศที่มีความเข้มข้นค่อนข้างสูง ทำให้เครื่องมือบางรุ่นมีระบบเจือจางอนุภาค ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเครื่องมือเพิ่มเติมในส่วนการทำให้เครื่องมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้ราคาถูกลงด้วย

ข้อจำกัดของ DMAS คือขนาด ราคา ความซับซ้อนในการใช้งาน จำนวนเครื่องที่ต้องมีมากกว่าหนึ่งเพื่อให้การวัดการกระจายขนาดของอนุภาคทำได้ครอบคลุมช่วงที่ต้องการวัด และการใช้สารกัมมันตภาพรังสีเพื่อทำให้ประจุสมดุล อย่างไรก็ตาม หากสามารถระบุช่วงขนาดอนุภาคนาโนที่สนใจได้ อาจใช้เครื่องเดียวในการวัดได้

ง.5.2 การวัดโดยอาศัยหลักการตกกระทบตามแรงเฉื่อย (inertial impaction)

เครื่องวัดขนาดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคในอากาศที่อาศัยหลักการตกกระทบเรียงเป็นชั้น (cascade impactors) มีหลายรูปแบบ ทำให้สามารถนำมาใช้เป็นเครื่องเก็บตัวอย่างแบบติดตัวบุคคล หรือเก็บตัวอย่างในพื้นที่ สำหรับเครื่องเก็บตัวอย่างแบบติดตัวบุคคลนั้นเหมาะสำหรับวัดอนุภาคที่มีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่า 250 nm ทำให้มีข้อจำกัดในการวัดอนุภาคในระดับนาโนสเกล แต่เครื่องเก็บตัวอย่างในพื้นที่สามารถวัดอนุภาคที่มีขนาดในช่วงนาโนสเกลได้ เช่น เครื่องวัดการกระจายขนาดอนุภาคแบบ ELPI™ หรือเครื่องอิมแพ็คเตอร์แบบที่มีรูเปิดหลายหัว (multi-orifice impactors)

สำหรับ ELPI ™ นั้น จำเป็นต้องมีปั๊มสุญญากาศเพื่อให้มีการไหลของอากาศซึ่งไม่เหมาะต่อการเก็บตัวอย่างแบบติดตัวบุคคล

การวิเคราะห์ข้อมูลการกระจายตัวของขนาดละอองลอยจากข้อมูลที่ได้จากเครื่องแคสเคดอิมแพ็คเตอร์นั้น จำเป็นต้องมีการคำนวณค่าต่าง ๆ ที่ต้องใช้ชุดข้อมูลกลับไปกลับมาอยู่เป็นประจำ โดยวิธีการที่ง่ายที่สุดคือการคำนวณหาค่าความเข้มข้นมวลสะสมด้วยการใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของละอองลอยให้ได้ จากนั้นนำค่าที่ได้มาใช้ในการประมาณค่า MMAD และค่า GSD ของการกระจายตัวของขนาดละอองลอย โดยแนวทางนี้ได้ตั้งสมมติฐานไว้ว่าไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนของการสะสมอนุภาค และพฤติกรรมของอิมแพ็คเตอร์หรือแผ่นตกกระทบเป็นไปตามทฤษฎีทุกประการ รวมทั้งการกระจายตัวของขนาดละอองลอย เป็นการแจกแจงแบบฐานนิยมเดี่ยว (unimodal)โดยที่การกระจายตัวของขนาดละอองลอยสามารถอธิบายโดยฟังก์ชันการกระจายแบบลอกนอร์มัล (lognormal) เครื่องแคสเคดอิมแพ็คเตอร์นิยมนำมาใช้ในการวัดการกระจายตัวของขนาดตามมวล-น้ำหนักของละอองลอยได้ ดังนั้นในการใช้งานเครื่องจึงจำเป็นต้องสร้างสมมติฐานเกี่ยวกับรูปร่างและความหนาแน่นของอนุภาคขึ้นมาเพื่อใช้สำหรับการประมาณค่าจำนวนอนุภาคและพื้นที่ผิวแบบกระจายน้ำหนัก เนื่องจาก

พารามิเตอร์เหล่านี้เป็นข้อมูลที่ประเมินได้ยาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องให้ความสำคัญในการแปลผลข้อมูลที่ได้จากเครื่องแคสเคดอิมแพ็คเตอร์ในรูปแบบที่เป็นจำนวนหรือพื้นที่ผิวละอองลอยเป็นอย่างยิ่ง

ง.5.3 การวัดด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแบบ ELPI™

เครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแบบ ELPI™ เป็นเครื่องมือที่รวมเทคนิคการสะสมอนุภาคด้วยแรงเฉื่อยเข้ากับเทคนิคการตรวจวัดอนุภาคด้วยไฟฟ้าเพื่อใช้ในการหาค่าการกระจายตัวของขนาดละอองลอยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7 nm ขึ้นไป ซึ่งเป็นการตรวจวัดที่เชื่อถือได้ว่ามีความใกล้เคียงกับการตรวจวัดแบบเรียลไทม์ โดยมีการอัดประจุละอองลอยที่เข้ามาในเครื่องโดยเครื่องอัดประจุแบบขั้วเดียวก่อนที่มีการเก็บตัวอย่างด้วยเครื่องแคสเคดอิมแพ็คเตอร์แบบที่ใช้ความดันต่ำดังที่กล่าวไว้ใน ข้อ ง.2.2 เครื่องแคสเคดอิมแพ็คเตอร์ โดยแผ่นตกกระทบแต่ละแผ่นมีระบบไฟฟ้าแยกเป็นอิสระต่อกัน แต่มีการเชื่อมต่อการทำงานของแต่ละแผ่นเข้าด้วยกันด้วยอิเล็กโตรมิเตอร์แบบหลายช่องทำให้สามารถวัดประจุสะสมที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาได้ สำหรับในกรณีของเครื่อง DC ดังที่กล่าวไว้ในข้อ ง.4 การวัดความเข้มข้นพื้นที่ผิว โดยที่ประจุของอนุภาคจะมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อพื้นที่ผิวไวงาน ดังนั้นสัญญาณรวมที่ได้จากเครื่องอิเล็กโตรมิเตอร์ที่รวบรวมมาจากสัญญาณของแผ่นตกกระทบแต่ละแผ่นจึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวไวงานของละอองลอย อย่างไรก็ตามการที่สัญญาณของเครื่องอิเล็กโตรมิเตอร์ที่ได้มาจากแผ่นตกกระทบแต่ละแผ่นซึ่งมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวไวงานของอนุภาคที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์ในช่วงแคบ จึงทำให้เครื่องมือนี้มีข้อจำกัดในการแปลผลข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับรูปร่างของอนุภาคที่เป็นตัวอย่าง

ในกรณีที่ทราบว่าประสิทธิภาพในการอัดประจุให้กับอนุภาคเป็นฟังก์ชันกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์ หรืออาจสามารถตั้งเป็นสมมุติฐานได้นั้น สามารถนำข้อมูลแบบเรียลไทม์ที่ได้จากเครื่อง ELPI™ มาใช้ในการแปลผลในรูปแบบที่เป็นการกระจายตัวของขนาดตามจำนวนหรือน้ำหนักของละอองลอยได้ โดยในทางปฏิบัตินั้นประสิทธิภาพในการอัดประจุให้กับอนุภาคนั้นสามารถหาได้จากการทดลอง ซึ่งการแปลผลการวัดในรูปแบบของความเข้มของมวลอนุภาค หรือการกระจายตัวของขนาดตามมวลหรือน้ำหนักก็สามารถทำได้เช่นเดียวกัน แม้ว่าการวัดดังกล่าวนี้ต้องมีข้อมูลประสิทธิผลของความหนาแน่นอนุภาคที่เป็นฟังก์ชันกับขนาดอนุภาคและมีข้อมูลการสูญเสียอนุภาคที่มีความถูกต้อง นอกจากการที่เครื่อง ELPI™ สามารถทำการวัดความเข้มข้นของอนุภาคและการกระจายตัวของขนาดแบบออนไลน์ได้แล้วนั้น การดักเก็บตัวอย่างละอองลอยโดยการใช้เครื่อง ELPI™ ยังสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ถูกเก็บมาในภายหลังได้อีก ซึ่งรวมถึงการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

ง.5.4 การคำนวณความเข้มข้นของอนุภาคนาโนจากการวัดการกระจายตัวของขนาด

ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะของขนาดอนุภาคละอองลอยขณะผลิตหรือจัดการเกี่ยวกับอนุภาคนาโน รวมถึงการวัดการกระจายตัวของขนาด สามารถนำมาใช้คำนวณหาระดับการได้รับสัมผัสอนุภาคนาโนได้ เช่น

การคำนวณค่าความเข้มข้นของจำนวนจากการใช้ค่าการกระจายความถี่ร่วมกับข้อมูลปริมาตรของตัวอย่าง จากการตั้งสมมติฐานว่าอนุภาคนั้นมีลักษณะเกือบเป็นทรงกลมและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางกายภาพของอนุภาคที่เทียบเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางที่เคลื่อนที่ (สำหรับ DMAS ดูข้อมูลด้านล่าง) หรือมีค่าเทียบเท่าเส้นผ่านศูนย์กลางทางอากาศพลศาสตร์ (สำหรับ ELPI™ ดูข้อมูลที่ด้านล่าง) ทำให้สามารถคำนวณค่าความเข้มพื้นผิวละอองลอยได้ วิธีการนี้ได้มีการพัฒนาเพื่อใช้ในการคำนวณพื้นที่ผิวของอนุภาคเกาะก้อนแบบแน่น และการกระจายตัวของปริมาตร โดยการใช้เส้นผ่านศูนย์กลางการเคลื่อนที่ทางไฟฟ้าสำหรับละอองลอยนาโน จากความรู้เกี่ยวกับความหนาแน่นของอนุภาคในลักษณะเดียวกันนี้ ทำให้สามารถคำนวณค่าความเข้มข้นมวลของละอองลอยได้ โดยที่ความแม่นยำของการประมาณค่านี้ขึ้นอยู่กับการตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับลักษณะเฉพาะทางฟิสิกส์ของอนุภาค

ง.2.6 การเก็บตัวอย่างสำหรับการอธิบายลักษณะเฉพาะของวัสดุ

การประเมินสมบัติทางฟิสิกส์-เคมีของวัสดุนาโนในอากาศที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์นั้นเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง ด้วยตัวชี้วัด เช่น ขนาดอนุภาค รูปร่าง พื้นที่ผิว องค์ประกอบ สภาพการเกาะก้อนแบบหลวม สภาพเป็นผลึก ความสามารถในการละลาย และความคงตัวทางชีวภาพ เพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นฐานในประเมินการรับสัมผัสและความเป็นพิษของวัสดุนาโนใหม่ ๆ การเคลือบผิวบนอนุภาคและประจุไฟฟ้าของอนุภาคมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อสภาพการเกาะก้อนแบบหลวมของอนุภาค ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมทางกายภาพและการตอบสนองทางชีวภาพที่เกิดขึ้นตามมาด้วย การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างในระดับนาโนสเกลของอนุภาคนาโนที่อยู่ในอากาศเป็นสิ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อการศึกษาทางพิษวิทยา ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างในระดับนาโนสเกลของอนุภาคมักมีผลโดยตรงต่อลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคและตำแหน่งที่อนุภาคเกิดการสะสมหรือตกค้างอยู่ในระบบทางเดินหายใจซึ่งส่งผลต่อความเป็นพิษของอนุภาค สำหรับเทคนิคใหม่ ๆ ในการตรวจลักษณะเฉพาะของวัสดุนาโนที่อยู่ในอากาศ เช่น เทคนิคในการตรวจวิเคราะห์การเกาะก้อนแบบหลวมของ SWCNT นั้น กำลังอยู่ในช่วงของการพัฒนาเทคนิค

เทคนิคการวิเคราะห์ส่วนใหญ่ที่มีการใช้กันเป็นประจำในการวิเคราะห์ขนาด รูปร่าง และองค์ประกอบของอนุภาคมักเป็นการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง เช่น SEM ชนิดปืนยิงปล่อยสนามไฟฟ้า (field emission gun SEM) TEM และ STEM ร่วมกับเทคนิคการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีด้วยรังสีเอกซ์ เทคนิค EELS และเทคนิคที่ใช้การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน โดยในกรณีที่ใช้ SEM และ TEM นั้นจำเป็นต้องเตรียมตัวอย่างอนุภาคให้มีความสม่ำเสมอและอนุภาคต้องไม่ทับซ้อนกัน ซึ่งลักษณะในการเตรียมตัวอย่างดังกล่าวนี้เป็นอุปสรรคสำคัญในการตรวจวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของอนุภาคที่เก็บรวบรวมมาจากอิมแพ็คเตอร์หรือแผ่นตกกระทบ เพราะว่าอนุภาคที่เก็บรวบรวมด้วยอิมแพ็คเตอร์นั้นอยู่รวมกันอย่างหนาแน่นในบริเวณเดียวกัน ซึ่งอยู่บริเวณด้านล่างหัวพ่นของอิมแพ็คเตอร์ สำหรับการตรวจวิเคราะห์ด้วย SEM นั้น อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า

20 nm สามารถเก็บตัวอย่างลงบนฐานรองตัวอย่างของ SEM ได้โดยตรงโดยการใช้วิธีการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต โดยวิธีการดังกล่าวนี้อาจมีข้อจำกัดในเก็บตัวอย่างอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่เกิน 200 nm ขึ้นไป ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่เกิดขึ้นจากลักษณะรูปทรงของอุปกรณ์ที่เลือกใช้

เครื่องตกกะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบจุดบนระนาบ (point to plane) เป็นการรวมสนามอัดประจุและสนามตกตะกอนเข้าด้วยกัน ด้วยการใช้เข็มโคโรนาที่แหลม (sharp corona) เป็นที่หนึ่ง และพื้นเก็บตัวอย่างที่เป็นแผ่นระนาบเป็นขั้วไฟฟ้าที่สอง ซึ่งมีประสิทธิภาพในการเก็บตัวอย่างอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 20 nm ขึ้นไปได้ถึง 100% แต่สำหรับตัวอย่างที่เป็นอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 20 nm ลงมาอาจมีประสิทธิภาพในการเก็บตัวอย่างต่ำลง เนื่องจากการเก็บตัวอย่างด้วยเครื่องตกกะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ทำให้อนุภาคมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในลักษณะเดียวกันบนแผ่นระนาบที่ใช้เก็บตัวอย่าง จึงทำให้สามารถนำตัวอย่างอนุภาคมาตรวจวิเคราะห์ต่อด้วย SEM ได้ เครื่องดักจับอนุภาคด้วยการตกกะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตนั้นมีจำหน่ายโดยทั่วไป และมีบางรายงานที่ระบุไว้ว่าอุปกรณ์เก็บตัวอย่างละอองลอยแบบไม่ต้องใช้พลังงาน (passive aerosol samplers) นั้นสามารถนำมาใช้ในการเก็บตัวอย่างอนุภาคนาโนสำหรับการตรวจวิเคราะห์ด้วย SEM ได้

สำหรับการตรวจวิเคราะห์ด้วย TEM นั้น การเตรียมตัวอย่างมักนิยมเตรียมบนแผ่นรองตัวอย่างสำหรับ TEM โดยเฉพาะ ซึ่งทำให้สามารถหลีกเลี่ยงการเตรียมตัวอย่างในขั้นที่สองได้ สำหรับการวางตัวอย่างลงบนแผ่นรองตัวอย่างสำหรับ TEM นั้น สามารถทำได้โดยการตกตะกอนเชิงความร้อน การตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต หรือการผ่านอากาศไปที่แผ่นรองรับตัวอย่าง TEM โดยตรง โดยการตกตะกอนเชิงความร้อนจัดเป็นกลไกในการเก็บรวบรวมตัวอย่างที่เหมาะสมที่สุด เพราะเป็นไปตามหลักการที่ว่าอนุภาคละอองลอยเคลื่อนที่จากบริเวณที่ร้อนกว่าไปยังบริเวณที่เย็นกว่า และวิธีนี้มีประสิทธิผลเป็นอย่างยิ่งในกรณีที่อนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนสเกล การตกตะกอนเชิงความร้อนนั้นสามารถใช้ในการเก็บรวบรวมละอองลอยภายใต้อุณหภูมิโดยรอบโดยการสร้างระดับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขึ้นเหนือบริเวณพื้นผิวที่ใช้เก็บตัวอย่าง แล้วให้ละอองลอยเคลื่อนที่ผ่านข้ามพื้นผิวนั้นไป ซึ่งมีการออกแบบและผลิตเครื่องเก็บตัวอย่างแบบตกตะกอนเชิงความร้อนขึ้นมาหลายรูปแบบ

ง.2.7 การวัดอนุภาคของวัสดุนาโนที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างสูง

มีอนุภาคที่เกี่ยวข้องกับอาชีวอนามัยหลากหลายชนิด ซึ่งเป็นวัสดุนาโนที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างที่มีค่าสูง ในกลุ่มนี้เราสามารถแยกความแตกต่างของอนุภาคที่ยาวมากของวัสดุโครงสร้างนาโน (เช่น สายโซ่ของอนุภาคนาโนเกาะก้อนแบบแน่น) และวัตถุนาโนที่ยาวมาก ซึ่งมักเรียกว่า แท่งนาโน ซึ่งวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะโดยการมีองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างและลักษณะทางเรขาคณิตที่แตกต่างกัน

ตัวอย่างของแท่งนาโนซึ่งมีการผลิตในระดับอุตสาหกรรม คือ CNT SWCNT นั้นประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนเพียงชั้นเดียวที่จัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 nm และ

ความยาวมากถึงประมาณ 1 mm นอกจากนี้ CNT อาจมีลักษณะเป็นท่อที่มีผนังหลายชั้นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางร่วมกันโดยมีขนาดใหญ่กว่า SWCNT มาก CNT ที่มีอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างที่มีค่าสูงมาก ๆ รวมทั้งมีความสามารถในการละลายได้ต่ำ เมื่ออยู่ในปอดแล้วอาจนำไปสู่กลไกความเป็นพิษที่เหมือนกับกลไกที่เกิดจากอนุภาคเส้นใยชนิดอื่น ๆ เช่น แร่ใยหิน และเส้นใยแก้วสังเคราะห์ (synthetic vitreous fibers) ดังนั้นอาจมีคำถามตามมาสำหรับวัตถุประสงค์ในการวัดการรับสัมผัสกับท่อนาโนเหล่านี้ว่าควรมีการพิจารณาให้เหมือนกับการรับสัมผัสกับแร่ใยหิน และวิเคราะห์ได้โดยการนับจำนวนจาก TEM

อย่างไรก็ตาม สิ่งที่ไม่เหมือนกันกับแร่ใยหิน คือ SWCNT นั้นมักไม่พบในลักษณะของเส้นใยเดี่ยว แต่ CNT มักเกิดการม้วนของท่อนาโนแบบขดไปขดมา (คล้ายกับเชือกนาโน: nanoropes) โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 20 nm ถึง 50 nm และจากนั้นเกิดการเกาะกลุ่มที่ซับซ้อนและเกาะรวมกันเป็นอนุภาคเกาะก้อนแบบหลวมกับเชือกนาโนชนิดอื่น สารคาร์บอนในรูปแบบอื่น และวัสดุที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอยู่ โดยมีขนาดตั้งแต่ 100 μm และ 1 mm จากการศึกษาในห้องปฏิบัติการและในภาคสนามของเมย์นาร์ดและคณะ (Maynard et al.) พบว่าการที่สามารถแยกท่อนาโนที่จับเป็นกลุ่มก้อนนี้ให้เกิดเป็นท่อนาโนที่อยู่ในรูปละอองลอยนั้นค่อนข้างทำได้ยากมาก กระบวนการทั่วไปในการเคลื่อนย้ายผง SWCNT จากภาชนะที่ใช้ในการผลิตไปยังภาชนะที่ใช้เก็บ และเข้าสู่ภาชนะที่ใช้เก็บใบถัดไปนั้นพบว่าไม่มีการเพิ่มจำนวนของอนุภาคนาโนเกิดขึ้น การเพิ่มจำนวนของอนุภาคนาโนเกิดขึ้นอย่างมีนัยสำคัญถ้ามีการใช้เครื่องเขย่าผสมสารให้เข้ากัน เตาเผาชนิดใช้ตัวกลางนำความร้อน (fluidized bed) โดยการเขย่าให้เกิดการหมุนวนของอนุภาคเดี่ยว มากกว่า 50% แม้ว่าอัตราการเกิดละอองลอยของ SWCNT อาจต่ำมากในขณะที่มีการขนส่งหรือการจัดการ แต่จากผลการศึกษาในปัจจุบันได้ระบุว่า SWCNT ที่อยู่ในอากาศและสามารถหายใจเข้าไปได้นั้นอาจทำให้เกิดอันตรายกับปอดได้ ในส่วนของการวัดและการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของ SWCNT นั้น เป็นที่น่าสังเกตว่าสมบัติทางฟิสิกส์-เคมีของอนุภาคละอองลอยของ SWCNT ที่ปลดปล่อยออกมานั้น ขณะที่ยังไม่ผ่านการแปรรูป SWCNT จะมีสมบัติของขนาดอนุภาคและชุดการผลิตที่หลากหลาย ทำให้การประเมินอันตรายที่อาจเกิดขึ้นต่อสุขภาพของมนุษย์ต้องคำนึงถึงประเด็นเหล่านี้ด้วย อย่างไรก็ตามสำหรับการใช้งานแล้ว ผู้ผลิตพยายามป้องกันอนุภาคนาโนจากการรวมกันเป็นอนุภาคเกาะก้อนแบบหลวม โดยใช้รูปแบบของการเคลือบผิวและเทคนิคอื่น ๆ ร่วมด้วย นอกจากนี้ ยังไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับการกระจายขนาดของอนุภาคที่ปลดปล่อยออกมาจากการตัด การขัดด้วยกระดาษทราย หรือการขัดถูของผลิตภัณฑ์ซึ่งมีท่อนาโนรวมเข้าเป็นส่วนหนึ่งในเมทริกซ์ของวัสดุ เช่น คอมโพสิต ยางรถยนต์ เป็นต้น ดังนั้นในขณะนี้จึงยังไม่มีการแนะนำให้มีการปฏิบัติกับท่อนาโนให้เหมือนกับแร่ใยหินในการประเมินการรับสัมผัส แต่อาจเป็นการดีถ้ามีการตรวจติดตามระดับของอนุภาคนาโนในสถานที่ปฏิบัติงานที่กำลังมีการผลิตหรือจัดการกับ CNT นั้น เพื่อเก็บตัวอย่างในการวิเคราะห์ด้วย TEM สำหรับท่อนาโนที่แยกจากกันโดยสิ้นเชิง โดยสรุปการเฝ้าดูอย่างระมัดระวังควรดำเนินไป

พร้อมกับการพัฒนาการผลิตท่อนาโน และควรมีการแบ่งปันความรู้จากหลักฐานต่าง ๆ ของท่อนาโนในอากาศที่ปรากฏในสถานที่ปฏิบัติงาน

งานวิจัยเกี่ยวกับการประเมินการรับสัมผัสในสถานที่ปฏิบัติงานที่มีการดำเนินการโดยใช้เส้นใยนาโนคาร์บอนนั้น การวัดทำโดยเครื่องมือประมวลผลแบบเรียลไทม์ (CPC, DC, aerosol photometer และ ELPI™) ซึ่งระบุว่ากระบวนการส่วนใหญ่ไม่ได้ปลดปล่อยเส้นใยนาโนคาร์บอนในปริมาณที่มากอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับการวัดอนุภาคในพื้นที่ทั่วไป อย่างไรก็ตาม กระบวนการบางอย่าง เช่น การเลื่อยวัสดุคอมโพสิตขณะเปียก และการเคลื่อนย้ายเส้นใยนาโนคาร์บอนจากภาชนะผสม เป็นต้น ทำให้ปริมาณอนุภาคในอากาศเพิ่มขึ้น (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 300 nm ถึง 2 500 nm) โดยมีความเข้มข้นมวลถึง 0.16 mg/m^3 ซึ่งวัดโดยเครื่องวัดความสว่างแสงของละอองลอย (aerosol photometer) นอกจากนี้การเก็บตัวอย่างอากาศและตัวอย่างพื้นผิวโดยใช้วิธีเก็บตัวอย่างในสุญญากาศ (vacuum sampling method) โดยใช้แผ่นกรองเส้นใยควอตซ์ที่มีความบริสุทธิ์สูงและวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อนและแสง (thermal-optical analysis technique) ซึ่งระบุว่ามีปริมาณคาร์บอนทั้งหมดถึง 1.1 mg/m^3 ของอากาศที่สามารถหายใจเข้าไปได้ มีการใช้เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบจุดบนระนาบบน เพื่อเก็บตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ด้วย TEM สำหรับการวัดขนาดอนุภาคและรูปร่าง ตัวอย่างบางส่วนได้แสดงให้เห็นถึงม้วนของเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน (บางเส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 100 nm) และความยาวที่ต่างกัน เส้นใยส่วนใหญ่ปรากฏในรูปของการเกาะก้อนของม้วนเส้นใยแบบหลวม ๆ มากกว่าเป็นแบบเส้นใยเดี่ยว

จากการเปรียบเทียบเทคนิคในการวิเคราะห์ พบว่าเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี (Raman spectroscopy) เป็นเทคนิคเหมาะสมที่สุดสำหรับวิธีทางสเปกโตรสโคปี ในขณะที่วิธีการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์นั้นการใช้เครื่อง SEM เหมาะสมมากกว่า TEM และการใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (atomic force microscope) มีความเหมาะสมกว่าการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดในอุโมงค์ (scanning tunneling microscope)

ง.6 แนวทางในการเก็บตัวอย่าง

ได้มีคำแนะนำให้มีการใช้เครื่องมือต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของละอองลอยในสถานที่ปฏิบัติงานขณะผลิต จัดการ หรือใช้ผลิตวัสดุชนิดใหม่ จนกว่ามีข้อตกลงว่าตัวชี้วัดที่เหมาะสมสำหรับการประเมินการรับสัมผัสอนุภาคนาโนที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์นั้นคือวิธีใด การดำเนินการนี้จำเป็นต้องใช้เครื่องมือจำนวนมากซึ่งไม่สามารถนำไปใช้ในการเก็บตัวอย่างส่วนบุคคลโดยทั่วไปได้เพื่อประเมินการรับสัมผัสส่วนบุคคลสำหรับการปฏิบัติตามขอบเขตการรับสัมผัสหรือสำหรับการศึกษาทางระบาดวิทยา

อย่างไรก็ตามมีการพัฒนาเครื่องมือชนิดใหม่ ๆ อย่างต่อเนื่องและมีเครื่องมือพกพาขนาดเล็กสำหรับการวัดปริมาณความเข้มข้นของอนุภาค ความเข้มของพื้นที่ผิวอนุภาค และความเข้มของพื้นที่ผิวที่มีผลต่อสุขภาพแล้ว แม้ว่าเครื่องมือส่วนใหญ่นั้นยังไม่ได้เป็นเครื่องมือเฉพาะส่วนบุคคลแต่เครื่องมือเหล่านี้มีความกะทัดรัด

ที่สามารถใช้ในการเคลื่อนย้ายจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งในสถานที่ปฏิบัติงานได้ และสามารถตั้งอยู่ใกล้กับผู้ปฏิบัติงานในแต่ละพื้นที่ได้ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันเครื่องมือเหล่านี้ยังไม่สามารถให้ข้อมูลที่เพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของสถานที่ปฏิบัติงานได้อย่างเต็มรูปแบบ ดังนั้นควรมีการใช้งานเครื่องมือที่ติดอยู่กับที่ เช่น DMAS ELPI™ และเครื่องมือสำหรับการเก็บอนุภาคเพื่อการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางฟิสิกส์-เคมีด้วย ควรระมัดระวังและใส่ใจในการติดตั้งเครื่องมือในการเก็บตัวอย่างที่ตั้งอยู่กับที่นี้เนื่องจากลักษณะเฉพาะของละอองลอยนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามระยะทางที่ห่างจากแหล่งกำเนิด ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งความแตกต่างของช่วงเวลาและระยะทางของมวล และปริมาณความเข้มข้นของละอองลอยระดับนาโนสเกล ซึ่งเหตุการณ์นี้เกิดขึ้นจริงกับกระบวนการที่มีความร้อนซึ่งนำไปสู่การรวมกันของนิวเคลียสของอนุภาคจากไอซึ่งมักนำไปสู่อัตราการปล่อยพลังงานที่เปลี่ยนแปลงไปและความเข้มข้นที่เปลี่ยนไปตามเวลา

เพื่อปรับปรุงความสามารถในการเปรียบเทียบข้อมูลการรับสัมผัสแนวทางที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดค่าการรับสัมผัสต่ออนุภาคละอองลอยนาโนส่วนบุคคลนั้นคือการวัดค่าเป็นเวลา 8 h สำหรับช่วงกะของการปฏิบัติงาน ดังนั้นเมื่อมีผลการวัดการรับสัมผัสในช่วงเวลาที่สั้นกว่า ควรมีการคำนวณปรับข้อมูลให้มีเวลาเทียบเท่ากับช่วงเวลา 1 กะ หรือ 8 h ในกรณีที่ต้องมีการเก็บข้อมูลการรับสัมผัสในช่วงระยะเวลาสั้น ควรมีการบันทึกเวลาที่ใช้ในการวัดจริงทุกครั้ง ในการวัดการรับสัมผัสแบบระยะสั้นนั้นแนะนำให้ใช้ช่วงเวลาประมาณ 15 min เนื่องจากเป็นเวลาที่มักนำไปใช้ในการวัดอาชีวอนามัย

การเลือกตำแหน่งการเก็บตัวอย่างที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการแปรผลที่น่าเชื่อถือของข้อมูลในการวัดการรับสัมผัสของบุคคล ซึ่งต้องมีการวิเคราะห์ในหลายประเด็นที่มีการดำเนินการโดยผู้ปฏิบัติงานที่มีการใช้งาน หรือการเคลื่อนย้าย หรือการจัดการกับวัสดุนาโนนั้น ๆ ควรมีการระบุแหล่งกำเนิดที่ปลดปล่อยละอองลอยขนาดนาโนสเกลและมีความเข้าใจถึงระบบระบายอากาศในสถานที่ปฏิบัติงาน เพื่อประเมินโอกาสในการเกิดการปนเปื้อนระหว่างการเก็บตัวอย่างได้ ซึ่งประเด็นนี้เป็นปัญหาสำคัญของอนุภาคนาโนเนื่องจากอนุภาคนาโนนั้นสามารถคงอยู่ในอากาศได้ในช่วงเวลาที่ยาวนาน และสามารถกระจายตัวได้ง่ายไปตามกระแสของการหมุนเวียนอากาศในสถานที่ปฏิบัติงาน สำหรับแหล่งกำเนิดอนุภาคละอองลอยเพียงจุดเดียวนั้น ความสัมพันธ์ของการปลดปล่อยละอองลอยและกิจกรรมในการปฏิบัติงานนั้นควรมีความชัดเจนสามารถทำให้การประเมินระดับการรับสัมผัสมีความน่าเชื่อถือ

อย่างไรก็ตาม ผลของการวัดระดับอนุภาคนาโนที่ปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิตที่วัดได้นั้นอาจมีค่าสูงกว่าความจริง หากสถานที่ปฏิบัติงานมีสภาพที่ไม่สะอาด หรือไม่มีระบบกรองอากาศที่มีประสิทธิภาพ จึงทำให้ละอองลอยขนาดนาโนสเกลที่เกิดจากแหล่งกำเนิดภายนอก เช่น จากไอเสียรถยนต์ กิจกรรมเชิงอุตสาหกรรมชนิดอื่น ๆ โรงงานไฟฟ้า อาจเข้ามาภายในอาคารได้ ซึ่งเหตุการณ์เช่นนี้อาจนำไปสู่การประเมินการรับสัมผัสวัสดุนาโนของผู้ปฏิบัติงานจากกระบวนการผลิตที่เกินความเป็นจริงไปด้วย วิธีการหนึ่งในการแก้ปัญหาคือควรมีการประเมินอนุภาคที่มีในบรรยากาศ หรือทำการวัดอนุภาคที่มีทั่วไปก่อนการดำเนินการ

ผลิต หรือการแปรรูปอนุภาคนาโน อย่างไรก็ตาม ไม่ควรนำค่าที่ได้จากการวัดอนุภาคที่มีอยู่ทั่วไปก่อนการผลิตนั้นไปหักลบกับค่าที่วัดได้จากการวัดการรับสัมผัสเนื่องจากค่าที่วัดอนุภาคที่มีอยู่ทั่วไปก่อนการผลิตในพื้นที่นั้นอาจแปรเปลี่ยนไปตามช่วงเวลา อีกวิธีหนึ่งที่ใช้ได้คือการวัดค่าความเข้มข้นของอนุภาคที่มีอยู่โดยทั่วไปในพื้นที่ปฏิบัติงานไปพร้อมกับการวัดค่าอนุภาคภายนอกสถานปฏิบัติงานอย่างต่อเนื่องโดยใช้เครื่องมือตรวจวัดที่เหมือนกัน และทำการหักลบค่าที่ได้จากการวัดพื้นที่นอกสถานที่ปฏิบัติงานนั้นออกจากค่าที่วัดได้จากการวัดในสถานที่ปฏิบัติงาน อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูง และเป็นการตั้งสมมติฐานว่าอนุภาคในบรรยากาศนั้นไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเคลื่อนที่เข้ามาภายในสถานที่ปฏิบัติงาน

อีกทางเลือกหนึ่ง ความแตกต่างขององค์ประกอบระหว่างอนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นในสถานที่ปฏิบัติงานและองค์ประกอบของอนุภาคที่เกิดจากการเผาไหม้ในอากาศภายนอกนั้นสามารถนำมาใช้ในการแยกความแตกต่างนี้ได้ ถ้ารู้องค์ประกอบของอนุภาคนาโนจากการผลิต และองค์ประกอบเหล่านี้มักไม่พบในอากาศภายนอก ดังนั้นสามารถวัดอัตราส่วนของอนุภาคนาโนสังเคราะห์ขึ้นต่อจำนวนอนุภาคทั้งหมดที่สามารถนับด้วย TEM และสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของอนุภาคด้วยการวิเคราะห์ระดับจุลภาคด้วยรังสีเอกซ์ (x-ray microanalysis) นอกจากนี้อัตราส่วนนี้อาจนำไปใช้ในการคำนวณหาความเข้มข้นพื้นที่ผิวของอนุภาคนาโนจากค่าพื้นที่ผิวทั้งหมดของอนุภาคนาโนในอากาศที่ตรวจวัดได้ ความถูกต้องของวิธีการนี้ขึ้นอยู่กับว่าอนุภาคนาโนนั้นมีธาตุอย่างน้อย 1 ชนิดที่สามารถวัดได้ และเป็นธาตุที่ไม่ปรากฏในละอองลอยที่มาจากภายนอก แต่สิ่งที่นำเสนอมานี้ยังไม่มีการทดสอบอย่างเต็มรูปแบบ

ฉบับร่างเพื่อรับฟังความคิดเห็น

ภาคผนวก จ.
การวัดการรับสัมผัสวัสดุนาโนผ่านทางผิวหนัง
(ข้อ 8.3.8.1)

จ.1 การสุ่มตัวอย่าง

การสุ่มตัวอย่างอนุภาคนาโนที่สะสมบนผิวหนังสามารถทำได้ด้วยวิธีการที่ดัดแปลงมาจากการสุ่มตัวอย่างสารเคมีบนผิวหนัง การประเมินทางตรงสำหรับการรับสัมผัสวัสดุนาโนทางผิวหนังนั้น ทำได้โดยวัดปริมาณอนุภาคนาโนที่สัมผัสกับผิวหนังในช่วงเวลาหนึ่ง ด้วยวิธีการเก็บตัวอย่างวัสดุนาโนจากผิวหนัง หรือวิธีการเก็บตัวอย่างวัสดุนาโนจากชิ้นวัสดุ กรณีเลือกใช้แนวทางแรกควรพิจารณาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากประสิทธิภาพในการนำวัสดุนาโนออกมาจากผิวหนัง และระยะเวลาการรับสัมผัสในการประเมินแต่ละครั้ง ส่วนค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการใช้วิธีการตัดชิ้นวัสดุมักเกิดจากการที่วัสดุไม่สามารถให้ลักษณะเฉพาะการยึดเกาะที่เหมือนกับผิวหนังได้ วิธีการเก็บตัวอย่างจากผิวหนังที่ใช้งานในปัจจุบัน มีดังนี้

จ.1.1 วิธีการล้าง

ทำได้โดยใช้ตัวทำละลาย (เช่น สารละลายที่มีสารลดแรงตึงผิว) ชะผิวหนังส่วนที่มีการรับสัมผัสและสะสมวัสดุนาโนออก และนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของวัสดุนาโน รวมทั้งองค์ประกอบทางเคมี ขนาดและรูปร่างของอนุภาค

จ.1.2 วิธีการเช็ด

ทำได้โดยใช้วัสดุที่ทำให้ชุ่มด้วยตัวทำละลายเช็ดผิวหนัง แล้วนำวัสดุที่ผ่านการเช็ดไปวิเคราะห์อนุภาคนาโน เช่น วัดความเข้มข้นของโลหะด้วยเครื่อง ICP-MS หรือเทคนิคการวิเคราะห์อื่น ๆ

จ.1.3 วิธีการลอกด้วยเทปกาว

ทำได้โดยการแปะเทปกาวลงบนผิวหนังเพื่อดึงวัสดุนาโนที่อยู่บนผิวหนังและอยู่ในผิวหนังออกมา และนำไปวิเคราะห์หาวัสดุนาโนด้วย ICP-MS หรือเทคนิคการวิเคราะห์อื่น ๆ

จ.1.4 วิธีการใช้ชิ้นวัสดุในการเก็บตัวอย่าง

จ.1.4.1 วิธีที่อาศัยแผ่นแปะ

ทำได้โดยนำแผ่นแปะซึ่งเลือกได้จากวัสดุที่หลากหลาย เช่น สำลีฝ้าย ผ้าพันแผล โพลีเอสเตอร์ แผ่นกระดาษแอลฟาเซลลูโลส โฟมโพลียูรีเทน หรือฟิล์มพลาสติกโพลีโพรพิลีน แปะลงบนร่างกายเพื่อเก็บอนุภาคนาโนเมื่อมีการรับสัมผัสเกิดขึ้น วิธีการนี้เหมาะสำหรับใช้ในการทดสอบเพื่อคัดกรองเนื่องจากมีข้อจำกัดในการประมวลผลเชิงปริมาณ อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปเชื่อว่าทั้งวิธีการเก็บตัวอย่างวัสดุนาโนจากผิวหนังหรือจากชิ้นวัสดุ ไม่สามารถให้ค่าปริมาณการสะสมของวัสดุนาโนบนผิวหนังได้อย่างถูกต้อง โดยประสิทธิภาพการเก็บตัวอย่างวัสดุนาโนจากผิวหนังมักต่ำ

กว่าการเก็บจากชิ้นวัสดุ ดังนั้นผลที่ได้จากวิธีการเหล่านี้เป็นเพียงภาพสะท้อนมากกว่าเป็นค่าการรับสัมผัสที่แท้จริง จึงใช้แสดงค่าอนุมานการรับสัมผัสเท่านั้น

จ.1.4.2 วิธีที่อาศัยถุงมือ

ทำได้โดยใช้ถุงมือดูดซับในการเก็บตัวอย่างอนุภาคที่สัมผัสกับมือ

จ.1.4.3 วิธีการวัดปริมาณวัสดุนาโนทั้งร่างกาย

ทำได้โดยใช้ชุดที่ห่อหุ้มทั้งร่างกายเป็นตัวจับวัสดุนาโน (โดยทั่วไปเป็นชุดคลุมด้านในที่ยาวจากส่วนบนของลำตัวลงไปที่ขาและเท้า วัสดุที่ใช้ทำจากผ้าฝ้าย) ข้อจำกัดของวิธีการนี้คือ ความยากในการแยกวัสดุนาโนออกจากชุดซึ่งมีขนาดใหญ่ ข้อดีของวิธีการนี้เมื่อเทียบกับการใช้แผ่นแปะคือการลดโอกาสพลาดบริเวณที่การรับสัมผัสอาจเกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม สามารถใช้การแปะแผ่นแปะในหลายจุดของร่างกายเพื่อประมาณการรับสัมผัสที่จุดต่าง ๆ

จ.1.5 วิธีการอื่น ๆ

จ.1.5.1 ตัวติดตามการเรืองแสง

ทำได้โดยอาศัยการติดสารเรืองแสงที่ไม่เป็นพิษเข้ากับวัสดุนาโน และใช้การถ่ายภาพเพื่อระบุตำแหน่งและวัดปริมาณวัสดุนาโนที่สัมผัสกับผิวหนัง

จ.1.5.2 พื้นผิวที่มีการปนเปื้อน

เป็นการอาศัยการเก็บตัวอย่างจากพื้นผิวที่มีการปนเปื้อนวัสดุนาโน เช่น อุปกรณ์ เครื่องมือ ซึ่งวิธีการนี้สามารถใช้เป็นตัวคาดการณ์ลำดับแรกที่ใช้บ่งชี้การรับสัมผัสผ่านทางผิวหนัง นอกจากนี้ยังสามารถนำค่าที่ได้จากการตรวจวัดไปใช้สำหรับการควบคุมการเคลื่อนย้ายของวัสดุนาโนในสถานที่ทำงานได้

จ.2 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสามารถนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ การกระจายตัวของขนาด ความเข้มข้นเชิงจำนวน และรูปร่างของวัสดุนาโนที่ได้จากการเก็บตัวอย่าง สำหรับการเก็บตัวอย่างด้วยวิธีการเช็ดออกนั้นหากใช้แผ่นกรองที่ทำจากเซลลูโลสเอสเตอร์อาจช่วยให้การวิเคราะห์ทำได้ง่ายขึ้น

การวิเคราะห์ด้วยหลักการกระเจิงแสง การหักเหของเลเซอร์ การแยกขนาดด้วยโครมาโทกราฟี และ การแยกด้วยเทคนิคการแยกแบบไหลภายใต้สนาม (field-flow fractionation) นั้นสามารถให้ข้อมูลการกระจายตัวของขนาด ความเข้มข้นเชิงจำนวน ขณะที่ สเปกโตรสโกปี (spectroscopy) นั้นสามารถให้ข้อมูลองค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างของวัสดุนาโน และสามารถนำมาใช้กับการเก็บตัวอย่างด้วยวิธีการชะออกได้

ตาราง จ.2 การเปรียบเทียบค่า APEs ของ RPE

(ข้อ 8.3.8.1)

ชนิดของ RPE	OSHA 29CFR 1910.134 (2006)	NIOSH Decision Logic (2004)
APR – หน้ากากชนิดคลุม ¼ ของใบหน้า	5	5
APR – หน้ากากชนิดแผ่นกรองด้านหน้า	10	10
APR – หน้ากากชนิดกระชับแบบครอบครึ่งใบหน้า	10	10
APR – หน้ากากชนิดกระชับกับใบหน้า (กระดาษกรอง ≠N-P-R 100)	50	10
APR – หน้ากากชนิดกระชับกับใบหน้า (กระดาษกรอง = N-P-R 100)	50	50
PAPR – หน้ากากชนิดกระชับแบบครอบครึ่งใบหน้า	50	50
PAPR – หน้ากากชนิดกระชับแบบครอบเต็มใบหน้า	1000	50
PAPR – ที่ครอบหน้าแบบครอบศีรษะ/คลุมศีรษะ	25/1000*	25
PAPR – หน้ากากชนิดปิดคลุมแบบมีช่องอากาศผ่านออก	25	25
SAR – demand mode – หน้ากากแบบครอบครึ่งใบหน้า	10	10
SAR – demand mode – หน้ากากแบบครอบเต็มใบหน้า	50	50
SAR – continuous flow – หน้ากากแบบครอบครึ่งใบหน้า	50	50
SAR – continuous flow – หน้ากากแบบครอบเต็มใบหน้า	1000	50
SAR – continuous flow – ที่ครอบหน้าแบบครอบศีรษะ/คลุมศีรษะ	25/1000*	25
SAR – continuous flow – หน้ากากชนิดปิดคลุมแบบมีช่องอากาศผ่านออก	25	25
SAR – pressure demand – หน้ากากแบบครอบครึ่งใบหน้า	50	1000
SAR – pressure demand – หน้ากากแบบครอบเต็มใบหน้า	1000	2000
SAR/SCBA – pressure demand – หน้ากากแบบครอบเต็มใบหน้า	-	10000
SCBA – demand mode – หน้ากากแบบครอบครึ่งใบหน้า	10	-
SCBA – demand mode – หน้ากากแบบครอบเต็มใบหน้า	50	50
SCBA – demand mode – ที่ครอบหน้าแบบครอบศีรษะ/คลุมศีรษะ	50	-
SCBA – pressure demand – หน้ากากเต็มหน้า	10000	10000
SCBA –pressure mode–ที่ครอบหน้าแบบครอบศีรษะ/คลุมศีรษะ	10000	-
*พนักงานต้องมีหลักฐานจากผู้ผลิตในการทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ระดับการป้องกัน 1000 หรือมากกว่า		

หมายเหตุ *APF คือค่าต่ำสุดของการป้องกันที่คาดการณ์ไว้ซึ่งได้มาจากอุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจที่ใช้งานได้อย่างเหมาะสม หรือระดับของอุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจโดยค่าที่ได้มาจากผู้ใช้งานที่ผ่านการฝึกมาแล้วและนำมาพัฒนาโดย U.S. NIOSH ซึ่งอ้างอิงมาจากการศึกษาในห้องปฏิบัติการและการคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งรวมถึงการรั่วไหลจากการทะลุผ่านแผ่นกรองและการรั่วไหลจากส่วนปิดผนึกส่วนหน้าของอุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจ APF 10 ของอุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจหมายถึง ผู้ใช้งานคาดได้ว่าอาจหายใจรับอากาศที่มีค่าไม่เกิน 10% ของอากาศที่มีการปนเปื้อน ในขณะที่ AP100 หมายถึง ผู้ใช้งานคาดได้ว่าอาจหายใจรับอากาศที่มีค่าไม่เกิน 1% ของอากาศที่มีการปนเปื้อน*

ตาราง จ.3 ข้อดีและข้อเสียของ APR แต่ละชนิด

(ข้อ 8.3.8.1)

ชนิดของ APPR	ข้อดี	ข้อเสีย
หน้ากาก กรองแบบใช้แล้วทิ้ง (filtering facepiece)	- น้ำหนักเบา - ไม่ต้องบำรุงรักษาและทำความสะอาด - ไม่มีผลกระทบในการเคลื่อนไหวร่างกาย	- ไม่มีการป้องกันดวงตา - มีปัญหาในเรื่องการระบายความร้อน - เกิดการรั่วที่ช่องว่างของการปิดผนึกในส่วนหน้าได้ - บางชนิดไม่สามารถปรับสายรัดคาดหัวได้ - ยากต่อผู้ใช้งานในการตรวจสอบการปิดผนึก - ระดับการป้องกันแตกต่างกันมากตามชนิดที่ใช้ - การสื่อสารทำได้ยาก - ต้องมีการทดสอบความกระชับกับใบหน้าในการสวมใส่ - การใส่แว่นตาอาจทำให้การสวมใส่ไม่พอดี - ต้องมีการเปลี่ยน RPE เมื่อมีการเสียหาย หรือมีแรงต้านอย่างชัดเจนเมื่อหายใจ
หน้ากากยืดหยุ่นแบบครอบครึ่งใบหน้า (elastomeric half facepiece)	- การบำรุงรักษาไม่ยุ่งยาก - ตัวหน้ากากสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และสามารถเปลี่ยนแผ่นกรองและไส้กรองได้ - ไม่มีผลกระทบในการเคลื่อนไหวร่างกาย	- ไม่มีการป้องกันดวงตา - มีปัญหาในเรื่องการระบายความร้อน - เกิดการรั่วที่ช่องว่างของการปิดผนึกในส่วนหน้าได้ - การสื่อสารทำได้ยาก - ต้องมีการทดสอบความกระชับกับใบหน้าในการสวมใส่ - การใส่แว่นตาอาจทำให้การสวมใส่ไม่พอดี
หน้ากากคลุมช่องระบบทางเดินหายใจแบบมีอากาศผ่านออกชนิดใช้แบตเตอรี่ (powered with loose-fitting face piece)	- ป้องกันดวงตา - ป้องกันผู้สวมใส่ที่มีเครา ฟันปลอม หรือแผลเป็นบนใบหน้า - ความต้านทานการหายใจต่ำ - อากาศที่ไหลผ่านทำให้เกิดความเย็น - สังเกตการรั่วไหลจากที่ปิดผนึกได้ - ไม่ต้องทดสอบความกระชับของการสวมใส่ - ใส่แว่นสายตาทำงานได้ - การสื่อสารไม่ลำบาก - ส่วนประกอบบางส่วนนำมาใช้ใหม่ได้ และเปลี่ยนแผ่นกรองได้	- น้ำหนักของอุปกรณ์ที่มากขึ้นเนื่องจากแบตเตอรี่และเครื่องเป่าอากาศ - เคลื่อนไหวไม่สะดวกสำหรับการทำงาน - ต้องมีการชาร์ตแบตเตอรี่ - อากาศที่ไหลผ่านต้องมีการทดสอบพร้อมอุปกรณ์ให้อากาศก่อนใช้งาน

ตาราง จ.3 ข้อดีและข้อเสียของ APR แต่ละชนิด (ต่อ)

(ข้อ 8.3.8.1)

ชนิดของ APPR	ข้อดี	ข้อเสีย
หน้ากากยืดหยุ่นแบบครอบเต็มใบหน้าโดยใช้แผ่นกรอง N-100, R-100 หรือ P-100 (electrometric full-facepiece with N-100, R-100, P-100 filters)	- ป้องกันดวงตา - การบำรุงรักษาไม่ยุ่งยาก - สามารถนำแผ่นกรองด้านหน้ามาใช้ใหม่ได้ และสามารถเปลี่ยนแผ่นกรองและไส้กรองได้ - ไม่มีผลกระทบในการเคลื่อนไหวร่างกาย - ประสิทธิภาพการปิดผนึกมีมากกว่า filtering facepiece หรือหน้ากากยืดหยุ่นแบบครอบครึ่งใบหน้า	- มีปัญหาในเรื่องการระบายความร้อน - มีการบดบังวิสัยทัศน์เมื่อเปรียบเทียบกับแบบครอบครึ่งหน้า - เกิดการรั่วที่ช่องว่างของการปิดผนึกในส่วนหน้าได้ - ต้องมีการทดสอบความพอดีกับใบหน้าในการสวมใส่ - เลนส์ที่ใช้ในส่วนหน้าทำให้เกิดฝ้าได้ถ้าไม่ใส่ที่ครอบจมูก หรือถ้าไม่มีการทำความสะอาดเลนส์ - ต้องมีการดูแลเป็นพิเศษสำหรับผู้ที่ใส่แว่นสายตา
หน้ากากชนิดกระชับแบบครอบครึ่ง/เต็มใบหน้า (Powered with tight-fitting half facepiece or full facepice)	- ป้องกันดวงตาเมื่อใช้แบบครอบเต็มหน้า - ความต้านทานการหายใจต่ำ - อากาศที่ไหลผ่านทำให้เกิดความเย็น - สังเกตการรั่วไหลจากที่ปิดผนึกได้ - ส่วนประกอบบางส่วนนำมาใช้ใหม่ได้ และเปลี่ยนแผ่นกรองได้	- น้ำหนักของอุปกรณ์ที่มากขึ้นเนื่องจากแบตเตอรี่และเครื่องเป่าอากาศ - เคลื่อนไหวไม่สะดวกสำหรับการทำงาน - ไม่มีการป้องกันดวงตาเมื่อใช้แบบครอบครึ่งหน้า - ต้องมีการทดสอบความพอดีกับใบหน้าในการสวมใส่ - ต้องมีการชาร์ตแบตเตอรี่ - การสื่อสารทำได้ยาก - ต้องมีการดูแลเป็นพิเศษสำหรับผู้ที่ใส่แว่นสายตาเมื่อใช้แบบครอบเต็มหน้า - อากาศที่ไหลผ่านต้องมีการทดสอบพร้อมอุปกรณ์ให้อากาศก่อนใช้งาน

ฉบับร่างเพื่อรับฟังความคิดเห็น