

## ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

ฉบับที่ ๔๘๔๙ (พ.ศ. ๒๕๕๙)

ออกตามความในพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

พ.ศ. ๒๕๑๑

เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

นาโนเทคโนโลยี เล่ม ๗ วิธีปฏิบัติเกี่ยวกับสุขภาพและความปลอดภัยสำหรับผู้มีอาชีพ  
ที่เกี่ยวข้องกับนาโนเทคโนโลยี

อาศัยอำนาจตามความในมาตรา ๑๕ แห่งพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. ๒๕๑๑ ซึ่งแก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (ฉบับที่ ๗) พ.ศ. ๒๕๕๘ รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรมออกประกาศกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม นาโนเทคโนโลยี เล่ม ๗ วิธีปฏิบัติเกี่ยวกับสุขภาพและความปลอดภัยสำหรับผู้มีอาชีพที่เกี่ยวข้องกับ นาโนเทคโนโลยี มาตรฐานเลขที่ มอก. 2691 เล่ม 7 - 2559 ไว้ ดังมีรายละเอียดต่อท้ายประกาศนี้  
ทั้งนี้ ให้มีผลตั้งแต่วันที่ประกาศในราชกิจจานุเบกษาเป็นต้นไป

ประกาศ ณ วันที่ ๕ สิงหาคม พ.ศ. ๒๕๕๙

อรรชกา สีบุญเรือง

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม

# มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม นาโนเทคโนโลยี

## เล่ม 7 วิธีปฏิบัติเกี่ยวกับสุขภาพและความปลอดภัยสำหรับผู้มีอาชีพที่ เกี่ยวข้องกับนาโนเทคโนโลยี

### 1. ขอบข่าย

- 1.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ กำหนดแนวทางการปฏิบัติด้านอาชีวอนามัยและความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องกับนาโนเทคโนโลยี โดยมุ่งเน้นไปยังอาชีวอนามัยการผลิตและการใช้งานวัสดุนาโน ซึ่งเกี่ยวข้องกับ บริษัท นักวิจัย ผู้ปฏิบัติงาน และกลุ่มคนอื่น ๆ ที่ต้องการป้องกันผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพและความปลอดภัยที่เกิดระหว่างการผลิต การจัดการ การใช้งาน และการกำจัดวัสดุนาโน ครอบคลุมวัสดุนาโนและการใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ

### 2. บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ ให้เป็นไปตาม มอก. 2691 เล่ม 1 และดังต่อไปนี้

- 2.1 ฟูลเลอร์รีนส์ (fullerenes) หมายถึง โมเลกุลที่ประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอนทั้งหมดซึ่งสร้างเป็นรูปแบบของระบบของพอลิไซคลิก (polycyclic) ที่มีการหลอมวงแหวนคล้ายกรงปิดประกอบด้วยวงแหวนห้าเหลี่ยม 12 วง และที่เหลือเป็นวงแหวนหกเหลี่ยม

หมายเหตุ 1. จากคำนิยามในระบบการเรียกชื่อคำศัพท์สารเคมีของ IUPAC

2. ตัวอย่างที่รู้จักกันดีคือ C<sub>60</sub> ซึ่งมีรูปร่างแบบทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 nm

- 2.2 ควอนตัมดอต (quantum dot) หมายถึง อนุภาคนาโนที่แสดงสมบัติเชิงแสง และเชิงไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตามขนาดของอนุภาคเนื่องจากปรากฏการณ์ควอนตัม

### 3. อักษรย่อ

ความหมายของอักษรย่อที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ มีดังต่อไปนี้

- 3.1 ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) สมาคมนักสุขศาสตร์อุตสาหกรรมภาคีรัฐบาลแห่งสหรัฐอเมริกา
- 3.2 AES (atomic emission spectroscopy) เครื่องอะตอมิกอิมิตชันสเปกโทรสโกปี
- 3.3 AIDS (acquired immune deficiency syndrome) โรคอาการภูมิคุ้มกันบกพร่อง หรือ โรคเอดส์
- 3.4 APF (assigned protection factor) ค่าระดับการป้องกัน
- 3.5 APR (air-purifying respirator) อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจประเภททำให้อากาศสะอาด
- 3.6 BEI (biological exposure index) ดัชนีชี้วัดการรับสัมผัสทางชีวภาพ
- 3.7 BET (Brunauer-Emmett-Teller) เครื่องบรูเนาเออร์-อิมเมทท์-เทลเลอร์
- 3.8 BMD (benchmark dose) ปริมาณของสารเคมีที่ทำให้เกิดการตอบสนอง (response) ที่ 5% หรือ 10% โดยการคำนวณผลการตอบสนองจากสัตว์ทดลองที่เหมาะสม
- 3.9 BSC (biological safety cabinet) ตู้ชีวนิรภัย หรือตู้ปลอดเชื้อ
- 3.10 CNF (carbon nanofibre) เส้นใยนาโนคาร์บอน
- 3.11 CNT (carbon nanotube) ท่อนาโนคาร์บอน
- 3.12 COSHH (control of substances hazardous to health) การควบคุมสารอันตรายต่อสุขภาพ
- 3.13 CPC (condensation particle counter) เครื่องวัดความเข้มข้นโดยจำนวนอนุภาค
- 3.14 DC (diffusion charger) เครื่องอัดประจุด้วยวิธีการแพร่
- 3.15 DEMS (differential electrical mobility sizer) เครื่องวัดขนาดอนุภาคที่แยกความแตกต่างในการเคลื่อนที่ทางไฟฟ้า
- 3.16 DIN (Deutsches Institut für Normung) สถาบันการมาตรฐานแห่งเยอรมนี
- 3.17 DMAS (differential mobility analysing system) ระบบตรวจวิเคราะห์การเคลื่อนที่ทางไฟฟ้า
- 3.18 DNA (deoxyribonucleic acid) กรดดีออกซีไรโบนิวคลีอิก
- 3.19 EELS (electron energy loss spectroscopy) สเปกโทรสโกปีการสูญเสียพลังงานอิเล็กตรอน
- 3.20 EHS (environment, health and safety) หน่วยจัดการด้านสิ่งแวดล้อม สุขภาพ และความปลอดภัย

- 3.21 ELPI (electrical low pressure impactor) เครื่องวัดการกระจายขนาดอนุภาคชนิดความดันต่ำทางไฟฟ้า
- 3.22 GSD (geometric standard deviation) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเรขาคณิต
- 3.23 HEPA (high efficiency particulate air filter) แผ่นกรองที่มีประสิทธิภาพสูง (แผ่นกรองเฮปา)
- 3.24 HVAC (heating, ventilating and air conditioning) ระบบให้ความร้อน ระบบระบายอากาศ และระบบปรับอากาศ
- 3.25 ICON (International Council on Nanotechnology) สภาสากลว่าด้วยนาโนเทคโนโลยี
- 3.26 ICP (inductively coupled argon plasma) เครื่องอินดักทีฟพลาสมาอาร์กอนพลาสมา
- 3.27 ICP-MS (inductively coupled plasma mass spectrometry) แมสสเปกโตรเมตรีของมวลพลาสมาที่ถูกเหนี่ยวนำ
- 3.28 ICSC (International Chemical Safety Cards) เอกสารความปลอดภัยทางเคมี
- 3.29 IDLH (immediately dangerous to life or health) อันตรายที่มีผลต่อชีวิตและสุขภาพร่างกายอย่างทันทีทันใด
- 3.30 ISO (International Organization for Standardization) องค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน
- 3.31 LEV (local exhaust ventilation) การระบายอากาศเฉพาะพื้นที่
- 3.32 LPI (low pressure impactor) เครื่องวัดการกระจายขนาดอนุภาคชนิดความดันต่ำ
- 3.33 MMAD (mass median aerodynamic diameter) เส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์ค่ามัธยฐานโดยมวล
- 3.34 MPPS (most penetrating particle size) ขนาดของอนุภาคที่มีความสามารถทะลุทะลวงได้มากที่สุด
- 3.35 NOAA (nano-objects and their aggregates and agglomerates) วัสดุนาโน และกลุ่มของวัสดุนาโนที่เกาะเป็นก้อนแบบแน่นและอนุภาคเกาะก้อนแบบหลวม
- 3.36 NOAEL (no-observed-adverse-effect level) ปริมาณของสารเคมีที่มากที่สุดซึ่งได้รับทุกวันแล้วไม่ทำให้เกิดความเป็นพิษหรือผลเสียใด ๆ ต่อร่างกาย
- 3.37 OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) องค์การเพื่อความร่วมมือทางเศรษฐกิจและการพัฒนา
- 3.38 PAPR (powered air-purifying respirator) อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจประเภททำให้อากาศสะอาดชนิดใช้แบตเตอรี่
- 3.39 PPE (personal protective equipment) อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล

- 3.40 PTFE (polytetrafluoroethylene) พอลิเตตระฟลูออโรเอธิลีน หรือเทฟลอน (Teflon)
- 3.41 RDECOM (research, development and engineering command) หน่วยบัญชาการการวิจัย พัฒนา และวิศวกรรม
- 3.42 RPE (respiratory protection equipment) อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ
- 3.43 SAR (air supplying respirator) อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจประเภทจัดส่งอากาศสำหรับการหายใจ
- 3.44 SCBA (self-contained breathing apparatus) อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจชนิดบรรจุอากาศแบบพกพา
- 3.45 SDS (safety data sheet) เอกสารข้อมูลความปลอดภัย
- 3.46 SEM (scanning electron microscope) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 3.47 SOP (standard operating procedure) มาตรฐานการปฏิบัติงาน
- 3.48 SPE (skin protective equipment) อุปกรณ์ป้องกันการสัมผัสทางผิวหนัง
- 3.49 STEM (scanning transmission electron microscope) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด-ส่องผ่าน
- 3.50 SWCNT (single-wall carbon nanotube) ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว
- 3.51 TEM (transmission electron microscope) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน
- 3.52 TEOM (tapered element oscillating microbalance) เครื่องวัดมวลระดับไมโครแบบเทเปอร์อีเลเมนต์ออสซิลเลตติง
- 3.53 UK HSL(UK Health and Safety Laboratory) ห้องปฏิบัติการสุขภาพและความปลอดภัยแห่งสหราชอาณาจักร
- 3.54 U.S. DOE (U.S. Department of Energy) กระทรวงพลังงานแห่งสหรัฐอเมริกา
- 3.55 U.S. EPA (U.S. Environmental Protection Agency) องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา
- 3.56 U.S. NIOSH (U.S. National Institute for Occupational Safety and Health) สถาบันอาชีวอนามัยและความปลอดภัยแห่งชาติสหรัฐอเมริกา
- 3.57 U.S. OSHA (U.S. Occupational Safety and Health Administration) สำนักงานบริหารความปลอดภัยและอาชีวอนามัยแห่งสหรัฐอเมริกา
- 3.58 WHO (World Health Organization) องค์การอนามัยโลก

## 4. วัสดุนาโน และกระบวนการผลิต

### 4.1 วัสดุนาโน

วัสดุนาโน แบ่งเป็น 2 กลุ่ม ตามแหล่งกำเนิด คือ วัสดุนาโนจากธรรมชาติ และวัสดุนาโนจากการผลิต วัสดุนาโนจากธรรมชาติ เป็นวัสดุนาโนที่เกิดจากกระบวนการทางธรรมชาติ กระบวนการให้ความร้อน และการดำเนินการอื่น ๆ ซึ่งก่อให้เกิดวัสดุนาโนได้ ส่วนวัสดุนาโนจากการผลิต เป็นวัสดุนาโนที่ผลิตขึ้นสำหรับใช้ในวัตถุประสงค์ทางการค้าเพื่อให้มีสมบัติหรือองค์ประกอบที่จำเพาะ โดยแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยตามโครงสร้างได้ 2 กลุ่ม คือ

- วัสดุนาโน
- วัสดุโครงสร้างนาโน เช่น นาโนคอมโพสิต ซึ่งเป็นวัสดุที่มีวัสดุนาโนฝังตัวอยู่ในเมทริกซ์ที่เป็นของแข็ง หรือเป็นวัสดุนาโนที่ยึดเกาะกันด้วยการจัดเรียงตัวแบบสุ่มง่าย ๆ ในรูปแบบของอนุภาคก้อนเกาะแน่น และอนุภาคก้อนเกาะหลวม หรือจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบในรูปแบบของผลึก เช่น กลุ่มผลึกของฟูลเลอร์รีนส์ หรือ กลุ่มของCNT

นอกจากนี้ยังจัดจำแนกวัสดุนาโนออกเป็นกลุ่มได้จากการพิจารณาจำนวนมิติและองค์ประกอบพื้นฐานทางเคมี ตามภาคผนวก ก. แนวทางการจัดจำแนกวัสดุนาโนจากการผลิต การจัดจำแนกวัสดุนาโนออกเป็นกลุ่มนั้นยังมีข้อจำกัด เนื่องจากมีวัสดุนาโนหลายชนิดที่จัดเข้ากลุ่มไม่ได้ หรืออาจมีสมบัติที่สอดคล้องกับหลายกลุ่มของการจัดจำแนก เช่น วัสดุนาโนในรูปแบบง่าย แต่มีการเคลือบผิวและมีโครงสร้างทางฟิสิกส์-เคมีที่ซับซ้อน ดังนั้นการจัดจำแนกวัสดุนาโนในภาคผนวก ก. จึงมีไว้เพื่อใช้เป็นกรอบทั่วไปในการจัดจำแนกสำหรับองค์กรเท่านั้น

### 4.2 กระบวนการผลิตวัสดุนาโน

วัสดุนาโนมีความหลากหลาย และผลิตได้โดยใช้วิธีการที่แตกต่างกัน วิธีการทั่วไปที่ใช้ในการผลิตวัสดุนาโน ได้แก่ การผลิตละอองลอย (aerosol generation) การสะสมด้วยไอ (vapour deposition) การสังเคราะห์ในเฟสของเหลว (liquid phase method) การเกิดพอลิเมอร์ด้วยไฟฟ้าและการสะสมสารด้วยไฟฟ้า (electropolymerization และ electrodeposition) การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า (electro-spinning) และกระบวนการทางกล (mechanical process) ซึ่งรายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ข. กระบวนการผลิตวัสดุนาโน

## 5. อันตรายจากวัสดุนาโน

### 5.1 อันตรายของวัสดุนาโนต่อสุขภาพ

โดยทั่วไป แนวโน้มของความเสี่ยงต่อสุขภาพของสาร มีความเกี่ยวข้องกับปริมาณและระยะเวลาของการรับสัมผัสสารนั้น การคงอยู่ของสารในร่างกาย ความเป็นพิษของสาร ความไวต่อการรับสัมผัสหรือสภาวะร่างกายของบุคคลที่รับสัมผัส สำหรับผลกระทบต่อสุขภาพของวัสดุนาโนนั้นยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด เนื่องจากนาโนเทคโนโลยีเป็นสาขาความรู้ใหม่ ทำให้เกิดข้อจำกัดในแง่ของความรู้ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่จำเป็นสำหรับการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ เช่น ช่องทางการรับสัมผัส การเคลื่อนที่ของวัสดุนาโนเมื่อเข้าสู่ร่างกาย และปฏิกิริยาของสารกับระบบชีววิทยาของร่างกาย

ผลการศึกษารับสัมผัสและตอบสนองต่ออนุภาคในระดับนาโนสเกล หรืออนุภาคที่หายใจเข้าไปได้ รวมถึงข้อมูลพิษวิทยาที่มีอยู่เกี่ยวกับสารขนาดใหญ่ในหลอดทดลอง ในสัตว์ทดลอง และในมนุษย์นั้น เป็นการประเมินผลกระทบเบื้องต้นที่อาจเกิดขึ้นต่อสุขภาพจากการรับสัมผัสกับวัสดุที่มีลักษณะเหมือนกันในระดับนาโนสเกล อย่างไรก็ตามสิ่งที่ควรระลึกไว้เสมอคือ ความไม่แน่นอนและความแปรปรวนอย่างมีนัยสำคัญในการคาดการณ์ผลกระทบที่อาจเกิดกับมนุษย์จากผลการศึกษาในสัตว์ทดลองมักเกิดขึ้นได้เสมอ ดูรายละเอียดเพิ่มเติมในภาคผนวก ก. อันตรายของวัสดุนาโนต่อสุขภาพ (รายละเอียดเพิ่มเติม) ในปัจจุบันวิธีการทดสอบโดยเลี้ยงเซลล์ในหลอดทดลองนั้นนิยมใช้กันมากเพื่ออธิบายกลไกความเป็นพิษ โดยทั่วไปแล้วข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในหลอดทดลองนั้นไม่สามารถใช้ประเมินกับมนุษย์โดยไม่มีข้อมูลเพิ่มเติม เช่น ข้อมูลจากการทดสอบในสัตว์ทดลอง การศึกษาในสัตว์ทดลองได้แสดงให้เห็นการตอบสนองทางชีววิทยา (ไม่ว่าด้านบวกหรือด้านลบ) ต่ออนุภาคนาโนนั้นมีมากกว่าการตอบสนองต่ออนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าที่มีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกันและมวลเท่ากัน นอกเหนือจากจำนวนอนุภาคและพื้นที่ผิวรวมแล้วนั้น ลักษณะเฉพาะอื่น ๆ ของอนุภาคอาจมีอิทธิพลต่อการตอบสนองทางชีววิทยาด้วย ตัวอย่างเช่น ความสามารถในการละลาย รูปร่าง ประจุและเคมีพื้นผิว สมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การดูดซับมลพิษ (เช่น โลหะหนัก หรือ เอนโดทอกซิน) รวมไปถึงระดับการเกาะก้อนแบบหลวมของอนุภาค

มักมีการเคลือบพื้นผิวของอนุภาคนาโน หรือเพิ่มหมู่ฟังก์ชันเพื่อป้องกันการจับตัวเป็นก้อน ให้ได้สมบัติตามต้องการ เช่น ใช้ประโยชน์ทางเภสัชกรรม รวมถึงการปนเปื้อนของพื้นผิวอนุภาคด้วยสิ่งเจือปนสามารถนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงการตอบสนองทางชีววิทยาได้ ยังมีงานวิจัยจำนวนมากที่อยู่ระหว่างการศึกษาดังกล่าวถึงผลกระทบจากสมบัติของอนุภาคต่อสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ และผลกระทบเชิงลบที่อาจเกิดขึ้น

**หมายเหตุ** รายละเอียดเพิ่มเติมสำหรับ (1) ข้อมูลผลกระทบต่อสุขภาพของอนุภาคนาโนและเส้นใยนาโนจากอุบัติการณ์ที่เกิดขึ้นโดยไม่ตั้งใจ (2) ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นพิษกับพื้นผิว เคมีพื้นผิว และจำนวนอนุภาค (3) ปฏิกิริยาการอักเสบจากอนุภาคนาโน (4) ข้อสังเกตจากการศึกษาระบาดวิทยาที่เกี่ยวข้องกับอนุภาคระดับนาโนสเกลและอนุภาคขนาดเล็กละเอียด และ (5) ผลการศึกษาทางพิษวิทยา

ของวัสดุนาโนในเซลล์และในสัตว์ทดลองสำหรับวัสดุนาโน แสดงไว้ในภาคผนวก ค. อันตรายของ  
วัสดุนาโนต่อสุขภาพ (รายละเอียดเพิ่มเติม)

## 5.2 อันตรายทางกายภาพของวัสดุนาโนที่ทำให้เกิดอค์กัภัย

แม้ว่าข้อมูลที่มีอยู่ในขณะนี้ยังไม่เพียงพอสำหรับใช้ในการคาดการณ์โอกาสของความเสี่ยงในการเกิดอค์กัภัยและการระเบิดจากวัสดุนาโนในรูปแบบผง วัสดุนาโนมีความเสี่ยงสูงต่อการติดไฟได้ง่ายกว่าวัสดุชนิดเดียวกันในปริมาณที่เท่ากันแต่มีขนาดใหญ่กว่า เนื่องจาก เมื่อวัสดุมีขนาดเล็กลงทำให้พลังงานต่ำสุดที่ใช้ในการจุดติดไฟลดลงและอัตราการเผาไหม้สูงขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้วัสดุที่ไม่ติดไฟหรือวัสดุเฉื่อยมีโอกาสเกิดการติดไฟได้

เมื่อวัสดุนาโนที่ติดไฟได้กระจายตัวอยู่ในอากาศจะทำให้เกิดความเสี่ยงสูงกว่าในการเกิดการระเบิดของฝุ่นเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดเดียวกันแต่มีขนาดใหญ่กว่า ทั้งนี้ปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องกับฝุ่น คือ พลังงานและอุณหภูมิต่ำสุดที่ใช้ในการจุดติดไฟ

เนื่องจากวัสดุนาโนที่มีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถช่วยเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาเคมี หรือลดอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาให้ต่ำลง ทำให้ปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้ในของเหลวหรือแก๊ส ส่งผลให้การระเบิดและการเกิดอค์กัภัยมีแนวโน้มที่สูงขึ้นด้วย โดยควรพิจารณาจากองค์ประกอบและโครงสร้างของวัสดุนั้นด้วย

วัสดุนาโนบางชนิดได้รับการออกแบบให้สามารถสร้างความร้อนได้ โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาแบบก้ำวหน้าในระดับนาโนสเกล ซึ่งเป็นพื้นฐานความรู้สำหรับการวิจัยทางด้านพลังงานนาโน ทำให้วัสดุนาโนกลุ่มนี้ติดไฟได้เร็วกว่าวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่าได้หลายเท่าตัว

## 5.3 ข้อควรพิจารณาด้านความปลอดภัยในการผลิตวัสดุนาโน

การผลิตวัสดุนาโนและวัสดุอื่น ๆ ขึ้นมาใหม่นั้น ทำให้ทั้งการผลิตระดับต้นแบบ ซึ่งเป็นกิจกรรมในการวิจัยและพัฒนา ไปจนถึงการผลิตในระดับอุตสาหกรรม ในปัจจุบันการผลิตวัสดุนาโนประกอบด้วยกระบวนการที่ใช้พลังงานสูงหลายชนิด เช่น การแยกสลายด้วยเปลวไฟ การแยกสลายด้วยความร้อนจากเลเซอร์ การทำให้เป็นไอด้วยเลเซอร์ (laser vaporisation) การสังเคราะห์ด้วยพลาสมาความร้อน (thermal plasma) ไมโครเวฟพลาสมา (microwave plasma) กระบวนการสปัตเตอริง (sputtering) และการระเหิดด้วยเลเซอร์ (laser ablation) ซึ่งต้องมีประเด็นความปลอดภัยที่เฉพาะเจาะจง อันตรายที่มีผลกระทบต่อความปลอดภัยจากกระบวนการเหล่านี้ประกอบด้วย การทำงานกับถังทรงกระบอกที่อัดความดันสูง เครื่องมือที่ใช้ความดันต่ำ แก๊สพิษ และแก๊สเฉื่อย วัสดุที่มีอุณหภูมิสูง การทำงานกับไฟฟ้าแรงสูง เครื่องมือที่ปลดปล่อยรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า เลเซอร์ และแหล่งกำเนิดแสงที่มีความเข้มแสงสูง เช่น รังสีอัลตราไวโอเล็ต รังสีอินฟราเรด และแสงที่ตามองเห็น การทำงานภายใต้สภาวะที่เป็นอันตรายเหล่านี้ต้องการการฝึกอบรมปฏิบัติงานที่เหมาะสมและเป็นไปตามแนวทางการทำงานที่ปลอดภัยในห้องปฏิบัติการ



## 6. การประเมินการรับสัมผัสกับวัสดุนาโน

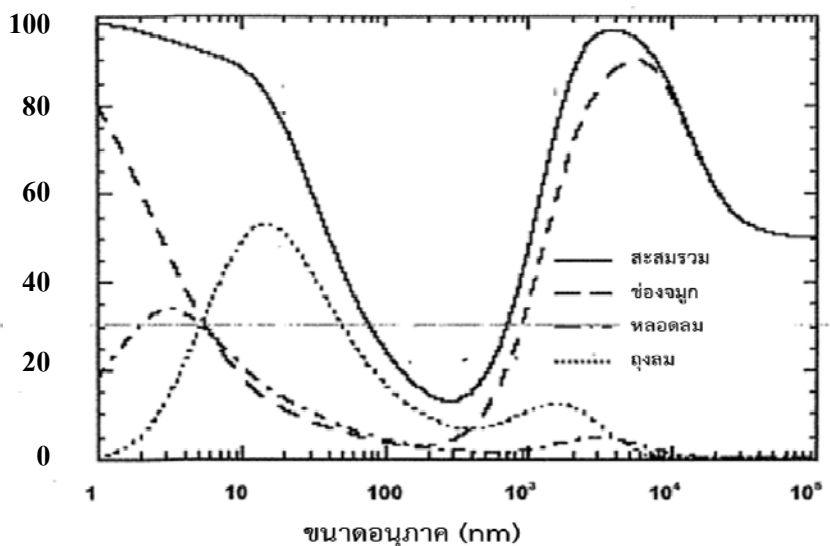
### 6.1 ช่องทางการรับสัมผัส

ช่องทางการรับสัมผัสกับวัสดุนาโนของผู้ปฏิบัติงานนั้นมี 3 ช่องทางหลัก คือ ทางการหายใจ ทางปาก และทางผิวหนัง โดยมีรายละเอียด ดังนี้

#### 6.1.1 การรับสัมผัสทางการหายใจ

การรับสัมผัสทางการหายใจ เป็นเส้นทางหลักที่วัสดุนาโนเข้าสู่ร่างกายของผู้ปฏิบัติงาน เนื่องจากอนุภาคส่วนใหญ่ในสถานที่ปฏิบัติงานอยู่ในรูปแบบไอระเหย และลอยอยู่ในอากาศ อนุภาคนาโนที่เข้าสู่ร่างกายผ่านทางหายใจจะสะสมบริเวณทางเดินหายใจซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค โดยทั่วไปแล้วอนุภาคนาโนจะตกค้างในทุกส่วนของระบบทางเดินหายใจ โดยมีสัดส่วนการสะสมในบริเวณต่าง ๆ ได้แก่ ช่องจมูก (nasopharyngeal) หลอดลม (tracheobronchial) และถุงลม (alveolar region) ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งได้จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคาดการณ์ (ตามคณะกรรมการนานาชาติว่าด้วยการป้องกันอันตรายจากรังสี (International Commission on Radiological Protection; ICRP)) โดยพบว่า โอกาสที่อนุภาคขนาด 1 nm สะสมอยู่ในช่องจมูกมีมากถึง 80% ในหลอดลม 20% และในถุงลม น้อยกว่า 1% สำหรับอนุภาคที่มีขนาด 20 nm พบว่ามีโอกาสสะสมในถุงลม 50% และในช่องจมูกและหลอดลมในสัดส่วนที่เท่ากัน คือ 25%

เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 1 แนวโน้มการสะสมของอนุภาคโดยรวม และตามบริเวณทางเดินหายใจของมนุษย์  
ที่สัมพันธ์กับขนาดของอนุภาค  
(ข้อ 6.1.1)

### 6.1.2 การรับสัมผัสทางปาก

ในสถานที่ปฏิบัติงาน วัสดุนาโนในรูปของอนุภาคสามารถเข้าสู่ร่างกายทางปาก จากการกลืนเมือก (หรือน้ำมูก) ที่สะสมอยู่ในระบบทางเดินหายใจ จากการบริโภคอาหารหรือน้ำที่ปนเปื้อนอนุภาคนาโน หรือจากการได้รับเข้าทางปากผ่านมือหรือผิวหนังที่ปนเปื้อน ทั้งนี้ การศึกษาเรื่องการตกค้างของอนุภาคนาโนในระบบทางเดินอาหารนั้นยังมีจำนวนน้อยมาก

### 6.1.3 การรับสัมผัสทางผิวหนัง

ในสถานที่ปฏิบัติงานนั้น ผู้ปฏิบัติงานอาจเกิดการรับสัมผัสทางผิวหนังกับวัสดุนาโนในระหว่างกระบวนการผลิต หรือใช้งาน หรือโดยการรับสัมผัสกับพื้นผิวที่ปนเปื้อนวัสดุนาโน อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันยังคงเป็นที่ถกเถียงว่าอนุภาคนาโนสามารถทะลุผ่านเข้าทางผิวหนังปกติ และทำให้เกิดผลร้ายหรือไม่ และในปริมาณเท่าใดที่จะทำให้เกิดลักษณะนั้น งานวิจัยส่วนใหญ่ศึกษาการรับสัมผัสทางผิวหนังในสภาวะปกติกับวัสดุนาโนเฉพาะชนิด เช่น  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{ZnO}$  แต่ยังไม่พบว่ามีการศึกษาถึงผลกระทบต่อผิวหนังในรูปแบบอื่น เช่น การทะลุผ่านผิวหนังที่ได้รับบาดเจ็บ รวมทั้งการศึกษาถึงบทบาทของตัวทำละลายในการดูดซึมอนุภาคนาโนผ่านทางผิวหนังในขณะที่ปฏิบัติงาน ส่วนการรับสัมผัสผ่านทางกรีดเข้าสู่ส่วนต่าง ๆ ของร่างกายเกิดขึ้นได้ในสถานที่ปฏิบัติงานนั้นส่วนใหญ่เนื่องจากอุบัติเหตุ

## 6.2 การประเมินการรับสัมผัส

### 6.2.1 การประเมินการรับสัมผัสจากการวิเคราะห์ตัวอย่างจากภายในร่างกาย

การวิเคราะห์ตัวอย่างจากภายในร่างกาย เช่น เนื้อเยื่อ ของเหลวจากร่างกาย และอากาศที่หายใจเข้าไป อาจมีความยุ่งยาก ซึ่งในทางอาชีวอนามัยสามารถใช้วิธีการที่ง่ายขึ้นโดยใช้ตัวอย่างจาก ผม ปัสสาวะ และอากาศที่หายใจออกมาแทน การระบุปริมาณที่รับเข้าสู่ร่างกายทำได้โดยใช้การวัดปริมาณวัสดุนาโนที่สนใจ และหรือเมแทบอลิต์ (metabolite) ของวัสดุนาโน นอกจากนี้ยังมีการใช้ “ตัวระบุทางชีวภาพ” (biomarker) ซึ่งเป็นสารที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาระหว่างสารพิษกับระบบในร่างกายมนุษย์ เป็นหลักฐานในการแสดงถึงการได้รับสัมผัสสารพิษของร่างกายหากตัวระบุนั้น ๆ มีความสัมพันธ์อย่างจำเพาะกับสารพิษที่ได้รับเข้าสู่ร่างกาย โดยการวัดปริมาณตัวระบุทางชีวภาพมีข้อดีคือให้ข้อมูลการรับสัมผัสได้ไม่ว่าการรับสัมผัสนั้นจะเกิดขึ้นผ่านทางเส้นทางการใด การวัดปริมาณตัวระบุยังนำมาใช้สำหรับการตรวจคัดกรองและตรวจติดตามพนักงานที่ทำงานกับวัสดุนาโนได้ ข้อมูลการศึกษาตัวระบุทางชีวภาพสำหรับการรับสัมผัสวัสดุนาโนนั้นยังอยู่ในช่วงเริ่มต้น และมีความซับซ้อนอันเนื่องมาจากความหลากหลายของสมบัติทางฟิสิกส์-เคมีของวัสดุนาโน ซึ่งส่งผลให้การตอบสนองทางชีวภาพมีความหลากหลายไปด้วยการศึกษาการรับสัมผัสวัสดุนาโนที่มีความเป็นพิษต่ำและความสามารถในการละลายต่ำเมื่อรับ

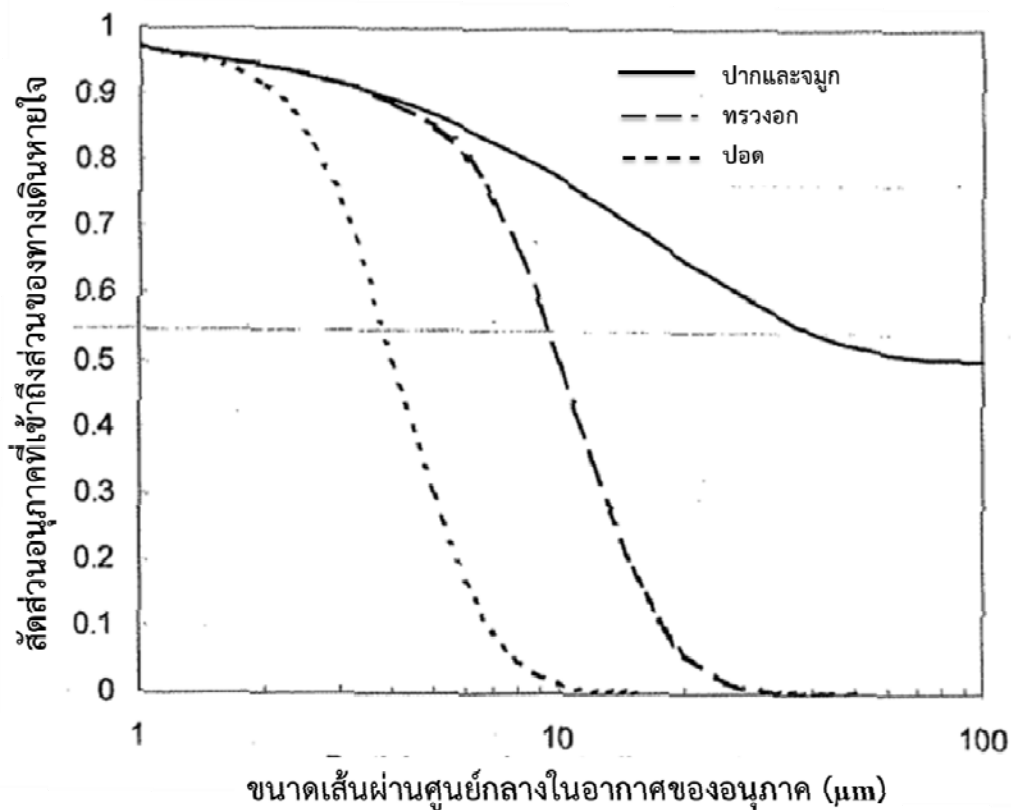
สัมผัสผ่านทางหายใจ พบว่าเป็นสาเหตุให้เกิดการอักเสบ ตัวอย่างเช่น มีการเสนอให้ใช้ในทรिकอกออกไซค์ในลมหายใจออกของมนุษย์เป็นตัวระบุทางชีวภาพของการเกิดกระบวนการอักเสบในร่างกาย

#### 6.2.2 การประเมินการรับสัมผัสจากวัสดุนาโนในอากาศ

การประเมินการรับสัมผัสของผู้ปฏิบัติงาน ทำได้โดยการวัดความเข้มข้นโดยมวลของอนุภาคที่มีผลต่อสุขภาพที่ระดับหายใจของผู้ปฏิบัติงาน (worker's breathing zone) ตาม มอก. 2574 และวิเคราะห์ส่วนประกอบของสารเคมีนั้น ส่วนของละอองลอยที่มีผลต่อสุขภาพนั้นสัมพันธ์กับโอกาสในการทะลุผ่านของอนุภาคไปยังส่วนต่าง ๆ ของระบบทางเดินหายใจ และใช้แสดงข้อกำหนดสำหรับคุณลักษณะของเครื่องมือที่ใช้สูมตัวอย่าง (รูปที่ 2) ส่วนที่หายใจเข้าไปได้ผ่านจมูกและปาก (inhalable convention) เป็นสัดส่วนโดยมวลของอนุภาคในอากาศทั้งหมดที่เข้าสู่จมูกหรือปากขณะหายใจ ส่วนที่อยู่ในทรวงอก (thoracic convention) เป็นสัดส่วนโดยมวลของอนุภาคที่หายใจเข้าไปแล้วทะลุผ่านเส้นระบบทางเดินหายใจเข้าไปยังกล่องเสียง โดย 50% ที่ผ่านเข้าไปที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลอากาศพลศาสตร์ (aerodynamic equivalent diameter (Da)) เป็น  $11.64 \mu\text{m}$  (ซึ่งเท่ากับ  $10 \mu\text{m}$  เมื่อแสดงในรูปของสัดส่วนของละอองลอยทั้งหมด) และส่วนที่ถูกหายใจผ่านระบบทางเดินหายใจ (respirable convention) เป็นสัดส่วนโดยมวลของอนุภาคที่หายใจเข้าไปแล้วผ่านไปยังถุงลมของปอดได้ โดย 50% ที่ผ่านเข้าไปมีค่า Da เป็น  $4.25 \mu\text{m}$  (ซึ่งเท่ากับ  $4 \mu\text{m}$  เมื่อแสดงในรูปของสัดส่วนของละอองลอยทั้งหมด)

ข้อยกเว้นหลักสำหรับวิธีการนี้คือ การวัดอนุภาคนาโนโดยเทียบกับจำนวนอนุภาคในการได้รับนั้นให้ใช้ สำหรับเส้นใย เช่น แร่ใยหินที่เป็นอนุภาคที่อยู่ในอากาศ (เมื่อมีความยาว  $> 5 \mu\text{m}$  ความกว้าง  $< 3 \mu\text{m}$  และมีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง  $\geq 3:1$  ซึ่งสะสมในแผ่นกรองเมมเบรนเก็บตัวอย่าง และให้นับจำนวนด้วยกล้องจุลทรรศน์เชิงแสง

**หมายเหตุ** คำนิยามและวิธีการเก็บตัวอย่างสำหรับเส้นใยแร่ใยหินสามารถผันแปรไปตามการตัดสินใจที่แตกต่างกัน โดยคำนิยามของเส้นใยนี้อ้างอิงตามคำนิยามของ WHO



รูปที่ 2 สัดส่วนของละอองลอยในที่ปฏิบัติงานที่เข้าสู่ส่วนต่าง ๆ ของระบบทางเดินหายใจ  
ที่สัมพันธ์กับขนาดของอนุภาค  
(ข้อ 6.2.2)

หลักฐานทางพิษวิทยา ระบุว่า ผลกระทบต่อสุขภาพที่เกิดขึ้นซึ่งเกี่ยวข้องกับการหายใจเอาละอองลอยนาโน (ซึ่งหมายถึงอนุภาคนาโนในอากาศและอนุภาคของวัสดุโครงสร้างนาโน) อาจไม่เกี่ยวข้องกับมวลของอนุภาค งานวิจัยหลายเรื่องระบุว่าความเป็นพิษของวัสดุที่ไม่ละลายน้ำเพิ่มขึ้นถ้าลดขนาดของอนุภาคลง โดยอ้างอิงมวลต่อมวล กล่าวคือว่าวัสดุที่มีความเป็นพิษในระดับสูงเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลง ได้อย่างไรนั้น มีการอธิบายไว้แล้วโดยมีหลายสมมุติฐานในการอธิบาย งานวิจัยหลายเรื่องได้ระบุว่า การตอบสนองทางชีวภาพขึ้นอยู่กับบริเวณพื้นที่ผิวของอนุภาคนาโนที่ตกค้างในปอด ทั้งนี้ เนื่องจากขนาดที่เล็กมากของอนุภาคนาโนทำให้อนุภาคนั้นทะลุผ่านเซลล์เยื่อหุ้มผนังเข้าสู่กระแสเลือดในปอด และยังทะลุผ่านเข้าสู่สมองโดยผ่านทางเส้นประสาทในการรับกลิ่น เมื่อวัสดุที่มีขนาดระดับนาโนนั้นมีร้อยละของพื้นที่ผิวต่ออะตอมสูง และแสดงลักษณะสมบัติทางโครงสร้างของสารเคมีที่เฉพาะตัว ซึ่งคาดว่าอาจส่งผลให้อนุภาคนาโนแสดงพฤติกรรมทางชีวภาพที่เกี่ยวข้องกับเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค พื้นที่ผิว และการทำปฏิกิริยาพื้นผิว

จากการอธิบายข้างต้นนี้เห็นได้ชัดเจนว่า การวัดการรับสัมผัสละอองลอยนาโนในขอบเขตของความเข้มข้นโดยมวลเพียงอย่างเดียว นั้น ไม่เพียงพอ ต่อการประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพที่อาจเกิดขึ้นได้

นอกจากนี้ ยังมีหลักฐานที่น่าเชื่อถือแสดงให้เห็นว่า การปฏิบัติงานที่รับสัมผัสกับละอองลอยนาโนควรตรวจดูพื้นที่ผิวด้วย ในบริบทนี้พื้นที่ผิวของละอองลอยนั้นไม่ได้อธิบายไว้ชัดเจน และยังขึ้นอยู่กับวิธีวัดที่ใช้ พื้นที่ผิวรูปทรงเรขาคณิตมักอ้างอิงถึงพื้นที่ผิวทางกายภาพของวัตถุ และขึ้นอยู่กับสเกลความยาวที่ใช้ในการวัด การวัดโดยใช้สเกลความยาวมีการกำหนดขนาดของขอบบนซึ่งตรวจไม่พบด้วยวิธีการวัด เช่นวิธีการที่ใช้การดูดซับพื้นผิวของโมเลกุล โดยมีการประมาณว่าสเกลความยาวมีค่าใกล้เคียงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับในลักษณะเดียวกัน พื้นที่ผิวที่เกี่ยวกับทางชีวภาพจะประมาณโดยโมเลกุลทางชีวภาพที่เล็กที่สุดที่ทำปฏิกิริยากับอนุภาคภายในร่างกาย

การวัดที่น่าเชื่อถือมากที่สุดเป็นการวัดโดยใช้พื้นที่ผิวของละอองลอยในการคำนวณการรับสัมผัสสารสิ่งที่จำเป็นในการพิจารณาคือ การจำแนกลักษณะการรับสัมผัสมวลละอองลอยและค่าความเข้มข้นจนกว่าข้อมูลที่น่าเชื่อถือมีมากเพียงพอ

กรณีที่วัสดุนาโนมีองค์ประกอบในเรื่องของขนาดและรูปร่างที่สอดคล้องกัน ทำให้วัดพื้นที่ผิวเฉพาะและเชื่อมโยงพื้นที่ผิวกับความเข้มข้นโดยมวลได้ อย่างไรก็ตาม สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์นั้นถ้อยโอนจากวัสดุนาโนหนึ่งไปยังวัสดุอื่น ๆ ที่มีองค์ประกอบรวมทั้งขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันไม่ได้ การคำนวณการรับสัมผัสแต่ละวิธี โดยเฉพาะการวัดความเข้มข้นโดยมวล จำเป็นต้องมีช่องทางในการเลือกขนาดของอนุภาคที่แน่ใจได้ว่าอนุภาคที่มีช่วงขนาดที่มีความสัมพันธ์กันเท่านั้นที่จะนำมาเป็นตัวอย่างขนาดตัด (cut size) ที่ต้องการแท้จริงของการเลือกอนุภาคซึ่งควรจัดทำขึ้นเพื่อประเมินผลกระทบที่อาจเกิดต่อสุขภาพของมนุษย์ ยังเปิดกว้างให้มีการถกเถียงและขึ้นอยู่กับพฤติกรรมของอนุภาคและผลกระทบต่อชีวภาพ ขณะนี้ขนาดตัดของอนุภาคนาโนคือ 100 nm แม้ว่าขนาดของอนุภาคนาโนนี้ไม่ได้มาจากพฤติกรรมของอนุภาคในระบบทางเดินหายใจที่มีการตกค้างของอนุภาคอยู่ และไม่รวมถึงวัสดุนาโนที่เป็นอนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งคาดว่ามีความแตกต่างจากวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่า เช่น มีความเป็นไปได้ในการอธิบายความสัมพันธ์ต่อสุขภาพของอนุภาคนาโนโดยอ้างอิงจากการตกค้างที่มีโอกาสเกิดขึ้นในปอด (รูปที่ 2) ประสิทธิภาพการสะสมของอนุภาคในระบบทางเดินหายใจมีค่าต่ำสุดเมื่ออนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 200 nm ถึง 300 nm และประสิทธิภาพการสะสมมีค่าเพิ่มขึ้นในอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า นอกจากนี้ เมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลง ทำให้ความโค้งของพื้นผิว การจัดวางเรียงตัว (และร้อยละ) ของอะตอมบนพื้นผิวของอนุภาคและผลควอนตัมที่ขึ้นอยู่กับขนาด มีบทบาทที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในการหาพฤติกรรมทางฟิสิกส์-เคมีของวัสดุ

ยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่า การตกค้างในระบบทางเดินหายใจของอนุภาคนาโนปฐมภูมิ ก่อให้เกิดผลกระทบทางชีววิทยาที่แตกต่างกันหรือเหมือนกันกับผลกระทบของอนุภาคก้อนเกาะแน่นและอนุภาคก้อนเกาะหลวม ปัจจัยหลายชนิดที่ส่งผลต่อการตอบสนองทางชีววิทยา เริ่มแรกคือ ตำแหน่งของการสะสม ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคเชิงอากาศพลศาสตร์ที่เปลี่ยนไปตามระดับก้อนเกาะแน่น/ ก้อนเกาะหลวม เมื่อเกิดการแยกจากก้อนเกาะแน่น/ ก้อนเกาะหลวม ออกจากกันโดยสิ้นเชิงหลังการสะสม ทำให้เข้าใจได้ว่า

ผลที่ตามมาของผลกระทบทางชีวภาพอาจเหมือนกับการรับสัมผัสที่เท่ากันของอนุภาคนาโนที่แยกจากกัน นอกจากนี้ ถ้าการตอบสนองทางชีวภาพเกี่ยวข้องกับพื้นที่ผิวของละอองลอยที่สะสมอยู่ตามปริมาตรของสารนั้น การตอบสนองต่อก้อนเกาะแน่น/ ก้อนเกาะหลวม ของสารที่สะสมอยู่โดยมีโครงสร้างที่มีรูปทรงเรขาคณิตเหมือนกัน ทำให้เชื่อได้ว่าเหมือนกับการตอบสนองของรูปร่างของสารที่มีปริมาณเทียบเท่ากับอนุภาคที่แยกจากกัน ถ้าอนุภาคโครงสร้างนาโนนั้นแยกออกจากก้อนเกาะหลวมไม่ได้ สารเหล่านี้มักไม่เคลื่อนย้ายไปสู่อวัยวะอื่น ๆ ในร่างกายเหมือนกับอนุภาคปฐมภูมิ และผลกระทบทางชีวภาพอาจแตกต่างกันไปด้วย ดังนั้น ความรู้ว่าอนุภาคเกิดการแยกจากการเป็นก้อนเกาะหลวมต้องทราบก่อนตัดสินใจว่าอนุภาคขนาดใดเป็นขนาดที่ไม่ต้องการ (อนุภาคก้อนรวมที่ไม่ได้เป็นวัสดุโครงสร้างนาโน) และอาจแตกต่างกันในส่วนของคุณสมบัติของอนุภาค

**หมายเหตุ** รายละเอียดเพิ่มเติมสำหรับวิธีวัดการรับสัมผัสวัสดุนาโนผ่านทางหายใจ ดูภาคผนวก ง.

## 7. การประเมินความเสี่ยงด้านอาชีวอนามัย

### 7.1 ขอบข่าย

ส่วนนี้กล่าวถึงสถานะปัจจุบันของการประเมินความเสี่ยงในการผลิตและกระบวนการแปรรูปวัสดุนาโน ซึ่งเน้นเฉพาะปัจจัยที่เกี่ยวข้องด้านอาชีวอนามัย เช่น โรงงานผลิต ห้องทดลองหรือห้องปฏิบัติการ แต่ไม่ได้พิจารณาถึงความปลอดภัยของผู้บริโภค หรือความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม

วัสดุนาโนที่มีลักษณะเป็นอนุภาคนาโนอิสระหรืออนุภาคนาโนที่เกาะเป็นกลุ่ม ล้วนแต่เกี่ยวข้องกับอาชีวอนามัยและความปลอดภัย วัสดุที่มีโครงสร้างนาโนสเกล ชั้มนาโน หรือของแข็งที่มีอนุภาคนาโนฝังตัวอยู่ เช่น สารประกอบพอลิเมอร์ สารเคลือบหรือสารตกแต่ง ก่อให้เกิดการรับสัมผัสได้และมีผลกระทบเมื่อมีการรับสัมผัส จากการศึกษาภาคสนามพบว่า กระบวนการแปรรูปวัสดุด้วยวิธีทำลายของสารประกอบพอลิเมอร์ที่มีวัสดุนาโนฝังอยู่จะทำให้เกิดละอองลอยของเส้นใยนาโนที่เป็นชนิดก้อนเกาะแน่น แต่ไม่ปล่อยอนุภาคนาโนชนิดก้อนเกาะหลวม ซึ่งละอองลอยนี้อาจเป็นส่วนผสมของอนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นโดยไม่ตั้งใจและอนุภาคนาโนที่สร้างขึ้น ดังนั้น จึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของละอองลอยอย่างถูกต้องและเหมาะสม

ในขณะที่อันตรายทางกายภาพซึ่งมาจากการแปรรูปด้วยวิธีเฉพาะ เช่น การให้ความร้อนสูง การให้แรงดันไฟฟ้าสูง ใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนาโน เนื้อหาในส่วนนี้มุ่งเน้นอันตรายที่เกิดจากความเปราะบางมากกว่าอันตรายจากอักษิภัยและระเบิด โดยทั่วไปแล้วหลีกเลี่ยงผลกระทบแบบเฉียบพลันได้โดยใช้หลักการพื้นฐานและข้อกำหนดขั้นต้นของอาชีวอนามัยและความปลอดภัยในกรณีที่มีข้อมูลพิษวิทยาของวัสดุนาโนนั้น อย่างไรก็ตาม ความเสี่ยงต่อสุขภาพเนื่องจากการรับสัมผัสวัสดุนาโนในปริมาณที่ต่ำแบบสะสมนั้นประเมินได้ยากและท้าทายต่อการกำหนดแนวทางการปฏิบัติ การประเมินความเสี่ยงดำเนินการ

โดยผู้เชี่ยวชาญร่วมกับผู้มีอำนาจตัดสินใจในการจัดทำข้อกำหนดในการจัดการความเสี่ยง และ จำเป็นต้อง ใช้ข้อมูลอย่างละเอียดทั้งของผลิตภัณฑ์และของกระบวนการแปรรูป

## 7.2 การประเมินความเสี่ยงสำหรับวัสดุนาโน (risk assessment for nanomaterial)

การประเมินความเสี่ยงเป็นการวิเคราะห์ผลกระทบเชิงลบต่อสุขภาพที่อาจเกิดขึ้นทั้งในปัจจุบันและอนาคต อันเกิดจากสารเคมีอันตรายโดยปราศจากการกระทำใด ๆ ที่จะควบคุมหรือลดการรับสัมผัสสารเคมีนั้น

การประเมินความเสี่ยงในการประกอบอาชีพประกอบด้วย การระบุความเป็นอันตราย การประเมินอันตราย การประเมินการรับและการจำแนกความเสี่ยง เป้าหมายของการประเมินความเสี่ยงต้องประเมินว่าความเสี่ยงที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อมของสถานที่ทำงานอยู่เกินระดับการยอมรับ เพื่อเป็นข้อมูลให้กับผู้มีอำนาจในการตัดสินใจเพิ่มความเข้มงวดในการจัดการความเสี่ยงต่อไป

กระบวนการประเมินความเสี่ยง ประกอบด้วย

- (1) ระบุชนิดสารที่เป็นอันตรายเมื่อได้รับและมีความเสี่ยง
- (2) ประเมินการตอบสนองจากการรับสัมผัสต่ออันตราย เป็นการระบุผลกระทบเชิงลบต่อสุขภาพที่อาจเกิดขึ้นจากสารอันตรายในสถานที่ปฏิบัติงานที่ได้มีการระบุไว้
- (3) ประเมินการรับสัมผัสสารอันตราย เป็นการประเมินวิธีที่บุคคลมีโอกาสรับสัมผัสกับสารอันตรายที่มีอยู่ในสถานที่ปฏิบัติงาน
- (4) วิเคราะห์ความเสี่ยงร่วมกับข้อมูลที่ได้กล่าวมาแล้วจากข้อ 4. ถึงข้อ 6. ข้างต้นมาพิจารณาร่วมกันเพื่อ ประเมินความเสี่ยงในแต่ละสถานที่ปฏิบัติงาน

การประเมินความเสี่ยงในสถานที่ปฏิบัติงานเริ่มจากการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการประเมินอันตราย จากนั้น จึงใช้กระบวนการตรรกะในการประเมินปริมาณการรับสัมผัสและการเข้าถึงสารอันตราย ดังนั้น การประเมินความเสี่ยงจึงเป็นการสังเคราะห์ข้อมูลของอันตรายและการรับสัมผัส

วิธีในการประเมินความเสี่ยงของวัสดุนาโนให้เป็นไปตาม มอก. 2691 เล่ม 6

### 7.2.1 การประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ (quantitative and qualitative risk assesment)

#### 7.2.1.1 การประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณ

การประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณขึ้นอยู่กับข้อมูลที่มีของการรับสัมผัสเชิงปริมาณซึ่งแสดงถึง โอกาส หรือระดับการรับสัมผัส และขีดจำกัดของปริมาณการรับสัมผัส ขีดจำกัดของการรับสัมผัส พัฒนามาจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการรับสัมผัสการตอบสนอง และระดับของ การรับสัมผัสที่มีความเสี่ยงเชิงลบต่อสุขภาพ แม้ว่ามีความต่ำกว่าระดับที่ยอมรับได้ก็ตาม ส่วนประกอบอื่น

ของการประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณได้แก่ การวัด การประมาณค่าการรับสัมผัสที่แท้จริง หรือ โอกาสการรับสัมผัสในสถานที่ปฏิบัติงาน

#### 7.2.1.2 การประเมินความเสี่ยงเชิงคุณภาพ

ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลสำหรับการประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณ ข้อมูลที่ขาดไปนี้ทดแทนได้ โดยการใช้ความเห็นจากบุคคล คณะบุคคล หรือหน่วยงานที่มีความเชี่ยวชาญด้านนาโนเทคโนโลยี การประเมินความเสี่ยง อาชีวอนามัยและความปลอดภัย ร่วมกับการประมาณการจากข้อมูลที่มีอยู่ ของวัสดุที่คล้ายกัน

การประเมินความเสี่ยงเชิงคุณภาพด้วยวิธีนี้นำมาใช้จัดกลุ่มวัสดุนาโนตามลักษณะความเป็นอันตรายและโอกาสการรับสัมผัส การจัดสรรอันตรายเป็นกลุ่มช่วยให้เกิดการพัฒนากลยุทธ์การควบคุมเพื่อประเมินความเสี่ยงและแนะนำเทคนิคในการจัดการความเสี่ยงอย่างเหมาะสม

ส่วนประกอบที่สำคัญอื่น ๆ ของการประเมินความเสี่ยงเชิงคุณภาพได้แก่ การประเมินข้อมูลอันตรายและการรับสัมผัสที่มีอยู่อย่างสม่ำเสมอ

#### 7.2.2 การระบุลักษณะอันตราย (hazard identification)

การระบุลักษณะอันตรายเพื่อระบุและติดตามอันตรายของสารที่อาจส่งผลกระทบต่อ การรับสัมผัสและความเสี่ยง ในกรณีนี้มุ่งเน้นการจัดทำรายการของอันตรายที่เกิดจากความเป็นพิษ (สารเคมี หรือวัสดุนาโน) และอันตรายทางกายภาพ (เช่น สนามแม่เหล็กไฟฟ้า แหล่งกำเนิดแสงที่มีความเข้มแสงสูง เสี่ยงที่มีความเข้มสูง วัสดุติดไฟและวัตถุระเบิด ความดันสูง หรือสุญญากาศ) แม้ว่าจะมีกระบวนการควบคุมทางวิศวกรรม โอกาสการได้รับสารในระดับต่ำหรือการได้รับสารที่มีอันตรายในระดับต่ำ จำเป็นต้องทำการระบุลักษณะอันตรายทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการรับสัมผัสจากการปฏิบัติงาน

ข้อมูลที่ใช้สำหรับการระบุอันตรายได้จาก บทความวิชาการ เอกสารความปลอดภัย (SDS) เอกสารความปลอดภัยทางเคมี (ICSC) ข้อมูลจากผู้ผลิต ประกาศ กฎกระทรวง และข้อมูลผลการทดสอบ ข้อมูลในเอกสารต่าง ๆ ส่วนใหญ่ไม่ระบุข้อมูลเฉพาะของวัสดุนาโนหรือเกณฑ์ปริมาณสารที่รับได้ ดังนั้น ข้อมูลจากเอกสารข้างต้นอาจไม่เพียงพอต่อการวิเคราะห์อันตรายของวัสดุนาโน ในกรณีนี้ทดสอบเพื่อใช้เป็นข้อมูลได้

ขั้นต่อไปประกอบด้วย การวิเคราะห์ปริมาณวัสดุหรือสารเคมีที่เป็นอันตราย ปริมาณวัสดุหรือสารเคมีที่ใช้หรือมีอยู่ในสถานที่ปฏิบัติงานเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อโอกาสในการรับสัมผัส สถานที่ปฏิบัติงานซึ่งมีปริมาณของวัสดุเพียงเล็กน้อย ทำให้มีโอกาสรับสัมผัสต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสถานที่ปฏิบัติงานที่มีการใช้วัสดุในปริมาณมาก การวิเคราะห์สถานที่ปฏิบัติงานช่วยในการประเมิน



โอกาสการรับสัมผัสของผู้ปฏิบัติงานในหน้าที่หรือในสถานที่ดังกล่าวได้ ซึ่งนำไปสู่การระบุกลุ่มประชากรที่เป็นเป้าหมาย

การระบุอันตรายประกอบด้วยการสำรวจสถานที่ปฏิบัติงาน ขั้นตอนการทำงาน กระบวนการผลิต และการวัดความปลอดภัยในสถานที่ปฏิบัติงาน รวมถึงการใช้ระบบงานควบคุมทางวิศวกรรมและ PPE เพื่อใช้ในการอธิบายถึงการรับสัมผัสและการระบุโอกาสในการรับสัมผัสสารเคมีที่เป็นอันตรายของผู้ปฏิบัติงานทั้งในหน้าที่และในสถานที่ หากผลการสำรวจเบื้องต้นระบุว่ามีโอกาสของการรับสัมผัสต้องรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประเมินการรับสัมผัสในสถานที่ปฏิบัติงานดังกล่าว ข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้แก่ ความเข้มข้นโดยมวล จำนวนอนุภาคการกระจายตัวของขนาดอนุภาคพื้นที่ผิว และข้อมูลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมี

### 7.2.3 การประเมินการตอบสนองต่อการรับสัมผัส (exposure-response assessment)

#### 7.2.3.1 อันตรายทางพิษวิทยา (toxicological hazard)

ในการจัดการด้านอาชีวอนามัยนั้น การป้องกันผลกระทบจากความเป็นพิษทำได้โดยการลดปริมาณการรับสัมผัสสารที่เป็นพิษให้ต่ำกว่าค่าปริมาณที่ระดับปลอดภัย ซึ่งอยู่ในระดับความเสี่ยงที่ยอมรับได้ ผลกระทบจากความเป็นพิษจำแนกได้ 2 ชนิด คือ ชนิดมีจุดเปลี่ยน (threshold) และชนิดไม่มีจุดเปลี่ยน (nonthreshold) ชนิดมีจุดเปลี่ยนระบุเกณฑ์การรับสัมผัสที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ ส่วนชนิดไม่มีจุดเปลี่ยน คือไม่ระบุเกณฑ์การรับสัมผัสที่ส่งผลต่อสุขภาพได้ ในการระบุเกณฑ์ความปลอดภัยจำเป็นต้องวิเคราะห์เชิงปริมาณ ดังนี้

- (1) หาค่า NOAEL หรือ BMD โดยใช้ข้อมูลตอบสนองต่อการรับสัมผัสในสัตว์หรือมนุษย์
- (2) ประมาณเกณฑ์สำหรับมนุษย์จากเกณฑ์ของสัตว์ (พิจารณาค่าความไม่แน่นอนประกอบ) โดยใช้แบบจำลอง เช่น แบบจำลองปอดมนุษย์ ในการประมาณความเข้มข้นที่ได้รับตลอดอายุการทำงาน
- (3) กำหนดขีดจำกัดของการรับสัมผัสจากการปฏิบัติงาน โดยคำนึงถึงความเป็นไปได้ทางเทคนิค ความแปรปรวนและความไม่แน่นอนของแบบจำลอง การประมาณการ และระบบความเสี่ยงที่ยอมรับได้

สมบัติความเป็นพิษของวัสดุนาโนอาจเกิดจากองค์ประกอบเคมีที่อยู่ภายในของวัสดุ ได้แก่ ส่วนประกอบในสารตั้งต้น ได้มีการศึกษาทางพิษวิทยาของวัสดุนาโน เช่น CNT ซึ่งมีลักษณะแตกต่างจากคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่

นิยาม วิธีการและมาตรฐานสำหรับการทดสอบพิษวิทยาของวัสดุนาโนอยู่ในระหว่างการพัฒนา ควรตรวจสอบมาตรฐานระหว่างประเทศที่อ้างอิงได้ เช่น มาตรฐานของ OECD เพื่อใช้เป็นแนวทางการปฏิบัติ นอกจากนี้การวิเคราะห์ทางพิษวิทยาของวัสดุนาโนนั้น จำเป็นต้องระบุการกระจาย

ตัวของอนุภาคนาโน เนื่องจากวัสดุนาโนที่ความเข้มข้นสูงจะเกิดเป็นก้อนเกาะหลวมอย่างรวดเร็ว อันเป็นผลจากการเคลื่อนที่แบบบราวน์และแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคนาโน ซึ่งเกิดขึ้นได้ในระหว่างกระบวนการผลิตและกระบวนการบรรจุลงในบรรจุภัณฑ์ ดังนั้นการสัมผัสจึงอาจเกิดจากอนุภาคนาโน หรือเกิดจากอนุภาคก้อนเกาะหลวม

รายงานผลการศึกษาทางพิษวิทยาจำนวนหนึ่ง มีผลการศึกษาที่พบว่าบางครั้งความเป็นพิษได้มาจากวัสดุทดสอบที่ไม่ทราบสมบัติอย่างชัดเจนเนื่องจากข้อจำกัดทางเทคนิคดังนั้นในปัจจุบันจึงมีข้อมูลอันตรายที่พิสูจน์ยืนยันจากผลการศึกษาพิษวิทยาสำหรับอาชีพอนามัยอยู่อย่างจำกัด และเชื่อว่าในอนาคตจะมีเกณฑ์การสัมผัสของวัสดุนาโนที่สร้างขึ้นเพียงไม่กี่ชนิดเท่านั้น ตัวอย่างรายงานผลการวิเคราะห์ความเสี่ยงของวัสดุนาโน เช่น TiO<sub>2</sub> คาร์บอน และอนุภาคที่เกิดจากท่อไอเสียเครื่องยนต์ดีเซล

จากข้อมูลที่มีไม่มากนักในปัจจุบันพบว่าข้อมูลความเป็นอันตรายจากความเป็นพิษของวัสดุนาโนนั้น ไม่ได้มีการประเมินอย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามสิ่งที่ควรพิจารณาในปัจจุบันประกอบด้วย

- (1) พิษวิทยาของวัสดุนาโนนั้นคาดการณ์จากพิษวิทยาของสารนั้น ๆ ที่มีขนาดใหญ่ไม่ได้เสมอไป
- (2) วัสดุนาโนบางชนิด มวลไม่ใช่ปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์การสัมผัส และให้ใช้พื้นที่ผิวของวัสดุนาโนและจำนวนของอนุภาคนาโนในการวิเคราะห์แทน

ดังนั้นขีดจำกัดของการสัมผัสในสถานที่ทำงาน (occupational exposure limit) สำหรับวัตถุขนาดใหญ่ที่มีลักษณะเป็นฝุ่นผง อาจใช้สำหรับวัสดุนาโนที่มีส่วนประกอบทางเคมีเหมือนกันไม่ได้

#### 7.2.3.2 อันตรายทางฟิสิกส์ (physical hazard)

อันตรายจากอ็อกซิไดซ์และระเบิดอันเนื่องมาจากวัสดุนาโนนั้นมีรายงานน้อยมาก หากอนุภาคนาโนก่อให้เกิดเหตุอ็อกซิไดซ์และระเบิดได้ ความรุนแรงจะมีมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่หรือวัสดุขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบเพิ่มเติมเพื่อประเมินสภาพลุกไหม้ได้ สภาพระเบิดได้ และความไวปฏิกิริยาของวัสดุนาโน เกณฑ์วิธีการทดสอบอันตรายเหล่านี้มีอยู่แล้วสำหรับการทดสอบวัสดุขนาดใหญ่ที่เป็นฝุ่นผงและนำมาใช้กับวัสดุนาโนได้ เกณฑ์วิธีดังกล่าวประกอบด้วย การวัดอัตราการเผาไหม้ การวัดอุณหภูมิการจุดติดไฟและการวัดสมบัติความเป็นระเบิด

สภาพลุกไหม้ได้ของวัสดุนาโนนั้น ประเมินตาม ASTM E-918-83 สมบัติความเป็นระเบิดวิเคราะห์ด้วยวิธี Fallhammer และ Koenen ดังนั้นเมื่อมีข้อมูลอันตรายจากลักษณะเฉพาะทางฟิสิกส์แล้ว การประเมินความเสี่ยงอันเกิดจากเหตุอ็อกซิไดซ์และการระเบิดได้ให้ใช้เทคนิคที่มีอยู่ เนื่องจากข้อมูลความเป็นอันตรายของวัสดุนาโนมีอยู่อย่างจำกัด การแบ่งกลุ่มความเป็นอันตรายของ

วัสดุนาโนจึงอ้างอิงตามความเห็นของผู้เชี่ยวชาญ ระบบการติดฉลากระดับอันตรายในสหภาพยุโรปประกอบด้วยข้อมูลดังนี้

- (1) ระดับความรุนแรงของอันตราย ได้แก่ เป็นพิษมาก เป็นพิษ อันตราย กัดกร่อน และระคายเคือง
- (2) ระดับความเสี่ยง เพื่ออธิบายระดับความเป็นอันตราย

ข้อมูลเกี่ยวกับการจำแนกความเป็นอันตรายนั้นดูได้จากข้อ 5. และภาคผนวก ค. อันตรายของวัสดุนาโนต่อสุขภาพ (รายละเอียดเพิ่มเติม)

#### 7.2.4 การประเมินการรับสัมผัส (exposure assessment)

การรับสัมผัสวัสดุนาโนเกิดขึ้นได้จากการรับสัมผัสโดยตรง ในกรณีของอนุภาคนาโนต้องพิจารณาแนวโน้มการปลดปล่อยของอนุภาคนาโนด้วย ซึ่งหาได้จากความสามารถของอนุภาคนาโนแต่ละชนิดที่เกิดการรับสัมผัสโดยตรงกับผิวหนังของมนุษย์หรืออวัยวะอื่น ๆ ได้ เช่น ปอด ปังจัยที่ต้องพิจารณาสำหรับการปลดปล่อยอนุภาคนาโนในอากาศ ได้แก่ สมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ และกระบวนการแปรรูป ซึ่งสมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ประกอบด้วยขนาด การเคลือบผิว ประจุ การฟุ้งกระจาย การพิจารณาวิธีการวิเคราะห์ ควรตรวจสอบว่าสถานะของวัสดุนั้น ๆ ด้วยว่าอยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลวหรือของแข็ง กระบวนการเชิงกล เช่น การกวน การเจาะ การเลื่อย การบด การครูด และการตัด อาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอนุภาคนาโนและอนุภาคของวัสดุที่มีโครงสร้างนาโนสเกล กระบวนการอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อการรับสัมผัส ได้แก่ การฉีดสเปรย์ของเหลวที่มีส่วนประกอบของวัสดุนาโน กระบวนการที่ให้พลังงานสูงแก่วัสดุนาโนหรือวัสดุที่ก่อให้เกิดโครงสร้างนาโนสเกลได้ เช่น การใช้เลเซอร์สำหรับเจาะ การเชื่อมด้วยพลาสมา นอกจากนี้กระบวนการทางวิศวกรรมทั้งที่อยู่ในระบบปิดและระบบเปิดล้วนแล้วแต่มีโอกาสในการรับสัมผัสวัสดุนาโนทั้งสิ้น ความเสี่ยงของการรับสัมผัสเกิดจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น การใช้งานที่ไม่ถูกต้อง เครื่องมือทำงานผิดปกติ ความรู้เท่าไม่ถึงการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน และการขาดประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน

ในการประเมินการรับสัมผัสจำเป็นต้องเข้าใจภาพรวมของการรับสัมผัสที่เกิดขึ้นจริง การสูดดม และการซึมผ่านผิวหนังเป็นช่องทางทั่วไปของการรับสัมผัสในสถานที่ปฏิบัติงาน ส่วนการรับสัมผัสทางปากนั้นเกิดขึ้นน้อยมาก (แม้ว่าการบริโภคเป็นส่วนหนึ่งของการรับสัมผัสทางการหายใจจากการกลืนเสมหะ และการกลืนอนุภาคนาโนจากการหายใจเข้าไป) การรับสัมผัสทางปากมักเกิดอย่างไม่ตั้งใจจากมือที่สัมผัสกับวัสดุนาโน การรับสัมผัสที่เกิดจากอุบัติเหตุ เช่น ทางเข็มฉีดยา ผลการศึกษารายงานว่าอนุภาคนาโนทะลุผ่านผิวหนังชั้นในของหนูไม่ได้ ในขณะที่งานวิจัยอื่น ๆ แสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนสามารถผ่านหนังกำพร้าชั้นสตราตัม คอร์เนียม (stratum corneum) และเข้าสู่ชั้นผิวหนัง และ ชั้นผิวหนังบนสุดของหนูและมนุษย์ได้

การรับสัมผัสทางการหายใจวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีการวัด เช่น การนับจำนวนอนุภาค การวัดขนาด ในขณะที่การรับสัมผัสทางผิวหนังสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ตัวอย่างของกระดาษเช็ดมือ ทำการทดสอบทางเคมีและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ซึ่งวิธีการเหล่านี้มีความยุ่งยาก จากการทวนสอบ การสอบเทียบ และการประมาณค่าความไม่แน่นอน อย่างไรก็ตามขนาดอนุภาค จำนวน และการกระจายตัวเป็นปัจจัยที่สำคัญที่จำเป็น รวมถึงพื้นที่ผิวหรือข้อมูลสมบัติทางเคมี

ในกรณีที่ข้อมูลการรับสัมผัสไม่เพียงพอ ให้นำเทคนิคเชิงคุณภาพมาใช้ประเมินได้ เช่น ใช้สมบัติการฟุ้งกระจายในการกำหนดโอกาสในการรับสัมผัส 3 ระดับ คือ ต่ำ ปานกลาง และสูง

การประเมินปริมาณการได้รับเข้าสู่ร่างกายนั้นเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ตัวอย่างจากภายในร่างกาย เช่น เนื้อเยื่อ ของเหลวจากร่างกาย และอากาศที่หายใจเข้าไป ในทางอาชีวอนามัยจึงกำหนดให้มีวิธีการที่ง่ายขึ้น โดยใช้ตัวอย่างจาก ผม ปัสสาวะ และอากาศที่หายใจออกมาแทน

การระบุปริมาณที่รับเข้าสู่ร่างกายทำได้โดยใช้การวัดปริมาณวัสดุนาโนที่สนใจ และหรือเมแทบอลิต์ของวัสดุนาโน นอกจากนี้ยังมีการใช้ “ตัวระบุทางชีวภาพ” (biomarker) ซึ่งเป็นสารที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาระหว่างสารพิษกับระบบในร่างกายมนุษย์เป็นหลักฐานในการแสดงถึงการได้รับสัมผัสสารพิษของร่างกายหากตัวระบุนั้น ๆ มีความสัมพันธ์อย่างจำเพาะกับสารพิษที่ได้รับเข้าสู่ร่างกาย โดยการวัดปริมาณตัวระบุทางชีวภาพมีข้อดี คือ สามารถให้ข้อมูลการรับสัมผัสได้ไม่ว่าการรับสัมผัสนั้นจะเกิดขึ้นผ่านทางเส้นทางการวัดปริมาณตัวระบุยังสามารถนำมาใช้สำหรับการตรวจคัดกรองและตรวจติดตามพนักงานที่ทำงานกับวัสดุนาโนได้ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลการศึกษาตัวระบุทางชีวภาพสำหรับการรับสัมผัสวัสดุนาโนนั้นยังอยู่ในช่วงเริ่มต้น และมีความซับซ้อนอันสืบเนื่องมาจากความหลากหลายทางฟิสิกส์และเคมีของวัสดุนาโน ซึ่งส่งผลให้การตอบสนองทางชีวภาพมีความหลากหลายไปด้วย จากการศึกษาการรับสัมผัสวัสดุนาโนที่มีความเป็นพิษต่ำและความสามารถในการละลายต่ำผ่านการหายใจ พบว่าเป็นสาเหตุให้เกิดการอักเสบ ซึ่งมีการเสนอให้ไนโทรออกไซด์ในลมหายใจออกของมนุษย์เป็นตัวระบุทางชีวภาพของการเกิดกระบวนการอักเสบในร่างกาย

#### 7.2.5 ลักษณะเฉพาะของความเสี่ยง (risk characterization)

ลักษณะเฉพาะของความเสี่ยง ประกอบด้วย การทบทวนและการรวมข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนการระบุอันตราย การประเมินการตอบสนองต่อการรับสัมผัส และการประเมินการรับสัมผัส ค่าประมาณการความเสี่ยงเชิงปริมาณนั้นประเมินได้จากความไม่แน่นอนทางสถิติและทางชีวภาพ การอธิบายลักษณะของความเสี่ยงนั้นใช้ในการประเมินอันตรายและการรับสัมผัส ณ สถานที่ใด ๆ ว่ามีความเสี่ยงเกินเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และมีประชากรกลุ่มเสี่ยงหรือไม่ การจัดการความเสี่ยงอาจนำมาใช้เพื่อลดระดับความเสี่ยงให้ต่ำกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ มาตรการในการลดความเสี่ยงนั้นอาจเป็นการแนะนำให้กำจัดอนุภาคนาโน

ที่เป็นอันตรายหรือใช้สารอื่นทดแทน รวมถึงการปรับปรุงกระบวนการผลิต และ/หรือการใช้การควบคุมทางวิศวกรรม มาตรการระดับองค์กร เช่น คู่มือความปลอดภัย PPE และ SOP

### 7.3 บทสรุป

การประเมินความเสี่ยงของการรับสัมผัสวัสดุนาโนในที่ทำงาน ประกอบด้วยการประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณและ/หรือเชิงคุณภาพ ในกรณีที่มีข้อมูลวิชาการจำกัดหรือวัสดุนั้นมีลักษณะเฉพาะ อาจทำการประเมินด้านคุณภาพเพียงอย่างเดียวหากมีข้อมูลการรับสัมผัสและการตอบสนอง (เช่น พิษวิทยา และระบาดวิทยา) แต่อาจทำการประเมินความเสี่ยงด้านปริมาณได้ ในปัจจุบันข้อมูลการรับสัมผัสและอันตรายด้านปริมาณสำหรับวัสดุนาโนมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้น ดังนั้นการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพสำหรับสถานที่ปฏิบัติงานในปัจจุบันจึงขึ้นอยู่กับความเห็นของผู้เชี่ยวชาญในการระบุอันตราย โอกาสการรับสัมผัสและการนำมาตราความปลอดภัยที่เหมาะสมไปใช้งาน

## 8. แนวทางการจัดการ

### 8.1 บทนำ

เนื้อหาส่วนนี้กล่าวถึงวิทยาการที่มีในปัจจุบันเรื่องการควบคุมเพื่อลดหรือป้องกันการรับสัมผัสวัสดุนาโนจากการผลิตในสถานที่ปฏิบัติงาน โดยไม่ครอบคลุมถึงเรื่องสุขภาพและความปลอดภัย หรือข้อปฏิบัติที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนาโนที่เกิดจากกระบวนการทางธรรมชาติ อนุภาคนาโนที่เกิดโดยไม่ตั้งใจ เช่น ในกระบวนการเชื่อม หรือการใช้งานของผู้บริโภค แม้ว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้อาจเกี่ยวข้องกับวัสดุต่าง ๆ ข้างต้น

การควบคุมการปลดปล่อยอนุภาคนาโนอยู่ในการปฏิบัติงานที่จัดทำขึ้นเพื่อป้องกันและควบคุมการรับสัมผัส เช่น ควันไฟจากกระบวนการเชื่อม ไอเสียจากเครื่องยนต์ดีเซล (อนุภาคนาโนที่เกิดโดยไม่ตั้งใจ) นั้นมีมานานแล้ว แต่การควบคุมสำหรับวัสดุนาโนจากการผลิตเป็นเรื่องใหม่ ซึ่งใช้วิธีการควบคุมอนุภาคนาโนเล็ก รวมทั้งอนุภาคนาโนที่เกิดโดยไม่ตั้งใจได้

แม้ว่าวิธีการควบคุมที่อธิบายในข้อนี้จะเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันการรับสัมผัสอนุภาคนาโนจากการผลิตในสถานการณ์ที่ระบุไว้ แต่หลักฐานที่ใช้ยืนยันประสิทธิภาพของวิธีการควบคุมนั้นมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้น ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับวิธีการควบคุมที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันการรับสัมผัสที่กล่าวไว้นั้น จึงอยู่บนพื้นฐานข้อมูลและความรู้ที่มีอยู่ในปัจจุบัน

การนำข้อมูลวิธีการควบคุมเหล่านี้ไปใช้ช่วยให้บริษัท นักวิจัย และประชาชน ป้องกันผลกระทบที่อาจเกิดต่อสุขภาพและความปลอดภัยซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการผลิต การจัดการ การใช้งาน และการกำจัดวัสดุนาโนจากการผลิต โดยครอบคลุมวัสดุนาโนและการใช้งานวัสดุนาโน

## 8.2 ความเกี่ยวข้องของการประเมินความเสี่ยงกับวิธีการควบคุม

ในการพิจารณาแนวทางการควบคุมที่เหมาะสมสำหรับอนุภาคนาโนในสถานที่ปฏิบัติงาน จำเป็นต้องพิจารณาระดับความเสี่ยงของกิจกรรมในสถานที่ปฏิบัติงานเป็นอันดับแรก การประเมินความเสี่ยงอธิบายไว้ในข้อ 7. การประเมินความเสี่ยงด้านอาชีวอนามัย ซึ่งแนวทางการควบคุมควรสอดคล้องกับความเสี่ยงที่ทราบ ซึ่ง COSHH ได้แบ่งกลุ่มการควบคุมตามแถบควบคุม (control banding) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้เทคโนโลยีเดียวในการควบคุมกลุ่มของอันตรายที่กำหนด โดยมีการพัฒนาการควบคุมสำหรับการรับสัมผัสสารเคมีผ่านทางสูดดม ไว้ 4 กลุ่ม หรือ 4 แถบ ดังนี้

- (1) ใช้แนวปฏิบัติงานที่ถูกละเลยในการทำงาน และมีระบบระบายอากาศแบบทั่วไป
- (2) ใช้ระบบระบายอากาศแบบเฉพาะที่
- (3) ใช้ระบบปิดในการปฏิบัติงาน
- (4) ปฏิบัติตามคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญ

สมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ของวัสดุนาโนจากการผลิตอาจนำมาซึ่งความเสี่ยงต่อสุขภาพ หากมีโอกาสได้รับในระหว่างปฏิบัติงาน นอกจากนี้ยังมีความเสี่ยงที่จะเกิดอหิวาต์หรือระเบิดได้ในระหว่างกระบวนการผลิต การจัดการ การเก็บรักษา และการใช้งานวัสดุนาโนจากการผลิต อย่างไรก็ตามในปัจจุบันความเสี่ยงต่อสุขภาพและความปลอดภัยในการทำงานกับอนุภาคนาโนมีความไม่แน่นอน ดังนั้นจึงอาจใช้ความเสี่ยงมากำหนดแนวทางการควบคุมไม่ได้ นอกจากนี้ในปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานในการกำหนดการรับสัมผัสในสถานที่ปฏิบัติงานสำหรับวัสดุนาโนแต่ละชนิดเพื่อใช้ในการกำหนดวิธีการปฏิบัติในการควบคุมได้

### 8.2.1 กลยุทธ์ในการควบคุม (strategy for the control)

วิธีปฏิบัติเพื่อควบคุมกระบวนการผลิต การใช้งาน การเก็บรักษา และการจัดการ เป็นหลักการป้องกันล่วงหน้ากับวัสดุนาโน เพื่อใช้ป้องกันและลดความเสี่ยงที่มีประสิทธิภาพและคุ้มค่า ทำได้แม้ว่าวิทยาการเกี่ยวกับความเสี่ยงต่อสุขภาพและความปลอดภัยสำหรับวัสดุนาโนจากการผลิตมีไม่มาก โดยเฉพาะเมื่อความเสี่ยงต่อสุขภาพและความปลอดภัยมีความไม่แน่นอน และไม่มีมาตรฐานเรื่องการรับสัมผัสอนุภาคนาโนในสถานที่ปฏิบัติงาน

ในพ.ศ. 2547 UK Royal Society and Royal Academy of Engineering ได้แนะนำให้ห้องปฏิบัติการวิจัยและโรงงานอุตสาหกรรมปฏิบัติต่ออนุภาคนาโนจากการผลิตและท่อานาโนเสมือนสารอันตราย กระบวนการป้องกันที่เข้มงวดควรนำมาใช้เพื่อป้องกันอนุภาคนาโนหลุดไปยังสภาพแวดล้อมในสถานที่ปฏิบัติงาน รวมถึงสภาพแวดล้อมภายนอก และควรมีโปรแกรมการประเมินความเสี่ยงเพื่อลดการรับสัมผัส และจำนวนผู้ปฏิบัติงานที่ได้รับวัสดุนาโน ซึ่งหลักการป้องกันนี้ไม่ได้มีวัตถุประสงค์ให้

เลิกใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าจะทราบอันตรายต่อสุขภาพและความปลอดภัยอย่างแท้จริง แต่ต้องการให้ ผู้ปฏิบัติงานมีการป้องกันอย่างเหมาะสม

การเลือกกลยุทธ์ในการควบคุมอยู่บนพื้นฐานความเข้าใจถึงความแตกต่างระหว่างอนุภาคนาโนกับ อนุภาคขนาดใหญ่ และข้อมูลเฉพาะของอนุภาคนาโน การควบคุมอาจแปรผันไปตามสมบัติของอนุภาค นาโนที่เกี่ยวข้อง วิธีทำงานที่เหมาะสมต้องเป็นไปตามกระบวนการและภาระงานในระหว่างการรับ สัมผัสที่อาจเกิดขึ้น ทางเลือกของกลยุทธ์ทราบได้จากวิธีที่เลือกสำหรับการควบคุมอนุภาคนาโนที่ เกิดขึ้นโดยไม่ตั้งใจ

ผลการวิจัยระบุว่าพื้นที่ผิวทั้งหมดของอนุภาคที่อยู่ในปอดเป็นปัจจัยหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิง ปริมาณถึงความเป็นพิษของฝุ่นที่มีการละลายต่ำ (poorly soluble dust) ซึ่งได้จากการทดลองของฝุ่น  $\text{TiO}_2$  กับ  $\text{BaSO}_4$  ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.1 mm และ 4.3 mm ตามลำดับ หลักฐานเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนอาจเกิดปฏิกิริยาทางชีวภาพได้รุนแรงกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีองค์ประกอบทาง เคมีต่อมวลที่เหมือนกัน ดังนั้นจึงอาจก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพมากกว่าเมื่อมีการสูดดมเข้าไป ผล การศึกษาจากสัตว์ทดลองพบว่าพยาธิสภาพในปอด เช่น มะเร็ง การอักเสบ การเกิดก้อนเนื้อ เส้นใย และ การหายใจลำบาก อาจเกิดขึ้นเมื่อมีการรับสัมผัส CNT และฝุ่นผงของโลหะออกไซด์ กระบวนการทาง เคมีหลายอย่างถูกเร่งปฏิกิริยาโดยใช้สารเคมีในปริมาณน้อย ซึ่งประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานั้น ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของสารนั้น ๆ ดังนั้นวัสดุนาโนซึ่งมีพื้นที่ผิวต่อมวลมากมีความสามารถในการเร่ง ปฏิกิริยาให้เร็วขึ้น หรือมีความรุนแรงถึงขั้นทำให้เกิดการระเบิดได้ นั่นคือวัสดุนาโนหรือวัสดุ โครงสร้างนาโนจะมีอันตรายจากการติดไฟและระเบิดได้มากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีองค์ประกอบ ทางเคมีเหมือนกัน อย่างไรก็ตามในการพิจารณาความเสี่ยงจำเป็นต้องวิเคราะห์สมบัติของวัสดุที่มี ปริมาณมากด้วย เนื่องจากวัสดุนาโนไม่ได้ประกอบด้วยวัตถุเพียงชนิดเดียว แต่ประกอบไปด้วยวัตถุที่มี รูปร่าง ขนาด และองค์ประกอบที่มีความหลากหลาย ทำให้วัสดุนาโนมีสมบัติที่หลากหลาย เช่น ความ เป็นพิษทางเคมี รูปร่าง ขนาด พื้นที่ผิว และความไวปฏิกิริยาของพื้นที่ผิว วัสดุนาโนบางชนิดอาจมี อันตรายต่อสุขภาพและความปลอดภัยมากกว่าวัสดุนาโนชนิดอื่น

ในอนาคตเมื่อความเข้าใจเรื่องความเสี่ยงต่อสุขภาพและความปลอดภัยมีมากขึ้น อาจปรับมาตรการ ป้องกันเพื่อใช้กับวัสดุนาโนอย่างเฉพาะเจาะจงได้ เมื่อมีข้อมูลอันตรายต่อสุขภาพมากขึ้น การจัดกลุ่ม ความเสี่ยง และการควบคุม นำมาใช้จะมีประสิทธิภาพโดยพิจารณาร่วมกับอันตรายต่อสุขภาพที่ แตกต่างกันไป ในบางกรณีมาตรการควบคุมที่เข้มงวดอาจยืดหยุ่นได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณ ของวัสดุนาโนในกระบวนการผลิต ใช้งาน เก็บรักษา และจัดการเพิ่มสูงขึ้น ความเสี่ยงของความ ปลอดภัยอาจเพิ่มสูงตามไปด้วย

การวัดและการประเมินประสิทธิภาพของแนวทางการป้องกันเป็นการควบคุมที่จำเป็นและสำคัญ อย่างไรก็ตามความสามารถในการวัดและประเมินประสิทธิภาพในปัจจุบันจำกัดอยู่เฉพาะอนุภาคนาโนบางชนิดเท่านั้น

### 8.3 การตรวจสอบกระบวนการควบคุม (examination of control methodology)

#### 8.3.1 การป้องกันการรับสัมผัส

มาตรการป้องกันการรับสัมผัสและขั้นตอนการปฏิบัติงานที่เหมาะสมนั้นจำเป็นต่ออาชีวอนามัยและความปลอดภัย เนื่องจากกระบวนการผลิตและการใช้งานวัสดุนาโนอาจมีความเสี่ยง ดังนั้นผู้บริหาร นักวิจัย และพนักงานอื่น ๆ ควรให้ความสำคัญต่อกระบวนการป้องกันซึ่งออกแบบมาเฉพาะสำหรับบริษัทหรือหน่วยงานวิจัยนั้น ๆ การจัดทำมาตรการป้องกันและการนำไปใช้ควรมีขั้นตอนที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันสุขภาพและความปลอดภัยของพนักงานและบุคคลอื่น ๆ ในสถานที่ปฏิบัติงาน

หน่วยงานหลายแห่งได้พัฒนามาตรการเฉพาะในการจัดการวัสดุนาโนขึ้น ซึ่งในการพัฒนามาตรการนั้นผู้บริหารขององค์กรควรระบุให้ชัดเจนถึงหน้าที่ความรับผิดชอบของแต่ละบุคคลในบริษัทเพื่อให้แน่ใจได้ว่า ผู้บริหาร ทีมนักวิจัย และห้องปฏิบัติการได้เข้ามามีส่วนร่วม แนวทางการประเมินความเสี่ยงเป็นสิ่งจำเป็นต้องมีโดยต้องพิจารณาวัสดุนาโนแต่ละชนิด รูปแบบ ความเป็นพิษ และอันตรายต่อความปลอดภัย และควรนำไปใช้กับกระบวนการเฉพาะหน่วยงานที่ได้พัฒนาการจัดการวัสดุนาโน พบว่าการป้องกันการรับสัมผัสขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ประกอบด้วย

- (1) รูปแบบของวัสดุ เช่น ผง สารแขวนลอยในสารละลาย หรือฝังตัวในเมทริกซ์ และ
- (2) อันตรายจำเพาะ เช่น สภาพลุกลไหม้ได้ ความเป็นพิษ สารก่อมะเร็ง หรือความไวปฏิกิริยา

โปรแกรมการป้องกันการรับสัมผัสหรือการจัดการความเสี่ยงของการปลดปล่อยของวัสดุนาโนอาจประกอบด้วย

- (1) การเฝ้าระวังและการบันทึกสมรรถนะและประสิทธิภาพของเครื่องมือควบคุม
- (2) การเฝ้าระวังการรับสัมผัสอนุภาคนาโนของสถานที่ปฏิบัติงาน
- (3) การพัฒนาหลักเกณฑ์และวิธีการติดตั้งเครื่องควบคุมทางวิศวกรรม เช่น ตู้ครอบเครื่องมือ หรือระบบระบายอากาศ ที่ตำแหน่งซึ่งมีการปลดปล่อยอนุภาคนาโน
- (4) การฝึกอบรมเกี่ยวกับอันตราย วิธีการปฏิบัติงาน คู่มือการใช้เครื่องมือ วิธีการในการจัดการวัสดุนาโน และมาตรการป้องกันที่ได้ผล
- (5) การจัดหา SDS จากผู้ผลิตหรือผู้จำหน่ายอนุภาคนาโนที่ใช้ใน SDS นี้ควรรบอถึงอันตรายต่อสุขภาพที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ และมาตรการในการป้องกันในสถานที่ปฏิบัติงาน อย่างไรก็ตามผล



การตรวจสอบ SDS ที่มีอยู่สำหรับวัสดุนาโนจากการผลิตพบว่ามีข้อมูลไม่สมบูรณ์ และการนำข้อมูลดังกล่าวเพียงอย่างเดียวไปใช้อาจส่งผลให้มาตรการการป้องกันไม่สมบูรณ์ด้วย

- (6) การพัฒนาขั้นตอนการดำเนินการ โดยอธิบายประเภทของ PPE ที่ควรมี เช่น เสื้อผ้า และอุปกรณ์ช่วยหายใจ
- (7) การพัฒนาขั้นตอนการดำเนินการเพื่อระบุความถี่ในการเปลี่ยนหรือทิ้ง PPE เช่น ถุงมือ เสื้อคลุม
- (8) การบำรุงรักษาอุปกรณ์ช่วยหายใจ รวมถึงทำการเก็บรักษาและเก็บบันทึกอย่างเหมาะสม
- (9) การพัฒนาขั้นตอนการทำความสะอาดและการกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกจากเครื่องมือและตู้ครอบ
- (10) การขอคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญ เช่น นักอาชีวอนามัย ในการรับรองสภาพแวดล้อมที่ปลอดภัยในการทำงาน
- (11) การดำเนินโครงการวิจัยด้านความปลอดภัยและสุขภาพกับนาโนเทคโนโลยี (โครงการวิจัยอาจดำเนินการร่วมกับหน่วยงานของภาครัฐ)
- (12) การเปรียบเทียบมาตรฐานและการแบ่งปันความรู้ระหว่างหน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวกับวัสดุนาโน

### 8.3.2 กลยุทธ์ควบคุม (control strategy)

โดยทั่วไปนั้นกลยุทธ์ควบคุมความเสี่ยงประกอบด้วย การกำจัดอันตราย การแทนที่ การใช้เทคนิคทางวิศวกรรมในการควบคุม ระบบบริหารควบคุมและการใช้ PPE แนวทางเหล่านี้ควรพิจารณาตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบกระบวนการทางอุตสาหกรรม

เมื่อเรียงลำดับเทคนิคตามความนิยมจากมากไปน้อย ดังนี้ การกำจัด > การแทนที่ > การควบคุมทางวิศวกรรม > การบริหารควบคุม > การใช้ PPE แต่ในทางปฏิบัติ ควรใช้หลากหลายเทคนิคประกอบกัน เพื่อให้ได้แนวทางที่ดีที่สุดเพื่อควบคุมการรับสัมผัสในสถานที่ปฏิบัติงาน

แม้ว่าแนวปฏิบัติในการควบคุมสำหรับลดการหายใจและสูดดมฝุ่นในสถานที่ปฏิบัติงานจะเป็นที่ทราบกันดีและมีการใช้งานกันโดยทั่วไป แต่ประสิทธิภาพของวิธีการเหล่านี้ในการควบคุมอนุภาคนาโนและอนุภาคของวัสดุโครงสร้างนาโนนั้น ได้ประเมินไปแล้วบางส่วน แต่มาตรการนี้ก็เป็นประโยชน์สำหรับใช้เป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนามาตรการป้องกันองค์กรที่ทำงานกับวัสดุนาโน ซึ่งมักใช้กระบวนการความปลอดภัยในการทำงานกับสารเคมี โดยเพิ่มความเข้มงวดให้มากขึ้น และอ้างอิงถึงพิษวิทยา และสมบัติเคมี-ฟิสิกส์ของวัสดุอื่นที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ เช่น ในเอกสาร ICON ได้ระบุชนิดของถุงมือขึ้นอยู่กับชนิดของตัวทำละลายที่เลือกใช้

### 8.3.3 การกำจัดอันตรายด้วยการออกแบบอย่างมีประสิทธิภาพ (eliminating the hazard through effective design)

การออกแบบกระบวนการที่มีประสิทธิภาพส่งผลกระทบต่อ การป้องกันการรับสัมผัสอนุภาคนาโนในสถานที่ปฏิบัติงาน ในบางสถานการณ์อาจจำเป็นต้องปรับปรุงระบบภายหลังติดตั้ง เพื่อให้

สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ในการออกแบบควรคำนึงถึงตำแหน่งที่ตั้งของโรงงาน การติดตั้ง กระบวนการ การใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ และสถานที่ทำงาน โดยผู้ออกแบบสามารถทำสิ่งสำคัญได้ดังนี้

- (1) การรับรู้ปัจจัยความเสี่ยงของการรับสัมผัสเฉพาะต่อกระบวนการการผลิต แล้วจึงออกแบบเพื่อจำกัดหรืออย่างน้อยเพื่อลดปัจจัยความเสี่ยงนั้น
- (2) การออกแบบและการแนะนำมาตรการควบคุม

กิจกรรมที่พิจารณาในขั้นตอนการออกแบบประกอบด้วย การสร้างแบบอาคาร การวางแผนจัดซื้อ การผลิต การบรรจุภัณฑ์ การคลังสินค้า การขนส่ง และระบบอื่น ๆ นอกจากนี้ควรพิจารณาถึงข้อกำหนดตามระเบียบและข้อบังคับ ควรออกแบบเพื่อจำกัดสภาวะการณ์ที่มีความเสี่ยงจากกระบวนการและกันผู้ปฏิบัติงาน การออกแบบที่มีประสิทธิภาพจะช่วยป้องกันการเกิดฝุ่นและละอองลอยได้

ในส่วนของออกแบบระบบควบคุมทางวิศวกรรมนั้น กระบวนการที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดอนุภาคนาโนที่มีขนาดต่างกันซึ่งอาจไม่ได้มีเฉพาะอนุภาคนาโนแต่รวมไปถึงอนุภาคของวัสดุโครงสร้างนาโน เช่น อนุภาคก้อนเกาะหลวม ความเร็วในการตกกระทบ ความเร็วในการตรวจจับ และความเร็วในการเคลื่อนที่ โดยขึ้นอยู่กับธรรมชาติของกระบวนการและขนาดอนุภาคที่เกิดขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวระบบควบคุมทางวิศวกรรมจึงจำเป็นต้องมีการป้องกันหรือจำกัดการปลดปล่อย หรือการสะสมของอนุภาคนาโนในสภาวะแวดล้อมการทำงาน เช่น ตู้ครอบ ระบบระบายอากาศ ควรออกแบบตามลักษณะเฉพาะสมบัติที่สภาวะแก๊สและลักษณะเฉพาะสมบัติที่สภาวะอนุภาคนาโนและอนุภาคของวัสดุโครงสร้างนาโน หลักการพื้นฐานของการออกแบบที่ดีคือการหลีกเลี่ยงสถานการณ์ที่เกิดระเบิดได้ หลีกเลี่ยงฝุ่นที่มีโอกาสระเบิด ในกรณีเลวร้ายสุดจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ป้องกันสภาพที่ระเบิดได้ ที่พร้อมใช้งาน นอกจากนี้ควรออกแบบอาคาร โดยแยกสถานที่ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุอันตรายออกไป

#### 8.3.4 การแทนที่วัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์ กระบวนการ และเครื่องมือ (substitution of raw materials, products, processes and equipment)

การแทนที่โดยทั่วไปแล้วเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่งในการลดความเสี่ยงต่อสุขภาพและความปลอดภัยในสถานที่ปฏิบัติงาน แม้ว่าลักษณะเฉพาะทางเคมี-ฟิสิกส์ของอนุภาคนาโนแต่ละชนิดจะมีความจำเพาะและทำให้การแทนที่ด้วยวัสดุอื่นทำได้ยาก แต่ความจำเพาะนี้ทำให้วัสดุนาโนใช้งานและมีประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ การแทนที่วัสดุนาโนในกระบวนการมีดังนี้

- (1) การแทนที่วัตถุดิบที่เป็นพิษมากด้วยวัตถุดิบที่เป็นพิษน้อยกว่า
- (2) การแทนที่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นพิษมากด้วยผลิตภัณฑ์ที่เป็นพิษน้อยกว่า
- (3) การเปลี่ยนลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์หรือวัตถุดิบ เช่น ใช้ในรูปสารแขวนลอย ครีมอัดเม็ด หรือวัสดุเชิงประกอบ แทนการใช้ผงฝุ่นหรือละอองลอย

- (4) การเปลี่ยนกระบวนการเป็นวิธีการควบคุมความเสี่ยงที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด เช่น การเปลี่ยนกระบวนการจากแบบแห้งมาเป็นแบบเปียก และการใช้น้ำเพื่อลดการปลดปล่อยฝุ่นจากวัสดุแห้งที่หลุดออกมาในกระบวนการหรือการขนถ่าย
- (5) การแทนที่เครื่องมือที่ต้องใช้วัสดุที่เป็นพิษหรือทำให้เกิดวัสดุที่เป็นพิษ ด้วยเครื่องมือที่ใช้วัสดุที่เป็นพิษหรือทำให้เกิดวัสดุที่เป็นพิษในปริมาณน้อยลง หรือมีความเป็นพิษน้อยลง
- (6) การแทนที่เครื่องมือเพื่อลดหรือเลี่ยงการปลดปล่อยมลพิษ
- (7) การปรับปรุงอนุภาค เช่น การเคลือบหัวหมุดควอนตัม ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ไม่ปรากฏความเป็นพิษทางพันธุกรรมของหัวหมุดควอนตัมเมื่อเคลือบด้วยซิลิกา อีกทั้งยังป้องกันการทำปฏิกิริยากับ แคลเซียม สังกะสี ซิลิเนียม และซัลเฟอร์ กับ โปรตีน และ DNA ในนิวเคลียสได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- (8) การพิจารณาว่าวัสดุนาโนานั้น ๆ จำเป็นต่อการใช้งานหรือผลิตภัณฑ์

#### 8.3.5 เทคนิคการควบคุมทางวิศวกรรม (engineering control technique)

สถานที่ปฏิบัติงานโดยทั่วไปควรเลือกเทคนิคการควบคุมโดยพิจารณาจากระดับความเสี่ยง COSHH ได้แนะนำแนวทางในการควบคุมสิ่งปนเปื้อนในอากาศไว้ดังนี้

- (1) ความเสี่ยงสูงสุด ให้ขอคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญ
- (2) ความเสี่ยงสูง ให้จำกัดบริเวณ
- (3) ความเสี่ยงน้อย ให้ใช้การควบคุมทางวิศวกรรม เช่น LEV
- (4) ความเสี่ยงต่ำสุด ให้ใช้ระบบระบายอากาศทั่วไป

ในปัจจุบันความเข้าใจเกี่ยวกับระดับความเสี่ยงของอนุภาคนาโนจากการผลิตและวัสดุโครงสร้างนาโนส่วนใหญ่มีอย่างจำกัดซึ่งได้แนะนำไปแล้วว่าในกรณีที่มีความไม่แน่นอนในความเสี่ยง ควรนำหลักปลอดภัยไว้ก่อนมาประยุกต์

ระบบการควบคุมทางวิศวกรรมนำมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพในการควบคุมฝุ่นผงและแก๊ส และใช้กันโดยทั่วไปในอุตสาหกรรมเคมีและอุตสาหกรรมอื่น ๆ

การควบคุมทางวิศวกรรมนั้น มีการใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อลดการรับสัมผัสควันจากการเชื่อม วิธีการกำจัดควันจากการเชื่อม เช่น การแยกโต๊ะ การแยกห้อง การจัดทำระบบระบายอากาศ และการแยกแบบ on-gun extraction\* การระบายอากาศโดยทั่วไป เช่น การระบายอากาศโดยการเจือจาง หรือการระบายอากาศด้วยการแทนที่ ควรนำมาใช้ในการกำจัดควันจากการเชื่อมเพื่อลดระดับควันในพื้นที่ลง ระดับของการป้องกันของวิธีการเหล่านี้จะแตกต่างกันไปและขึ้นอยู่กับการใช้งานและการบำรุงรักษาที่เหมาะสม การควบคุมทางวิศวกรรมในลักษณะนี้มักนำมาใช้กับอุตสาหกรรมผลิตคาร์บอนแบล็ก

การควบคุมทางวิศวกรรมที่ใช้กันในหน่วยงานที่ทำงานกับวัสดุนาโนนั้นมีรายงานในผลการสำรวจของ ICON พบว่าโดยวิธีการควบคุมทั้งหมดไม่ได้ทำเพื่อลดการรับสัมผัสอนุภาคนาโนของผู้ปฏิบัติงาน แต่ทำเพื่อรักษาความสะอาดของวัสดุ วิธีการควบคุมที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นเทคโนโลยีที่มีอยู่แล้ว

#### 8.3.5.1 การจัดทำระบบปิดสำหรับกระบวนการ (การปิดล้อมและการแยกส่วน)

การจัดทำสิ่งห่อหุ้มและการแยกส่วนของกระบวนการแบบปิดลดการปลดปล่อยอนุภาคเข้าสู่สถานะแวดล้อมในสถานที่ปฏิบัติงานในระหว่างกระบวนการผลิตหรือการใช้งานได้ วิธีนี้ควรนำไปใช้ในกระบวนการที่มีความเสี่ยงสูงต่อสุขภาพและความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน โดยควบคุมการปลดปล่อยอนุภาคได้ดีกว่าการทำงานในกระบวนการแบบเปิด แต่ยังคงต้องมีการบำบัดมลพิษที่ปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อมในกรณีจำเป็น

แม้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเสี่ยงกับวิธีการจัดการวัสดุนาโนนั้นมีความไม่ชัดเจน แต่สำหรับวัสดุที่มีหลักฐานระบุว่าควรหลีกเลี่ยงการรับสัมผัสนั้น จะต้องนำวิธีการจำกัดบริเวณมาประยุกต์ การดำเนินการทำได้โดยจัดให้วัสดุอยู่ในบริเวณเฉพาะมีระบบระบายอากาศเพื่อป้องกันการปนเปื้อนกับส่วนงานอื่น ตัวอย่างการแยกส่วนงานได้แก่ การใช้ระบบปิดแบบครบวงจร การใช้หุ่นยนต์ และการทำตู้ปิดล้อมเครื่องมือ ในบางสถานการณ์ที่กระบวนการมีมลพิษสูง ควรแยกผู้ปฏิบัติงานออกจากสถานีและทำการควบคุมระบบแบบรีโมทแทน ผู้ปฏิบัติงานควรอยู่ในพื้นที่หรือห้องควบคุมที่มีคุณภาพอากาศดีเพื่อสุขภาพและความปลอดภัย

การป้องกันสถานะแวดล้อมและผู้ปฏิบัติงานชั้นสูงสุดทำได้โดยใช้ตู้ปลอดเชื้อระดับ 3 (BSC Class III) ซึ่งออกแบบมาสำหรับการทำงานกับสารติดเชื้อทางจุลชีววิทยาและกระบวนการที่อันตราย ตู้ปลอดเชื้อมีลักษณะเป็นระบบปิดที่อัดอากาศไม่มีหน้าต่างที่เปิดได้ การนำวัสดุเข้าไปในตู้ปลอดเชื้อมี ต้องทำผ่านถึงบรรจของเหลวซึ่งเข้าถึงได้ทางพื้นตู้ หรือตู้ที่มีประตูสองชั้น (เช่น เครื่องอบความร้อนฆ่าเชื้อ) เพื่อป้องกันการปนเปื้อนขณะใช้งาน และสามารถนำวัสดุจากในตู้ปลอดเชื้อออกมาภายนอกได้อย่างปลอดภัย อากาศที่ผ่านเข้าและออกจากห้องปลอดเชื้อจะผ่านแผ่นกรอง HEPA ก่อน โดยอากาศที่ปล่อยออกจากตู้จะผ่านแผ่นกรอง HEPA 2 ตัว หรือแผ่นกรอง HEPA 1 ตัวกับเตาเผาอากาศ การไหลของอากาศควบคุมด้วยระบบไอเสียแบบเฉพาะที่เป็นอิสระเพื่อรักษาความดันภายในตู้ให้ต่ำกว่าภายนอก ถังมือยางชนิดใช้กับงานหนักจะมีติดอยู่กับตู้เพื่อใช้ในการจัดการวัสดุภายในตู้ แม้ว่าจะเคลื่อนที่ได้อย่างจำกัดในขณะที่ใช้ถังมือ แต่ก็เป็นการป้องกันผู้ใช้จากการสัมผัสวัสดุอันตรายโดยตรงและทำให้เกิดความปลอดภัยสูงสุด

โดยทั่วไปการปิดล้อม (enclosure) แหล่งกำเนิด (เช่น การแยกแหล่งกำเนิดออกจากผู้ปฏิบัติงาน) ควรมีประสิทธิภาพในการจับวัสดุนาโนในอากาศ โดยพิจารณาจากการเคลื่อนที่และพฤติกรรมของอนุภาคนาโนในอากาศ

วัสดุต่าง ๆ เช่น คาร์บอนแบล็ก คิววิตติกา  $TiO_2$  ที่เป็นนาโนสเกล โลหะและโลหะออกไซด์ที่เป็นนาโนสเกล เกิดขึ้นในกระบวนการที่เป็นระบบปิดและมีผู้ใช้ผู้ครอบและแยกส่วนการทำงานอย่างชัดเจน รายงานของ ICON ระบุว่าองค์กรหลายแห่งที่ทำงานเกี่ยวกับวัสดุนาโน มีรายงานการใช้ห้องสะอาด (clean room) โดยแยกส่วนของระบบ HVAC ออกจากกัน นอกจากนี้ยังรายงานถึงการใช้ถุงควบคุมบรรยากาศ (glove bag) และกล่องควบคุมบรรยากาศ (glove box) และระบบท่อปิด ในการแยกวัสดุตกค้างไปเก็บในระบบแยกเก็บ ปัญหาที่มักพบเมื่อใช้ถุงควบคุมบรรยากาศ คือ การเกิดไฟฟ้าสถิต จึงอาจก่อให้เกิดปัญหากับวัสดุนาโนที่ติดไฟ หรือระเบิดได้ ข้อมูลเกี่ยวกับการควบคุมและการแยกส่วนนั้นรวบรวมไว้ในตารางที่ 1

เมื่อการปิดล้อมเกิดการรั่วไหล อนุภาคนาโนสามารถหลุดออกไปสู่ภายนอกและแพร่ไปทั่วโรงงานได้ ดังนั้น จึงต้องทำการศึกษาสมบัติทางอากาศพลศาสตร์ (aerodynamic property) ของอนุภาคนาโนว่ามีความคล้ายกับสมบัติของแก๊สมากเพียงใด จากผลการศึกษาพบว่าอนุภาคนาโนขนาด 10 nm มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำกว่าโมเลกุลของไนโตรเจนหรือออกซิเจนซึ่งมีขนาดประมาณ 0.3 nm

เมื่อกระบวนการแพร่เกิดขึ้น อนุภาคจะเกาะกันแบบหลวมทำให้การกระจายตัวในอากาศลดลง อย่างไรก็ตามการรับสัมผัสทางการหายใจของอนุภาคก้อนเกาะหลวมยังอาจเกิดขึ้นได้ในระหว่างกระบวนการกักเก็บอนุภาคนาโน การบรรจุ การบำรุงรักษา และการทำความสะอาด

**ตารางที่ 1** รายละเอียดของการควบคุมด้วยการปิดล้อมและการแยกส่วนโดยใช้อุปกรณ์เสริม  
(ข้อ 8.3.5.1)

การควบคุม	รายละเอียด
การใช้ถังปิดผนึกสนิทสำหรับเก็บวัสดุ นาโนจากถังปฏิกรณ์	ถังปฏิกรณ์ทำงานภายใต้สุญญากาศ และมีการเก็บแบบอัด โนมัติภายในระบบปิดล็อก อากาศ (air lock) ระบบลือกอากาศทำให้อนุภาคตกค้างถูกกำจัดได้ด้วยสุญญากาศ ระบบนี้ต้องสร้าง ณ สถานที่ปฏิบัติงาน
การสังเคราะห์วัสดุนาโนในระบบปิด	มีการระบายอากาศอัตโนมัติก่อนเปิดและมีระบบทำความสะอาดด้วยตัวเองเพื่อกำจัด วัสดุตกค้าง ระบบนี้เหมาะกับการใช้ในผู้ดูแล
การปรับความดันห้องให้มีความดัน มากกว่าภายนอก	ห้องสะอาดที่มีค่าผลต่างความดันเป็นบวกจะระบายอากาศออกไปยังพื้นที่ที่มี ความดันต่ำกว่าได้
การใช้เครื่องสูบบแบบพกพาสำหรับชุด ของเหลวเข้าถึงเก็บของเสีย	เพื่อป้องกันการรั่วไหลและลดการเกิดละอองลอยของวัสดุ เครื่องสูบบแบบบีบ จะทำให้เกิดละอองลอยน้อยกว่าเครื่องความดันสูง
การใช้ระบบการกั้นเพื่อระเหยตัว ทำละลายในคอลลอยด์ในระบบปิดที่ ป้องกันสภาพที่ระเบิดได้	ระบบปิดล้อมนี้ออกแบบมาโดยคำนึงถึงโอกาสสภาพที่ระเบิดได้ ของวัสดุนาโน
ใช้อุปกรณ์สำหรับกระจายเพื่อเปิด บรรจุภัณฑ์ของอนุภาคนาโนและนำวัสดุ เข้าถึงปฏิกรณ์	เพื่อลดการจัดการวัสดุที่ส่งผล อุปกรณ์กำจัดบรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้วโดยการส่งไปยังถัง ของเสีย เมื่อใช้อุปกรณ์นี้ร่วมกับแผ่นกรอง HEPA ทำให้ได้กระบวนการที่ปลอดภัยจาก การสัมผัสสัมผัสและการปลดปล่อยมลพิษ
ใช้ระบบควบคุมแบบรีโมทกับเครื่อง ผลิตวัสดุนาโน	วิธีนี้จะทำให้เครื่องมือทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมที่แยกสัดส่วน เป็นระบบปิดที่มี ระบบระบายอากาศเข้า-ออก เพื่อทำความสะอาดหรือการบำรุงรักษาจะอนุญาตให้ทำ ได้เฉพาะบุคคลที่ผ่านการฝึกอบรมและสวมเครื่องช่วยหายใจเท่านั้น
ใช้ระบบเตือนภัยในกระบวนการผลิต วัสดุนาโน	ภายในระบบปิดจะมีอุปกรณ์รับรู้ (sensor) 2 ชุดสำหรับวัดการเปลี่ยนแปลงของ ปริมาณออกซิเจนและความดัน ถ้าอุปกรณ์รับรู้ตัวใดตัวหนึ่งถูกกระตุ้นระบบจะหยุด การทำงานเพื่อป้องกันการหลุดรอดของวัสดุนาโนเนื่องจากความผิดพลาดของ เครื่องมือหรืออุบัติเหตุ

8.3.5.2 การตรวจจับแหล่งที่มาของมลพิษ

ในกรณีที่ใช้ระบบปิดไม่ได้ ควรหลีกเลี่ยงกิจกรรมที่ทำให้เกิดฝุ่นหรือละอองลอย อย่างไรก็ตามใน  
บางกระบวนการอาจหลีกเลี่ยงการเกิดฝุ่นและละอองลอยไม่ได้ การตรวจจับแหล่งที่มาของมลพิษ  
เหล่านี้ เช่น การใช้ LEV จึงเป็นทางเลือกที่สามารถป้องกันการแพร่กระจายของวัสดุดังกล่าวใน  
สถานที่ปฏิบัติงาน การปนเปื้อนในพื้นที่ทำงาน และการสูดดมโดยผู้ปฏิบัติงานได้

สมรรถนะของเครื่องมือ LEV สัมพันธ์กับคุณภาพและประสิทธิภาพของการออกแบบ การ  
บำรุงรักษา และความถี่ในการใช้งาน ระบบระบายอากาศต้องผ่านการออกแบบ ทดสอบ และ  
บำรุงรักษาอย่างเหมาะสมตามแนวทางที่แนะนำ เช่น แนวทางที่สอดคล้องตาม ACGIH กำหนดไว้

ว่าระบบการกักเก็บที่มีประสิทธิภาพต้องผ่านการตรวจสอบและจดบันทึกทุกวัน ควรติดตั้งระบบการตรวจวัดในกระบวนการที่สำคัญ (เช่น หลังตู้ดูดควัน หรือผิวหน้าของแผ่นกรอง) ควรตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบระบายอากาศเมื่อติดตั้งใหม่เพื่อให้เกิดความมั่นใจ กระบวนการที่แตกต่างกันทำให้เกิดอนุภาคที่มีขนาดต่าง ๆ กัน โดยอาจมีขนาดนาโนสเกลจนถึงอนุภาคก่อนเกาะหลวมที่ใหญ่กว่า ความเร็วในการตกกระทบ ความเร็วในการตรวจจับ และความเร็วในการเคลื่อนที่ ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของกระบวนการและขนาดอนุภาคที่เกิดขึ้น ระบบที่ออกแบบดีจะใช้งานได้ดีกับวัสดุนาโนจากการผลิตในอากาศ อย่างไรก็ตามหากความเร็วปะทะสูงมาก อาจส่งผลให้เกิดความแปรปรวนของอากาศ ซึ่งทำให้วัสดุหลุดออกจากตู้ดูดควัน เกิดความเสี่ยงในการรับสัมผัสทางลมหายใจ และวัสดุนาโนที่อยู่ในรูปฝุ่นผงหลุดไปยังระบบระบายอากาศเสียได้ ดังนั้น ก่อนการบำรุงรักษาเครื่องมือ ควรทำความสะอาดด้วยสูญญากาศที่มีระบบการกรองประสิทธิภาพสูงและควรเช็ดทำความสะอาดแบบเปียก

การลดมลภาวะโดยการตรวจจับแหล่งกำเนิดด้วยระบบความดันเป็นลบ เป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสำหรับใช้ในการทำงานในระบบวงจรเปิด เช่น กระบวนการผสม การได้กลับคืน การบรรจุถุง หรือการชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ การตรวจจับแหล่งกำเนิดมักใช้กับการเชื่อม การตัด และการพ่นโลหะ กระบวนการเหล่านี้ใช้กันมานานมากและมักก่อให้เกิดอนุภาคที่มีขนาดนาโนสเกลในปริมาณมาก

จากผลการสำรวจของ ICON ตู้ดูดควันเป็นการควบคุมทางวิศวกรรมที่มีการนำมาใช้งานมากที่สุดสำหรับจัดการวัสดุนาโน โดยตู้ดูดควันนำมาใช้กับวัสดุนาโนหลายชนิด เช่น ผงนาโน CNT การกระจายตัวแบบคอลลอยด์ ฟูลเลอร์รีนส์ หัวหมุดควอนตัม พอลิเมอร์ ลวดนาโน ผลึกนาโน และคาร์บอนแบล็ก ระบบกรองอากาศเสียนิยมใช้ในตู้ดูดควัน แผ่นกรองมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ได้แก่ ชนิด HEPA ชนิด non-HEPA ตัวดูดซับเพื่อดูดวัสดุเคมีอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ และไส้กรองขนาดเล็กกว่าไมโครเมตรสำหรับกั้นอนุภาคนาโนที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 nm

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

## ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบลักษณะของ BSC

(ข้อ 8.3.5.2)

BSC Class	ความเร็วตกกระทบ (m/s)	รูปแบบการไหลของอากาศ	การใช้งาน	
			สารเคมีเป็นพิษ และนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ไม่ระเหย	สารเคมีเป็นพิษ และนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ระเหย
I	0.381	เข้าด้านหน้าผ่าน HEPA ไปสู่ภายนอก หรือจากภายในห้องโดยผ่าน HEPA	ใช่	เมื่อระบายอากาศเสียสู่ภายนอก <sup>ก,ข</sup>
II, A1	0.381	หมุนเวียนภายในห้อง 70% โดยผ่าน HEPA และอีก 30% ปล่องผ่าน HEPA กลับไปในห้องหรือทางปล่องควัน	ใช่ (ในปริมาณน้อย)	ไม่ใช่
II, B1	0.508	หมุนเวียนภายใน 30% และระบายออกอีก 70% อากาศที่ออกจากตู้จะต้องผ่าน HEPA	ใช่	ใช่ (ในปริมาณน้อย) <sup>ก,ข</sup>
II, B2	0.508	ไม่มีการหมุนเวียนอากาศ อากาศทั้งหมดจะระบายสู่ภายนอกโดยผ่าน HEPA	ใช่	ใช่ (ในปริมาณน้อย) <sup>ก,ข</sup>
II, A2	0.508	เหมือน II, A1 แต่ความเร็วของอากาศเข้าเป็น 0.508 m/s และความดันภายในตู้ต้องต่ำกว่าความดันในห้อง อากาศเสียส่งออกข้างนอกทางปล่องควัน	ใช่	เมื่อปล่อยอากาศเสียสู่ภายนอก (เดิมเป็น "B3") (ในปริมาณน้อย) <sup>ก,ข</sup>
III	N/A	อากาศเข้าต้องผ่านการกรองด้วย HEPA อากาศเสียต้องผ่าน HEPA 2 ชั้นซ้อนกัน	ใช่	ใช่ (ในปริมาณน้อย) <sup>ก,ข</sup>

<sup>ก</sup> การติดตั้งต้องมีท่อชนิดพิเศษที่เชื่อมต่อภายนอก มีดัดกรองถ่าน และมอเตอร์ป้องกันไฟ (ป้องกันระเบิด) และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ภายในตู้ไม่ควรระบายอากาศจาก BSC Class I หรือ Class II (A2) ไปในห้องเมื่อใช้สารระเหย

<sup>ข</sup> ไม่ควรให้ความเข้มข้นของสารเคมีเข้าใกล้เกณฑ์ต่ำสุดที่จะเกิดสภาพที่ระเบิดได้ ของสารเคมีนั้น ๆ

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

## 8.3.5.3 การระบายอากาศทั่วไป

การระบายอากาศทั่วไป คือการเจือจางอากาศในสภาวะแวดล้อมที่ทำงานและนำสิ่งปนเปื้อนออกไปสู่ภายนอก หากใช้การระบายอากาศแบบทั่วไปสำหรับควบคุมทางวิศวกรรมเพียงอย่างเดียวจะทำให้ผู้ปฏิบัติงานได้รับวัสดุนาโนในขณะที่ทำงานได้ หากใช้ระบบ LEV ในกระบวนการที่เป็น



ระบบเปิดไม่ได้ ควรนำระบบการระบายอากาศแบบแทนที่ (displacement ventilation) มาใช้ เพื่อลดระดับของวัสดุนาโนในพื้นที่โดยมีการสกัดที่ความสูงระดับหลังคาหรือเพดาน

#### 8.3.5.4 การหมุนเวียนและการกรองอากาศ

การกรองมีบทบาทสำคัญในการควบคุมการรับสัมผัสอนุภาคในอากาศ การควบคุมทางวิศวกรรมมักใช้แผ่นกรอง HEPA เพื่อทำความสะอาดอากาศก่อนที่อากาศนั้นจะหมุนเวียนกลับไปในสถานที่ปฏิบัติงาน หรือก่อนระบายออกสู่บรรยากาศ แผ่นกรองเหล่านี้เป็นการกรองเชิงกล จากผลการศึกษาพบว่าระบบระบายอากาศที่ออกแบบมาอย่างดีและมีแผ่นกรอง HEPA สามารถกำจัดอนุภาคนาโนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ถ้ามีการใช้แผ่นกรอง HEPA ในระบบเก็บกักฝุ่น ต้องใช้ร่วมกับเครื่องกรองอากาศ หากแผ่นกรองติดตั้งไม่ดีทำให้อนุภาคเคลื่อนที่โดยไม่ผ่านแผ่นกรอง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกรองต่ำกว่าที่ควรจะเป็น

ในบางกระบวนการที่จำเป็นต้องใช้อากาศใหม่ ต้องมีการดูดเอาอากาศบางส่วนที่ใช้ในการเก็บและการกรองออกไป และอากาศที่ระบายออกไปนี้ต้องผ่านการกรองหลายชั้นด้วยตัวดูดซับแบบเปียกหรือตัวดักตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิต การตรวจจับที่ใช้หลักการดึงดูดด้วยไฟฟ้าสถิตนั้นใช้กับอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ การทำความสะอาดแผ่นเก็บทำได้โดยการฉีดของเหลวลงบนแผ่นเก็บด้วยความแรง

การกรองประกอบด้วยกลไกหลายอย่าง โดยมีการจับอนุภาคโดยเส้นใยของแผ่นกรองซึ่งเป็นการแยกอนุภาคออกจากอากาศที่มีประสิทธิภาพ เมื่อละอองลอยเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในแผ่นกรองโดยการเคลื่อนที่ของอนุภาคอาจอยู่ในแนวลมหรือแตกต่างจากแนวลม (เช่น โดยการแพร่) การจับอนุภาคเชิงกลเกิดขึ้นได้โดย

- (1) การสกัดกั้น โดยตรง เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ในทิศของลมส่งผลให้มีการจับอนุภาคโดยเส้นใยแผ่นกรองเมื่ออนุภาคนั้นตกกระทบ
- (2) การตกกระทบด้วยแรงเฉื่อย เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่แตกต่างจากทิศของลมเกิดการจับอนุภาคโดยแรงเฉื่อยของอนุภาคเอง
- (3) การสะสมจากการแพร่ เป็นผลจากทิศของลมและการแพร่แบบบราวน์ ส่งผลให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปปะทะกับเส้นใยของแผ่นกรอง
- (4) การตกจมตามความโน้มถ่วง (gravitational setting)

แผ่นกรองบางชนิดจับอนุภาคด้วยแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) สำหรับการกรองด้วยแผ่นกรองเดี่ยวนั้น มีการกักเก็บอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 300 nm ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดอันเกิดจากการปะทะ การกีดขวาง และการตกจมตามความโน้มถ่วง ในขณะที่อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า

300 nm กักด้วยกระบวนการแพร่หรือการดึงดูดด้วยไฟฟ้าสถิต อนุภาคขนาด 100 nm ถึง 300 nm จะไหลผ่านแผ่นกรองได้โดยไม่ถูกกักไว้ ซึ่งเป็นขนาดที่สามารถทะลุผ่านได้มากที่สุด (MPPS) และมีประสิทธิภาพในการกรองต่ำที่สุด การกรองเชิงกลสำหรับการกักอนุภาคที่มีขนาดในช่วงดังกล่าวต้องอาศัยการแพร่และการกีดขวาง ส่วนการปะทะมีบทบาทน้อย ช่วง MPPS อาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ชนิดของแผ่นกรองและอัตราการไหล

อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 300 nm การแพร่แบบบราวน์เป็นกลไกเชิงกลหลักที่ทำให้เกิดการปะทะของอนุภาคกับเส้นใยของแผ่นกรอง ประสิทธิภาพในการกรองเนื่องจากการแพร่แบบบราวน์เพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคลดลง การแพร่แบบบราวน์เกิดจากการชนกันระหว่างอนุภาคและโมเลกุลของอากาศทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบสุ่ม การเคลื่อนที่แบบสุ่มเพิ่มโอกาสที่อนุภาคเกิดการรับสัมผัสกับส่วนต่าง ๆ ของแผ่นกรองและเกิดการยึดติดไว้ที่ผิวของแผ่นกรองด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์

วิธีการรับรองแผ่นกรอง HEPA ในปัจจุบันไม่จำเป็นต้องทำการทดสอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กกว่า 100 nm ซึ่งมาตรฐานด้านพลังงานของสหรัฐอเมริกา DOE HEPA Filter Test Program ระบุว่าแผ่นกรองต้องผ่านการทดสอบด้วยละอองลอยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแอโรไดนามิก 300 nm โดยต้องมีประสิทธิภาพกักอนุภาคนาโนได้มากกว่า 99.97%

ตามที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น การแพร่แบบบราวน์ทำให้ประสิทธิภาพในการกรองเพิ่มสูงขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคเล็กลง ผลการวิจัยระบุว่า การกรองด้วยแผ่นกรองลดขนาดอนุภาคที่ทะลุผ่านแผ่นกรองได้ถึง 2.5 nm เมื่อคาดการณ์ตามทฤษฎีการกรองแบบเดิม และถ้าอนุภาคมีขนาดเข้าใกล้ขนาดโมเลกุล (เล็กกว่า 2 nm) อนุภาคนั้นจะยึดติดกับเส้นใยของแผ่นกรองไม่ได้ แต่จะสะท้อนกลับเนื่องจากความร้อนได้ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของการกรองยังคงสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคแบบผกผัน ในทางปฏิบัตินั้นการสะท้อนกลับเนื่องจากความร้อนอาจไม่มีนัยสำคัญต่อการกรองอนุภาคนาโนหากแผ่นกรองมีการออกแบบเพื่อให้มั่นใจว่ามีการชนกันของอนุภาคมากพอ

#### 8.3.6 วิธีการบริหารจัดการสำหรับการควบคุมการรับสัมผัสในสถานที่ปฏิบัติงาน

วิธีการบริหารจัดการสำหรับการควบคุมการรับสัมผัสในสถานที่ปฏิบัติงาน เป็นวิธีการเพิ่มเติมจากกระบวนการทางวิศวกรรม แต่ใช้แทนกระบวนการทางวิศวกรรมไม่ได้ การควบคุมด้วยระบบบริหารจัดการช่วยในการรับประกัน (guarantee) ทางอนามัยด้านอุตสาหกรรม (industrial hygiene) ของสภาพแวดล้อมในการทำงาน และในกรณีที่เป็นบริษัทและหน่วยงานวิจัยควรขอคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญด้านชีวอนามัย วิธีการบริหารจัดการเมื่อทำงานกับอนุภาคนาโนขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคนาโนและวัสดุอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง รวมถึงลักษณะการทำงาน

มาตรการทางวิศวกรรมนั้นอาจมีขีดจำกัดในบางกรณี เช่น การควบคุมทางวิศวกรรมนั้นอาจมีเทคนิคที่ยังไม่ก้าวหน้าเพียงพอ หรือนำมาใช้ไม่ได้เนื่องจากค่าใช้จ่ายสูง ในกรณีเหล่านี้นำวิธีการบริหารจัดการเพื่อจำกัดความเสี่ยงในการรับสัมผัสอนุภาคนาโนในสถานที่ทำงานมาใช้ได้ โดยประกอบด้วย

- (1) การปรับปรุงวิธีปฏิบัติงาน
- (2) ลดจำนวนผู้ปฏิบัติงานที่มีโอกาสสัมผัสกับสาร
- (3) จำกัดสิทธิการเข้า-ออกพื้นที่และจำกัดการเข้า-ออก
- (4) จัดให้มีการตรวจสอบสุขภาพส่วนบุคคลที่มีประสิทธิภาพ
- (5) เก็บกวาด และทำความสะอาดเป็นประจำ และทำความสะอาดวัสดุนาโนเมื่อมีการรั่วไหล
- (6) ทำการบำรุงรักษาแบบป้องกัน เพื่อลดความเสี่ยงของการหยุดกระบวนการผลิตนอกแผนงานและเป็นการประกัน (assuring) ความปลอดภัยของการปฏิบัติงาน

#### 8.3.6.1 การเก็บรักษาบันทึก

การเก็บรักษาบันทึกที่มีประสิทธิภาพมีส่วนช่วยให้สถานที่ปฏิบัติงานมีความปลอดภัย และถูกสุขลักษณะ วิธีการเก็บรักษาบันทึกกำหนดไว้ในเอกสารวิธีการปฏิบัติงานในการจัดการสารอันตราย และวัตถุอันตราย ถึงแม้จะมีปริมาณน้อยก็ต้องพิจารณา บันทึกที่ควรเก็บรักษามีดังนี้

- (1) แผนการฝึกอบรม
- (2) การประเมินความเสี่ยง
- (3) การให้บริการและการทดสอบเครื่องมือ (รวมถึงอุปกรณ์ดับเพลิง)
- (4) การเฝ้าระวังสถานที่ปฏิบัติงาน
- (5) การตรวจติดตามสุขภาพ (บันทึกผลการตรวจให้เก็บเป็นความลับ)
- (6) บันทึกอันตรายที่เกิดขึ้นและเหตุการณ์ที่เกือบเกิดอุบัติเหตุ (near miss)
- (7) การบาดเจ็บและการเจ็บป่วยเนื่องจากการปฏิบัติงาน
- (8) การบำรุงรักษาระบบควบคุมทางวิศวกรรมในสถานที่ปฏิบัติงาน การตรวจสอบสภาพประจำวัน และผลการตรวจสอบ
- (9) การบันทึกการกำจัดของเสีย

โดยทั่วไปบันทึกควรจัดเก็บไว้ในสถานที่ที่ผู้จัดการ พนักงาน ตัวแทนพนักงาน และเจ้าหน้าที่ภาครัฐเข้าถึงข้อมูลได้สะดวก (ยกเว้นบันทึกลับ เช่น ผลการตรวจสุขภาพ) เจ้าหน้าที่ภาครัฐอาจกำหนดช่วงเวลาในการเก็บบันทึกและการดำเนินงานในกรณีที่บริษัทเปลี่ยนเจ้าของหรือขายทอดตลาด

### 8.3.6.2 การฝึกอบรม

การฝึกอบรมและการแนะนำที่มีประสิทธิภาพสำหรับวิธีการปฏิบัติงานเพื่อสร้างความมั่นใจในสุขภาพและความปลอดภัยเมื่อจัดกระทำ (handling) กับวัสดุนาโน หัวข้อที่ควรทำการฝึกอบรมในองค์กรที่ใช้วัสดุนาโน ได้แก่

- (1) การจัดกระทำกับวัสดุนาโนอย่างปลอดภัยและ SOP
- (2) อันตรายและความเป็นพิษ
- (3) PPE
- (4) การควบคุมทางวิศวกรรมและการบำรุงรักษาเครื่องมือ
- (5) ขั้นตอนฉุกเฉิน
- (6) การจัดกระทำกับของเสีย
- (7) นิยามของอนุภาคนาโน
- (8) การปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม การขนส่ง และการปกป้องผู้บริโภค
- (9) การเฝ้าระวังการสัมผัส
- (10) ระเบียบข้อกำหนด

แหล่งข้อมูลและแนวทางในการฝึกอบรม รวมถึง ข้อมูลจากหน่วยงานภาครัฐ (เช่น NIOSH, OSHA 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) หรือในสถานการณ์ที่ควบคุมความเสี่ยงด้วยเทคนิคทางวิศวกรรมไม่ได้ วิธีการนี้ไม่นิยมใช้ในการจัดกระทำกับวัสดุนาโน

### 8.3.6.4 อนามัยส่วนบุคคล (personal hygiene)

อนามัยส่วนบุคคลที่มีประสิทธิภาพเป็นสิ่งจำเป็นในการป้องกันสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งเมื่อบุคคลได้รับวัสดุนาโน จะต้องหาข้อมูลว่า (ก) สารนั้นเป็นอันตราย หรือ (ข) สารนั้นอาจเป็นอันตราย แม้ว่าในสถานที่ปฏิบัติงานจะมีวิธีการควบคุมทางวิศวกรรมที่มีประสิทธิภาพ แต่ผู้ปฏิบัติงานก็ยังมีโอกาสได้รับอนุภาคนาโน เช่น ในระหว่างการทำความสะอาดหรือบำรุงรักษา การจัดการอนามัยที่ดีในการทำงานกับอนุภาคนาโนนั้นมีการกล่าวถึงในส่วนถัดไป ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในหลายองค์กรแต่ยังไม่ได้ประเมินประสิทธิภาพของวิธี

อ่างล้างหน้าและฝักบัวเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับสถานที่ปฏิบัติงานเพื่อใช้ในการชำระล้างผิวหนัง บริเวณที่สัมผัสกับฝุ่นหรือของเหลวก่อนออกจากสถานที่ปฏิบัติงาน ฝักบัวฉุกเฉินต้องอยู่ในสภาพพร้อมใช้งานตลอดเวลา

ห้ามสูบบุหรี่ ดื่มน้ำ และรับประทานอาหารในสถานที่ปฏิบัติงาน ยกเว้นในห้องสะอาดที่จัดไว้เพื่อ กิจกรรมเหล่านี้ (โดยแยกบริเวณจากส่วนที่มีวัสดุนาโน) หากมีบาดแผลควรทำแผลและปิดปาก แผลให้เรียบร้อยเพื่อป้องกันการดูดซึมของวัสดุนาโนผ่านผิวหนัง

ควรจัดพื้นที่สำหรับเปลี่ยนเสื้อผ้า โดยเตรียมชุดปฏิบัติงานที่สะอาดไว้ให้ใช้งาน ควรแยกเก็บ เสื้อผ้าส่วนตัวออกจากชุดปฏิบัติงาน และใช้ตู้เก็บ 2 ตู้ในกรณีที่ใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นพิษสูง เพื่อแยกเก็บเสื้อผ้าส่วนตัวและชุดปฏิบัติงานอย่างชัดเจน อีกทั้งไม่ควรนำชุดปฏิบัติงานออกจาก สถานที่ปฏิบัติงานเพื่อหลีกเลี่ยงความเสี่ยงจากการปนเปื้อนสู่ภายนอก และห้ามใช้ลมเป่าและ ไม่ควรทำความสะอาดชุดปฏิบัติงานด้วยตัวเอง

นอกจากนี้ควรวางแผ่นกาวรองเหยียบ (sticky mat) ไว้บริเวณทางเข้า-ออกพื้นที่ปฏิบัติงานเพื่อ ป้องกันวัสดุนาโนที่ติดมากับรองเท้าของผู้ปฏิบัติงานออกสู่นอกอาคาร ต้องมีวิธีปฏิบัติงานวางอยู่ ในที่จัดไว้สำหรับกำจัด PPE เช่น ถุงมือและสิ่งปกปิด นอกจากนี้ต้องมีวิธีปฏิบัติงานสำหรับ กำหนดความถี่ของการเปลี่ยนและการซักอุปกรณ์ส่วนบุคคลที่ใช้ใหม่ได้

#### 8.3.6.5 การทำความสะอาดสถานที่ปฏิบัติงานประจำ (routine) และเมื่อวัสดุนาโนหกั่วไหล

ในขณะที่ยังไม่มีข้อกำหนดที่เกี่ยวกับการทำความสะอาดวัสดุนาโน แนะนำให้ใช้มาตรการทำ ความสะอาดแบบเดียวกับวัสดุที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามควรมีการให้ข้อมูลที่เกี่ยวข้อง กับความเสี่ยงของการรับสัมผัสวัสดุนาโน รวมไปถึงข้อมูลอื่น ๆ ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของช่อง ทางการรับสัมผัสวัสดุนาโนที่แตกต่างกันเพื่อใช้ในการตัดสินใจในการทำความสะอาด ซึ่งรูปแบบ การทำความสะอาดพื้นที่บริเวณปฏิบัติงานในงานประจำ และเมื่อมีวัสดุนาโนหกั่วไหลนั้นมีหลาย วิธี (เช่น การทำความสะอาดโดยการเช็ดแบบเปียก หรือใช้การทำความสะอาดแบบสูญญากาศ (vacuum cleaning) ขึ้นอยู่กับชนิดและเฟสของวัสดุนาโน การทำความสะอาดพื้นที่บริเวณ ปฏิบัติงานนั้นต้องกำจัดฝุ่นผงที่ติดค้างบนพื้น ผนัง และพื้นผิวในการทำงาน ซึ่งควรทำความ สะอาดเป็นประจำเพื่อหลีกเลี่ยงการสะสมและความเสี่ยงของการฟุ้งกระจายของอนุภาคนาโนใน อากาศ หรือสภาพที่ระเบิดได้ (ฝุ่นผงอาจเกิดระเบิดขึ้นได้ ในกรณีที่มีผงโลหะเป็นองค์ประกอบ) รวมถึงการทำความสะอาดอุปกรณ์ทั้งหมดอย่างละเอียดก่อนนำไปซ่อมบำรุง

วิธีทำความสะอาดวัสดุนาโนที่นิยม ได้แก่ การเช็ดแบบเปียก การเช็ดแบบแห้ง และการทำความสะอาดแบบสูญญากาศ ซึ่งส่วนใหญ่การทำความสะอาดวัสดุนาโนมักใช้การเช็ดแบบเปียก และการ ทำความสะอาดแบบสูญญากาศที่มีแผ่นกรองแบบ HEPA หรืออาจใช้ทั้ง 2 วิธีร่วมกันเพื่อเพิ่ม

ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดวัสดุนาโน ซึ่งวิธีการเช็ดแบบเปียกมักผสมสบู่หรือน้ำมันเพื่อช่วยในการทำความสะอาดด้วย ในปัจจุบันมีการจำหน่ายผ้าไมโครไฟเบอร์แบบเปียกหรือแบบไฟฟ้าสถิต (electrostatic microfiber) เพื่อใช้ในการกำจัดอนุภาคนาโนได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งยังลดการฟุ้งกระจายของอนุภาคนาโนในอากาศ ส่วนการทำความสะอาดโดยการเช็ดแบบแห้งนั้นใช้สำหรับการทำความสะอาดสารละลายต่าง ๆ เท่านั้น ถ้าหากใช้วิธีทำความสะอาดแบบสูญญากาศ ควรมีการตรวจสอบแผ่นกรอง HEPA ว่าติดตั้งได้ถูกต้อง และเปลี่ยนถุงกรองและตัวกรองตามคำแนะนำของผู้ผลิต ควรมีการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องทำความสะอาดแบบสูญญากาศที่ใช้แผ่นกรอง HEPA อย่างสม่ำเสมอเพื่อให้แน่ใจว่าปิดผนึกดี รวมทั้งการทดสอบในส่วนอื่น ๆ ด้วย วิธีมาตรฐานในการทำความสะอาดวัสดุนาโนที่เป็นผงและของเหลวที่หกั่วไหล ให้ใช้เครื่องทำความสะอาดแบบสูญญากาศที่มีแผ่นกรอง HEPA การเช็ดผงแบบเปียก การใช้ผ้าชื้นในการเช็ดผงอนุภาคออกไป และการใช้วัสดุหรือของเหลวดูดซับวัสดุนาโนที่หกั่ว

ควรหลีกเลี่ยงการทำความสะอาดด้วยการกวาดแบบแห้งหรือการใช้ลมเป่า ถ้าหากหลีกเลี่ยงไม่ได้ ควรทำความสะอาดด้วยความระมัดระวังเพื่อให้แน่ใจว่าอนุภาคนาโนที่แขวนลอยนั้นถูกกรองด้วยแผ่นกรอง HEPA ในการทำความสะอาดควรหาวิธีที่ป้องกันผู้ปฏิบัติงานจากการสัมผัสกับของเสีย และการกำจัดวัสดุของเสียทุกชนิดให้เป็นไปตามระเบียบที่กำหนด นอกจากนี้ยังพบว่ายังมีเพียงไม่กี่หน่วยงานที่รายงานว่าได้เก็บวัสดุนาโนที่หกั่วแยกไว้ในถังที่มีการปิดผนึก ซึ่งการให้ความรู้เกี่ยวกับอันตรายของวัสดุนาโนนั้นยังไม่กว้างขวางดังนั้นการเช็ดทำความสะอาดวัสดุนาโนควรตระหนักเหมือนกับการทำความสะอาดของเสียอันตราย และไม่ควรทำให้แห้ง หรือนำผ้าเช็ดที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ เพราะอาจทำให้เกิดการกระจายของอนุภาคอีกครั้ง

เมื่อมีการพัฒนาวิธีทำความสะอาดการหกั่วไหลของวัสดุนาโนหรือพื้นผิวที่ปนเปื้อน ควรเพิ่มการพิจารณาการได้รับสัมผัสอนุภาคนาโนระหว่างการทำความสะอาด ซึ่งมีโอกาสได้รับสัมผัสจากการหายใจและทางผิวหนัง จากการพิจารณาดังกล่าวทำให้กำหนดระดับที่เหมาะสมของการใช้ PPE ได้ สำหรับการรับสัมผัสทางการหายใจนั้นการรับสัมผัสจากฝุ่นมีแนวโน้มเกิดขึ้นได้มากกว่าการรับสัมผัสจากของเหลว แต่ในขณะเดียวกันของเหลวอาจทำให้เกิดความเสี่ยงที่สูงกว่าวัสดุนาโนและโครงสร้างนาโน ที่มีการห่อหุ้มหรือการตรึง ความเสี่ยงจากการรับสัมผัสจากของเหลวอาจเกิดจากการที่ของเหลวกลายเป็นละอองลอยของวัสดุ โดยมีรายงานถึงการใช้เครื่องช่วยหายใจขณะทำความสะอาดวัสดุนาโนที่หกั่วไหลด้วย

#### 8.3.6.6 การกำจัดของเสีย

การกำจัดของเสียที่มีวัสดุนาโนนั้น ส่วนใหญ่ทำโดยบริษัทจัดการของเสียซึ่งบางแห่งได้มีการแยกวัสดุนาโนในถังบรรจุของเสีย การติดฉลากบนถังบรรจุของเสียนั้นควรระบุรายละเอียดให้

สอดคล้องกับรหัสสถานที่ที่มีการจัดทำอยู่แล้ว ซึ่งทำให้มีการใช้งานข้อมูลสำหรับวัสดุอันตรายที่เหมาะสม (เช่น ข้อมูลความเป็นอันตรายหาได้จากบทความทางวิชาการ ซึ่งรวมถึงรายงานวิจัยต่าง ๆ) ในการเก็บของเสียอันตรายนั้น ควรใช้ถังแก้ว ถังโลหะ และถังกลมโลหะปิดผนึก

วิธีการกำจัดวัสดุอันตรายซึ่งทำโดยองค์กรที่ไม่ได้ส่งของเสียให้กับบริษัทภายนอกจัดการ มีวิธีการดังต่อไปนี้

- (1) การบำบัดวัสดุอันตรายในบริเวณโรงงานก่อนการกำจัด
- (2) การนำวัสดุอันตรายมาใช้ใหม่
- (3) การเผาวัสดุอันตรายในพื้นที่ (สำหรับวัสดุที่มาจากคาร์บอน)
- (4) การคืนวัสดุอันตรายกลับให้กับผู้ส่งมอบ

#### 8.3.6.7 การป้องกันและควบคุม อักเสบ สภาพที่ระเบิดได้ และการเร่งปฏิกิริยา (fire, explosion and catalysis prevention and control)

หลักการในการจัดการวัสดุอันตรายนั้นใช้เกณฑ์เดียวกับการจัดการผงละเอียด ฝุ่น หรือวัสดุที่เป็นฝุ่น แต่ในกรณีที่เป็นฝุ่นผงโลหะที่เกิดการออกซิไดส์ได้ง่ายจำเป็นต้องเผาระวังอย่างมาก อยากรก็ตามประสิทธิภาพของวิธีการป้องกันและควบคุมอักเสบ การระเบิด และการเร่งปฏิกิริยาของอนุภาคนาโนนั้นยังไม่ได้รับการประเมิน

การจัดการวัสดุอันตรายที่อาจเกิดสภาพที่ระเบิดได้นั้น ประยุกต์จากมาตรการป้องกันสภาพที่ระเบิดระเบิดได้ ที่อธิบายไว้สำหรับการแพร่กระจายของฝุ่นละออง (เช่น โดย OSHA)<sup>51</sup> และสำหรับวัสดุอันตรายที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ ส่วนการจัดการอนุภาคนาโนที่ติดไฟได้นั้นมีหลายมาตรการที่แนะนำให้ใช้ สำหรับวัสดุอันตรายที่ทำปฏิกิริยาได้รวดเร็ว หรือเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ควรป้องกันไม่ให้เกิดการสัมผัสกับสารที่เข้ากันไม่ได้

ในการป้องกันอักเสบควรทำตามระเบียบแบบแผนที่มีการกำหนดไว้โดยเฉพาะข้อกำหนดเกี่ยวกับไฟฟ้า ซึ่งการออกแบบการป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าต้องมีการออกแบบการป้องกันฝุ่น ดังนั้นควรคำนึงถึงอนุภาคละเอียด และใช้เวลานานในการตกลงมาของอนุภาคนาโนด้วย นอกจากนี้ควรเพิ่มความระมัดระวังเกี่ยวกับอุณหภูมิของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ เนื่องจากอาจมีความเสี่ยงในการลัดวงจรด้วยตัวเองของอนุภาคนาโน

การเลือกสารเคมีที่เหมาะสมในการดับเพลิงควรพิจารณาถึงความเข้ากันได้หรือเข้ากันไม่ได้ของสารเคมีที่ใช้ในการดับเพลิงและสารเคมีที่อยู่ในบริเวณที่เกิดอักเสบ เนื่องจากอาจทำให้เกิดการลุกลามหากเลือกไม่เหมาะสม เช่น ฝุ่นโลหะบางชนิดจะทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนและสารอื่น ๆ แก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นสามารถลัดวงจรไฟได้ง่ายและเผาไหม้อย่างรุนแรง ดังนั้นการดับเพลิงจำพวกฝุ่นโลหะนั้นให้ใช้ผงเคมีในการดับเพลิง และในการดับเพลิงที่มาจากผงฝุ่นโลหะ

ควรหลีกเลี่ยงการทำให้อากาศเคลื่อนที่เนื่องจากอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานให้ผงโลหะแขวนลอยในอากาศและเพิ่มความเสี่ยงที่อาจทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างรุนแรง ดังนั้นเพื่อลดความเสี่ยงของการเกิดอัคคีภัยและการเผาไหม้ที่รุนแรงนั้น จำเป็นต้องใช้การผลิตที่มีการควบคุมบรรยากาศและกระบวนการเก็บที่ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไนโตรเจน หรือแก๊สเฉื่อย แต่อาจนำไปสู่อันตรายที่เกิดจากการขาดอากาศหายใจ (asphyxiation) หากเกิดการรั่วไหล

เมื่อมีการทำงานกับวัสดุนาโนที่ระเบิดได้ มีรายงาน ดังนี้

- (1) การใช้รองเท้าและแผ่นรองเท้ากันไฟฟ้าสถิตในบริเวณที่มีการจัดกระทำกับวัสดุนาโน ซึ่งรองเท้าสามารถช่วยลดการสะสมประจุไฟฟ้าอันเป็นสาเหตุของการลุกไหม้ของวัสดุ
- (2) ระบบการกลั่นสำหรับระเหยตัวทำละลายออกจากการกระจายตัวของคอลลอยด์ซึ่งควรติดตั้งระบบอยู่ภายในระบบปิดที่ป้องกันระเบิด ซึ่งออกแบบโดยคำนึงถึงโอกาสการเกิดระเบิดของวัสดุนาโน

#### 8.3.6.8 การเก็บรักษา

การเก็บวัสดุนาโน ต้องป้องกันเป็นพิเศษ เพื่อความปลอดภัยต่อสุขภาพและความปลอดภัยในสถานที่ปฏิบัติงาน ต้องบันทึกรายละเอียด และวิธีเก็บของวัสดุนาโนที่เหมาะสม

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

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



8.3.6.9 มาตรการป้องกันอื่น ๆ

มาตรการป้องกันเกี่ยวกับความปลอดภัยจากกระบวนการผลิตวัสดุนาโน ควรพัฒนาและนำมาใช้ เพื่อป้องกันการขาดอากาศหายใจและไฟฟ้าช็อต ในกระบวนการผลิตอนุภาคนาโนนั้นมีความเสี่ยง ของการขาดอากาศหายใจซึ่งเกิดจากการใช้แก๊สเฉื่อยในปริมาณมาก และอาจมีความเสี่ยงจากไฟฟ้า ช็อตเนื่องจากการเกิดพลาสมาจากการใช้กระแสไฟฟ้าสูง

ขั้นตอนสำหรับการตอบโต้แบบฉุกเฉิน รวมถึงการใช้อุปกรณ์ป้องกันแบบฉุกเฉิน ควรพัฒนา รูปแบบเฉพาะในการปฐมพยาบาลเบื้องต้น

8.3.7 การประเมินสิ่งแวดล้อมในที่ทำงาน

ขอข่ายการศึกษาและวิธีการประเมินการรับสัมผัสอนุภาคนาโนนั้นดูรายละเอียดได้ในข้อ 6. เรื่องการ รับสัมผัสวัสดุนาโน และภาคผนวก ง. วิธีการวัดการรับสัมผัสวัสดุนาโนผ่านทางหายใจ สำหรับการ ตรวจสอบติดตาม และการประเมินสิ่งแวดล้อมในที่ทำงานเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพนั้นควรปฏิบัติตาม แนวทางที่ได้อธิบายไว้ข้อ 8.3.3 ถึงข้อ 8.3.6 สิ่งที่ได้จากการประเมินทำให้ทราบว่าต้องมีการใช้ PPE หรือไม่

การวัดอนุภาคนาโนที่ปนเปื้อนในอากาศนั้น ในปัจจุบันการวัดการรับสัมผัสวัสดุนาโนโดยตรงจาก บุคคลทำได้ยาก เนื่องจากอุปกรณ์การวัดส่วนใหญ่ไม่ได้ออกแบบให้สามารถพกพาไปกับบุคคลได้ นอกจากนี้การตรวจวัดการรับสัมผัสของบุคคลโดยตรงแล้ว ยังมีวิธีการประมาณค่าทางสถิติในส่วนของ ความเข้มข้นของการรับสัมผัสส่วนบุคคลจากความเข้มข้นที่สัมผัสในอากาศซึ่งวัดจากสถานที่ ปฏิบัติงานในเวลาทั่วไป หรือสุ่มช่วงเวลาในการวัด โดยอธิบายวิธีการหาค่าประมาณความเข้มข้นเฉลี่ย ทางคณิตศาสตร์ (arithmetical average concentration) และขีดจำกัดบนของความเข้มข้นที่รับสัมผัส (upper limiting exposure concentration)

(1) ความเข้มข้นเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ (C1)

ค่าความเข้มข้นนี้บอกถึงความเข้มข้นที่สัมผัสของแต่ละบุคคลที่ปฏิบัติงานเป็นประจำในสถานที่ ปฏิบัติงาน ค่าความเข้มข้นนี้หาได้จาก

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

เมื่อ

Mg คือ ค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิตของความเข้มข้นที่วัดได้

SDg คือ ค่าเบี่ยงเบนทางเรขาคณิตของความเข้มข้นที่วัดได้

(ที่มา : ISO/TR 12885)

## (2) จี๊ดจำกัดบนของความเข้มข้นที่รับสัมผัส (C2)

ค่าจี๊ดจำกัดบนของความเข้มข้นที่รับสัมผัสหมายถึงระดับที่ 5% ของความเข้มข้นในอากาศทั้งหมดที่วัดได้ในช่วงเวลาใด ๆ และที่ใด ๆ ในสถานที่ปฏิบัติงานซึ่งมากกว่าจี๊ดจำกัดของการรับสัมผัส โดยค่าความเข้มข้นนี้หาได้จาก

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

**หมายเหตุ** สมมุติว่าเป็นการกระจายล็อกแบบปกติ (*lognormal distribution*) ของความเข้มข้นของอนุภาคในอากาศในสถานที่ปฏิบัติงาน

การใช้วิธีการเหล่านี้ทำให้ประเมินสิ่งแวดล้อมในสถานที่ปฏิบัติงานได้โดยไม่ต้องวัดความเข้มข้นที่รับสัมผัสของแต่ละบุคคล

## 8.3.8 อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล (PPE)

มาตรการป้องกันอันตรายทางวิศวกรรมและการบริหารจัดการนั้นควรใช้เสริมกับ PPE เช่น การใช้ RPE ถุงมือป้องกัน แวนครอบตาป้องกัน เสื้อคลุมที่ป้องกันทั้งตัว ในทางปฏิบัตินั้นองค์กรที่ทำงานด้านนาโนเทคโนโลยีซึ่งสำรวจโดย ICON แนะนำให้ผู้ปฏิบัติงานและนักวิจัยใช้ PPE ซึ่งโดยปกติแล้วการสวมใส่ในห้องปฏิบัติการทั่วไปก็ถือว่าการป้องกันอันตรายอย่างหนึ่ง

## 8.3.8.1 การป้องกันการรับสัมผัสทางการหายใจ-การใช้ RPE แบบตัวกรอง และ SAR

การใช้ RPE แบบตัวกรอง (สำหรับกรองอากาศ) หรือ SAR นั้น เป็นเพียงอุปกรณ์เสริมที่ใช้ในการป้องกันการรับสัมผัสทางการหายใจ แต่ใช้แทนการควบคุมทางวิศวกรรมและการบริหารจัดการไม่ได้ เมื่อใดก็ตามที่การควบคุมนั้นไม่ดีพอที่จะป้องกันการรับสัมผัสของผู้ปฏิบัติงานจากสารปนเปื้อนในอากาศให้อยู่ในระดับต่ำกว่าที่กำหนด หรือต่ำกว่าเป้าหมายที่ควบคุมภายใน การใช้ RPE เป็นส่วนหนึ่งของการลดการรับสัมผัสทางการหายใจ โดยผลการตรวจสอบเบื้องต้นแสดงให้เห็นถึง RPE สามารถช่วยผู้ปฏิบัติงานในการป้องกันการรับสัมผัสอนุภาคนาโนได้

การป้องกันการรับสัมผัสทางการหายใจนั้น ควรอ้างอิงการประเมินความเสี่ยงหลังจากที่ได้จัดการควบคุมปัจจัยอื่น ๆ หมดแล้ว ส่วนการประเมินความเสี่ยงนั้นยังไม่มีข้อจำกัดในการรับสัมผัสอนุภาคนาโนที่ปนเปื้อนในอากาศ ดังนั้นในการพิจารณานำข้อจำกัดของการรับสัมผัสวัสดุนาโนนั้น สามารถใช้ข้อมูลการประเมินความเสี่ยงของอนุภาคนาโนขนาดใหญ่ที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมือนกันได้ และนำข้อมูลความเป็นพิษของสารนั้นมาใช้ อย่างไรก็ตาม หลักฐานทางวิทยาศาสตร์ในปัจจุบันแสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาทางชีวภาพได้มากกว่าอนุภาคนาโนขนาดใหญ่ที่มีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกันและมวลเท่ากัน และอาจนำไปสู่ความเสี่ยงต่อสุขภาพเมื่อมีการหายใจรับวัสดุเข้าไป

ประสิทธิภาพในการควบคุมทางวิศวกรรม การบริหารจัดการ และขั้นตอนในการปฏิบัติงาน สามารถประเมินโดยใช้เทคนิคการวัดซึ่งอธิบายไว้ในข้อ 6. ถ้าคำนึงถึงการรับสัมผัสอนุภาคนาโนที่ปนเปื้อนในอากาศของผู้ปฏิบัติงานหลังจากที่มีการจัดทำมาตรการต่าง ๆ ในการควบคุมการรับสัมผัสแล้ว การนำ RPE มาใช้เพื่อลดการรับสัมผัสอนุภาคนาโน ในโปรแกรมการป้องกันระบบทางเดินหายใจ อย่างน้อยควรประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

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

ข้อมูลสำหรับผู้ปฏิบัติงานในการใช้ RPE คู่มือได้จากมาตรฐาน RPE ของ US OSHA's ตาม 29 CFR 1910.134

RPE มีหลายชนิด แตกต่างกันในระดับในการปกป้องซึ่งต้องทำการทดสอบกับผู้ปฏิบัติงานถึงประสิทธิภาพในการสวมใส่ หลายองค์กรได้แนะนำให้ใช้เกณฑ์การตัดสินใจเลือก RPE ตามค่า APF แสดงในภาคผนวก จ. ตารางที่ จ.2 และข้อดี-ข้อเสียของ RPE แสดงในตารางที่ จ.3

ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคโดยแผ่นกรองนั้นตรวจสอบรายละเอียดตามข้อ 8.3.5 เทคนิคการควบคุมทางวิศวกรรม ซึ่ง MPPS ของแผ่นกรองส่วนใหญ่อยู่ที่ 300 nm ทั้งนี้ MPPS อาจแปรเปลี่ยนไปตามชนิดตัวกลางของแผ่นกรองที่ใช้ อัตราการไหล และสภาวะที่ใช้ในการป้องกันการหายใจ เช่น MPPS ของแผ่นกรองชนิด HEPA อยู่ระหว่าง 100 nm กับ 300 nm ในขณะที่ APR ชนิด N95 นั้น มีแผ่นกรองที่มีประจุไฟฟ้าสถิตย์อยู่ ขนาดของอนุภาคที่ผ่านได้ประมาณ 30 nm ถึง 70 nm และประมาณ 50 nm ถึง 100 nm โดยประสิทธิภาพในการกรองเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคเล็กลงเนื่องจากการกระจายตัวของอนุภาค

แต่ปัจจุบันยังไม่มีวิธีการมาตรฐานในการตรวจสอบแผ่นกรองสำหรับอนุภาคที่มีขนาดต่ำกว่า 100 nm อนึ่ง มีงานวิจัยระบุว่า RPE ช่วยป้องกันอนุภาคนาโนได้ 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 l/min อย่างไรก็ตาม รายงานอีกฉบับหนึ่งได้ทำการเปรียบเทียบการทะลุผ่านของอนุภาคโซเดียมคลอไรด์ผ่าน RPE แบบครอบกระชับเต็มใบหน้า ชนิด N95 ที่รับรองโดย NIOSH จำนวน 5 ตัวอย่าง ที่อัตราการหายใจ 85 l/min โดยแบ่งการทดสอบเป็น 2 วิธีคือ 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 แบบรุ่น ที่มีค่าเกิน 5 % จากผลการทดสอบทั้ง 2 วิธี ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยการทะลุผ่านของละอองลอยที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอ กับค่าเฉลี่ยการทะลุผ่านของละอองลอยที่มีขนาดสม่ำเสมอ 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 แบบครอบเต็มหน้า และตัวกรองแบบตลับ ชนิด N95 และชนิด P100 (จาก 2 แบบรุ่น แบบรุ่นละ 4 แผ่นกรอง) มีแนวโน้มเป็นดังนี้

- (1) ค่าการทะลุผ่านมีค่าแตกต่างกันภายในกลุ่ม RPE ได้แก่ ในการทดสอบกลุ่มของแผ่นกรอง P100 และในการทดสอบภายในกลุ่มของแผ่นกรอง N95
- (2) ค่า MPPS ของตัวกรองแบบตลับชนิด P100 อยู่ระหว่าง 100 nm กับ 200 nm และอาจเลื่อนไปสู่ระดับค่าที่ต่ำกว่าของช่วงเมื่อเพิ่มอัตราการไหล สำหรับค่า MPPS ของตัวกรองแบบตลับชนิด N95 อยู่ระหว่าง 50 nm กับ 100 nm สำหรับทุกสภาวะการไหล และค่า MPPS ของ RPE แบบครอบเต็มหน้าทั้ง P100 และ N95 อยู่ระหว่าง 50 nm กับ 100 nm
- (3) อนุภาคขนาด 50 nm ที่อัตราการไหล 85 l/min ค่าเฉลี่ยการทะลุผ่าน อยู่ในช่วง
  - <0.0001% ถึง 0.002% สำหรับตัวกรองแบบตลับชนิด P100
  - 0.7% ถึง 8.8% สำหรับตัวกรองแบบตลับชนิด N95
  - 0.01% ถึง 0.048% สำหรับ RPE แบบครอบกระชับเต็มใบหน้า ชนิด P100 และ
  - 2.8% ถึง 9.7% สำหรับ RPE แบบครอบกระชับเต็มใบหน้าชนิด N95

การเลือกใช้ RPE ชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานที่จำเพาะเจาะจงและวัสดุที่ต้องจัดกระทำ โดยมีรายงานว่ามิชชีกำหนดของแผ่นกรองจำนวนหนึ่งได้นำมาใช้โดยองค์กรที่ต้องทำงานกับวัสดุ นาโน หลายองค์กรได้นำตัวกรองแบบดักจับ (cartridge respirator) ทั้งแบบที่เป็นหน้ากากครอบเต็ม ใบหน้า (full-face mask) และแบบครึ่งหน้ามาใช้จำนวนมาก บางหน่วยงานระบุว่า RPE แบบใช้ แล้วทั้งนั้นควรให้ผู้ปฏิบัติงานนำไปใช้ขณะที่มีการปฏิบัติงานกับวัสดุนาโน โดย RPE แบบใช้แล้ว ทั้งบางชนิด เช่น RPE ชนิด N/R/P95/99/100 ที่ได้รับการรับรองมาตรฐานจาก US NIOSH ในขณะที่ หน้ากากที่มีราคาถูกบางชนิดมักไม่ได้รับการทดสอบและไม่ได้รับการรับรองจากหน่วยงานที่ ได้รับการรับรองใดๆ ดังนั้น หน้ากาก และ RPE ที่ไม่ได้รับการรับรองไม่ควรนำมาใช้ในการ ป้องกันการรับสัมผัสอนุภาคนาโน เนื่องจากผู้ใช้งานไม่มั่นใจว่าได้รับการป้องกันในระดับที่ เหมาะสม

แนะนำให้ให้นำ RPE มาใช้ทุกครั้งเมื่อมีการจัดการกับฝุ่นผง (โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องทำงานกับ ฝุ่นผงในปริมาณมาก) และใช้สำหรับงานบำรุงรักษาเครื่องจักรในการผลิต ตัวอย่างของการใช้ RPE สำหรับการเก็บตัวอย่างและรวบรวมข้อมูลระหว่างการทำงานเกี่ยวกับการผสมวัสดุแสดงในรูปแบบที่ 3 RPE ของแต่ละบุคคลที่ใช้ในแต่ละตำแหน่งซึ่งมีการผลิตวัสดุนาโนในรูปแบบของฝุ่นผงควรมี ประสิทธิภาพที่สูง โดยบางหน่วยงานแนะนำให้มีการสวมใส่หน้ากากแบบเต็มหน้าซึ่งควรมีแผ่น กรองที่มีประสิทธิภาพสูง (ประสิทธิภาพมากกว่า 99.97%)



รูปที่ 3 การใช้ RPE สำหรับการเก็บตัวอย่างและการรวบรวมข้อมูล ระหว่างการทำงานเกี่ยวกับการผสมวัสดุ (ข้อ 8.3.8.1)

ความถี่ในการเปลี่ยนตัวกรองแบบตลับ และ/หรือ การกำจัด RPE แบบครอบเต็มใบหน้า ควรพิจารณาอย่างระมัดระวังและควรดำเนินการก่อนที่ผู้ปฏิบัติงานรู้สึกหายใจลำบาก หรือก่อนสุดคมไอของสารเคมี หรือเกิดการอุดตันของตัวกรอง ตารางการเปลี่ยนหรือการกำจัด RPE เหล่านี้ควรทำบ่อยครั้งขึ้นเมื่อมีการผลิตวัสดุนาโนในปริมาณที่สูงขึ้นและเมื่อองค์กรต้องมีการปฏิบัติงานกับวัสดุนาโนที่เป็นฝุ่นผงแห้ง

ปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของ RPE ต่อฝุ่นผง คือการที่ฝุ่นผงทะลุผ่านแผ่นกรองไปไม่ได้ อย่างไรก็ตามอาจมีรอยรั่วทางอ้อมจากผนึกที่ปิดหน้าอยู่ของอุปกรณ์ รอยรั่วจากผนึกที่ปิดหน้านั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ รวมทั้ง ความพอดีของหน้ากากกับใบหน้า ช่วงเวลาในการใส่ และกิจกรรมในการปฏิบัติงาน ความสะดวกของผู้สวมใส่และการบำรุงรักษาอุปกรณ์นั้นมักเป็นประเด็นสำคัญของ RPE ด้วยเช่นกัน เนื่องจากอนุภาคนาโนละอองลอยนั้นสามารถเคลื่อนที่ได้เร็ว ดังนั้นโอกาสในการรั่วออกมาอาจเกิดขึ้นได้ถึงแม้ว่าอาจเกิดน้อยกว่าก๊าซก็ตาม ทั้งนี้อนุภาคละอองลอยอาจยึดติดแน่นบนพื้นผิวที่เกาะอยู่ ซึ่งมีงานวิจัยจำนวนมากศึกษาเกี่ยวกับรอยรั่วของหน้ากากของอนุภาคขนาดใหญ่และก๊าซหรือไอต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น งานวิจัยที่ทำโดย RDECOM ซึ่งทำแบบจำลองของศีรษะแสดงให้เห็นถึงรอยรั่วของหน้ากาก (จำลองโดยใช้ปัจจัยของการสวมใส่ที่พอดีของ RPE) ที่วัดโดยใช้ละอองลอยขนาดเล็กมากกว่าไมโครเมตร (ใช้อนุภาคพอลิสไตรีนลาเทคซ์แบบทรงกลม ขนาด 720 nm) ซึ่งเป็นตัวแทนของไอต่าง ๆ เช่น ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (sulfur hexafluoride) และไอโซเอมิลแอซิเตต (isoamyl acetate)

การป้องกันในระดับสูงขึ้นไปทำได้โดยใช้ PAPR ซึ่งประกอบด้วยตัวกรองที่มีประสิทธิภาพสูง และมีเครื่องสูบอากาศที่ช่วยกรองอากาศที่เข้าสู่หน้ากากแบบเต็มใบหน้า กระแสอากาศที่เกิดขึ้นที่ใบหน้าผู้สวมใส่ อาจเพิ่มระดับการป้องกันด้วยการควบคุมความดันบวกภายในหน้ากาก ซึ่งจะทำให้ผู้สวมใส่รู้สึกสบายมากขึ้นและลดการรับสัมผัสเมื่อหน้ากากนั้นมีรอยรั่วหรือช่องว่างอยู่ในกรณีที่ APF ของ PAPR นั้นไม่เพียงพอหรือเมื่อความเข้มข้นอนุภาคละอองลอยนั้นมีผลในแบบ IDLH จำเป็นต้องใช้ RPE ชนิดที่มีการใช้ท่ออากาศ (airline respirator) หรือ SCBA

#### 8.3.8.2 การป้องกันการรับสัมผัสทางผิวหนัง (dermal protection)

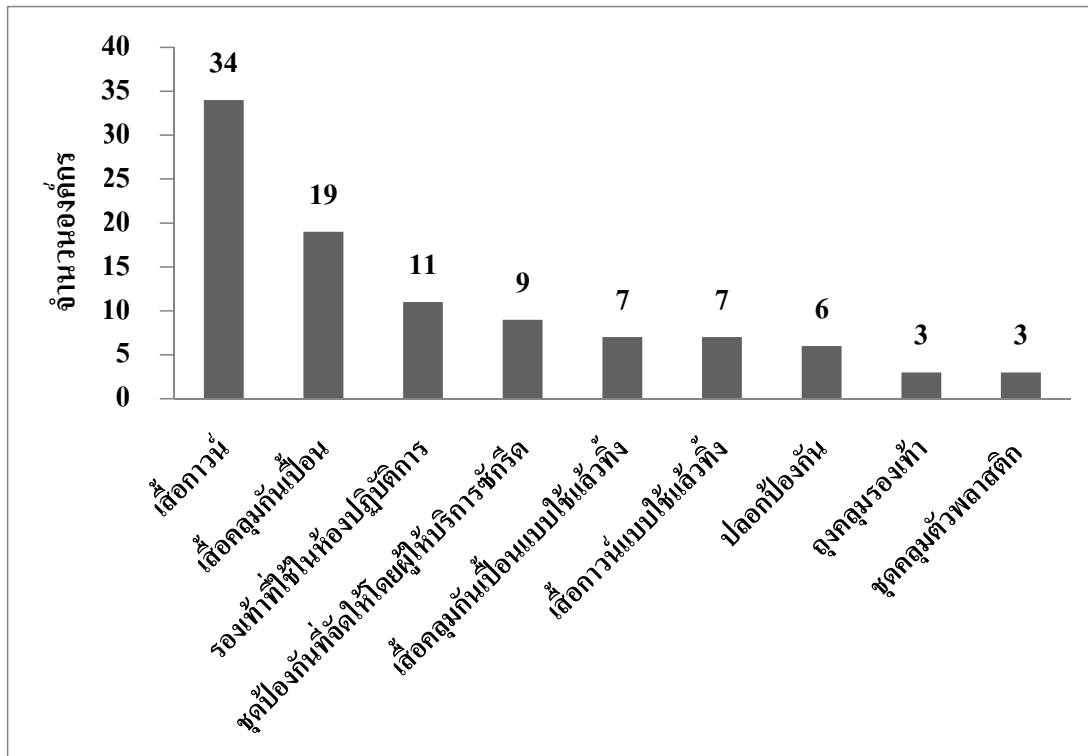
การรับสัมผัสผ่านทางผิวหนังอาจเกิดขึ้นระหว่างการผลิต ใช้งาน และจัดกระทำกับอนุภาคนาโน สำหรับการผลิตวัสดุนาโนนั้น การรับสัมผัสส่วนใหญ่เกิดขึ้นในขั้นตอนการเก็บกู้และบรรจุหีบห่อผลิตภัณฑ์ และจากการที่มีวัสดุนาโนปนเปื้อนบนพื้นผิว เช่น ระหว่างกระบวนการบำรุงรักษาสถานที่ปฏิบัติงานและเครื่องจักร จึงจำเป็นต้องมีการใช้ SPE เมื่อหลีกเลี่ยงการรับสัมผัสไม่ได้ตลอดเวลา SPE จำเป็นต้องมีประสิทธิภาพในการป้องกันผิวหนังจากวัสดุนาโนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก เช่น จากการวิจัยภายใต้โครงการ EU Nanosafe 2 พบว่าอนุภาคนาโนสามารถทะลุ

ผ่านถุงมือที่มีจำหน่ายทางการค้า ดังนั้นจึงแนะนำให้ใช้ถุงมืออย่างน้อย 2 ชั้น นอกจากนี้ยังพบว่าผ้าไม่ทอ (non-woven fabric) มีแนวโน้มในการป้องกันการทะลุผ่านของอนุภาคนาโนได้มีประสิทธิภาพกว่า และไม่แนะนำให้ใช้ชุดป้องกันที่ทำจากผ้าฝ้าย

สารประกอบอนุภาคนาโนที่ละลายได้ ทะลุผ่านผิวหนังโดยการแตกตัวและการดูดซึม อย่างไรก็ตามอนุภาคนาโนที่ไม่ละลายบางชนิดก็ทะลุผ่านผิวหนังชั้นกำพริ้ว และมีโอกาสเดินทางเข้าสู่กระแสโลหิตซึ่งแพร่กระจายไปทั่วร่างกายได้ เนื่องจากในปัจจุบันยังขาดข้อมูลความรู้เกี่ยวกับแนวโน้มความเสี่ยงของวัสดุนาโนต่อสุขภาพ และไม่มีมาตรฐานการได้รับวัสดุนาโนผ่านทางผิวหนังกำหนดไว้ จึงแนะนำให้มีการนำมาตรการควบคุมเพื่อแยกหรือจำกัดระดับของการรับสัมผัสทางผิวหนังที่อาจเกิดขึ้นได้ไว้ก่อน

การรับสัมผัสผ่านทางหายใจ COSHH ได้ให้กรอบความคิดในด้านยุทธศาสตร์การป้องกัน หรือควบคุมการรับสัมผัสผ่านทางผิวหนังไว้ เช่น มาตรการควบคุมการรับสัมผัสทางการหายใจ ให้พิจารณาการใช้ผนังปิดล้อมกระบวนการเป็นลำดับแรก และกระบวนการที่มีการจัดการกับผงนาโนสามารถทำในระบบปิดอย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่อยู่ในช่วงการพัฒนา สิ่งที่ต้องเน้นย้ำคือการลงทุนในด้านการออกแบบการป้องกันสิ่งไม่พึงประสงค์ไว้ล่วงหน้า ระหว่างการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่อยู่ในสถานะของการพัฒนา ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวอาจช่วยลดค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการใช้มาตรการควบคุมและกระบวนการอัตโนมัติที่มีความซับซ้อนสำหรับจัดการงานที่เกี่ยวข้อง เช่น การเก็บเกี่ยววัสดุนาโน และการบรรจุวัสดุนาโน ถึงแม้ว่าจะมีการใช้กระบวนการต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วเพื่อควบคุมการรับสัมผัส แต่เมื่อมีการชำรุดหรือการซ่อมบำรุงอุปกรณ์ใด ๆ เกิดขึ้น ควรให้ความสำคัญเสมอว่าเราไม่สามารถหลีกเลี่ยงการรับสัมผัสทางผิวหนังได้ตลอดเวลา จึงควรใช้ SPE ทางผิวหนัง ด้วยทุกครั้ง ได้แก่ การสวมชุดป้องกัน ถุงมือ และชิ้นส่วนป้องกันร่างกายอื่น ๆ

ชุดป้องกันที่องค์กรที่ทำงานกับวัสดุนาโนแนะนำให้ผู้ปฏิบัติงาน หรือนักวิจัยในองค์กรใช้ แสดงดังรูปที่ 4 วัสดุที่ใช้ทำเสื้อกาวน์ทำจาก ฝ้าย ไนลอน และวัสดุใช้แล้วทิ้ง สำหรับงานที่ต้องมีการรับสัมผัสในปริมาณที่สูง แนะนำให้ใช้ชุดที่ใช้แล้วทิ้ง สำหรับวัสดุที่ใช้ทำถุงมือนั้นมีความหลากหลายแต่ที่นิยมใช้คือ ไนไตรล์ ลาเท็กซ์ และยางกับวัสดุอื่น ๆ รวมทั้ง พีวีซี พอลิเอทิลีน นิโอพรีน และหนัง ซึ่งรูปแบบการใช้ถุงมืออาจเป็นถุงมือที่มีความยาวคลุมข้อมือ สวม 2 ชั้น หรือมีสายรัดข้อมือ องค์กรส่วนใหญ่เลือกใช้ถุงมือโดยดูจากตัวทำละลายที่ใช้งานอยู่ ร่วมกับความเข้ากันได้ทางเคมีกับงานที่ใช้อยู่ นอกจากนี้ยังมีการใช้ PPE อื่น ๆ เช่น หมวกคลุมผม รองเท้ากันไฟฟ้าสถิต ในบริเวณที่ทำงานกับวัสดุนาโนที่มีสมบัติที่ระเบิดได้



รูปที่ 4 ประเภทของชุดป้องกันที่องค์กรแนะนำให้ใช้เมื่อทำงานกับวัสดุนาโน

(ข้อ 8.3.8.2)

การบำรุงรักษาอุปกรณ์ป้องกันผิวหนังเป็นสิ่งสำคัญที่ควรมีการพิจารณา ถ้าในการปฏิบัติงานนั้น พิสูจน์ได้ว่าการบำรุงรักษาและการทำความสะอาด SPE มีความยุ่งยาก ดังนั้นจึงควรเลือกใช้เสื้อผ้าแบบใช้แล้วทิ้ง เช่น เสื้อคลุมที่มีที่คลุมศีรษะ ผ้ากันเปื้อน และผ้าคลุมรองเท้า ซึ่งป้องกันผิวหนังได้เป็นอย่างดี หลักการนี้ประยุกต์กับถุงมือได้เช่นเดียวกัน ซึ่งถุงมือมีอยู่หลายแบบทั้งขนาดที่หลากหลายและทนต่อสารเคมีหลายชนิดได้ รวมทั้งทนต่อการขาดและการเกิดเป็นรู โดยทั่วไปแล้วการเสื่อมสภาพของถุงมือเกิดขึ้นได้ขณะใช้งานจึงต้องมีการเปลี่ยนถุงมือเป็นปกติ โดยต้องมีขั้นตอนการทำงานในที่ใช้งานการกำจัด PPE (เช่น ถุงมือและเสื้อคลุม) รวมทั้งควรมีการระบุถึงความถี่ของการเปลี่ยนและวิธีการทำความสะอาดของ PPE ที่ไม่ได้อยู่ในกลุ่มใช้แล้วทิ้งด้วย

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพของ SPE แล้ว อธิบายกลไกการเกิดการปนเปื้อนทางผิวหนังขณะเมื่อใช้ SPE ไว้แล้ว กลไกนี้ได้แก่ 1) การทะลุผ่าน หรือการซึมผ่านของวัสดุที่ใช้ทำ SPE 2) การถ่ายเทของสารระหว่างผิวของ SPE กับผิวหนังของคน 3) การถ่ายเทของสารผ่านการรับสัมผัสโดยตรงของผิวหนังของคนกับพื้นผิวที่มีการปนเปื้อน และ 4) การกระจายซ้ำของสารโดยการสัมผัสกับผิวจากผิวสู่ผิว เช่น ผลจากการเอานิ้วมือที่เปื้อนสารไปสัมผัสกับใบหน้า

การส่งถ่ายสารปนเปื้อนทะลุผ่านเสื้อผ้าที่ซึมผ่านได้เกิดขึ้นโดยการทะลุผ่านของละอองลอยและการส่งถ่ายของของเหลว ความดันอากาศภายนอกและการเกิดผลกระทบบेलโล (bellows effect)



เช่น การขับออก การเข้ามาระหว่างการเคลื่อนที่ของอากาศ จัดเป็นแรงขับเคลื่อนในการทะลุผ่านของ ละอองลอยผ่านผ้าได้ ในขณะที่กลไกของการส่งผ่านของของเหลวเกิดจากการทะลุผ่านรูเล็ก (capillary penetration) การทะลุผ่านด้วยความดัน (pressure penetration) การทะลุผ่านด้วยแรงปะทะหรือแรงกระแทก (impact penetration) และการระเหย-การควบแน่น (evaporation-condensation) การส่งผ่านของมวลผ่านเสื้อผ้าที่ซึมผ่านไม่ได้ เป็นกระบวนการแพร่จากความเข้มข้นของสาร

การทดสอบในสหภาพยุโรป การรับรอง PPE ที่มีต่อการรับสัมผัสทางผิวหนังนั้นคำนึงถึงเฉพาะ การซึมผ่านหรือการทะลุผ่านของวัสดุเท่านั้น อย่างไรก็ตามได้มีการนำเสนอการทดสอบแบบใหม่ โดยคำนึงถึงปัจจัยจากบุคคลด้วย เช่น การทดสอบประสิทธิภาพของ SPE ในสถานที่ปฏิบัติงานจริง และ/หรือ การจำลองสถานที่ปฏิบัติงาน

เป็นที่ยอมรับว่า SPE มีข้อจำกัดในส่วนของประสิทธิภาพในการลดหรือควบคุมการรับสัมผัสทางผิวหนังแม้ว่าผงจะมีขนาดมากกว่า 100 nm ก็ตาม โดยมีการประเมินประสิทธิภาพในการทะลุผ่าน เช่น ประเมินเป็นแบบร้อยละการทะลุผ่าน สำหรับผ้าที่แตกต่างกัน 10 ชนิด เช่น ผ้าใยถักทอ ผ้าใยสังเคราะห์ ผ้าที่มีชั้นบางซ้อนกัน โดยทดสอบการทะลุผ่านของละอองลอยของยางพอลิสไตรีนแบบทรงกลมซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 477 nm ผลการตรวจวัดการทะลุผ่านของอนุภาคนาโนพบว่ามีความอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0% ถึง 54% ของการทะลุผ่านผ้าทั้ง 3 ชนิด และความดันอย่างมีนัยสำคัญ คือ การซึมผ่านของอากาศน้อยที่สุดซึ่งทำให้มีระดับการทะลุผ่านในระดับที่น้อยกว่า 1% ทั้งนี้ยังไม่มีข้อมูลในส่วนของประสิทธิภาพของ SPE ต่อการทะลุผ่านของอนุภาคนาโนโดยตรง หรือข้อมูลที่ระบุถึงผลกระทบของอนุภาคนาโนต่อโอกาส การที่ SPE นั้นไม่มีประสิทธิภาพเนื่องจากปัจจัยจากบุคคล อย่างไรก็ตามมาตรฐานของเสื้อผ้าที่มีอยู่ในปัจจุบันได้รวมการทดสอบกับอนุภาคนาโน และได้ให้ข้อมูลที่ระบุถึงประสิทธิภาพของเสื้อผ้าที่ใช้ในการป้องกันต่ออนุภาคนาโน ตัวอย่างเช่น มาตรฐานของ ASTM F1671-03 ระบุให้ใช้ไวรัสทำลายแบคทีเรีย (bacteriophage) ที่มีขนาด 27 nm เพื่อประเมินความทนทานของวัสดุที่ใช้ทำเสื้อผ้าที่ใช้ในการป้องกันการทะลุผ่านของเชื้อโรคที่ถ่ายทอดผ่านทางเลือด

การทะลุผ่าน SPE ด้วยอนุภาคนาโนมีโอกาสเกิดได้มากกว่าการทะลุผ่านของอนุภาคขนาดใหญ่ เนื่องจากการที่อนุภาคนาโนมีโอกาสเล็ดลอดเข้าไปในสถานที่ปฏิบัติงานได้ ทำให้เกิดการกระจายอนุภาคไปในวงกว้างได้ จึงมีการเสนอว่าส่วนประกอบของปัจจัยที่มาจากบุคคลจะมีความสำคัญมากกว่าปัจจัยที่มีต่ออนุภาคขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังทำให้ SPE มีประสิทธิภาพในการป้องกันเมื่อสัมผัสกับอนุภาคนาโนน้อยกว่าประสิทธิภาพของ SPE เมื่อสัมผัสกับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่

### 8.3.8.3 การป้องกันดวงตา (eye protection)

การป้องกันดวงตาเมื่อมีโอกาสการรับสัมผัสวัสดุนาโน อุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการทำงาน ได้แก่ กรอบตานิรภัย (goggles) แว่นตานิรภัย และชุดกระบังหน้าแบบเต็มใบหน้า ไม่นิยมใช้ชุดกระบังหน้ากับการจัดการกระทำกับวัสดุนาโนโดยเฉพาะ เช่น มีโอกาสในการรับสัมผัสตัวทำละลายหรือวัสดุที่ร้อน โดยมีองค์กรหนึ่งได้รายงานว่าไม่อนุญาตให้สวมคอนแทคเลนส์ในห้องปฏิบัติการ

RPE แบบเต็มใบหน้ามีส่วนของการป้องกันดวงตาอยู่ด้วยซึ่งในกรณีนี้ผู้ปฏิบัติงานใช้แว่นสายตาหรือคอนแทคเลนส์ได้

### 8.3.8.4 การป้องกันการรับสัมผัสทางปาก (preventing ingestion exposure)

การรับสัมผัสทางปากที่อาจเกิดขึ้นได้ในสถานที่ปฏิบัติงานนั้นเกิดจากมือที่สัมผัสสารนั้นเข้าสู่ปากหรืออาจเกิดจากกลไกการโบกพัดขึ้นเยื่อเมือก (mucociliary escalator) ของระบบทางเดินหายใจดักจับอนุภาคนาโน แล้วขับออกในรูปของเสมหะซึ่งอาจเกิดการรับสัมผัสโดยการบริโภคจากการกลืนเสมหะเข้าไป แนวทางปฏิบัติเพื่อลดการรับสัมผัสทางปากของอนุภาคนาโนในสถานที่ปฏิบัติงานให้ปฏิบัติตามมาตรการการป้องกันการรับสัมผัสผ่านทางผิวหนัง

## 8.4 การตรวจติดตามสุขภาพ (health surveillance)

ควรมีการตรวจติดตามสุขภาพให้กับผู้ปฏิบัติงานที่มีความเสี่ยงในการรับสัมผัสกับอนุภาคนาโน และเมื่อมีตัวระบุทางชีวภาพที่สัมพันธ์ระหว่างการรับสัมผัสสาร กับโปรแกรมการตรวจสุขภาพ มีความจำเป็นอย่างยิ่งในกรณีที่อนุภาคนาโนมีองค์ประกอบเป็นสารเคมีที่มีแนวทางอาชีวอนามัยปัจจุบันแนะนำไว้ให้มีการตรวจสุขภาพ

การรับสัมผัสอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้นต่ำมาก อาจวัดได้จากระดับของตัวระบุทางชีวภาพที่เปลี่ยนแปลงไปจากระดับเส้นฐาน มากกว่าการเปรียบเทียบปริมาณทั้งหมดของสารในร่างกายกับ BEI (biological exposure index) ซึ่งอาจเป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการตรวจสอบ การตรวจติดตามสุขภาพที่ใช้ในมาตรฐานนี้ เป็นตัวระบุการเกิดการรับสัมผัสมากกว่าที่จะเป็นตัวกำหนดระดับการรับสัมผัสที่ปลอดภัย เนื่องจากในปัจจุบันยังคงมีข้อจำกัดของวิธีการที่ใช้วัดความเข้มข้นของอนุภาคนาโนในอากาศ ดังนั้นการใช้ตัวระบุทางชีวภาพจึงอาจเป็นแนวทางที่เป็นประโยชน์สำหรับการประเมินประสิทธิผลของมาตรการควบคุมที่แนะนำให้นำมาใช้

ในขั้นนี้ถ้าข้อมูลผลกระทบของอนุภาคนาโนต่อสุขภาพยังไม่ชัดเจน การตรวจสุขภาพอย่างต่อเนื่องนับเป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยติดตามผลกระทบใด ๆ ที่เกิดจากอนุภาคนาโน และบันทึกการตรวจสุขภาพเป็นหลักฐานสำคัญในการระบุผลกระทบต่อสุขภาพ

โปรแกรมการเฝ้าระวังต่อสุขภาพพื้นฐานควรประกอบด้วยการจัดการขั้นต่ำ ดังต่อไปนี้

- (1) การระบุผู้ปฏิบัติงานที่รับสัมผัสอนุภาคนาโนจากการผลิตที่อาจยังไม่ทราบผลกระทบที่อาจเกิดต่อสุขภาพ
- (2) ดำเนินการระบุลักษณะเฉพาะของสถานที่ปฏิบัติงาน และประเมินการรับสัมผัสของผู้ปฏิบัติงาน
- (3) จัดให้มีการตรวจสุขภาพให้กับผู้ปฏิบัติงานที่ทำงานกับอนุภาคนาโน ตามเส้นฐานการประเมินทางการแพทย์ รวมทั้งให้มีโปรแกรมการตรวจสุขภาพประจำทั่วไป (nonspecific routine) สำหรับผู้ปฏิบัติงานที่ทำงานกับวัสดุนาโน

ต้องมั่นใจว่าผู้ปฏิบัติงานที่ทำงานกับอนุภาคนาโนได้รับการตรวจสุขภาพตามระยะเวลา และรวมถึงการทดสอบประจำ เช่น การทดสอบการทำงานของปอด ใต้ ตับ และการสร้างเม็ดเลือด

#### 8.5 การดูแลผลิตภัณฑ์ (product stewardship)

ข้อมูลแนะนำที่องค์กรผู้ส่งมอบวัสดุนาโนควรมีให้กับลูกค้า แสดงตามรายการด้านล่าง ซึ่ง SDS เป็นเอกสารแนะนำทั่วไปที่ควรมี

- (1) SDS
- (2) เอกสารข้อมูลผลิตภัณฑ์
- (3) วิธีการใช้งานเชิงเทคนิค
- (4) เหตุการณ์ที่อาจเกิดกับผู้ใช้งาน
- (5) จดหมายแนบ
- (6) เอกสารข้อมูลเชิงเทคนิค
- (7) เอกสารข้อกำหนดผลิตภัณฑ์
- (8) เอกสารรับรองการวิเคราะห์
- (9) คู่มือการปฏิบัติงาน

## ภาคผนวก ก.

## กระบวนการผลิตวัสดุนาโน

(ข้อ 4.2)

## ก.1 วิธีผลิตละอองลอย

วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้ผลิตวัสดุนาโนหลายชนิด วิธีการนี้ทำโดยการที่นิวเคลียสชนิดเดียวกันของไอของสารอิมัลด์แบบยิ่งยวดรวมตัวกันเอง และเกิดการขยายตัวของอนุภาคโดยการควบแน่นจนตกตะกอนและจับตัวกัน การควบแน่นให้เกิดไอระเหยนั้นทำได้โดยใช้ถังเร่งปฏิกิริยาและเพิ่มอุณหภูมิขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนของแข็งเกิดการอิมัลด์ตัวยวดยิ่งและทำให้เย็นลงอีกครั้งจนละอองของแข็งแขวนลอยคล้ายก๊าซ วิธีการผลิตวัสดุนาโนโดยปกติใช้กระบวนการให้ความร้อนหรือกระบวนการระเหยให้กลายเป็นไอ ซึ่งประกอบด้วย

- การแยกสลายด้วยความร้อนโดยใช้เปลวไฟ (flame pyrolysis)
- เตาปฏิกรณ์ที่ร้อน หรือถังปฏิกิริยาที่มีผนังร้อน (furnace/hot wall reactors)
- การแยกสลายด้วยความร้อนโดยใช้เลเซอร์ (laser induced pyrolysis)

## ก.2 วิธีสะสมด้วยไอ

วิธีนี้เกิดจากการผลิตไอสารในห้องปฏิกิริยา (reaction chamber) ด้วยปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยความร้อน (pyrolysis) ปฏิกิริยารีดักชัน (reduction) ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) และไนตริเดชัน (nitridation) ขั้นตอนแรกเป็นการสะสมอะตอม 2 ถึง 3 อะตอม โดยอะตอมกลุ่มแรกจะก่อตัวเป็นก้อนและกระจายตัวเชื่อมต่อกันเป็นฟิล์มต่อเนื่อง จากนั้นเกิดการขยายมากขึ้นต่อเนื่องจนกระทั่งเกิดเป็นฟิล์มหนา

วิธีการเหล่านี้ได้นำมาใช้ในการผลิตเป็นนาโนฟิล์ม ได้แก่  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  และ  $\text{SiC}$  นอกจากนี้กระบวนการสะสมด้วยไอโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวช่วยมักใช้ในการผลิต CNT

## ก.3 วิธีผลิตอนุภาคนาโนคอลลอยด์ หรือการจัดเรียงตัวเอง

วิธีนี้เป็นกระบวนการตกตะกอนแบบเคมีเปียก (wet chemistry precipitation process) ในสารละลายเข้มข้นที่มีไอออนแตกต่างกันและผสมกันภายใต้การควบคุมอุณหภูมิและความดันจนได้ตะกอนที่ไม่ละลายน้ำ

ปัจจุบันมีการพัฒนาวิธีการผลิตอนุภาคนาโนคอลลอยด์ ด้วยการนำวิธีเคมีคลื่นเสียง (sonochemistry) มาใช้เป็นตัวควบคุมกระบวนการ โดยโมเลกุลของสารตั้งต้นเกิดปฏิกิริยาเคมีเนื่องจากการใช้การแผ่คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ ส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ คือ การสร้าง การขยายตัว และการยุบตัวของฟองขนาดเล็กที่เกิดขึ้นในของเหลวจากการใช้คลื่นเสียง โดยการใช้อุณหภูมิที่สูงและอัตราการเย็นตัวที่สูงร่วมกับการยุบตัวของฟองและการเกิดศูนย์กลางของนิวเคลียสซึ่งมีการจำกัดการขยายตัวโดยการยุบตัวของฟองอย่างรวดเร็ว

ตัวอย่างของสารที่ผลิตโดยใช้วิธีการผลิตอนุภาคขนาดคอลลอยด์ ได้แก่ สารประกอบในกลุ่มของซาลโคเจนไนด์ (chalcogenide) โลหะ และโลหะผสม รวมทั้ง ทอง โคบอลต์ และนิกเกิล รวมไปถึง CNT และท่อนาโนไทเทเนีย (titania nanotube)

ก.4 การสะสมสารด้วยไฟฟ้า

เส้นใยนาโนพอลิเมอร์ และฟิล์มลวดนาโนโลหะสามารถสร้างบนซับสเตรต (substrate) ด้วยวิธีการเกิดพอลิเมอร์ด้วยไฟฟ้า สำหรับพอลิเมอร์หรือการสะสมด้วยไฟฟ้าสำหรับโลหะ

ก.5 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า

วิธีนี้เป็นวิธีการหลักที่ใช้ในการผลิตเส้นใยนาโนพอลิเมอร์ วิธีนี้ใช้แรงไฟฟ้าในการผลิตเส้นใยพอลิเมอร์จากสารละลายพอลิเมอร์หรือสารพอลิเมอร์ที่หลอมละลายได้

ก.6 วิธีลดขนาด

วิธีนี้ใช้วิธีการเจียและการบดในการผลิตวัสดุ เช่น ดินเหนียว ถ่านหิน และโลหะ โดยอัตราการผลิตอยู่ในระดับหลายตันต่อชั่วโมง

## ภาคผนวก ข.

(ข้อแนะนำ)

## อันตรายของวัสดุนาโนต่อสุขภาพ

(ข้อ 5.1 และข้อ 7.2.3.2)

## ข.1 หลักการพื้นฐานและความไม่แน่นอน (basic principle and uncertainty)

ผลงานวิจัยเกี่ยวกับอนุภาคและเส้นใยที่มีอยู่ เป็นข้อมูลพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ในการประเมินแนวโน้มของอันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากอนุภาคนาโน ในขณะที่สมบัติของอนุภาคนาโนนั้นแปรผันได้อย่างมาก หลักการพื้นฐานทางฟิสิกส์-เคมี และพิษจลนศาสตร์ นั้นได้มาจากการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับความเข้าใจถึงพิษวิทยาที่อาจเกิดขึ้นของอนุภาคนาโน ตัวอย่างเช่น จากการศึกษาในมนุษย์ทำให้รู้ว่าอนุภาคนาโนที่หายใจเข้าไปนั้น ส่วนมากอาจไปตกค้างและสะสมอยู่ในพื้นที่ถูกลดขจัดของระบบทางเดินหายใจซึ่งมีปริมาณมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตาม ต้องตระหนักว่าอนุภาคนาโนอาจรวมตัวกันอย่างหลวม ๆ และไปสะสมในพื้นที่อื่น ๆ ของระบบทางเดินหายใจ จนทำให้หายใจไม่ได้ จากการศึกษาในสัตว์ทดลองพบว่าอนุภาคนาโนหลังจากได้รับสัมผัสเข้าสู่ร่างกายแล้วสามารถเคลื่อนไปยังอวัยวะอื่น ๆ ในร่างกายได้ แม้ว่าจะยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัดว่าการเคลื่อนไปในลักษณะนี้มีอิทธิพลมาจากสมบัติทางฟิสิกส์-เคมีของอนุภาคนาโนอย่างไร นอกจากนี้ ความยากในการคาดการณ์ถึงผลกระทบที่เกิดต่อสุขภาพของมนุษย์โดยอ้างอิงจากการศึกษาในสัตว์ทดลองนั้นควรพิจารณาถึงความไม่แน่นอนที่เพิ่มขึ้นด้วย แนวโน้มสำหรับการได้รับสัมผัสอนุภาคนาโนในปริมาณมากผ่านทางผิวหนังและระบบทางเดินอาหารนั้นอาจเกิดขึ้นได้เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า หลักฐานจากการศึกษาทางพิษวิทยานาโน ทั้งในหลอดทดลองและในสัตว์ทดลอง พบว่าการรับสัมผัสกับอนุภาคนาโนนั้นอาจทำให้เกิดความเป็นพิษต่อเซลล์ หรือต่อเนื้อเยื่อ หรือทั่วทั้งร่างกายได้ เนื่องจากการที่อนุภาคนาโนมีขนาดเล็กมากทำให้มีโอกาสผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ และทำปฏิกิริยากับโครงสร้างภายในเซลล์ได้ เช่น ไมโทคอนเดรีย และนิวเคลียส และอนุภาคนาโนบางชนิดได้ทำให้เซลล์ได้รับความเสียหายจากภาวะออกซิเดชัน ทำให้การทำงานของเซลล์เสียไป การศึกษาในสัตว์ทดลองนั้นได้ระบุว่าอนุภาคนาโนบางชนิดทำงานกับระบบชีววิทยาได้ดีกว่าสารเคมีชนิดเดียวกันที่มีอนุภาคขนาดใหญ่กว่า เนื่องจากอนุภาคนาโนมีพื้นที่ผิวต่อมวลมากกว่าเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของการตอบสนองต่อปริมาณสารในรูปของมวล การที่อนุภาคนาโนมีพื้นที่ผิวต่อมวลที่มากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่เป็นสาเหตุพื้นฐานที่ส่งผลให้มีความไวปฏิกิริยาทางเคมีที่ดีกว่ามากและทำให้นาอนุภาคนาโนไปใช้งานได้ในภาคอุตสาหกรรม เภสัชภัณฑ์และการแพทย์ได้ อย่างไรก็ตาม ได้ทำให้มีความกังวลมากขึ้นเกี่ยวกับผลกระทบเชิงลบที่อาจเกิดกับสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานที่มีโอกาสรับสัมผัสกับอนุภาคนาโน

ข.2 ข้อมูลผลกระทบต่อสุขภาพของอนุภาคนาโนและเส้นใยนาโนจากอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นโดยไม่ตั้งใจ

งานวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบต่อสุขภาพของอนุภาคนาโนยังมีไม่มาก ส่วนมากนั้นเกี่ยวกับผลกระทบต่อสุขภาพจากอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นโดยไม่ตั้งใจ เช่น อนุภาคที่เกิดจากการปล่อยไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล และควันไอ (fume) จากการเชื่อม กลไกทางชีววิทยาต่อการตอบสนองของปอดจากการรับสัมผัสอนุภาคนาโน อาจปรากฏในลักษณะที่สอดคล้องกับการตอบสนองของปอดต่อการหายใจเข้าไปโดยไม่ตั้งใจของอนุภาคนาโน การตอบสนอง เช่น ความเครียดจากภาวะออกซิเดชัน การอักเสบ การผลิตของไซโตไคน์ (cytokines) คีโมไคน์ (chemokines) หรือไซโตไคน์ที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของเซลล์ และสารเร่งการเจริญเติบโตของเซลล์ ลิงปนเปื้อน เช่น โลหะแทรนซิชัน อาจนำไปสู่การตอบสนองของปอดได้เช่นกัน แม้ว่าองค์ประกอบและลักษณะเฉพาะทางฟิสิกส์-เคมีของอนุภาคนาโนจากการผลิตและอนุภาคนาโนที่เกิดโดยไม่ตั้งใจนั้นแตกต่างกันมาก อย่างไรก็ตาม หลักการทางพิษวิทยาและการเปรียบเทียบปริมาณที่ได้จากการศึกษาของอนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นโดยไม่ตั้งใจอาจสัมพันธ์กับการประเมินผลกระทบทางสุขภาพที่มาจากอนุภาคนาโนจากการผลิต

งานวิจัยจำนวนมากที่เกี่ยวกับผลกระทบต่อสุขภาพจากการหายใจเอาเส้นใยเข้าไป เช่น ข้อมูลที่ทราบกันดีคือรูปแบบเฉพาะของแร่ใยหินเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดมะเร็งเยื่อหุ้มปอดเมโซเทลิโอมา (mesotheliomas) ที่เป็นอันตรายร้ายแรงต่อสุขภาพอนามัย และทำให้เกิดโรคเกี่ยวกับปอดชนิดอื่น เช่น โรคพังผืดแทรกในปอด (pulmonary interstitial fibrosis) โรคเยื่อหุ้มปอดมีหินปูนเกาะจับ (pulmonary pleural plaques and calcification) โรคเยื่อหุ้มปอดหนาตัว (pulmonary thickening) ผลกระทบที่เป็นอันตรายของเส้นใยเกิดขึ้นจากปัจจัยสำคัญ 3 ประการ คือ ความยาว เส้นผ่านศูนย์กลาง และการคงอยู่ ทั้งนี้เป็นการยากในการสรุปผลกระทบต่อสุขภาพของเส้นใยที่มีขนาดในระดับนาโนสเกลโดยอ้างอิงจากการศึกษาแร่ใยหิน แต่ข้อมูลจากการศึกษานี้แนะนำว่าสมบัติของอนุภาคซึ่งได้แก่ ขนาด รูปร่าง และองค์ประกอบ เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความเป็นพิษของอนุภาคนาโน โดยมีการศึกษาระยะสั้นต่อผลกระทบของ SWCNT และ MWCNT ในปอดของหนูแรดและหนูไมซ์ ทำโดยวิธีการหยอดขวาเพื่อระงับความรู้สึกทางหลอดลม หรือการสูดดมหายใจทางช่องคอ การศึกษานี้แสดงถึงการอักเสบที่ผิดปกติและการเกิดพังผืดในปอด ตัวอย่างเช่น การอักเสบแบบชั่วคราวและตามมาด้วยการเกิดพังผืดในช่วงระยะเริ่มแรกในปอดด้วยปริมาณสารที่ต่ำกว่าปริมาณสารที่ทำให้เกิดพังผืดซึ่งมาจากควอตซ์ หรือคาร์บอนแบล็ก

ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นพิษกับพื้นผิว เคมีพื้นผิว และจำนวนอนุภาค

ปัจจัยสำคัญที่สุดที่ทำให้วัสดุนาโนเป็นอันตรายเพิ่มขึ้น คือ ปริมาณหรือพื้นผิวสัมผัสกับอนุภาคนาโนที่มากขึ้น เมื่อเทียบกับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าที่มีความเข้มข้นเท่ากัน สมมุติฐานนี้มาจากผลกระทบต่อปอดที่สังเกตได้จากการศึกษาในสัตว์ทดลองจำพวกหนู โดยหนูได้รับสัมผัสกับวัสดุโครงสร้างระดับนาโนที่ละลายน้ำได้ยากหลายชนิดในรูปแบบของอนุภาคนาโนที่รวมกันแบบอนุภาคก้อนเกาะแน่นและอนุภาค

ก้อนเกาะหลวม หรืออนุภาคที่หายใจเข้าไปได้ที่มีขนาดใหญ่กว่า เช่น โทเทเนียมไดออกไซด์ คาร์บอนแบล็ก แบเรียมซัลเฟต เขม่าดีเซล ถ้ำถ่านหิน ผงหมึก จากการศึกษาพบว่า ที่มวลใด ๆ ของวัสดุโครงสร้างระดับนาโนที่ละลายน้ำได้ยากในรูปแบบของอนุภาคนาโนที่รวมกันแบบอนุภาคก้อนเกาะแน่นและอนุภาคก้อนเกาะหลวมนั้น อาจทำให้เกิดผลกระทบได้ชัดเจนกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติพื้นผิวที่คล้ายกัน ความสัมพันธ์ของปริมาณการตอบสนองต่อสารที่ได้จากการศึกษาในสัตว์ทดลองของอนุภาคที่ละลายน้ำได้ยากและมีความเป็นพิษต่ำมีลักษณะสอดคล้องกับขนาดของอนุภาคเมื่อปริมาณที่ได้รับนั้นแสดงในรูปของพื้นที่ผิวของอนุภาค กลไกสำหรับการที่วัสดุแสดงความเป็นพิษที่สูงขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลงเมื่อพิจารณามวลเป็นหลักเกี่ยวข้องกับอาการอักเสบที่ปอด ความเครียดจากภาวะออกซิเดชัน และการบาดเจ็บของเนื้อเยื่อ ฤทธิ์ทางชีวภาพของอนุภาคเป็นผลมาจากปริมาณของอนุภาครวมทั้งสมบัติทางฟิสิกส์-เคมีของอนุภาค ประกอบด้วย ขนาด พื้นที่ผิว ความสามารถในการละลาย รูปร่าง โครงสร้างผลึก ประจุ ความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยา และเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา

สมบัติของวัสดุนาโนปรับปรุงได้ด้วยเทคนิคทางวิศวกรรม เช่น การศึกษาในหลอดทดลองแสดงให้เห็นถึงความเป็นพิษของฟูลเลอร์เร็นส์ โดยวัดตามจำนวนเซลล์ที่ตาย และ CNT สามารถลดความรุนแรงลงได้อย่างมากด้วยการปรับปรุงเคมีพื้นผิวของโมเลกุลของฟูลเลอร์เร็นส์ และ CNT เช่น ด้วยปฏิกิริยาไฮดรอกซิเลชัน การศึกษาความเป็นพิษของหัวหมุดควอนตัมที่มีต่อเซลล์ในหลอดทดลองแสดงให้เห็นว่าชนิดของสารเคลือบผิวส่งผลต่อการเคลื่อนไหวยของเซลล์และอัตราการรอดชีวิต

#### ข.4 ภาวะการอักเสบจากอนุภาคนาโน

อนุภาคนาโนหลายชนิดที่ได้จากการเผาไหม้ของผลิตภัณฑ์คาร์บอนไปจนถึงโลหะแทรนซิชัน เมื่อมีการเข้าสู่เนื้อเยื่อและเซลล์แล้ว ทำให้เกิดการอักเสบทั่วไปและการตอบสนองระยะเฉียบพลันซึ่งร่วมกับการปลดปล่อยของสารสื่อโมเลกุล เช่น คีโมไคน์ ไซโทไคน์ โปรตีนชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นในภาวะอักเสบ (C-reactive protein) และโปรตีนในพลาสมาที่ช่วยทำให้โลหิตแข็งตัว (สารที่จับตัวเป็นก้อน) นอกจากนี้การกระตุ้นของแมโครฟาจ และการกระตุ้นนิวโทรฟิลซึ่งเป็นเม็ดเลือดขาวชนิดหนึ่งทำหน้าที่จับกินทำลายแบคทีเรียมันเกี่ยวข้องกับการผลิตสารประกอบที่มีออกซิเจนที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยา แมโครฟาจเป็นเซลล์ควบคุมที่รู้จักดีในเนื้อเยื่อซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับอนุภาคฝุ่นขนาดเล็ก เช่น อนุภาคนาโน ทำให้ออกฤทธิ์ทางชีวภาพขึ้น มีการค้นพบว่าการรับสัมผัสกับอนุภาคนาโนที่แตกต่างกันทำให้แมโครฟาจเกิดการอักเสบหรือการต่อต้านปรับเปลี่ยนไปได้หลายทาง โปรตีนพลาสมาและนิวโทรฟิลเคลื่อนที่จากเลือดไปยังจุดที่เกิดการอักเสบในการตอบสนองต่อไซโทไคน์และคีโมไคน์ บทบาทหนึ่งของนิวโทรฟิลในการตอบสนองต่อการอักเสบเป็นการทำลายสิ่งแปลกปลอมด้วยการย่อยสลายโปรตีน และรวมทั้งสารประกอบออกซิเจนที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยา อย่างไรก็ตาม หากการต่อต้านต่อสิ่งแปลกปลอมด้วยเซลล์เหล่านี้เกิดขึ้นในระยะเวลาอันนานและมากเกินไปย่อมส่งผลให้เนื้อเยื่อถูกทำลายไปด้วย เมื่อเกิดกระบวนการการกลืนกินแมโครฟาจและเกิดการสลายตัวของโปรตีน หรือเมื่ออนุภาคนาโนอยู่ภายในของกลุ่มเซลล์ที่ไม่เกี่ยวข้องกับ



ระบบภูมิคุ้มกัน เช่น เซลล์พาราเรนไคมา (parenchymal cell) การต่อต้านของโมเลกุลที่อยู่ภายในเซลล์เริ่มทำให้เกิดการแสดงออกของยีนควบคุมแบบใหม่ ๆ เมื่อกลไกในการคุ้มกัน เช่น สารต้านอนุมูลอิสระหายไป การบาดเจ็บของเนื้อเยื่อและโรคต่าง ๆ อาจเกิดขึ้น จากการทดสอบกับเซลล์และสัตว์ทดลองนั้นมีรูปแบบการตอบสนองซึ่งป้องกันภายในเซลล์หลายแบบที่พบว่าเกิดจากการรับสัมผัสกับวัสดุที่มีอนุภาคนาขนาดเล็กหรือวัสดุที่เป็นเส้นใย เช่น คาร์บอนแบล็ก CNT ฝุ่นในอากาศ และไทเทเนียมระดับนาโนสเกล ซึ่งการตอบสนองดังกล่าว ได้แก่ ไซโทไคน์ที่กระตุ้นให้เกิดการอักเสบ และยีนที่เกี่ยวข้อง ยีนและโปรตีนที่สามารถเหนี่ยวนำธาตุให้มีการตอบสนองต่อสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant-response element-inducible gene and protein) และโปรตีนที่ตอบสนองต่อความเครียดหรือความร้อน ดังนั้นผลกระทบที่ตามมา ได้แก่ การตอบสนองต่อการอักเสบและการเหนี่ยวนำยีนซึ่งเป็นต้นเหตุของการเกิดพยาธิสภาพตามมา จากการทดสอบความเป็นพิษของอนุภาคนาโนสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะ หรือชีวพิษภายในตัวแบคทีเรีย (bacterial endotoxin) ที่เป็นพวกลิโปโพลีแซ็กคาไรด์มีส่วนทำให้เกิดการเหนี่ยวนำการตอบสนองต่อการอักเสบได้ โดยเฉพาะ SWCNT ที่ยังไม่ได้ทำให้บริสุทธิ์นั้นมีเหล็กเป็นองค์ประกอบมากกว่า 20% โดยน้ำหนักซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิดการอักเสบของปอดอย่างรุนแรงมากกว่า CNT ที่บริสุทธิ์ และสูตรปัจจุบันที่ใช้ในการผลิตอนุภาคนาโนทองซึ่งมีสารพิษเจือปนอยู่มากทำให้เกิดการกระตุ้นต่อเซลล์ภูมิคุ้มกันจากการทดสอบในหลอดทดลอง และการปรับปรุงสูตรการผลิตที่มีการลดสารพิษที่เจือปนอยู่ทำให้ฤทธิ์ทางชีวภาพลดลงได้

ข.5 ข้อสังเกตจากการศึกษาาระบาดวิทยาที่เกี่ยวข้องกับอนุภาคนาขนาดเล็กละเอียด และอนุภาคระดับนาโนสเกล

การศึกษาด้านระบาดวิทยาเริ่มต้นในผู้ปฏิบัติงานที่มีการสัมผัสกับละอองลอย ซึ่งรวมไปถึงอนุภาคนาขนาดเล็กละเอียด และอนุภาคนาโนที่เกิดโดยไม่ตั้งใจ ซึ่งมีรายงานว่าทำให้การทำงานของปอดลดลง ทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบหายใจ เกิดโรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง (chronic obstructive pulmonary disease) และการเกิดพังผืด นอกจากนี้ จากงานวิจัยพบว่าการเกิดโรคมะเร็งปอดเพิ่มสูงขึ้นในกลุ่มผู้ปฏิบัติงานที่สัมผัสกับอนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นโดยไม่ตั้งใจ เช่น อนุภาคที่เกิดจากการปล่อยไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลและควันไอจากการเชื่อมโลหะ มีกรณีศึกษาในมนุษย์โดยรายงานถึงอาการบวม น้ำของปอดในผู้ปฏิบัติงานที่สัมผัสควันไอของ PTFE และการตายโดยอุบัติเหตุในผู้ปฏิบัติงานจากการทำงานที่ผิดพลาดของเครื่องจักรทำให้เรซิน PTFE ได้รับความร้อนมากเกินไปและมีการปลดปล่อยของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการสลายด้วยความร้อน ของ PTFE ขึ้นในสถานที่ทำงาน ผลกระทบของอนุภาคนาโนที่ได้จากการศึกษาเหล่านี้มีความไม่แน่นอนอยู่ ซึ่งมาจากการที่อนุภาคนาโนมีสมบัติที่แตกต่างกัน

การศึกษาทางระบาดวิทยาในกลุ่มประชากรทั่วไปได้แสดงให้เห็นถึงความเกี่ยวเนื่องกันระหว่างอนุภาคมลพิษในอากาศกับอัตราการเจ็บป่วยและการตายที่เพิ่มขึ้นจากโรกระบบทางเดินหายใจและโรคหัวใจและหลอดเลือด การศึกษาทางระบาดวิทยาพบว่าผลกระทบต่อสุขภาพเกิดเนื่องจากการได้รับสัมผัสอนุภาคนาโนในมลพิษทางอากาศ แม้ว่าจะมีความไม่แน่นอนถึงบทบาทของอนุภาคนาโนกับมลพิษในอากาศชนิดอื่น ๆ

ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ การศึกษาที่เกี่ยวข้องนั้นอยู่บนพื้นฐานของการวัดจำนวนอนุภาค หรือความเข้มข้น โดยมวลของอนุภาคที่มีสัดส่วนขนาดที่แน่นอน เช่น อนุภาคขนาดเล็กกว่า  $2.5 \mu\text{m}$  ในการศึกษาทดลองกับผู้รับการทดลองที่มีสุขภาพแข็งแรง และผู้ที่ป่วยเป็นโรคหอบหืดจากการหายใจเอาอนุภาคคาร์บอนระดับนาโนสเกลเข้าไปนั้น มีการสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงต่อการแสดงออกของโมเลกุลที่ยึดติดกันโดยเม็ดเลือดขาว (blood leukocyte) ซึ่งอาจนำไปสู่การเกิดผลกระทบต่อโรคหัวใจและหลอดเลือดจากการได้รับสัมผัสกับอนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นโดยไม่ตั้งใจ จากการศึกษาเชิงคลินิกที่มีการควบคุมในห้องปฏิบัติการพบว่าการสะสมของฝุ่นระดับนาโนสเกลตลอดทั่วแขนงปอด (pulmonary tree) พร้อมทั้งทำให้เกิดปัญหาโรกระบบหัวใจและหลอดเลือด

การศึกษาผลกระทบต่ออนุภาคนาโนต่อมนุษย์ในเบื้องต้นเป็นการอ้างอิงจากกลุ่มคนที่ได้รับสัมผัสกับควันไอจากการเชื่อม โลหะ อนุภาคที่เกิดจากการปล่อยไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล หรืออนุภาคเล็ก ๆ จากมลพิษในอากาศ การศึกษาทางระบาดวิทยาได้มุ่งเป้าเฉพาะไปที่อนุภาคนาโนจากการผลิตซึ่งยังไม่มีการศึกษามากนัก ยกเว้นเฉพาะ  $\text{TiO}_2$  และคาร์บอนแบล็ก ดังนั้น การนำข้อมูลที่ได้จากมลพิษทางอากาศและฝุ่นที่อาจมีอนุภาคนาโนปนอยู่ด้วยไปใช้กับอนุภาคนาโนจากการผลิตนั้นอาจมีความไม่แน่นอน อย่างไรก็ตาม ควรพิจารณาถึงความเสี่ยงจากการได้รับสัมผัสกับวัสดุนาโนรวมไปถึงอาชีพอนามัย

## ข.6 ผลการศึกษาทางพิษวิทยาของวัสดุนาโนในเซลล์และในสัตว์ทดลองสำหรับวัสดุนาโน

### ข.6.1 วัสดุนาโนที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ

วัสดุที่มีคาร์บอนในระดับนาโนสเกลเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ CNT CNF ฟูลเลอร์รีนส์ และคาร์บอนแบล็ก สำหรับ SWCNT นั้น เป็นแผ่นแกรไฟต์ชั้นเดียวที่มีวนเป็นทรงกระบอกแบบไม่มีรอยต่อ วัสดุนี้นี้ให้ลักษณะสมบัติที่ดีเยี่ยมทั้งทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ เชิงกล และทางความร้อน เนื่องจากลักษณะสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์และเป็นประโยชน์ทำให้มีการผลิตและการใช้งาน CNT เพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังนั้นจึงทำให้มนุษย์มีโอกาสที่จะรับสัมผัสกับสารนี้มากขึ้น

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มีงานวิจัยด้านพิษวิทยาของ CNT เป็นจำนวนมาก โดยจากงานวิจัยในการเพาะเลี้ยงเซลล์และจากสัตว์ทดลองได้แสดงให้เห็นถึงฤทธิ์ทางชีวภาพต่อ CNT ซึ่งเกิดขึ้นได้อย่างหลากหลายขึ้นอยู่กับวัสดุและวิธีการที่ใช้ทดสอบ ลักษณะทางธรรมชาติของ CNT นั้นขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้ในการผลิตและการปฏิบัติหลังการผลิตส่งผลให้เกิด (1) สิ่งเจือปนที่แตกต่างกัน เช่น โลหะ โมเลกุล สารอินทรีย์ คาร์บอนรูปแบบอื่น ๆ วัสดุพอง (2) โครงสร้างที่แตกต่างกัน เช่น โครงสร้างอะตอม จำนวนชั้นของผนัง สภาวะการรวมตัวเป็นก้อน และ (3) รูปทรงเรขาคณิตที่แตกต่างกัน เช่น เส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว การเปลี่ยนรูป

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตรวจวัดและรายงานผลการทดสอบสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุทดสอบพร้อมกับผลการศึกษาอันตรายของวัสดุเหล่านั้นด้วย

การทดสอบในหลอดทดลอง (*in vitro*) พบว่าหลังจากมีการบ่มเซลล์ร่วมกับ SWCN/T แล้ว คัดชนีชีวิต สารทางชีวภาพของความเครียดจากภาวะออกซิเดชันเพิ่มขึ้น SWCNT ที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ด้วยกรด ส่งผลด้านลบต่อเซลล์ เช่น การอักเสบแบบเฉียบพลันซึ่งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และต่อเนื่อง การเกิดพังผืด และเนื้องอกในปอดของหนูไม่ซ์หลังจากการพ่น SWCNT เข้าไปทางช่องคอเพียงครั้งเดียว ในขณะที่ การใช้งานของคาร์บอนแบล็กที่มีปริมาณมวลสารที่ได้รับเท่ากันไม่เหนี่ยวนำให้เกิดเนื้องอก หรือเกิด ความหนาของผนังถุงลมปอดเพิ่มขึ้น รวมทั้งการอักเสบของปอดและการทำลายอวัยวะนั้นเกิดขึ้นน้อยกว่า แม้ว่าผลการทดลองเหล่านี้แสดงให้เห็นได้ถึงแนวโน้มความเป็นอันตรายของ SWCNT ที่เกิดผ่านทาง การหายใจก็ตาม แต่ยังไม่มีการทดสอบความเป็นพิษของ SWCNT ที่เกิดขึ้นจากการหายใจในมนุษย์

การทำ MWCNT ให้บริสุทธิ์เพื่อนำมาทดลองโดยพ่นเข้าสู่ภายในหลอดลมของหนูแรดพบว่ามีความคง ตัวทางชีวภาพสูงมาก เนื่องจากยังพบ MWCNT ในปอดหลังผ่านไป 60 d และเหนี่ยวนำให้เกิดการ อักเสบและการเกิดปฏิกิริยาไฟโบรติก (fibrotic reaction) การเกิดรอยโรคในปอดจาก CNT โดยการ วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะ พบรูปแบบของการเกิดเนื้องอกที่มีคอลลาเจนมาก ซึ่งเกิดจากการสะสมของ CNT ในรูปแบบของอนุภาคก้อนเกาะหลวมขนาดใหญ่ที่รวมกันในระบบทางเดินหายใจ CNT แบบบด กระจายตัวได้ดีในเนื้อเยื่อแท้ของปอด และเหนี่ยวนำให้เกิดการอักเสบ และเกิดการตอบสนองแบบไฟ โบรติก (fibrotic response) แร่ใยหินประเภทคริโซไทล์ (chrysotile asbestos) และคาร์บอนแบล็ก นำมาใช้เป็นวัสดุอ้างอิงได้เช่นกันสำหรับทดสอบผลกระทบในหนูแรด โดยแร่ใยหินสามารถเหนี่ยวนำ ให้เกิดทั้งการอักเสบและการเกิดปฏิกิริยาไฟโบรติก ในขณะที่คาร์บอนแบล็กแสดงผลการเกิดการ อักเสบเท่านั้น

จากการศึกษาผลกระทบของการรับสัมผัส CNT ผ่านทางผิวหนังและดวงตาในหลอดทดลอง พบว่า SWCNT ที่ไม่บริสุทธิ์ ส่งผลให้เกิดการลดลงอย่างมีนัยสำคัญของอัตราการรอดชีวิตของเซลล์ และสารชี วิตความเครียดจากภาวะออกซิเดชันซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณสารที่ได้รับ รวมถึงการเพิ่มอย่างมี นัยสำคัญของปฏิกิริยาการออกซิเดชันของไขมันในชั้นหนังกำพร้าของมนุษย์ จากการศึกษานี้ได้สรุปว่า การรับสัมผัสกับ SWCNT ทางผิวหนังอาจเป็นพิษต่อผิวหนังของผู้ปฏิบัติงาน นอกจากนี้ยังมีรายงาน ว่า SWCNT ที่เคลือบผิวด้วยเพปไทด์เคลื่อนที่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ผิวหนัง และเซลล์ผิวหนังชั้นหนังกำพร้าใน การทดสอบในหลอดทดลองได้ แต่การทดสอบการรับสัมผัสของผิวหนังกับแผ่นกรองที่อิมมัลด้วย สารละลายที่มีอนุภาคฟูลเลอรีนส์และ SWCNT เข้มข้นสูง กลับพบว่าไม่ทำให้เกิดการระคายเคืองหรือ อาการแพ้ในอาสาสมัครที่รับการทดสอบ และการหยอดตากระต่ายด้วยสารแขวนลอย SWCNT ในการ ทดสอบความเป็นพิษเฉียบพลันด้วยการทดสอบเดิร์ซ (Draize test) พบว่า CNT ไม่ก่อให้เกิดการระคายเคือง สำหรับพิษวิทยาของ CNT ที่มีการคัดแปลงหมู่ฟังก์ชันพบว่า มีการรายงานผลกระทบทางพิษวิทยาที่ แตกต่างกันไปตามลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่ใช้ การทดสอบในหลอดทดลองกับเซลล์เนื้องอกปอด พบว่า MWCNT ที่ไม่บริสุทธิ์ และคาร์บอนแบล็กระดับนาโนสเกลที่ได้จากการบดแกรไฟต์ มีความเป็น

พิษสูงขึ้นเมื่อเติมหมู่คาร์บอนิล (carbonyl group) หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) และหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ลงบน CNT ในการทดสอบในหลอดทดลองอื่น ๆ ที่อาศัยการทดสอบกับเซลล์ผิวหนังของมนุษย์ พบว่าความเป็นพิษของ SWCNT ลดลงโดยการเติม หมู่ฟีนิลซัลโฟนิค (phenyl-SO<sub>3</sub>H) และหมู่ฟีนิล-คาร์บอกซิลิก (phenyl-(COOH)<sub>2</sub>) การทดสอบในหนูไม่ชี้ให้เห็นว่า SWCNT ที่ละลายน้ำได้ดีและมีการเติมหมู่ไดเอทิลีนไตรอะซิเตต (diethylenetriamine pentaacetate) ซึ่งติดเครื่องหมายด้วยธาตุอินเดียม (<sup>111</sup>In) เพื่อใช้ในการติดตาม SWCNT พบว่าไม่มีการสะสมของ SWCNT ในตับหรือม้าม และถูกกำจัดออกจากระบบการไหลเวียนเลือดอย่างรวดเร็วผ่านเข้าสู่ระบบการขับถ่ายที่ไตหลังจากที่เข้าสู่หลอดเลือดดำแล้ว

#### ข.6.2 วัสดุนาโนโลหะออกไซด์

การทดสอบในสัตว์ทดลอง แสดงให้เห็นว่า วัสดุนาโนโลหะออกไซด์ที่มีสมบัติการละลายต่ำ และอยู่ในรูปอนุภาคก้อนเกาะแน่น หรืออนุภาคก้อนเกาะหลวม เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และแมงกานีสออกไซด์ มีแนวโน้มในการทำให้เกิดการอักเสบของปอด การทำลายเนื้อเยื่อ และการเกิดเนื้องอกในปอดได้มากกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า เมื่อใช้สารในปริมาณเท่ากัน สำหรับอนุภาคอื่น ๆ ที่มีสมบัติการละลายต่ำนั้น แสดงความสัมพันธ์การตอบสนองต่อปริมาณ (dose-response relationship) ในรูปแบบที่สอดคล้องกัน เมื่อปริมาณสารแสดงอยู่ในรูปของพื้นที่ผิวของอนุภาค การทดสอบวัสดุนาโนและอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าที่มีสมบัติทางเคมีเดียวกันในสัตว์ทดลอง พบว่าความเป็นพิษเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดลดลงเนื่องจากพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้น นอกจากขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวแล้ว สมบัติทางฟิสิกส์-เคมีอื่น ๆ ต่างส่งผลกระทบต่อความเป็นพิษด้วย เช่น ความสามารถในการละลาย รูปร่าง ความไวต่อปฏิกิริยาของพื้นผิว ประจุ โครงสร้างผลึก สำหรับอนุภาคที่มีการละลายและความเป็นพิษต่ำ ผลการทดสอบในสัตว์ทดลองได้ระบุถึงปริมาณที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ ตัวอย่างเช่น มีรายงานถึงปริมาณของ TiO<sub>2</sub> แบบโครงสร้างนาโนหรือแบบผงละเอียดที่ไม่ส่งผลให้เกิดการตอบสนองในปอดเมื่อทดลองในหนูแรด ขณะที่ซิลิกาส่งผลให้เกิดการตอบสนองในปอดอย่างรุนแรง เมื่อได้รับในปริมาณที่เท่ากัน

#### ข.6.3 วัสดุนาโนโลหะ

การทดสอบในหลอดทดลองแสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนโลหะบางชนิดทำให้เกิดการอักเสบแบบเฉียบพลันในสัตว์ โดยมีความสัมพันธ์กับการให้อนุมูลอิสระของอนุภาค ความสัมพันธ์ของการตอบสนองต่อปริมาณ แตกต่างกันสำหรับโลหะต่างชนิดซึ่งอาจสัมพันธ์กับสมบัติทางฟิสิกส์-เคมี และกลไกทางพิษวิทยา เช่น การศึกษาความเป็นพิษของอนุภาคนาโนเงิน ขนาด 15 nm และขนาด 100 nm ที่ความเข้มข้น 5 µg/ml ถึง 50 µg/ml ในเซลล์ที่ได้มาจากตับของหนูแรด พบว่า อนุภาคนาโนเงินมีความเป็นพิษต่อเซลล์อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่อนุภาคอื่น ๆ เช่น อนุภาคนาโนอะลูมิเนียม ขนาด 30 nm และ

ขนาด 130 nm และอนุภาคทั้งสแตนขนาด 27  $\mu\text{m}$  ไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์เมื่อได้รับปริมาณเท่ากัน การศึกษาในหลอดทดลอง พบว่าอนุภาคนาโนเงินขนาด 15 nm มีความเป็นพิษกับเซลล์ ในสายพันธุ์ เซลล์ต้นกำเนิดตัวอสุจิของหนูไมซ์ (mouse spermatogonia cell line) การทดสอบในหลอดทดลอง ทำให้สังเกตได้ว่าอนุภาคนาโนโคบอลต์ และอนุภาคนาโนนิกเกิลเคลื่อนที่เข้าสู่เวกิวโอลของเซลล์ โดยอนุภาคนาโนโคบอลต์ทำให้เกิดการอักเสบและเกิดความเป็นพิษต่อเซลล์ในขณะที่อนุภาคนาโนนิกเกิลไม่ทำให้เกิดผลกระทบใด ๆ ในทางตรงกันข้าม จากการศึกษาในสัตว์ทดลองพบว่าอนุภาคนาโนนิกเกิลทำให้เกิดความเป็นพิษมากกว่าอนุภาคนาโนโคบอลต์ และความเป็นพิษนั้นเกี่ยวข้องกับอนุมูลอิสระด้วย ในการศึกษาในสัตว์ทดลองอื่น ๆ พบว่าอนุภาคนาโนนิกเกิลมีความเป็นพิษต่อปอดมากกว่าอนุภาคนิกเกิลที่มีขนาดในระดับไมโครเมตรเมื่อได้รับปริมาณที่เท่ากัน และอนุภาคนาโนโคบอลต์มีความเป็นพิษมากกว่าอนุภาคโคบอลต์ในระดับไมโครเมตรเช่นกัน ในการศึกษาการได้รับสารโดยสายยางผ่านทางปากสู่หลอดอาหารนั้น อนุภาคนาโนทองแดงทำให้เกิดความเป็นพิษที่รุนแรงและทำให้เกิดความเสียหายต่อไต ตับ และม้าม ในขณะที่อนุภาคทองแดงในระดับไมโครเมตรนั้นไม่ทำให้เกิดความเป็นพิษใด ๆ อนุภาคนาโนทองคอลลอยด์ซึ่งนิยมใช้ในการรักษาโรคและการตรวจวินิจฉัยโรคนั้นไม่ทำให้เกิดความเป็นพิษต่อหนูไมซ์เมื่อมีการฉีดอนุภาคเข้าหลอดเลือดดำในระดับที่ใช้ในการรักษาโรค

#### ข.6.4 วัสดุนาโนกึ่งตัวนำ

อนุภาคนาโนวัสดุกึ่งตัวนำส่วนใหญ่ คือ หัวหมุดควอนตัม สมบัติที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของหัวหมุดควอนตัมขึ้นกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างทางเคมี และสภาวะสิ่งแวดล้อม ความเป็นพิษขึ้นกับขนาด ประจุ ความเข้มข้น ปฏิกริยาทางชีวภาพของผิวเคลือบ และความเสถียรต่อการออกซิเดชัน ความเสถียรต่อแสง และความเสถียรเชิงกลของสาร ในกรณีที่ต้องทำลายหรือกำจัด สารที่มีองค์ประกอบของตะกั่ว สารหนู แคดเมียม และเทลลูเรียม ซึ่งมีความเป็นพิษสูง ควรต้องมีการประเมินความเสถียรของสารในระยะยาวและการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ก่อน การเคลือบสามารถยับยั้งการสลายตัวของหัวหมุดควอนตัม ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยส่วนประกอบที่เป็นพิษ รวมถึงการสูญเสียการเรืองแสงของหัวหมุดควอนตัมในสัตว์ทดลอง

การศึกษาในหลอดทดลอง พบว่า หัวหมุดควอนตัมบางชนิดมีความเป็นพิษต่อเซลล์ตามความสัมพันธ์ในการตอบสนองต่อปริมาณ เช่น หัวหมุดควอนตัมของแคดเมียมเทลลูเรียม (CdTe) ทำให้เซลล์ฟีโอโครโมไซโทมาของหนูแรตตาย โดยผลการทดสอบในหลอดทดลองพบว่าเกิดการขดตัวของโครมาทิน (chromatin condensation) และการนูนออกอย่างไม่สมมาตรของเยื่อหุ้มเซลล์ (membrane blebbing) สำหรับหัวหมุดควอนตัมขนาดเล็กมีความเป็นพิษสูงกว่าหัวหมุดควอนตัมที่มีขนาดใหญ่ซึ่งมีประจุบวกเท่ากัน โดยหัวหมุดควอนตัมที่มีขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ไปยังนิวเคลียส และหัวหมุดควอนตัมที่มีขนาดใหญ่จะอยู่ในไซโทซอล โดยอธิบายได้จากการมีไอออนของแคดเมียม ( $\text{Cd}^{2+}$ ) การเกิดอนุมูลอิสระ หรือการทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบภายในเซลล์ ทำให้องค์ประกอบนั้นสูญเสียความสามารถในการทำ

หน้าที่ ส่วนการศึกษาในหลอดทดลองในงานวิจัยอื่น ๆ ได้รายงานว่าห้วมุดควอนตัมของแคดเมียมซีลีเนียม (CdSe) มีความเป็นพิษต่อเซลล์ตับ และเกิดออกซิเดชันที่พื้นผิวของห้วมุดควอนตัมทำให้เกิดไอออนของแคดเมียม ( $Cd^{2+}$ ) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง การห่อหุ้มห้วมุดควอนตัมด้วยซิงก์ซัลไฟด์ (ZnS) สามารถลดความเป็นพิษและผลกระทบ ที่กล่าวมานี้ และผลกระทบเหล่านี้น้อยมากถ้าใช้โบไวน์ซีรัมอัลบูมิน (bovine serum albumin) ในการห่อหุ้มห้วมุดควอนตัม จากการศึกษาความเป็นพิษต่อเซลล์ในหลอดทดลองของไดอาร์เซนิกไดซัลไฟด์ ( $As_2S_3$ ) ซึ่งเป็นวัสดุกึ่งตัวนำที่ใช้ในการพัฒนาสูตรทางยาชนิดใหม่ ที่มีขนาดเล็ก 100 nm ถึง 150 nm โดยทดสอบกับเซลล์บุผนังหลอดเลือดจากกรก (human umbilical vein endothelial cells) พบว่า  $As_2S_3$  มีความเป็นพิษสูงกว่าสารเดียวกันที่มีอนุภาคขนาด 200 nm ถึง 500 nm ความเป็นพิษที่ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของอนุภาคนั้นอธิบายได้จากการปลดปล่อยส่วนประกอบที่มีฤทธิ์ออกมาจากอนุภาคไปยังสารตัวกลางที่ใช้ในการบ่ม ซึ่งมีปริมาณสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของอนุภาคนั้น

การทดสอบในสัตว์ทดลองไม่พบผลกระทบที่ทำให้เกิดอาการเจ็บป่วย เช่น หนูไม่ซุกกิดด้วยห้วมุดควอนตัมที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์กรดแอมฟิฟิลิกพอลิอะคริลิก (amphiphilic polyacrylic acid) และห้วมุดควอนตัมที่จับคู่ร่วมกับพอลิเอทิลีนไกลคอลแอมีน (polyethyleneglycol amine) และหนูไม่ซุกกิดที่ได้รับสารห้วมุดควอนตัมของแคดเมียมซีลีเนียมและซิงก์ซัลไฟด์ (CdSe/ZnS)

#### ข.6.5 วัสดุนาโนพอลิเมอร์อินทรีย์

การสูดดมอนุภาคนาโนอินทรีย์โดยไม่ตั้งใจส่งผลให้เกิดความเป็นพิษแบบเฉียบพลันซึ่งเป็นอันตรายต่อมนุษย์ ในกลุ่มของอนุภาคนาโน คาร์บอนที่เพิ่งเกิดใหม่ของ PTFE ที่อุณหภูมิสูงกว่า 425 °C มีความเป็นพิษต่อปอดสูง PTFE ขนาด 15 nm ก่อให้เกิดภาวะปอดบวมน้ำที่มีเลือดออก (hemorrhagic pulmonary edema) และทำให้หนูแรตตายเมื่อได้รับสารน้อยกว่า 60  $\mu g/m^3$  ในทางตรงข้ามคาร์บอนไอของ PTFE ที่เกิดขึ้นระยะหนึ่งแล้วมีความเป็นพิษน้อยกว่าและไม่ทำให้เกิดการเสียชีวิตขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงเคมีพื้นผิวและการเพิ่มขนาดของอนุภาคที่รวมกันจนมีขนาดมากกว่า 100 nm ในขณะที่คาร์บอนไอของ PTFE จะแตกต่างไปจากอนุภาคนาโนจากการผลิต ผลการศึกษาเหล่านี้เป็นเพียงตัวอย่างที่ต้องการแสดงถึงสมบัติของอนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นโดยไม่ตั้งใจซึ่งส่งผลให้เกิดความเป็นพิษแบบเฉียบพลันได้

ความเป็นพิษของเดนดริเมอร์นาโนมีความสัมพันธ์กับธรรมชาติของมอนอเมอร์และวิธีการสังเคราะห์เดนดริเมอร์ จากการทดสอบในหลอดทดลองและในสัตว์ทดลอง พบว่า เดนดริเมอร์นาโนที่มีหมู่ฟังก์ชันประจุบวกที่ผิวซึ่งคล้ายกับโมเลกุลขนาดใหญ่ทางชีววิทยาชชนิดอื่น ๆ สามารถทำลายเยื่อหุ้มเซลล์และทำให้เซลล์แตกได้ ดังนั้น จึงปรับหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของเดนดริเมอร์นาโนได้ เพื่อให้มีการตอบสนองทางชีวภาพในรูปแบบที่ต้องการ ธรรมชาติของแกนภายในเดนดริเมอร์อาจมีผลกระทบต่อ

ปฏิกิริยาทางชีววิทยาได้ เช่น เคนครีเมอร์ที่มีโครงสร้างภายในเป็นสารแอโรแมติก (aromatic interior) อาจทำให้เกิดการแตกตัวของเม็ดเลือดแดงเมื่อรับสัมผัสกับเชื้อหุ้มเซลล์ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำได้ นอกจากนี้ ยังพบว่าเคนครีเมอร์ที่มีขนาดใหญ่กว่ามีความเป็นพิษที่มากกว่า

#### ข.6.6 วัสดุนาโนเลียนแบบธรรมชาติ

วัสดุนาโนเลียนแบบธรรมชาติจากการผลิตส่งผลต่อสุขภาพในรูปแบบต่าง ๆ เช่นเดียวกับวัสดุนาโนชีวภาพที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติซึ่งอาจส่งผลในด้านบวก เช่น ฮอร์โมนอินซูลินและฮอร์โมนควบคุมการเจริญเติบโต ไปจนถึงผลด้านลบและอาจมีอันตรายถึงชีวิต เช่น สารชีวพิษในกลุ่มโปรตีนที่เกิดตามธรรมชาติ

การนำส่งวัสดุนาโนชีวภาพซึ่งมีฤทธิ์ทางชีวภาพไปยังระบบไหลเวียนของโลหิตผ่านทางปาก อาจเกิดขึ้นโดยอาศัยน้ำดี ตัวยับยั้งเอนไซม์โปรทีเนส (proteinase inhibitor) การนำส่งโปรตีนผ่านทางผิวหนังเพื่อการรักษา เช่น อินซูลิน เป็นไปได้โดยอาศัยเฟจเพปไทด์แซพเพอโรน (phage peptide chaperone) ซึ่งกลไกในการซึมผ่านเข้าไบนั้นไม่จำเพาะเจาะจงกับอินซูลินแต่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาระหว่างเฟจเพปไทด์ (phage peptide) กับผิวหนัง ซึ่งช่วยทำให้การนำส่งสารผ่านทางรูขุมขนโดยการเคลื่อนที่ของอินซูลินผ่านผิวหนังได้ การประยุกต์ในการนำส่งยานี้อาจทำให้เกิดการได้รับสัมผัสสารอย่างไม่ตั้งใจต่อผู้ปฏิบัติงานระหว่างกระบวนการผลิตและการจัดการระบบดูแลสุขภาพ

## ภาคผนวก ก.

(ข้อแนะนำ)

## วิธีการจัดการรับสัมผัสวัสดุอันตรายผ่านทางหายใจ

(ข้อ 6.2.2 และข้อ 8.3.7)

## ก.1 ทัวไป

วัตถุประสงค์พื้นฐานในการเก็บตัวอย่างเพื่อการป้องกันผู้ปฏิบัติงานจากการสัมผัสอนุภาคนาโนหลักเกณฑ์บางส่วนประกอบด้วย

- (1) การประเมินการสัมผัสส่วนบุคคลตามข้อควรปฏิบัติ
- (2) การประเมินการสัมผัสส่วนบุคคลสำหรับเชื่อมโยงกับผลกระทบเชิงลบต่อสุขภาพที่อาจเกิดขึ้นได้ในการศึกษาทางระบาดวิทยา
- (3) การระบุถึงแหล่งปลดปล่อยที่สำคัญเพื่อกำหนดแผนการควบคุม
- (4) การประเมินประสิทธิภาพระบบควบคุมการใช้งาน

โดยแต่ละข้อข้างต้นต้องการเครื่องมือที่มีความจำเพาะและแตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น การจัดการรับสัมผัสส่วนบุคคล วิธีการที่ดีที่สุด คือ การใช้เครื่องมือเก็บตัวอย่างที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่และมีขนาดเล็ก โดยติดตั้งกับตัวผู้ปฏิบัติงานตลอดเวลาที่ทำงาน สำหรับการระบุแหล่งกำเนิด ควรใช้เครื่องมือวัดแบบพกพา ซึ่งให้การวัดความเข้มข้นที่ต่อเนื่องและเชื่อมโยงกับรายละเอียดของตำแหน่งที่ตั้ง การระบายอากาศ และกระบวนการการทำงานจำเพาะที่ต้องดำเนินการ ในการประเมินประสิทธิภาพของมาตรการควบคุมในสถานที่ปฏิบัติงานนั้น สามารถใช้เครื่องมือหลายชนิดที่แตกต่างกันซึ่งรวมไปถึงเครื่องมือที่ตั้งอยู่กับที่ ซึ่งเป็นเครื่องมือหลัก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ต้องการ อย่างไรก็ตาม ในการประเมินการรับสัมผัสวัสดุอันตรายที่มนุษย์สร้างขึ้นนั้น ปัจจัยรบกวนที่สำคัญในสถานที่ปฏิบัติงานส่วนใหญ่ คือ ปัจจัยที่เกิดกับอนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นโดยไม่ตั้งใจจากละอองลอยในอากาศโดยรอบที่เข้าไปในสถานที่ปฏิบัติงานในระดับที่แตกต่างกัน อนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นโดยไม่ตั้งใจที่เกิดจากสถานที่ปฏิบัติงานนั้น ๆ อนุภาคที่เกิดร่วมกันนี้ส่งผลกระทบต่อ การวัดหรือการนับจำนวนอนุภาคได้โดยตรง โดยอนุภาคเหล่านี้รวมกันกับอนุภาคนาโนอื่น ๆ ซึ่งเป็นอนุภาคนาโนที่เราสนใจซึ่งต้องออกแบบการทดลองอย่างระมัดระวัง วิธีการที่เป็นไปได้ในการแบ่งแยกการรับสัมผัสอนุภาคนาโนที่มนุษย์สร้างขึ้นกับการรับสัมผัสอนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นเองในบรรยากาศนั้น มีการอธิบายในภายหลัง

การแบ่งแยกนี้ช่วยในการวิเคราะห์การรับสัมผัสการควบคุมที่มีประสิทธิภาพทั้งอนุภาคนาโนที่มนุษย์สร้างขึ้นและอนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นเองจำเป็นต่อการจัดการความปลอดภัยต่อสุขภาพอาชีวอนามัยที่มีประสิทธิภาพ



ตามทฤษฎีแล้ว เครื่องมือที่ใช้ในการวัดทางอาชีวสุขศาสตร์ (occupational hygiene) ในการประกอบอาชีพควรมีลักษณะดังนี้

- เป็นเครื่องมือที่เคลื่อนย้ายได้
- สามารถวัดลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ของอนุภาคนาโนได้หลากหลาย เช่น การนับจำนวน มวล พื้นที่ผิว ประจุ การกระจายขนาด การแยกอนุภาคนาโนที่มนุษย์สร้างขึ้นออกจากอนุภาคนาโนที่มีอยู่แล้วในพื้นที่ การผันแปรชั่วคราว
- สามารถเก็บตัวอย่างที่ระดับหายใจ (breathing zone sample)
- สามารถนำไปใช้งานในระดับอุตสาหกรรมได้
- ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่
- ให้การประมวลผลแบบทันที
- ราคาไม่แพง

หมายเหตุ ขณะนี้ยังไม่มีเครื่องมือใดที่มีลักษณะครบทุกประการข้างต้น

ตาราง ก.1 ได้สรุปเครื่องมือที่มีอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งข้อมูลอาจปรับปรุงให้มีความทันสมัยกว่าที่ปรากฏในมาตรฐานนี้

ตารางที่ ก.1 เครื่องมือและเทคนิคในการวัดการรับสัมผัสละอองลอยนาโน  
(ข้อ ก.1)

ปริมาณ	เครื่องมือ	หมายเหตุ
ความเข้มข้น โดยมวล (จากการวัด)	เครื่องไซส์ซีเล็กทีฟ สแตติก แซมเพลอร์ (size selective static sampler)	ใช้วัดมวลอนุภาคโดยสุ่มตัวอย่างตามขนาดที่มีค่าไม่เกิน 100 nm และวิเคราะห์ตัวอย่างการซังน้ำหนัก หรือการวิเคราะห์ทางเคมี แม้ว่าไม่มีเครื่องมือทดสอบนี้จำหน่ายทางการค้า แต่ใช้เครื่องแคสเคดอิมแพ็คเตอร์ (cascade impactor) ได้แก่ Berner-type low pressure impactor หรือ microorifice impactor ในช่วง 100 nm วิเคราะห์ได้
	TEOM	ใช้วัดความเข้มข้นโดยมวลของอนุภาคนาโนละอองลอย แบบเชื่อมตรงกับระบบ (on-line) เป็นเครื่องวัดทันทีแบบความไวสูง (sensitive real-time) สามารถใช้ร่วมกับช่องคัดขนาด
ความเข้มข้น โดยมวล (จากการคำนวณ)	ELPI	ใช้วัดขนาดแบบทันที (เส้นผ่านศูนย์กลางกลางอากาศพลศาสตร์) ความเข้มข้นของพื้นที่ผิวที่แอ็กทีฟ และบอกการกระจายตัวของขนาดละอองลอยได้ ความเข้มข้นมวลละอองลอยคำนวณได้หากทราบประจุอนุภาค และความหนาแน่นของตัวอย่างขนาดอนุภาควิเคราะห์ได้โดยไม่เชื่อมตรงกับระบบ
	DMAS	ใช้วัดขนาดอนุภาคแบบทันที (เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่เคลื่อนที่) โดยแสดงผลการกระจายตัวของขนาดละอองลอย ความเข้มข้นของมวลละอองลอยคำนวณได้จากรูปร่าง และความหนาแน่นของอนุภาคที่ทราบหรือที่สมมุติ

ตารางที่ ก.1 เครื่องมือและเทคนิคในการวัดการรับสัมผัสละอองลอยนาโน (ต่อ)

ปริมาณ	เครื่องมือ	หมายเหตุ
ความเข้มข้น โดย จำนวน (จากการวัด)	CPC	ใช้วัดจำนวนอนุภาคแบบทันที ภายใต้ระดับเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคที่เครื่องทำได้ การวัดอาศัยหลักการควบแน่นของไอน้ำตัวอย่างอนุภาค และติดตาม/นับจำนวนหยดน้ำที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปใช้ช่องคัดขนาด (size selection inlet) 1 000 nm และสามารถติดตามอนุภาคที่มีขนาดเล็กได้ถึง 10 nm
	DMAS	ใช้วัดความเข้มข้นโดยจำนวนของอนุภาคตามขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลางขณะเคลื่อนที่) แบบทันที โดยให้ค่าความเข้มข้น และการกระจายตัวของอนุภาคขนาดต่าง ๆ
	SEM และ TEM	ใช้วัดความเข้มข้นโดยจำนวนตามขนาดอนุภาคที่อยู่ในรูปละอองในอากาศ
ความเข้มข้น โดย จำนวน (จากการคำนวณ)	ELPI™	ใช้วัดขนาดจำเพาะแบบทันที (เส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์) ความเข้มข้นของพื้นที่ผิวที่แอ็กทิฟ และสามารถบอกการกระจายตัวของขนาดละอองลอยได้ ข้อมูลเกิดจากการประมวลผลปริมาณความเข้มข้น ตัวอย่างขนาดอนุภาคสามารถวิเคราะห์ได้โดยไม่เชื่อมตรงกับระบบ
ความเข้มข้น โดย พื้นที่ผิว (จากการวัด)	เครื่องแพร่ประจุ (diffusion charger)	ใช้วัดพื้นที่ผิวของละอองลอยที่แอ็กทิฟแบบทันที ในกรณีพื้นที่ผิวที่มีขนาดของอนุภาคสูงกว่า 100 nm วัดผลไม่ได้โดยตรง เครื่องแพร่ประจุบางรุ่นไม่สามารถวัดพื้นที่ผิวที่มีขนาดของอนุภาคต่ำกว่า 100 nm ได้ เครื่องแพร่ประจุจึงใช้ได้กับอนุภาคนาโนที่ผ่านช่องคัดขนาดมาแล้วเท่านั้น
	ELPI	ใช้วัดความเข้มข้นโดยพื้นที่ผิวแบบทันทีตามขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์) ในกรณีพื้นที่ผิวที่มีขนาดของอนุภาคสูงกว่า 100 nm อาจวัดผลโดยตรงไม่ได้
	SEM และ TEM	ใช้วิเคราะห์แบบไม่เชื่อมตรงกับระบบ (off-line) โดยให้ข้อมูลพื้นที่ผิวของอนุภาคที่เกี่ยวข้องกับขนาด การวิเคราะห์โดย TEM ให้ข้อมูลโดยตรงของอนุภาคในบริเวณพื้นที่ผิวที่วิเคราะห์ซึ่งเกี่ยวข้องกับพื้นที่ที่มีรูปทรงทางเรขาคณิตต่างกัน
ความเข้มข้น โดย พื้นที่ผิว (จากการ คำนวณ)	DMAS	ใช้วัดขนาดอนุภาคแบบทันที (เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่เคลื่อนที่) ข้อมูลอาจแปรผลในรูปของพื้นที่ผิวละอองลอยในแต่ละสถานะ ตัวอย่างได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่หลอมรวมกันที่เคลื่อนที่ซึ่งแสดงความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกันอย่างดีกับพื้นที่ผิวที่ตรวจวัด
	DMAS และ ELPI ใช้ ควบคู่กัน	ใช้วัดความแตกต่างระหว่างการวัดอนุภาคแบบอากาศพลศาสตร์กับแบบเคลื่อนที่ ใช้เป็นหลักในการคำนวณค่าแตกต่างของมิติ ซึ่งทำให้คำนวณพื้นที่ผิวได้

ก.2 การวัดความเข้มข้นของมวล

ความเข้มข้นของมวลสารนั้นวัดได้โดยใช้เครื่องมือที่ใช้อ่านค่าได้ทันที จากอนุภาคที่สะสมอยู่บนแผ่นกรอง เช่น เครื่องเก็บตัวอย่างละอองลอย เครื่องแคสเคดอิมแพ็คเตอร์ และ เครื่องวัดมวลระบบไมโครแบบออสซิลเลตติง และ แบบผลึกเรโซแนนซ์ (resonator crystals) หรือเครื่องวัดมวลแบบสมดุลพิอิโซ (piezobalance)

และสามารถคำนวณค่ามวลโดยใช้เครื่องมือ เช่น ELPI™ และ DMAS (ดูข้อ ค.5 การวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคนาโน)

ค.2.1 การเก็บตัวอย่างด้วยแผ่นกรอง (filter sampling)

แม้ว่าการออกแบบและการทดสอบอุปกรณ์ให้เหมาะสมนั้นอาจเป็นไปได้ แต่ในปัจจุบันยังไม่มีอุปกรณ์เก็บตัวอย่างละอองลอยในสถานที่ปฏิบัติงานสำหรับอนุภาคนาโนที่มีขนาดไม่เกิน 100 nm ข้อมูลที่มีเกี่ยวกับมวลของอนุภาคนาโนในสถานที่ปฏิบัติงานมีน้อยมาก โดยคาดว่าอัตราการไหลที่มากกว่า 10 l/min ต้องมีการรวบรวมมวลของอนุภาคนาโนในปริมาณที่เพียงพอในระยะเวลา 8 h เพื่อให้ชั่งมวลได้ที่อัตราการไหลที่สูงนี้โดยหลักการแล้วคาดว่าอาจทำให้เครื่องมือที่มีอยู่ทำงานได้ดี เครื่องมือเหล่านี้ เช่น แผ่นตกกระทบ (impactors) ไซโคลน ที่ใช้สำหรับอนุภาคที่มีขนาดไม่เกิน 100 nm

วิธีการวิเคราะห์อื่น ๆ นอกเหนือจากการวิเคราะห์ด้วยแรงตกกระทบ ที่สามารถนำมาใช้ในการจำแนกความเข้มข้นของมวลของอนุภาคนาโนได้ ตัวอย่างเช่น ตามวิธีของ NIOSH 7300 สำหรับโลหะ โดยใช้เครื่อง ICP ร่วมกับการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง AES และวิธี NIOSH 7500 สำหรับซิลิกา โดยการวิเคราะห์สสารโดยใช้การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)

ค.2.2 เครื่องแคสเคดอิมแพกเตอร์

อีกทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์ทั้งในสถานที่ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อม คือ การใช้เครื่องแคสเคดอิมแพกเตอร์แบบใช้ความดันต่ำ เช่น ชนิดเบอร์เนอร์ (Berner-type) หรือการใช้เครื่องแคสเคดอิมแพกเตอร์แบบที่มีรูเปิดขนาดไมโครเมตร เครื่องมือทั้ง 2 ชนิดนี้ใช้การตกกระทบด้วยแรงเฉื่อยในการแยกอนุภาคออกจากกันตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์ของอนุภาค และเครื่องมือชนิดนี้มีการทำงาน 2 หรือ 3 ชั้นสำหรับขนาดของอนุภาคนาโน ในเครื่องมือทั้ง 2 ชนิดนี้ มีการชั่งมวลของอนุภาคนาโนบนแผ่นที่รวบรวมอนุภาคทั้งก่อนและหลังการเก็บตัวอย่าง จากนั้นจึงพล็อตการกระจายขนาดแบบเต็มรูปแบบ และตัดข้อมูลที่ขนาด 100 nm หรือขนาดใด ๆ ก็ตามที่ได้เกี่ยวกับอนุภาคที่มีขนาดโครงสร้างนาโน (ดูข้อ ค.5.2 การวัดโดยอาศัยหลักการตกกระทบตามแรงเฉื่อย)

ค.2.3 เครื่องวัดมวลระดับไมโครแบบออสซิลเลตติงและเครื่องวัดมวลระดับไมโครแบบพิโซอิเล็กทริก (oscillating and piezoelectric microbalances)

อีกทางเลือกหนึ่งในการวัดความเข้มข้นของมวลสาร คือการใช้ TEOM โดยหลักการของ TEOM (ซึ่งพัฒนาเริ่มแรกจากการวัดมวลของอนุภาคนาโนในอากาศ) ใช้แผ่นกรองขนาดเล็กซึ่งจะตั้งอยู่บนปลายแหลมของท่อแก้วที่เป็นส่วนหนึ่งของเครื่องวัดมวลระดับไมโครแบบออสซิลเลชัน (oscillation microbalance) (เครื่องชั่งอนุภาคขนาดเล็ก ที่ใช้หลักการแกว่งให้อนุภาคของสารที่มีขนาดเล็กหลุดจากฟิลเตอร์มาสะสมรวมกัน) โดยความถี่ของการสั่น (oscillation) ของเครื่องวัดมวลระดับไมโคร (microbalance) เปลี่ยนแปลงไปตามมวลของอนุภาคที่สะสมอยู่บนแผ่นกรอง เครื่องมือนี้ใช้งานกันอย่าง

กว้างขวางในหน่วยงานควบคุมคุณภาพอากาศแห่งชาติต่าง ๆ เพื่อเฝ้าระวังคุณภาพอากาศอย่างต่อเนื่องถึงระดับละอองลอยขนาดเล็กกว่า  $10 \mu\text{m}$  และขนาดเล็กกว่า  $2.5 \mu\text{m}$  และมีการพิสูจน์แล้วว่าเครื่องมือนี้ให้ข้อมูลระดับอนุภาคที่น่าเชื่อถือเป็นไปตามคุณภาพอากาศที่ได้กำหนดไว้ เมื่อมีการวัดมวลที่กำหนดไว้ที่  $0.01 \mu\text{g}$  มีการนำเครื่องมือนี้ไปใช้เพื่อให้ได้การวัดที่แม่นยำ ( $\pm 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ในช่วงเวลา 10 min และ  $\pm 1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ในช่วงเวลา 1 h) ในการวัดอนุภาคนาโนในสถานที่ปฏิบัติงาน การใช้เครื่องมือนี้จำเป็นต้องพิจารณาเลือกตัวคัดแยก (pre-separator) สำหรับ TEOM ให้เหมาะสมกับขนาดอนุภาคนาโนที่ศึกษาและเพื่อเปลี่ยนแผ่นกรองที่รวบรวมอนุภาคเป็นแผ่นกรองที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับอนุภาคนาโนนั้น ๆ มีการพัฒนาเครื่องมือ TEOM สำหรับใช้ส่วนบุคคลแล้ว เช่น การเก็บตัวอย่างฝุ่นที่สามารถหายใจเข้าไปได้จากเหมืองถ่านหิน

การทำงานของเครื่องวัดมวลระดับไมโครแบบไพเอโซอิเล็กทริก (หรือ piezobalance) ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency) ของผลึกไพเอโซอิเล็กทริก (piezoelectric) ซึ่งแปรผันตามมวล สามารถวัดมวลที่ตกค้างอยู่บนผลึกได้ด้วยข้อมูลความเข้มข้นของมวลของอนุภาคจากการตรวจสอบความถี่เรโซแนนซ์ของผลึกชุดที่ 2 อนุภาคในอากาศสะสมอยู่บนพื้นผิวผลึกโดยการตกตะกอนแบบไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitation) หรือโดยการตกกระทบ ประสิทธิภาพในการเก็บตัวอย่างของกลไกทั้งหลายเหล่านี้ เป็นฟังก์ชันของขนาดและสมบัติของอนุภาค และควรกำหนดเพื่อให้ได้มาซึ่งการวัดเชิงปริมาณ ผลึกควอตซ์มีความไวในหลายร้อยเฮิร์ตซ์ต่อไมโครกรัม ซึ่งหมายถึงความสามารถในการวัดความเข้มข้นมวลของละอองลอยที่ความเข้มข้น  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ได้ 2% ถึง 3% ภายในเวลา 1 min

### ค.3 การวัดความเข้มข้นโดยจำนวนอนุภาค

#### ค.3.1 เครื่องวัดความเข้มข้นโดยจำนวนอนุภาค (CPC)

CPC เป็นเครื่องวัดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการวัดความเข้มข้นโดยจำนวนของอนุภาคนาโน เครื่องวัดนี้ใช้หลักการควบแน่นของไอระเหยที่เกาะตัวบนอนุภาคนาโนหรืออนุภาคที่ขนาดใหญ่กว่า เพื่อให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นในระดับที่วัดได้โดยเครื่องนับเชิงแสง

เครื่อง CPC ที่ใช้การไหลแบบแลมินาร์ในการพาความร้อน (convective cooling laminar flow CPC) นิยมใช้กันมากและมีจำหน่ายโดยผู้ผลิตในหลายรุ่นซึ่งแตกต่างกันในส่วนของการกักขนาดที่แตกต่างกัน มีการดึงอนุภาคที่อยู่ในอากาศเข้าสู่เครื่องวัดที่อัตราการไหลของอากาศคงที่ซึ่งอิมตัวโดยใช้สารไออุ่นโดยทั่วไปใช้บิวทานอล ไอโซโพรพานอล หรือน้ำ การไหลที่อิมตัวนี้ผ่านเข้าสู่ท่อควบแน่นที่เย็นซึ่งไอจะควบแน่นบนพื้นผิวของท่อเนื่องจากการไหลมีความเย็นจึงมีบางส่วนของสารที่อิมตัวอย่างขูดขี้และควบแน่นบนอนุภาคซึ่งกลายเป็นหยดที่มีขนาดใหญ่ ขีดจำกัดในการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่มีขนาดเล็กขึ้นอยู่กับสมบัติของไอ อุณหภูมิของการทำงานซึ่งใช้ในการอิมตัว

ยวดยิ่ง อัตราการไหล และลักษณะของเครื่องวัด เครื่องวัดที่ใช้ชีวทานอลวัดขนาดได้เล็กถึง 3 nm ในขณะที่เครื่องวัดที่ใช้ไอโซโทปพานอลวัดขนาดได้ต่ำสุดในการวัดที่ 10 nm และเครื่องวัดเชิงพาณิชย์ที่ใช้น้ำวัดอนุภาคนาโนได้ในระดับเดียวกับเครื่องวัดที่ใช้ไอโซโทปพานอล

ค.3.2 อิเล็กโตรมิเตอร์ (electrometer)

เครื่องอิเล็กโตรมิเตอร์มีความไวต่อการวัดอนุภาคนาโน เป็นเครื่องวัดประจุที่นำพาโดยอนุภาคละอองลอยและการใช้งานของเครื่องวัดขึ้นอยู่กับความรู้ถึงประจุของอนุภาคแต่ละชนิดในการไหลของละอองลอย การกระจายประจุรู้ได้จากการใช้เครื่องให้ประจุหรือนิวทรัลไลซ์เซอร์ (neutralizer) ที่ทราบลักษณะเฉพาะของเครื่องวัดนั้น ประสิทธิภาพในการให้ประจุขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค การใช้เครื่องอิเล็กโตรมิเตอร์เพียงอย่างเดียวอาจได้ข้อมูลความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ไม่ถูกต้อง จึงต้องใช้ร่วมกับเครื่องวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางไฟฟ้า (mobility analyzer) ซึ่งประเมินการกระจายขนาดของอนุภาคนาโนได้ ในทางปฏิบัติเครื่องอิเล็กโตรมิเตอร์นี้ต้องสอบเทียบกับเครื่องมืออื่น ๆ โดยเฉพาะ CPCs เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีในการวัดอนุภาคในระดับนาโน

ค.4 การวัดความเข้มข้นพื้นที่ผิว (surface area concentration measurement)

การวัดพื้นที่ผิวของอนุภาคในบางครั้งทำได้ด้วยการใช้วิธี BET วิธีนี้ต้องเก็บรวบรวมอนุภาคนาโนในปริมาณที่มากถึง 50 mg สำหรับการวิเคราะห์ และความพรุนของอนุภาคจะส่งผลต่อการวัด รวมทั้งฐานรองที่ใช้ในการเก็บรวบรวมตัวอย่างอนุภาค โดยเฉพาะเมื่อวัสดุที่วิเคราะห์มีขนาดเล็กมาก

เครื่องอัดประจุแบบ DC ใช้วัดค่าพื้นที่ผิวฟูคส์ (Fuchs surface area) หรือค่าพื้นที่ผิวแอกทิฟของละอองลอยได้จากอัตราการติดผิวของไอออนที่เป็นขั้วบวกที่มีต่ออนุภาคละอองลอยซึ่งมาจากอนุภาคที่พื้นที่ผิวของละอองลอยที่สามารถอ้างอิงได้ การสูญเสียอนุภาคซึ่งกระทบต่อการวัดและเครื่องมือขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค ซึ่งประเมินได้จากการทดลองและการเปรียบเทียบกับ การตอบสนองที่จำเป็น ละอองลอยที่เก็บเป็นตัวอย่างผ่านพลาสมาแบบอ่อน สร้างโดยเครื่องปล่อยประจุแบบโคโรนา (corona discharge device) อนุภาคตัวอย่างผสมกับไอออนขั้วเดียวในอากาศสามารถแพร่กระจายและยึดติดกับพื้นที่ผิวของอนุภาคที่ได้รับไอออนนั้น ไอออนส่วนเกินจากการยึดติดกำจัดด้วยขั้วดักจับอนุภาค (collecting electrode) และอนุภาคที่มีประจุยึดเกาะอยู่ ซึ่งเก็บรวบรวมได้ด้วยตัวกรอง HEPA ที่อยู่ในฟาราเดย์คัพอิเล็กโตรมิเตอร์ (Faraday cup electrometer) กระแสไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นจากอนุภาคที่มีประจุวัดได้ด้วยอิเล็กโตรมิเตอร์ความไวสูง และเชื่อมโยงความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของอนุภาคตัวอย่างนั้น การตรวจวัดพื้นที่ผิวที่มีประจุทำโดยการวัดจำนวนอนุภาคที่มีอยู่และอยู่ในช่วง  $0 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$  ถึง  $2\,000 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$  และค่าความไว  $1 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$

เครื่องวัดที่ให้ผลขณะวัด (real-time) ของ 2 ช่วงที่แล้วให้ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวแอกทิฟต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่มีขนาดอยู่ในช่วง 20 nm ถึง 100 nm

การวัดพื้นที่ผิวแอกทีฟของอนุภาคทรงเรขาคณิตที่มีลักษณะคล้ายกัน (fractal-like particle) หรืออนุภาคที่เป็นทรงกลมที่มีขนาดเล็กกว่า 100 nm ด้วย DC พบว่ามีความสัมพันธ์กับการวัดพื้นที่ผิวทางเรขาคณิต ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางไฟฟ้า หรือ DMAS และพื้นที่ผิวประมาณการที่วัดจาก TEM ความท้าทายสำหรับการใช้วิธีวัดด้วยเครื่องอัดประจุแบบแพร่ คือ เมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่กว่า 100 nm ค่าพื้นที่ผิวที่วัดได้อาจมีค่าที่ต่ำกว่าค่าความเป็นจริง ซึ่งจำเป็นต้องศึกษาต่อไปว่าระดับที่มีการรายงานผลผลิตพลาดนั้นส่งผลกระทบต่อความสัมพันธ์ในด้านการรับสัมผัสสวัสดุนาโน และผลกระทบต่อสุขภาพอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่

เครื่องมือใหม่หลายชนิดอาศัยหลักการการอัดประจุให้กับอนุภาคในอากาศเพื่อจำลองปริมาณวัสดุที่แสดงค่าพื้นที่ผิวรับสัมผัสที่สะสมในบริเวณทอลม หลอดลม และถุงลมในปอด ซึ่งแตกต่างจากเครื่องมือที่กล่าวมาก่อนข้างต้นที่วัดพื้นที่ผิวทั้งหมด เครื่องมือในรูปแบบใหม่ทำงานโดยดูดอนุภาคที่ลอยอยู่ในอากาศผ่านไซโคลนคัดแยกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 1  $\mu\text{m}$  ส่วนอนุภาคที่เหลือที่ผ่านเข้าสู่เครื่องและผ่านเข้าสู่บริเวณอัดประจุ และชุดคัดแยกอนุภาค ตามลำดับ ในการใช้งานสามารถปรับชุดคัดแยกอนุภาคให้มีค่าศักย์ไฟฟ้าในระดับต่าง ๆ เพื่อให้มีการเก็บตัวอย่างอนุภาคที่มีประจุสูง และอนุภาคที่มีการเคลื่อนที่ทางไฟฟ้า (ขนาดพื้นที่ผิว) สอดคล้องกับอนุภาคส่วนที่มีการสะสมในบริเวณต่าง ๆ ของปอด หรือที่มีการหายใจเข้าไปได้ และวัดระดับประจุไฟฟ้าของอนุภาคที่ผ่านทะลุเข้าไปด้วยมิเตอร์ไฟฟ้า วิธีการใหม่นี้มีศักยภาพในการวัดค่าที่สัมพันธ์กับพื้นที่ผิวรับสัมผัสของอนุภาคในอากาศที่สะสมในปอด โดยเครื่องมือมีจำหน่ายทางการค้าในปัจจุบันเป็นรุ่นที่ใช้ตรวจวัดในบริเวณปฏิบัติงาน การสอบเทียบเครื่องทำได้ที่สภาวะอ้างอิงหนึ่งเท่านั้น เช่น การหายใจของผู้ปฏิบัติงานผ่านทางจมูก โดยผู้ปฏิบัติงานมีระดับกิจกรรมของร่างกายเพียงเล็กน้อย การสอบเทียบกับสภาวะอ้างอิงไม่สามารถรวมปัจจัยอื่น ๆ เข้าร่วมด้วย เช่น ระดับกิจกรรมของผู้ปฏิบัติงาน อายุ เพศ หรือการมีโรคทางปอดร่วมด้วยซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อระดับการสะสมของอนุภาคในปอด และเป็นตัวแทนข้อมูลการรับสัมผัสที่แท้จริงของผู้ปฏิบัติงานที่ปฏิบัติหน้าที่ที่แตกต่างกันไม่ได้ ดังนั้นการนำข้อมูลไปใช้จึงควรดำเนินการด้วยความระมัดระวัง การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องมือกับเครื่องมืออื่น ๆ ทำได้โดยการคำนวณพื้นที่ผิวของอนุภาคที่สะสม (ในแบบจำลองของปอดแบบเดียวกัน) ที่ได้จากการวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์แบบวัดการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามไฟฟ้า (electrical mobility spectrometer) ตัวอย่างผลการศึกษการเปรียบเทียบการวัดอนุภาคไดออกทิลซีบาแคต (dioctyl sebacate) โซเดียมคลอไรด์ หรือเขม่าดีเซล พบว่าให้ผลที่สอดคล้องกัน และไม่พบว่าระดับกิจกรรมหรือเพศของผู้ทดสอบมีผลต่อค่าการสะสมและระดับการรับสัมผัส แต่ระดับการรับสัมผัสมีค่าความสัมพันธ์กับความถี่ของการหายใจ และปริมาณการหายใจ ดังนั้นระดับการรับสัมผัสเข้าสู่ร่างกายอนุภาคได้จากการวัดการรับสัมผัสที่เป็นผลมาจากรูปแบบการหายใจ ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์ระดับการรับสัมผัสเข้าสู่ร่างกายสำหรับผู้ปฏิบัติงานแต่ละคนได้ ในปัจจุบัน งานวิจัยระบุว่าปัจจัยที่ใช้สอบเทียบสามารถนำมาใช้ในการคัดแปลงเครื่องมือให้เหมาะสมกับพฤติกรรมกรหายใจ เพศ และอายุ มากกว่าการใช้สภาวะอ้างอิง

ค.5 การวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคนาโน

ค.5.1 การวัดโดยใช้หลักการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาค (particle mobility analysis)

เครื่องมือที่ใช้โดยทั่วไปสำหรับการวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคนาโนในอากาศ คือเครื่องวิเคราะห์การเคลื่อนที่ทางไฟฟ้า หรือ DMAS ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ รายงานเป็นค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (particle mobility diameter) และช่วงการวัดที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 3 nm ถึง 800 nm ทั้งนี้ช่วงการวัดขึ้นกับเครื่องมือแต่ละรุ่น สำหรับการวิเคราะห์นี้ยังคงเป็นสิ่งที่ท้าทายสำหรับอนุภาคนาโนบางชนิดในอากาศ โดยมีกรณีศึกษาดังนี้ เมื่อใช้เครื่องวิเคราะห์การเคลื่อนที่ด้วยไฟฟ้าสำหรับวัดการกระจายตัวของขนาด CNT ที่มีการเกาะแบบก้อนเกาะแน่น พบว่า เครื่องรายงานผลเป็นค่าความต่างศักย์ที่สูงผิดปกติ หรือเมื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เคลื่อนที่ทะลุผ่านแผ่นกรองที่ไม่มีขั้นตอนการทำความสะอาดที่ดีพอ พบว่ามีอนุภาคที่ปนเปื้อนและให้ผลที่ไม่ถูกต้อง ดังนั้นควรระมัดระวังเป็นพิเศษเมื่อต้องวิเคราะห์วัสดุที่มีลักษณะเป็นท่อนาโน อนุภาคที่มีความเข้มข้นสูง และอนุภาคก้อนเกาะแน่น/ก้อนเกาะหลวม ด้วยการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ด้วยไฟฟ้า

เครื่อง DMAS ประกอบด้วย ส่วนที่ทำหน้าที่คัดแยกอนุภาคตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางการเคลื่อนที่ด้วยไฟฟ้าที่เรียกว่า DEMS และส่วนมิเตอร์วัดไฟฟ้าที่ทำหน้าที่นับจำนวนอนุภาค หรือ CPC ขั้นตอนการทำงานของ DMAS เริ่มต้นเมื่ออนุภาคในอากาศเคลื่อนที่เข้าสู่เครื่องผ่านตัวคัดแยกชั้นต้นเพื่อกำจัดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 1  $\mu\text{m}$  ออก และอนุภาคที่เหลือผ่านเข้าสู่บริเวณที่ทำให้ประจุสมมูลแบบโบลต์ซมันน์ (Boltzmann equilibrium) ซึ่งมีแหล่งกำเนิดจากสารกัมมันตภาพรังสี ก่อนผ่านเข้าสู่สนามไฟฟ้าของ DEMS และสุ่มนับจำนวนอนุภาคที่บริเวณทางออกจากสนามไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์ โดยในการวิเคราะห์ใช้การสแกนค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้า อนุภาคกับการเคลื่อนที่ด้วยไฟฟ้า ซึ่งมีความสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาค ทำให้ประมวลผลการกระจายตัวของขนาดอนุภาคในอากาศได้

การสแกนค่าศักย์ไฟฟ้าต้องใช้เวลาอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีความเร็วสูงสุดโดยประมาณที่ 1 min จึงต้องควบคุมกระบวนการไม่ให้เปลี่ยนแปลงระหว่างการตรวจติดตามในช่วงเวลาดังกล่าว สำหรับกรณีที่มีความผันแปรของอนุภาคนาโนในอากาศอย่างรวดเร็ว อาจใช้ท่อที่มีปริมาตร 2  $\text{dm}^3$  ถึง 3  $\text{dm}^3$  เป็นตัวบัฟเฟอร์เพื่อให้ความเข้มข้นอนุภาคมีความคงที่ตลอดการสแกน 1 ครั้ง และสำหรับกรณีระยะเวลาของกระบวนการสั้นกว่าระยะเวลาสแกน จะหาค่าเฉลี่ยได้จากการสแกนหลายครั้งอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้การกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่คงที่

การประยุกต์ที่ต้องการความรวดเร็วในการวิเคราะห์โดยใช้วัดการเคลื่อนที่ของอนุภาคอย่างรวดเร็ว โดยใช้ตัวรับรู้ที่ต่อเป็นแถวแบบขนานที่ใช้กับอิเล็กทรอนิกส์สำหรับนับอนุภาคเข้าไว้ด้วยกัน การวัดอาจกำหนดให้มีความละเอียดของเวลาที่ใช้วัดเป็น 1 s หรือต่ำกว่า และทำงานในสถานะความดันปกติเพื่อลดการระเหยของอนุภาคที่ระเหยได้ โดยไม่ต้องมีสารกัมมันตภาพรังสีเป็นส่วนประกอบการทำงาน

ส่วนข้อจำกัดการใช้งานอยู่ที่การใช้เครื่องมือสำหรับวัดอนุภาคในอากาศที่มีความเข้มข้นค่อนข้างสูง ทำให้เครื่องมือบางรุ่นต้องมีระบบที่ทำให้อนุภาคเจือจาง ในปัจจุบันได้พัฒนาเครื่องมือเพิ่มเติมโดยทำให้เครื่องมือขนาดเล็กส่งผลให้ราคาถูกลง

ข้อจำกัดของ DMAS คือขนาด ราคา ความซับซ้อนในการใช้งาน จำนวนเครื่องที่ต้องมีมากกว่า 1 เครื่อง เพื่อให้การวัดการกระจายขนาดของอนุภาคทำได้ครอบคลุมช่วงที่ต้องการวัด และการใช้สารกัมมันตภาพรังสีเพื่อทำให้ประจุสมมูล หากระบุช่วงขนาดอนุภาคนาโนที่สนใจได้ ก็อาจใช้เครื่องวัดเครื่องเดียวได้

#### ค.5.2 การวัดโดยใช้หลักการตกกระทบตามแรงเฉื่อย (inertial impaction)

เครื่องวัดขนาดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคในอากาศที่อาศัยหลักการตกกระทบเรียงเป็นชั้นหรือที่เรียกว่าแคสเคดอิมแพ็คเตอร์ (cascade impactor) ซึ่งมีหลายรูปแบบ ทำให้นำมาใช้เป็นเครื่องเก็บตัวอย่างแบบติดตัวบุคคล หรือเก็บตัวอย่างในพื้นที่ เครื่องเก็บตัวอย่างแบบติดตัวบุคคลนั้นเหมาะสำหรับวัดอนุภาคที่มีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่า 250 nm ทำให้มีข้อจำกัดในการวัดอนุภาคในระดับนาโนสเกล แต่เครื่องเก็บตัวอย่างในพื้นที่ใช้วัดอนุภาคที่มีขนาดในช่วงนาโนสเกลได้ เช่น เครื่องวัดการกระจายขนาดอนุภาคแบบ ELPI™ หรือเครื่องอิมแพ็คเตอร์แบบที่มีรูเปิดหลายหัว (multi-orifice impactors)

สำหรับ ELPI™ จำเป็นต้องมีปั๊มสุญญากาศเพื่อให้มีการไหลของอากาศจึงไม่เหมาะต่อการเก็บตัวอย่างแบบติดตัวบุคคล

การวิเคราะห์ข้อมูลการกระจายตัวของขนาดละอองลอยจากข้อมูลที่ได้จากเครื่องแคสเคดอิมแพ็คเตอร์ จำเป็นต้องมีการคำนวณค่าต่าง ๆ ที่ต้องใช้ชุดข้อมูลกลับไปกลับมาอยู่เป็นประจำ โดยวิธีการที่ง่ายที่สุดคือการคำนวณหาค่าความเข้มข้นโดยมวลสะสมด้วยการใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของละอองลอยที่ได้จากนั้นนำค่าที่ได้มาใช้ในการประมาณค่า MMAD และค่า GSD ของการกระจายตัวของขนาดละอองลอย โดยแนวทางนี้ได้ตั้งสมมุติฐานไว้ว่าไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนของการสะสมอนุภาค และพฤติกรรมของอิมแพ็คเตอร์หรือแผ่นตกกระทบเป็นไปตามทฤษฎีทุกประการ รวมทั้งการกระจายตัวของขนาดละอองลอย เป็นการแจกแจงแบบฐานนิยมเดี่ยว (unimodal) โดยที่การกระจายตัวของขนาดละอองลอยอธิบายได้โดยฟังก์ชันการกระจายแบบล็อกนอร์มัล (lognormal) เครื่องแคสเคดอิมแพ็คเตอร์นิยมนำมาใช้ในการวัดการกระจายตัวของขนาดตามการให้น้ำหนักไปที่มวลของละอองลอยได้ ดังนั้นในการใช้งานเครื่องจึงจำเป็นต้องสร้างสมมุติฐานเกี่ยวกับรูปร่างและความหนาแน่นของอนุภาคขึ้นมาเพื่อใช้สำหรับการประมาณค่าจำนวนอนุภาคและพื้นที่ผิวแบบกระจายน้ำหนัก เนื่องจากพารามิเตอร์เหล่านี้เป็นข้อมูลที่ประเมินได้ยาก จึงจำเป็นต้องให้ความสำคัญในการแปลผลข้อมูลที่ได้จากเครื่องแคสเคดอิมแพ็คเตอร์ในรูปแบบที่เป็นจำนวนหรือพื้นที่ผิวละอองลอย



ค.5.3 การวัดด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแบบ ELPI™

เครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแบบ ELPI™ เป็นเครื่องมือที่รวมเทคนิคการสะสมอนุภาคด้วยแรงเฉื่อยเข้ากับเทคนิคการตรวจวัดอนุภาคด้วยไฟฟ้าเพื่อใช้ในการหาค่าการกระจายตัวของขนาดละอองลอยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7 nm ขึ้นไป ซึ่งเป็นการตรวจวัดที่เชื่อถือได้ว่ามีความใกล้เคียงกับการตรวจวัดที่ให้ผลขณะวัดโดยมีการอัดประจุละอองลอยที่เข้ามาในเครื่องโดยเครื่องอัดประจุแบบขั้วเดียวก่อนเก็บตัวอย่างด้วยเครื่องแคสเคดิมแพ็คเตอร์แบบที่ใช้ความดันต่ำดังที่กล่าวไว้ใน ข้อ ค.2.2 เครื่องแคสเคดิมแพ็คเตอร์ ที่แผ่นตกกระทบแต่ละแผ่นมีระบบไฟฟ้าแยกเป็นอิสระต่อกัน แต่มีการเชื่อมต่อการทำงานของแต่ละแผ่นเข้าด้วยกันด้วยอิเล็กทรอนิกส์แบบหลายช่องทำให้สามารถวัดประจุสะสมที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาได้ สำหรับในกรณีของเครื่อง DC ดังที่กล่าวไว้ในข้อ ค.4 การวัดความเข้มข้นพื้นที่ผิว โดยที่ประจุของอนุภาคจะมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อพื้นที่ผิวเอกทิว ดังนั้นสัญญาณรวมที่ได้จากเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ที่รวบรวมมาจากสัญญาณของแผ่นตกกระทบแต่ละแผ่นจึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวเอกทิวของละอองลอย การที่สัญญาณของเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้มาจากแผ่นตกกระทบแต่ละแผ่นซึ่งมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวเอกทิวของอนุภาคที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์ในช่วงแคบ จึงทำให้เครื่องมือนี้มีข้อจำกัดในการแปลผลข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับรูปร่างของอนุภาคที่เป็นตัวอย่าง

ในกรณีที่ทราบว่าประสิทธิภาพในการอัดประจุให้กับอนุภาคเป็นฟังก์ชันกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์ หรืออาจตั้งเป็นสมมุติฐานได้นั้น สามารถนำข้อมูลที่ให้ผลขณะวัดที่ได้จากเครื่อง ELPI™ มาใช้ในการแปลผลในรูปแบบที่เป็นการกระจายตัวของขนาดตามการให้น้ำหนักไปที่จำนวนของละอองลอยได้ โดยในทางปฏิบัติประสิทธิภาพในการอัดประจุให้กับอนุภาคหาได้จากการทดลอง ซึ่งการแปลผลการวัดในรูปแบบของความเข้มข้นของมวลอนุภาค หรือการกระจายตัวของขนาดตามการให้น้ำหนักไปที่มวลทำได้เช่นเดียวกัน แม้ว่าการวัดดังกล่าวต้องมีข้อมูลประสิทธิภาพของความหนาแน่นอนุภาคที่เป็นฟังก์ชันกับขนาดอนุภาคและมีข้อมูลการสูญเสียอนุภาคที่มีความถูกต้อง

นอกจากการที่เครื่อง ELPI™ วัดความเข้มข้นของอนุภาคและการกระจายตัวของขนาดแบบต่อตรง (on-line) ได้แล้ว การดักเก็บตัวอย่างละอองลอยโดยใช้เครื่อง ELPI™ ยังนำมาใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่เก็บมาในภายหลังได้อีก ซึ่งรวมถึงการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

ค.5.4 การคำนวณความเข้มข้นของอนุภาคนาโนจากการวัดการกระจายตัวของขนาด

ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะของขนาดอนุภาคละอองลอยขณะผลิตหรือจัดการเกี่ยวกับอนุภาคนาโน รวมถึงการวัดการกระจายตัวของอนุภาค นำมาใช้คำนวณหาระดับการได้รับสัมผัสอนุภาคนาโนได้ เช่น การคำนวณค่าความเข้มข้นของจำนวนจากการใช้ค่าการกระจายความถี่ร่วมกับข้อมูลปริมาตรของตัวอย่าง

จากการตั้งสมมุติฐานว่าอนุภาคนั้นมีลักษณะเกือบเป็นทรงกลมและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางฟิสิกส์ของอนุภาคที่เทียบเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางที่เคลื่อนที่ หรือมีค่าเทียบเท่าทำให้คำนวณค่าความเข้มพื้นผิวของอะตอมได้ วิธีนี้ได้มีการพัฒนาเพื่อใช้ในการคำนวณพื้นที่ผิวของอนุภาคก่อนเกาะแน่น และการกระจายตัวของปริมาตร โดยการใช้เส้นผ่านศูนย์กลางการเคลื่อนที่ทางไฟฟ้าสำหรับอะตอมลอยนาโน จากความรู้เกี่ยวกับความหนาแน่นของอนุภาคในลักษณะเดียวกันนี้ ทำให้คำนวณค่าความเข้มข้นโดยมวลของอะตอมลอยได้ โดยที่ความแม่นยำของการประมาณค่านี้ขึ้นอยู่กับที่ตั้งสมมุติฐานเกี่ยวกับลักษณะเฉพาะทางฟิสิกส์ของอนุภาค

#### ค.5.5 การเก็บตัวอย่างสำหรับการอธิบายลักษณะเฉพาะของวัสดุ

การประเมินสมบัติทางฟิสิกส์-เคมีของวัสดุนาโนในอากาศที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์เป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง ด้วยพารามิเตอร์ เช่น ขนาดอนุภาค รูปร่าง พื้นที่ผิว องค์ประกอบ สภาพก่อนเกาะหลวม สภาพเป็นผลึก ความสามารถในการละลาย และความคงตัวทางชีวภาพ เพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นฐานในการประเมินการรับสัมผัสและความเป็นพิษของวัสดุนาโนใหม่ ๆ การเคลื่อนผิวบนอนุภาคและประจุไฟฟ้าของอนุภาคมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อสภาพก่อนเกาะหลวมของอนุภาค ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมทางฟิสิกส์และการตอบสนองทางชีวภาพที่เกิดขึ้นตามมาด้วย การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างในระดับนาโนสเกลของอนุภาคนาโนที่อยู่ในอากาศเป็นสิ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อการศึกษาด้านพิษวิทยา เนื่องจากโครงสร้างในระดับนาโนสเกลของอนุภาคมีผลโดยตรงต่อลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคและตำแหน่งที่อนุภาคเกิดการสะสมหรือตกค้างอยู่ในระบบทางเดินหายใจซึ่งส่งผลต่อความเป็นพิษ สำหรับเทคนิคใหม่ในการตรวจลักษณะเฉพาะของวัสดุนาโนที่อยู่ในอากาศ เช่น เทคนิคในการตรวจวิเคราะห์ก่อนเกาะหลวมของ SWCNT นั้น อยู่ในช่วงของการพัฒนาเทคนิค

เทคนิคการวิเคราะห์ส่วนใหญ่ที่ใช้กันเป็นประจำในการวิเคราะห์ขนาด รูปร่าง และองค์ประกอบของอนุภาคเป็นการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง เช่น SEM ชนิดปืนยิงปล่อยสนามไฟฟ้า (field emission gun SEM) TEM และ STEM ร่วมกับเทคนิคการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีด้วยรังสีเอกซ์ เทคนิค EELS และเทคนิคที่ใช้การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน โดยในกรณีที่ใช้ SEM และ TEM จำเป็นต้องเตรียมตัวอย่างอนุภาคให้มีความสม่ำเสมอและอนุภาคต้องทับซ้อนกันน้อยที่สุด ซึ่งลักษณะในการเตรียมตัวอย่างดังกล่าวนี้เป็นอุปสรรคสำคัญในการตรวจวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของอนุภาคที่เก็บรวบรวมมาจากอิมแพ็คเตอร์หรือแผ่นตกกระทบ เพราะอนุภาคที่เก็บรวบรวมด้วยอิมแพ็คเตอร์อยู่รวมกันอย่างหนาแน่นในบริเวณเดียวกัน ซึ่งอยู่บริเวณด้านล่างหัวพันของอิมแพ็คเตอร์ สำหรับการตรวจวิเคราะห์ด้วย SEM อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 20 nm สามารถเก็บตัวอย่างลงบนฐานรองตัวอย่างของ SEM ได้โดยตรง โดยการใช้วิธีการกรองฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต โดยวิธีการดังกล่าวนี้อาจมีข้อจำกัดในการเก็บตัวอย่างอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่เกิน 200 nm ขึ้นไป ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่เกิดขึ้นจากลักษณะรูปทรงของอุปกรณ์ที่เลือกใช้

เครื่องกรองฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรคปลายแหลมกับแผ่นเรียบเป็นการรวมสนามอัดประจุและสนามกรองฝุ่นเข้าด้วยกัน โดยการใช้เข็มโครนาที่แหลม (sharp corona) เป็นขั้วอิเล็กโทรดที่ 1 และพื้นที่เก็บตัวอย่างที่เป็นแผ่นระนาบเป็นขั้วอิเล็กโทรดขั้วที่ 2 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการเก็บตัวอย่างอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 20 nm ได้ถึง 100% แต่ตัวอย่างที่เป็นอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 20 nm อาจมีประสิทธิภาพในการเก็บตัวอย่างต่ำลง เนื่องจากการเก็บตัวอย่างด้วยเครื่องกรองฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตนี้ ทำให้อนุภาคกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในลักษณะเดียวกันบนแผ่นระนาบที่ใช้เก็บตัวอย่าง จึงทำให้นำตัวอย่างอนุภาคมาตรวจวิเคราะห์ต่อด้วย SEM ได้ เครื่องดักจับอนุภาคด้วยการกรองฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตมีจำหน่ายโดยทั่วไป และมีบางรายงานที่ระบุไว้ว่าอุปกรณ์เก็บตัวอย่างละอองลอยแบบไม่ต้องใช้พลังงาน (passive aerosol sampler) นั้นนำมาใช้ในการเก็บตัวอย่างอนุภาคนาโนสำหรับการตรวจวิเคราะห์ด้วย SEM ได้

สำหรับการตรวจวิเคราะห์ด้วย TEM การเตรียมตัวอย่างนิยมเตรียมบนตาข่ายรองตัวอย่างสำหรับ TEM โดยเฉพาะ ทำให้หลีกเลี่ยงการเตรียมตัวอย่างในชั้นที่ 2 ได้ สำหรับการวางตัวอย่างลงบนตาข่ายรองตัวอย่างสำหรับ TEM ทำได้โดยการกรองด้วยความร้อน การกรองฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต หรือการผ่านอากาศไปที่ตาข่ายรองรับตัวอย่าง TEM โดยตรง โดยการกรองด้วยความร้อนจัดเป็นกลไกในการเก็บรวบรวมตัวอย่างที่เหมาะสมที่สุด เพราะเป็นไปตามหลักการที่ว่าอนุภาคละอองลอยเคลื่อนที่จากบริเวณที่ร้อนกว่าไปยังบริเวณที่เย็นกว่า วิธีนี้มีประสิทธิภาพมากในกรณีที่อนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนสเกล การกรองด้วยความร้อนใช้เก็บรวบรวมละอองลอยภายใต้อุณหภูมิโดยรอบโดยสร้างความแตกต่างของอุณหภูมิเหนือบริเวณพื้นผิวที่ใช้เก็บตัวอย่าง แล้วให้ละอองลอยเคลื่อนที่ผ่านข้ามพื้นผิวนั้นไป

ค.5.6 การวัดอนุภาคของวัสดุนาโนที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างที่มีค่าสูง

มีอนุภาคที่เกี่ยวข้องกับอาชีพอนามัยหลากหลายชนิด ซึ่งเป็นวัสดุนาโนที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างที่มีค่าสูง ในกลุ่มนี้จะแยกความแตกต่างของอนุภาคที่ยาวมากของวัสดุโครงสร้างนาโน เช่น โซ่ของอนุภาคนาโนแบบก้อนเกาะแน่น และวัสดุนาโนที่ยาวมาก ซึ่งเรียกว่า แท่งนาโน ซึ่งวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะโดยการมืองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างและลักษณะทางเรขาคณิตที่แตกต่างกัน

ตัวอย่างของแท่งนาโนซึ่งผลิตในระดับอุตสาหกรรม คือ CNT SWCNT ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนเพียงชั้นเดียวที่จัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 nm และความยาวมากถึงประมาณ 1 mm นอกจากนี้ CNT อาจมีลักษณะเป็นท่อที่มีผนังหลายชั้นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางร่วมกันโดยมีขนาดใหญ่มากกว่า SWCNT อย่างมีนัยสำคัญ CNT ที่มีอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างที่มีค่าสูงมาก รวมทั้งมีความสามารถในการละลายได้ต่ำ เมื่ออยู่ในปอดแล้วอาจนำไปสู่กลไกความเป็นพิษที่เหมือนกับกลไกที่เกิดจากอนุภาคเส้นใยชนิดอื่น ๆ เช่น แร่ใยหิน และเส้นใยแก้วสังเคราะห์ (synthetic

vitreous fiber) ดังนั้นอาจมีคำถามตามมาเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ในการวัดการรับสัมผัสกับท่อนาโนเหล่านี้ว่าควรพิจารณาให้เหมือนกับการรับสัมผัสกับแร่ใยหิน และวิเคราะห์ได้โดยการนับจำนวนจาก TEM

สิ่งที่ไม่เหมือนกันกับแร่ใยหิน คือ SWCNT ไม่พบในลักษณะของเส้นใยเดี่ยว แต่ CNT เกิดจากการม้วนแบบบิดซ้อนทับร่วมกันคล้ายเชือกนาโน (nanorope) โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 20 nm ถึง 50 nm และเกิดการเกาะกลุ่มที่ซับซ้อนและเกาะรวมกันเป็นอนุภาคก้อนเกาะหลวมกับเชือกนาโนชนิดอื่น สารคาร์บอนในรูปแบบอื่น และวัสดุที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอยู่ นั้น โดยมีขนาดตั้งแต่ 100  $\mu\text{m}$  และ 1 mm จากการศึกษาในห้องปฏิบัติการและในภาคสนามของเมย์นาร์ด และคณะ (Maynard et al.) พบว่าการแยกท่อนาโนที่จับเป็นกลุ่มก้อนทำให้เกิดเป็นท่อนาโนที่อยู่ในรูปละอองลอยนั้นทำได้ยากมาก กระบวนการทั่วไปในการเคลื่อนย้ายผง SWCNT จากสถานะที่ใช้ในการผลิตไปยังสถานะที่ใช้เก็บ และเข้าสู่สถานะที่ใช้เก็บลำดับถัดไปพบว่าไม่มีการเพิ่มจำนวนของอนุภาคนาโนเกิดขึ้น การเพิ่มจำนวนของอนุภาคนาโนเกิดขึ้นอย่างมีนัยสำคัญหากใช้เครื่องเขย่าผสมสารให้เข้ากัน โดยใช้เตาเผาชนิดฟลูอิดิซด์เบด (fluidized bed) ทำให้เกิดการกว่นมากกว่า 50% จำนวนอนุภาคที่ผลิตได้เพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แม้ว่าอัตราการเกิดละอองลอยของ SWCNT อาจต่ำมากในขณะที่ขนส่งหรือจัดการ แต่จากผลการศึกษาระบุได้ว่า SWCNT ที่อยู่ในอากาศและหายใจเข้าไปได้นั้นอาจทำให้เกิดอันตรายต่อปอดได้ ในส่วนของ การวัดและการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของ SWCNT เป็นที่น่าสังเกตว่าสมบัติทางฟิสิกส์-เคมีของอนุภาคละอองลอยของ SWCNT ที่ปลดปล่อยออกมานั้น ในขณะที่ยังไม่ผ่านกระบวนการ SWCNT จะมีสมบัติของขนาดอนุภาคและชุดการผลิตที่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้การประเมินอันตรายที่อาจเกิดขึ้นต่อสุขภาพของมนุษย์ต้องคำนึงถึงประเด็นเหล่านี้ด้วย อย่างไรก็ตามในการใช้งานผู้ผลิตพยายามป้องกันอนุภาคนาโนจากการรวมกันเป็นอนุภาคก้อนเกาะหลวม โดยใช้รูปแบบของการเคลือบผิวและเทคนิคอื่น ๆ ร่วมด้วย นอกจากนี้ ยังไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับการกระจายขนาดของอนุภาคที่ปลดปล่อยออกมาจากการตัด การขัดด้วยกระดาษทราย หรือการขัดถูของผลิตภัณฑ์ซึ่งมีท่อนาโนรวมเข้าเป็นส่วนหนึ่งในเมทริกซ์ของวัสดุ เช่น คอมพอสิต ยางรถยนต์

งานวิจัยเกี่ยวกับการประเมินการรับสัมผัสในสถานที่ปฏิบัติงานที่ดำเนินการโดยใช้เส้นใยนาโนคาร์บอน การวัดทำโดยเครื่องมือประมวลผลที่ให้ผลขณะวัด (CPC, DC, aerosol photometer และ ELPI™) ซึ่งระบุว่ากระบวนการส่วนใหญ่ไม่ได้ปลดปล่อยเส้นใยนาโนคาร์บอนในปริมาณที่มากเมื่อเปรียบเทียบกับ การวัดอนุภาคทั่วไป กระบวนการบางอย่าง เช่น การเลื่อยวัสดุคอมพอสิตขณะเปียก และการเคลื่อนย้ายเส้นใยนาโนคาร์บอนจากสถานะผสม ทำให้ปริมาณอนุภาคเส้นใยนาโนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 300 nm ถึง 2 500 nm ในอากาศเพิ่มขึ้น โดยมีความเข้มข้นโดยมวลถึง 0.16  $\text{mg}/\text{m}^3$  ซึ่งวัดโดยเครื่องวัดความสว่างแสงของละอองลอย (aerosol photometer) นอกจากนี้การเก็บตัวอย่างอากาศและตัวอย่างพื้นผิวโดยใช้วิธีเก็บตัวอย่างในสุญญากาศ (vacuum sampling method) โดยใช้แผ่นกรอง

เส้นใยควอตซ์ที่มีความบริสุทธิ์สูงและวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อนและแสง (thermal-optical analysis technique) ซึ่งระบุว่าปริมาณคาร์บอนทั้งหมดถึง 1.1 mg/m<sup>3</sup> ของอากาศที่หายใจเข้าไปได้ และใช้เครื่องกรองฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ไหลลงกับแผ่นเรียบ เพื่อเก็บตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ด้วย TEM สำหรับการวัดขนาดอนุภาคและรูปร่างตัวอย่างบางส่วนได้แสดงให้เห็นถึงม้วนของเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน (บางเส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 100 nm) และความยาวที่ต่างกัน เส้นใยส่วนใหญ่ปรากฏในรูปของการเกาะก้อนของม้วนเส้นใยแบบหลวม ๆ มากกว่าเป็นแบบเส้นใยเดี่ยว

จากการเปรียบเทียบเทคนิคในการวิเคราะห์ พบว่าเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy) เป็นเทคนิคเหมาะสมที่สุดสำหรับวิธีทางสเปกโทรสโกปี ในขณะที่วิธีการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์นั้น การใช้เครื่อง SEM เหมาะสมมากกว่า TEM และการใช้ AFM มีความเหมาะสมกว่าการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดทันเนลลิง (scanning tunneling microscope)

#### ค.5.7 แนวทางในการเก็บตัวอย่าง

การแนะนำให้ใช้เครื่องมือที่เหมาะสมเพื่อวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของละอองลอยในสถานที่ปฏิบัติงานขณะผลิต จัดการ หรือใช้ผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่ ขึ้นอยู่กับข้อตกลงในการเลือกใช้ตัวชี้วัดที่เหมาะสมกับการประเมินการรับสัมผัสอนุภาคนาโนที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ ซึ่งจำเป็นต้องใช้เครื่องมือจำนวนมากที่นำไปใช้ในการเก็บตัวอย่างส่วนบุคคลโดยทั่วไปเพื่อประเมินการรับสัมผัสส่วนบุคคล สำหรับการปฏิบัติตามข้อจำกัดในการรับสัมผัสหรือสำหรับการศึกษาทางระบาดวิทยาไม่ได้

เครื่องมือชนิดใหม่ ๆ ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ได้แก่ เครื่องมือพกพาขนาดเล็กสำหรับการวัดปริมาณความเข้มข้นของจำนวนอนุภาคนาโน ปริมาณพื้นที่ผิวอนุภาคนาโนต่อปริมาตร และปริมาณพื้นที่ผิวอนุภาคนาโนต่อปริมาตรที่มีผลต่อสุขภาพ แม้ว่าเครื่องมือส่วนใหญ่ยังไม่เป็นเครื่องมือเฉพาะส่วนบุคคล แต่เครื่องมือเหล่านี้มีความกะทัดรัดและเคลื่อนย้ายจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งในสถานที่ปฏิบัติงานได้ รวมทั้งนำไปตั้งอยู่ใกล้กับผู้ปฏิบัติงานในแต่ละพื้นที่ได้ อย่างไรก็ตามปัจจุบันเครื่องมือเหล่านี้ยังให้ข้อมูลไม่เพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของสถานที่ปฏิบัติงานได้อย่างเต็มรูปแบบ ดังนั้นควรใช้เครื่องมือที่ติดตั้งอยู่กับที่ เช่น DMAS ELPI<sup>TM</sup> และเครื่องมือสำหรับเก็บตัวอย่างอนุภาคเพื่อวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางฟิสิกส์-เคมีร่วมด้วย โดยต้องระมัดระวังในการปรับค่าเครื่องมือสำหรับเก็บตัวอย่างที่ติดตั้งอยู่กับที่ เพราะลักษณะเฉพาะของละอองลอยจะเปลี่ยนแปลงได้ตามระยะทางที่ห่างจากแหล่งกำเนิด ซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงมวล และความเข้มข้นของละอองลอยระดับนาโนสเกล ซึ่งเกิดขึ้นจริงกับกระบวนการที่มีความร้อนจนทำให้เกิดรวมตัวกันของนิวเคลียสของอนุภาคจากไอและนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงอัตราการปล่อยพลังงานและความเข้มข้นตลอดเวลา

เพื่อปรับปรุงความสามารถในการเปรียบเทียบข้อมูลการรับสัมผัส แนวทางที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดค่าการรับสัมผัสอนุภาคละอองลอยนาโนส่วนบุคคล คือ การวัดค่าต่อ 1 กะ ของการปฏิบัติงาน ดังนั้นการวัดการรับสัมผัสในช่วงเวลาที่สั้นกว่า 8 h ควรคำนวณปรับข้อมูลโดยให้นำหนักไปที่เวลาเทียบเท่ากับช่วงเวลา 1 กะ หรือ 8 h ในกรณีที่ต้องเก็บข้อมูลการรับสัมผัสในช่วงระยะเวลาสั้น ควรบันทึกเวลาที่ใช้ในการวัดจริงทุกครั้ง และแนะนำให้ใช้ช่วงเวลาการเก็บข้อมูลประมาณ 15 min สำหรับการรับสัมผัสแบบระยะสั้น เนื่องจากเป็นช่วงเวลาขั้นต่ำที่ใช้ในการวัดทางอาชีพอนามัย

การเลือกตำแหน่งการเก็บตัวอย่างที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการแปรผลที่เชื่อถือได้ของข้อมูลในการรับสัมผัสส่วนบุคคล ซึ่งต้องวิเคราะห์จากงานที่ผู้ปฏิบัติงานทำหรือที่ผู้ปฏิบัติงานใช้งาน หรือเคลื่อนย้าย หรือจัดการกับวัสดุนาโนนั้น ควรระบุแหล่งกำเนิดที่ปล่อยละอองลอยขนาดนาโนสเกลและเข้าใจระบบระบายอากาศในสถานที่ปฏิบัติงาน เพื่อหาแนวโน้มในการเกิดการปนเปื้อนระหว่างการเก็บตัวอย่าง ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญเนื่องจากอนุภาคนาโนคงอยู่ในอากาศได้ในช่วงเวลาที่ยาวนาน และกระจายตัวได้ง่ายไปตามการหมุนเวียนของกระแสอากาศในสถานที่ปฏิบัติงาน สำหรับแหล่งกำเนิดอนุภาคละอองลอยเพียงจุดเดียว ความสัมพันธ์ของการปล่อยละอองลอยและกิจกรรมในการปฏิบัติงานควรมีความชัดเจน เพื่อให้การประเมินระดับการรับสัมผัสเชื่อถือได้

ผลของการวัดระดับอนุภาคนาโนที่ปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิตที่วัดได้อาจมีค่าสูงกว่าความเป็นจริง หากสถานที่ปฏิบัติงานมีสภาพไม่สะอาด หรือระบบกรองอากาศไม่มีประสิทธิภาพ ทำให้ละอองลอยขนาดนาโนสเกลที่เกิดจากแหล่งกำเนิดภายนอกอาจเข้ามาภายในอาคารได้ เช่น ไอเสียรถยนต์ กิจกรรมจากอุตสาหกรรมชนิดอื่น โรงไฟฟ้า ซึ่งทำให้การประเมินค่าเกินจริง การรับสัมผัสวัสดุนาโนของผู้ปฏิบัติงานจากกระบวนการผลิตเกินความเป็นจริงไปด้วย วิธีหนึ่งในการแก้ปัญหานี้คือให้หาปริมาณหรือจำนวนอนุภาคที่มีในบรรยากาศทั่วไปก่อนการผลิต หรือการแปรรูปอนุภาคนาโน แต่ไม่ควรนำค่าที่ได้จากการหาปริมาณหรือจำนวนอนุภาคนาโนที่มีอยู่ทั่วไปก่อนการผลิตนั้นไปหักลบกับค่าที่วัดได้จากการวัดการรับสัมผัส เนื่องจากค่าที่วัดได้อาจแปรเปลี่ยนไปตามเวลา อีกวิธีหนึ่งที่ใช้ได้คือการวัดค่าความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่มีอยู่โดยทั่วไปในพื้นที่ปฏิบัติงานควบคู่กับการวัดค่าความเข้มข้นของอนุภาคนาโนภายนอกสถานปฏิบัติงานอย่างต่อเนื่องโดยใช้เครื่องตรวจวัดที่เหมือนกัน และหักลบค่าที่ได้จากการวัดความเข้มข้นของอนุภาคนาโนนอกสถานปฏิบัติงานออกจากค่าความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่วัดได้ในสถานที่ปฏิบัติงาน ซึ่งวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูง และอยู่บนสมมติฐานที่ว่าอนุภาคนาโนในบรรยากาศไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเคลื่อนที่เข้ามาภายในสถานที่ปฏิบัติงาน

อีกทางเลือกหนึ่งคือใช้ความแตกต่างขององค์ประกอบของอนุภาคนาโนจากการผลิตที่เกิดขึ้นในสถานที่ปฏิบัติงานกับองค์ประกอบของอนุภาคนาโนที่เกิดจากการเผาไหม้ของอากาศภายนอก หากรู้องค์ประกอบของอนุภาคนาโนจากการผลิต ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้พบได้ยากในอากาศภายนอก ดังนั้นจึงวัดสัดส่วนของจำนวนอนุภาคนาโนจากการผลิตต่อจำนวนอนุภาคนาโนทั้งหมดที่นับได้ด้วย TEM

และวิเคราะห์องค์ประกอบของอนุภาคนาโนด้วยการวิเคราะห์ระดับจุลภาคด้วยรังสีเอกซ์ (x-ray microanalysis) ได้ และนำอัตราส่วนนี้ไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณพื้นที่ผิวอนุภาคนาโนจากการผลิตต่อปริมาตร โดยใช้ปริมาณพื้นที่ผิวทั้งหมดของอนุภาคนาโนในอากาศต่อปริมาตรที่ตรวจวัดได้ ความแม่นยำของวิธีนี้ขึ้นอยู่กับว่าอนุภาคนาโนจากการผลิตนั้นมีขนาดอย่างน้อย 1 ชาติที่สามารถวัดได้ และเป็นชาติที่ไม่มีอยู่ในละอองลอยที่มาจากภายนอก ซึ่งวิธีการนี้ยังไม่มีการทดสอบอย่างเต็มรูปแบบ

## ภาคผนวก ง.

(ข้อแนะนำ)

### การวัดการรับสัมผัสอนุภาคนาโนผ่านทางผิวหนัง

(ข้อ 8.3.8.1)

#### ง.1 การสุ่มตัวอย่าง

การสุ่มตัวอย่างอนุภาคนาโนที่สะสมบนผิวหนังทำได้ด้วยการตัดแปลงวิธีการสุ่มตัวอย่างสารเคมีบนผิวหนัง การประเมินทางตรงสำหรับการรับสัมผัสอนุภาคนาโนทางผิวหนัง ทำได้โดยวัดปริมาณอนุภาคนาโนที่สัมผัสกับผิวหนังในช่วงเวลาหนึ่ง ด้วยวิธีการเก็บตัวอย่างอนุภาคนาโนจากผิวหนัง หรือวิธีการเก็บตัวอย่างอนุภาคนาโนจากชิ้นวัสดุ กรณีเลือกใช้แนวทางแรกควรพิจารณาความไม่แน่นอนที่เกิดจากประสิทธิภาพในการนำอนุภาคนาโนออกจากผิวหนัง และระยะเวลาการรับสัมผัสในการประเมินแต่ละครั้ง ส่วนค่าความไม่แน่นอนที่ใช้วิธีการตัดชิ้นวัสดุเกิดจากการที่วัสดุให้ลักษณะเฉพาะของการยึดเกาะที่เหมือนกับผิวหนังไม่ได้ วิธีการเก็บตัวอย่างจากผิวหนังที่ใช้งานในปัจจุบัน มีดังนี้

##### ง.1.1 วิธีการล้าง

ทำได้โดยใช้ตัวทำละลาย (เช่น สารละลายที่มีสารลดแรงตึงผิว) ชะล้างผิวหนังส่วนที่รับสัมผัสและสะสมอนุภาคนาโนออก และนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณอนุภาคนาโน รวมทั้งองค์ประกอบทางเคมี ขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโน

##### ง.1.2 วิธีการเข็ด

ทำได้โดยใช้วัสดุที่ทำให้ชุ่มด้วยตัวทำละลายเข็ดผิวหนังแล้วนำวัสดุที่เข็ดผิวหนังแล้วไปวิเคราะห์หาปริมาณอนุภาคนาโน เช่น วัดความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของโลหะด้วยเครื่อง ICP-MS หรือวิธีการวิเคราะห์อื่น

##### ง.1.3 วิธีการลอกด้วยเทปกาว

ทำได้โดยการแปะเทปกาวลงบนผิวหนังเพื่อดึงอนุภาคนาโนที่อยู่บนผิวหนังและอยู่ในผิวหนังออกมา และนำไปวิเคราะห์หาอนุภาคนาโนด้วย ICP-MS หรือวิธีการวิเคราะห์อื่น

##### ง.1.4 วิธีการใช้ชิ้นวัสดุในการเก็บตัวอย่าง

###### ง.1.4.1 วิธีใช้แผ่นแปะ

ทำได้โดยนำแผ่นแปะซึ่งเลือกได้จากวัสดุที่หลากหลาย เช่น ผ้าพันแผลสำลีฝ้าย ผ้าพันแผลพอลิเอสเตอร์ แผ่นกระดาษแอลฟาเซลลูโลส โฟมพอลิยูรีเทน หรือฟิล์มพลาสติกพอลิโพรพิลีนแปะลงบนร่างกายเพื่อเก็บอนุภาคนาโนเมื่อมีการรับสัมผัสเกิดขึ้น วิธีการนี้เหมาะสำหรับใช้ในการ



ทดสอบเพื่อคัดกรอง เนื่องจากมีข้อจำกัดในการประมวลผลเชิงปริมาณ โดยทั่วไปเชื่อว่าทั้งวิธีการเก็บตัวอย่างอนุภาคนาโนจากผิวหนังหรือจากชิ้นวัสดุ ไม่สามารถให้ค่าปริมาณการสะสมของอนุภาคนาโนบนผิวหนังได้อย่างถูกต้อง โดยประสิทธิภาพการเก็บตัวอย่างอนุภาคนาโนจากผิวหนังจะต่ำกว่าประสิทธิภาพการเก็บตัวอย่างอนุภาคนาโนจากชิ้นวัสดุ ดังนั้นผลที่ได้จากวิธีการนี้เป็นเพียงการตอบสนองของผิวหนัง จึงเป็นค่าโดยประมาณของการรับสัมผัสเท่านั้น

ง.1.4.2 วิธีใช้ถุงมือ

ทำได้โดยใช้ถุงมือคู้ซบในการเก็บตัวอย่างอนุภาคนาโนที่สัมผัสกับมือ

ง.1.4.3 วิธีการวัดปริมาณอนุภาคนาโนทั้งตัว

ทำได้โดยใช้ชุดที่ห่อหุ้มทั้งร่างกายเป็นตัวจับอนุภาคนาโน (โดยทั่วไปเป็นชุดคลุมด้านในที่ยาวจากส่วนบนของลำตัวลงไปถึงขาและเท้า วัสดุทำจากผ้าฝ้าย) ข้อจำกัดของวิธีการนี้คือ ความยากในการแยกอนุภาคนาโนออกจากชุดซึ่งมีขนาดใหญ่ ข้อดีของวิธีการนี้เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แผ่นแปะคือ การลดโอกาสพลาดในบางบริเวณที่การรับสัมผัสอาจเกิดขึ้น หรืออาจทำโดยการใช้แผ่นแปะแผ่นแปะหลาย ๆ แผ่น แปะที่หลาย ๆ จุดของร่างกายเพื่อประมาณค่าการรับสัมผัสที่ส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย

ง.1.5 วิธีการอื่น ๆ

ง.1.5.1 ตัวติดตามการเรืองแสง

ทำได้โดยติดสารเรืองแสงที่ไม่เป็นพิษเข้ากับอนุภาคนาโน และถ่ายภาพเพื่อระบุตำแหน่งและวัดปริมาณอนุภาคนาโนที่สัมผัสกับผิวหนัง

ง.1.5.2 พื้นที่ผิวที่มีการปนเปื้อน

ทำได้โดยเก็บตัวอย่างจากพื้นผิวที่มีการปนเปื้อนอนุภาคนาโน เช่น อุปกรณ์ เครื่องมือ ซึ่งวิธีการนี้ใช้เป็นตัวคาดการณ์ลำดับแรกที่ใช้ระบุการรับสัมผัสผ่านทางผิวหนัง นอกจากนี้ยังนำค่าที่ได้จากการตรวจวัดไปใช้สำหรับการควบคุมการเคลื่อนย้ายของอนุภาคนาโนในสถานที่ปฏิบัติงานได้

ง.2 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ การกระจายตัวของขนาด ความเข้มข้นของจำนวน และรูปร่างของอนุภาคนาโนที่ได้จากการเก็บตัวอย่าง สำหรับการเก็บตัวอย่างด้วยวิธีการเช็ดออกนั้น หากใช้แผ่นกรองที่ทำจากเซลลูโลสเอสเทอร์อาจช่วยให้การวิเคราะห์ทำได้ง่ายขึ้น

การวิเคราะห์ด้วยหลักการกระเจิงแสง (light scattering) การหักเหของเลเซอร์ (laser diffraction) การแยกขนาดด้วยโครมาโทกราฟี (size exclusion chromatography) เทคนิคทางเสียง (acoustic techniques) และ การ

แยกด้วยเทคนิคการแยกภายใต้สนามการไหล (field-flow fractionation) ให้ข้อมูลการกระจายตัวของขนาดความเข้มข้นของจำนวน ขณะที่ สเปกโทรสโกปีให้ข้อมูลองค์ประกอบทางเคมี และ โครงสร้างของอนุภาคนาโน และนำมาใช้กับการเก็บตัวอย่างด้วยวิธีการชะล้างออกได้

หมายเหตุ เทคนิคการแยกภายใต้สนามการไหล (field-flow fractionation, FFF) เป็นเทคนิคที่พัฒนาขึ้นมา โดยเฉพาะสำหรับการแยกและการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุที่มีอนุภาคนาขนาดเล็กถึง โมเลกุลขนาดใหญ่ สามารถแยกสารตัวอย่างที่มีขนาดอนุภาคช่วง 1 nm ถึง 100 μm ที่อยู่ในตัวกลางของเหลวได้อย่างรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพสูง FFF นี้ประกอบด้วยเทคนิคย่อยหลายเทคนิค ซึ่งแต่ละเทคนิคย่อยนั้นใช้หลักการในการแยกพื้นฐานที่เหมือนกัน แตกต่างกันที่แรงที่ใช้ในการแยก โดยหลักการในการแยก คือ ใช้วิธีการชะสารตัวอย่างซึ่งใช้เฟสของเหลวเพียงเฟสเดียว (single liquid phase) ในการแยกสาร การวัดลักษณะเฉพาะของ FFF เกิดจากการให้แรงภายนอกในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางของการไหลของตัวอย่างที่ต้องการแยกผ่านท่อซึ่งมีลักษณะคล้ายรีบิบบาง เนื่องจากอัตราส่วนทางด้านยาวสุดต่อด้านสั้นสุดของท่อ FFF ที่มีค่าสูง โปรไฟล์การไหลภายในช่องการแยกนั้นมีลักษณะเป็นแบบพาราโบลา คือ มีความเร็วการไหลสูงสุดที่บริเวณศูนย์กลางของท่อ (channel) และความเร็วของการไหลลดลงเมื่อเข้าใกล้บริเวณผนังของท่อ FFF สามารถแบ่งออกเป็นเทคนิคย่อยได้ 4 ชนิด ได้แก่ การแยกภายใต้สนามการไหลแบบใช้การไหล (flow FFF) การแยกภายใต้สนามการไหลแบบการนอนกัน (sedimentation FFF) การแยกภายใต้สนามการไหลแบบที่ให้ความร้อน (thermal FFF) และการแยกภายใต้สนามการไหลแบบผ่านเซลล์แยก (split flow thin cell fractionation)

ตารางที่ ง.1 การเปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์การป้องกัน (APF) ของอุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ RPE (ข้อ 8.3.8.1)

ชนิดของอุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ 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 (กระดาศกรอง ≠N-P-R 100)	50	10
APR – หน้ากากชนิดกระชับกับใบหน้า (กระดาศกรอง = N-P-R 100)	50	50
PAPR – หน้ากากชนิดกระชับแบบครอบครึ่งใบหน้า	50	50
PAPR – หน้ากากชนิดกระชับแบบครอบเต็มใบหน้า	1 000	50
PAPR – ที่ครอบหน้าแบบครอบศีรษะ/คลุมศีรษะ	25/1 000 <sup>n</sup>	25
PAPR – หน้ากากชนิดปิดคลุมแบบมีช่องอากาศผ่านออก	25	25
SAR – ภาวะตามต้องการ (demand mode)– หน้ากากแบบครอบครึ่งใบหน้า	10	10
SAR – ภาวะตามต้องการ– หน้ากากแบบครอบเต็มใบหน้า	50	50

ตารางที่ ง.1 การเปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์การป้องกัน (APF) ของอุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ RPE (ต่อ)

ชนิดของอุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ RPE	OSHA 29CFR 1910.134 (2006)	NIOSH Decision Logic (2004)
SAR – การไหลต่อเนื่อง (continuous flow)– หน้ากากแบบครอบครึ่งใบหน้า	50	50
SAR – การไหลต่อเนื่อง– หน้ากากแบบครอบเต็มใบหน้า	1 000	50
SAR – การไหลต่อเนื่อง– ที่ครอบหน้าแบบครอบศีรษะ/คลุมศีรษะ	25/1 000 <sup>ก</sup>	25
SAR – การไหลต่อเนื่อง– หน้ากากชนิดปิดคลุมแบบมีช่องอากาศผ่านออก	25	25
SAR – ความดันตามต้องการ (pressure demand)– หน้ากากแบบครอบครึ่งใบหน้า	50	1 000
SAR – ความดันตามต้องการ– หน้ากากแบบครอบเต็มใบหน้า	1 000	2 000
Combo SAR/SCBA – ความดันตามต้องการ– หน้ากากแบบครอบเต็มใบหน้า	-	10 000
SCBA – ความดันตามต้องการ (demand mode)– หน้ากากแบบครอบครึ่งใบหน้า	10	-
SCBA – ความดันตามต้องการ– หน้ากากแบบครอบเต็มใบหน้า	50	50
SCBA – ความดันตามต้องการ– ที่ครอบหน้าแบบครอบศีรษะ/คลุมศีรษะ	50	-
SCBA – ความดันตามต้องการ– หน้ากากเต็มหน้า	10 000	10 000
SCBA – ความดันตามต้องการ– ที่ครอบหน้าแบบครอบศีรษะ/คลุมศีรษะ	10 000	-

<sup>ก</sup> ผู้ปฏิบัติงานต้องมีหลักฐานจากผู้ทำในการทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ระดับการป้องกัน 1 000 หรือมากกว่า

หมายเหตุ APF คือ ค่าต่ำสุดของการป้องกันที่คาดการณ์ไว้ซึ่งได้มาจากอุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจที่ใช้งานได้อย่างเหมาะสม หรือระดับของอุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ โดยค่าที่ได้มาจากผู้ใช้งานที่ผ่านการฝึกมาแล้วและนำมาพัฒนาโดย US NIOSH ซึ่งอ้างอิงมาจากการศึกษาในห้องปฏิบัติการ และการคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งรวมถึงการรั่วไหลจากการทะลุผ่านแผ่นกรองและการรั่วไหลจากส่วนปิดผนึกส่วนหน้าของอุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ APF 10 ของอุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ หมายถึง ผู้ใช้งานคาดได้ว่าอาจหายใจรับอากาศที่มีค่าไม่เกิน 10% ของอากาศที่มีการปนเปื้อน ในขณะที่ APF100 หมายถึง ผู้ใช้งานคาดได้ว่าอาจหายใจรับอากาศที่มีค่าไม่เกิน 1% ของอากาศที่มีการปนเปื้อน

## ตารางที่ ง.2 ข้อดีและข้อเสียของหน้ากากชนิดทำให้อากาศบริสุทธิ์ (APR) แต่ละชนิด

(ข้อ 8.3.8.1)

ชนิดของ APR	ข้อดี	ข้อเสีย
ที่ครอบหน้าชนิดแผ่นกรองแบบใช้แล้วทิ้ง (disposable filtering facepiece)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มวลเบา</li> <li>- ไม่ต้องบำรุงรักษาและทำความสะอาด</li> <li>- ไม่มีผลกระทบในการเคลื่อนไหวร่างกาย</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่มีการป้องกันดวงตา</li> <li>- มีปัญหาในเรื่องการระบายความร้อน</li> <li>- เกิดการรั่วที่ช่องว่างระหว่างหน้ากากกับใบหน้า</li> <li>- บางชนิดปรับสายรัดคางศีรษะไม่ได้</li> <li>- ขาดต่อผู้ใช้งานในการตรวจสอบการปิดผนึก</li> <li>- ระดับการป้องกันแตกต่างกันมากตามแบบหรือรุ่นที่ใช้</li> <li>- การสื่อสารทำได้ยาก</li> <li>- ต้องทดสอบความกระชับกับใบหน้าในการสวมใส่</li> <li>- การใส่แว่นตาอาจทำให้การสวมใส่ไม่พอดี</li> <li>- ต้องเปลี่ยน RPE เมื่อมีการเสียหาย หรือมีแรงดันอย่างชัดเจนเมื่อหายใจ</li> </ul>
ที่ครอบหน้าชนิดยืดหยุ่นแบบครอบครึ่งใบหน้า (elastomeric half facepiece)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การบำรุงรักษาง่าย</li> <li>- ตัวหน้ากานำกลับมาใช้ใหม่ได้ และเปลี่ยนแผ่นกรองและไส้กรองได้</li> <li>- ไม่มีผลกระทบในการเคลื่อนไหวร่างกาย</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่มีการป้องกันดวงตา</li> <li>- มีปัญหาในเรื่องการระบายความร้อน</li> <li>- เกิดการรั่วที่ช่องว่างระหว่างหน้ากากกับใบหน้า</li> <li>- การสื่อสารทำได้ยาก</li> <li>- ต้องทดสอบความกระชับกับใบหน้าในการสวมใส่</li> <li>- การใส่แว่นตาอาจทำให้การสวมใส่ไม่พอดี</li> </ul>
ที่ครอบหน้าคลุมช่องทางเดินหายใจแบบมีอากาศผ่านออกชนิดใช้แบตเตอรี่ (powered with loose-fitting facepiece)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ป้องกันดวงตา</li> <li>- ป้องกันผู้สวมใส่ที่มีเครา ฟันปลอม หรือแผลเป็นบนหน้า</li> <li>- ความต้านทานต่อการหายใจน้อย</li> <li>- อากาศที่ไหลผ่านทำให้เกิดความเย็น</li> <li>- สังเกตการรั่วไหลจากที่ปิดผนึกได้</li> <li>- ไม่ต้องทดสอบความกระชับของการสวมใส่</li> <li>- ใส่แว่นสายตาทำงานได้</li> <li>- การสื่อสารง่าย</li> <li>- ส่วนประกอบบางส่วนนำมาใช้ใหม่ได้ และเปลี่ยนแผ่นกรองได้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มวลของอุปกรณ์ที่มากขึ้นเนื่องจากแบตเตอรี่และเครื่องเป่าอากาศ</li> <li>- เคลื่อนไหวไม่สะดวกสำหรับการทำงาน</li> <li>- ต้องมีการชาร์จแบตเตอรี่</li> <li>- ต้องทดสอบอุปกรณ์ให้อากาศก่อนใช้งาน</li> </ul>

ตารางที่ ง.2 ข้อดีและข้อเสียของหน้ากากชนิดทำให้อากาศบริสุทธิ์ (APR) แต่ละชนิด (ต่อ)

ชนิดของ APRR	ข้อดี	ข้อเสีย
ที่ครอบหน้ายืดหยุ่นแบบครอบเต็มใบหน้าโดยใช้แผ่นกรอง N-100, R-100 หรือ P-100 (elastomeric full-facepiece with N-100, R-100, P-100 filter)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ป้องกันดวงตา</li> <li>- การบำรุงรักษาง่าย</li> <li>- นำแผ่นกรองด้านหน้ามาใช้ใหม่ได้และเปลี่ยนแผ่นกรองและไส้กรองได้</li> <li>- ไม่มีผลกระทบในการเคลื่อนไหวร่างกาย</li> <li>- ประสิทธิภาพการปิดผนึกมีมากกว่าหน้ากากชนิดแผ่นกรองด้านหน้าหรือหน้ากากยืดหยุ่นแบบครอบครึ่งใบหน้า</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีปัญหาในเรื่องการระบายความร้อน</li> <li>- บดบังทัศนวิสัยเมื่อเปรียบเทียบกับแบบครอบครึ่งใบหน้า</li> <li>- เกิดการรั่วที่ช่องว่างของการปิดผนึกในส่วนหน้าได้</li> <li>- ต้องทดสอบความกระชับกับใบหน้าในการสวมใส่</li> <li>- ถ้าไม่ใส่ที่ครอบจมูก หรือถ้าไม่มีการทำความสะอาดเลนส์ที่ใช้ในส่วนหน้าอาจทำให้เลนส์เกิดฝ้า</li> <li>- ต้องดูแลเป็นพิเศษสำหรับผู้ใส่แว่นสายตา</li> </ul>
ที่ครอบหน้าชนิดกระชับแบบครอบครึ่ง/เต็มใบหน้าชนิดใช้แบตเตอรี่ (powered with tight-fitting half facepiece or full facepiece)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ป้องกันดวงตาเมื่อใช้แบบครอบเต็มใบหน้า</li> <li>- ความต้านทานต่อการหายใจน้อย</li> <li>- อากาศที่ไหลผ่านทำให้เกิดความเย็น</li> <li>- สังเกตการรั่วไหลจากที่ปิดผนึกได้</li> <li>- ส่วนประกอบบางส่วนนำมาใช้ใหม่ได้และเปลี่ยนแผ่นกรองได้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มวลของอุปกรณ์ที่มากขึ้นเนื่องจากแบตเตอรี่และเครื่องเป่าอากาศ</li> <li>- เคลื่อนไหวไม่สะดวกสำหรับการทำงาน</li> <li>- ไม่มีการป้องกันดวงตาเมื่อใช้แบบครอบครึ่งใบหน้า</li> <li>- ต้องทดสอบความกระชับกับใบหน้าในการสวมใส่</li> <li>- ต้องชาร์จแบตเตอรี่</li> <li>- การสื่อสารทำได้ยาก</li> <li>- ต้องดูแลเป็นพิเศษสำหรับผู้ใส่แว่นสายตาเมื่อใช้แบบครอบเต็มใบหน้า</li> <li>- ต้องทดสอบอุปกรณ์ให้อากาศก่อนใช้งาน</li> </ul>