



ความปลอดภัยนาโน



(Nano Safety)

"รู้ก่อนใช้ ระวังภัยก่อนเกิดอันตราย"



ผู้ช่วยศาสตราจารย์เกียรติศักดิ์ บัทรสูงเนิน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ประวัติผู้เขียน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์เกียรติศักดิ์ บัตรสูงเนิน

ประวัติการศึกษา

- 2543 – 2546 วท.บ. อาชีวอนามัยและความปลอดภัย สำนักวิชาแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 2547 – 2550 วท.ม. สุขศาสตร์อุตสาหกรรมและความปลอดภัย ภาควิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
- 2558 – ปัจจุบัน กำลังศึกษา Ph.D. in life science (Nano Safety), Institute for Work and Health (IST), Faculty of Biology and Medicine, มหาวิทยาลัยโลซาน ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

ประสบการณ์การทำงาน

- 2548 – 2549 วิศวกรความปลอดภัย บริษัท CKE Engineering Co., Ltd.
- 2550 – ปัจจุบัน อาจารย์ประจำสาขาวิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 2553 – 2556 รักษาการหัวหน้าสาขาวิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 2557 - ปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย สำนักวิชาสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สถานที่ทำงานปัจจุบัน

สาขาวิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย สำนักวิชาสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

โทรศัพท์ : 044-223926

โทรสาร : 044-223920

อีเมล : kiattisak@sut.ac.th

Facebook: kiattisak batsungnoen



ความปลอดภัยนาโน (Nano Safety)



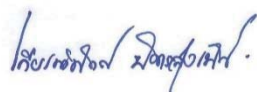
คำนำ

เอกสารความปลอดภัยนาโน (Nano Safety) “รู้ก่อนใช้ ระวังภัยก่อนเกิดอันตราย” ฉบับนี้ จัดทำขึ้นระหว่างผู้เขียนได้รับทุนจากกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศึกษาในระดับปริญญาเอกด้านความปลอดภัยนาโน (Nano Safety) ณ. Institute for Work and Health (IST), มหาวิทยาลัยโลซาน ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ รวมทั้งในโอกาสการแสดงความยินดี การก่อตั้งสำนักวิชาสาธารณสุขศาสตร์ เป็นสำนักวิชาที่ 8 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เอกสารฉบับนี้ผู้เขียนได้รวบรวมจากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความรู้ด้านความปลอดภัยนาโนเป็นหลัก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นแนวทางให้ผู้สนใจศึกษาความปลอดภัยนาโน ใช้เป็นความรู้พื้นฐานในการจัดการความปลอดภัยในสถานประกอบการที่มีการปฏิบัติงานเกี่ยวกับอนุภาคนาโนเหล่านี้

ความปลอดภัยนาโนเป็นหัวข้อใหม่ที่ท้าทายอย่างยิ่ง ต่อนักอาชีวอนามัยและความปลอดภัย ในการปกป้องคุ้มครองผู้ปฏิบัติงานให้ปราศจากโรคหรืออันตรายที่อาจจะเกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าเราจะมีเจ้าหน้าที่ความปลอดภัยที่เก่งกาจสักเท่าไรก็ตาม การดำเนินการด้านความปลอดภัยก็ไม่สามารถดำเนินงานให้ประสบความสำเร็จได้ด้วยเจ้าหน้าที่ความปลอดภัยเพียงคนเดียว แต่ต้องอาศัยความร่วมมือกันทุกฝ่ายไม่ว่าจะเป็นนายจ้าง เจ้าหน้าที่ความปลอดภัย รวมถึงผู้ปฏิบัติงานทุกคนร่วมตระหนักในการป้องกันอันตรายร่วมกัน

ถึงแม้ว่าอนุภาคนาโนจะมีประโยชน์อย่างมากต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมและธุรกิจ แต่อย่างไรก็ตามอนุภาคนาโนนี้ก็มีความเสี่ยงสูงต่อผู้ที่ได้รับสัมผัส ในขณะที่การศึกษาเกี่ยวกับความเป็นพิษและความเป็นอันตรายของอนุภาคนาโนต่อสุขภาพยังมีจำกัดและไม่เพียงพอ ดังนั้นผู้ที่มีโอกาสสัมผัสอนุภาคนาโน ควรตระหนักถึงอันตรายที่อาจเกิดขึ้น รวมทั้งหามาตรการในการป้องกันควบคุมอันตรายจากอนุภาคนาโน ก่อนส่งผลเสียต่อสุขภาพและชีวิต

ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าเอกสารฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อนายจ้าง เจ้าหน้าที่ความปลอดภัย เจ้าหน้าที่สิ่งแวดล้อม หัวหน้างาน วิศวกร ผู้ปฏิบัติงาน และผู้ที่มีความสนใจในงานด้านอาชีวอนามัยและความปลอดภัยทุกท่านไม่มากก็น้อย หากเอกสารฉบับนี้มีข้อผิดพลาด ผู้เขียนขอน้อมรับคำติชม เพื่อปรับแก้ไขและทำให้เอกสารฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น เพื่อเป็นประโยชน์สูงสุดต่อผู้อ่านทุกท่านต่อไป



ผู้ช่วยศาสตราจารย์เกียรติศักดิ์ บัตรสูงเนิน

2 กรกฎาคม 2560



สารบัญ

ความปลอดภัยนาโน (Nano safety)

1. บทนำ (Introduction)	1
นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology)	1
อนุภาคนาโน (Nano particle)	1
การจับตัวกันของอนุภาคนาโน	2
2. การประยุกต์ใช้อนุภาคนาโน (Nanoparticles and application)	3
2.1 อุตสาหกรรมก่อสร้าง (Construction)	4
2.2 ด้านการแพทย์ (Medical System)	4
2.3 ส่วนผสมในสินค้า (Customer goods)	5
2.4 อาหาร (Foods)	5
2.5 เครื่องสำอาง (Cosmetics)	6
2.6 ด้านการทหาร (Military)	6
2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)	6
2.8 การบิน อวกาศและอุตสาหกรรมยานยนต์	7
3. ผลกระทบต่อสุขภาพและการศึกษาด้านพิษวิทยาของอนุภาคนาโน (Health Effect of Nanoparticles and Toxicology Study)	8
3.1 อนุภาคนาโนในระบบทางเดินหายใจ	9
3.2 การเคลื่อนที่ของอนุภาคนาโนจากถุงลมปอดสู่อวัยวะเป้าหมาย	10
3.3 การศึกษาความเป็นพิษของอนุภาคนาโน	11

สารบัญ

ความปลอดภัยนาโน (Nano safety)

4. เทคนิคในการตรวจวัดอนุภาคนาโน (Analytical Techniques for Nanoparticles)	13
5. ค่าขีดจำกัดความเป็นอันตรายของอนุภาคนาโน (Exposure Limit for Nanomaterials)	15
6. การคัดกรองและการเฝ้าระวังทางทางการแพทย์ (Medical Screening and Surveillance)	16
7. มาตรการจัดการเมื่ออนุภาคนาโนเกิดการรั่วไหล (Measures of nanoparticles release)	17
8. การปฐมพยาบาลเบื้องต้น (First Aid)	18
9. การป้องกันควบคุมอนุภาคนาโน (Controlling of nanoparticles exposure)	
9.1 การป้องกันควบคุมอนุภาคนาโนทางด้านวิศวกรรม	19
9.2 การป้องกันควบคุมอนุภาคนาโนทางการบริหารจัดการ	20
9.3 การใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลสำหรับอนุภาคนาโน	21
9.3.1 หน้ากากกรองอากาศ	22
9.3.2 ถุงมือ	30
9.3.3 ชุดป้องกันอนุภาคนาโน	31
9.3.4 อุปกรณ์ป้องกันดวงตาสำหรับอนุภาคนาโน	32
10. บทสรุป (Executive summary)	33
11. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)	36
12. เอกสารอ้างอิง (References)	37

สารบัญรูป

รูปที่ 1: การเปรียบเทียบขนาดอนุภาคนาโน (Particle matter at different sizes)	1
รูปที่ 2: การจับตัวกันของอนุภาคนาโน	2
รูปที่ 3: การประยุกต์ใช้อนุภาคนาโน (Nanoparticles and application)	3
รูปที่ 4: Misericordia church, Rome, Italy	4
รูปที่ 5: สินค้าที่มีส่วนผสมของอนุภาคนาโน	5
รูปที่ 6: เครื่องสำอางที่มีส่วนผสมของอนุภาคนาโน	6
รูปที่ 7: Aluminium nanoparticle ที่ผสมในชั้นส่วนของยานอวกาศและเครื่องบิน	7
รูปที่ 8: การสะสมของอนุภาคในระบบทางเดินหายใจ (particle deposited in lung)	9
รูปที่ 9: การเคลื่อนที่ของอนุภาคนาโนจากถุงลมปอดสู่อวัยวะเป้าหมาย (Nano translocation)	10
รูปที่ 10: ตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้ศึกษาอนุภาคนาโน	13
รูปที่ 11: การปฏิบัติงานกับอนุภาคนาโนในระบบปิด (ห้องกระจกป้องกันอนุภาคนาโน)	20
รูปที่ 12: หน้ากากกรองอนุภาคนาโนชนิด N100 และ P100	25
รูปที่ 13: หน้ากากกรองอากาศชนิด Self-contained breathing apparatus: SCBA	26
รูปที่ 14: หน้ากากป้องกันอนุภาค ชนิด P3	27
รูปที่ 15: หน้ากากป้องกันอนุภาค ชนิด FFP3	27
รูปที่ 16: การกระจายตัวของอนุภาคลักษณะการทำงานเขย่าปูนซีเมนต์ออกจากถุงก่อนทำการผสมปูน	29
รูปที่ 17: ถุงมือที่ผลิตจากไนไตร์ (nitrile gloves)	30
รูปที่ 18: ชุดป้องกันอนุภาคนาโน	31
รูปที่ 19: อุปกรณ์ป้องกันดวงตาสำหรับอนุภาคนาโน	32

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1: การศึกษาความเป็นพิษของอนุภาคนาโน (Toxicology study of nanoparticles)	11
ตารางที่ 2: เครื่องมือที่ใช้ศึกษาอนุภาคนาโน	14
ตารางที่ 3: ประเภทของหน้ากากกรองอากาศตามมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา	24
ตารางที่ 4: หน้ากากตามมาตรฐาน EN 143	26
ตารางที่ 5: หน้ากากตามมาตรฐาน EN 149	27

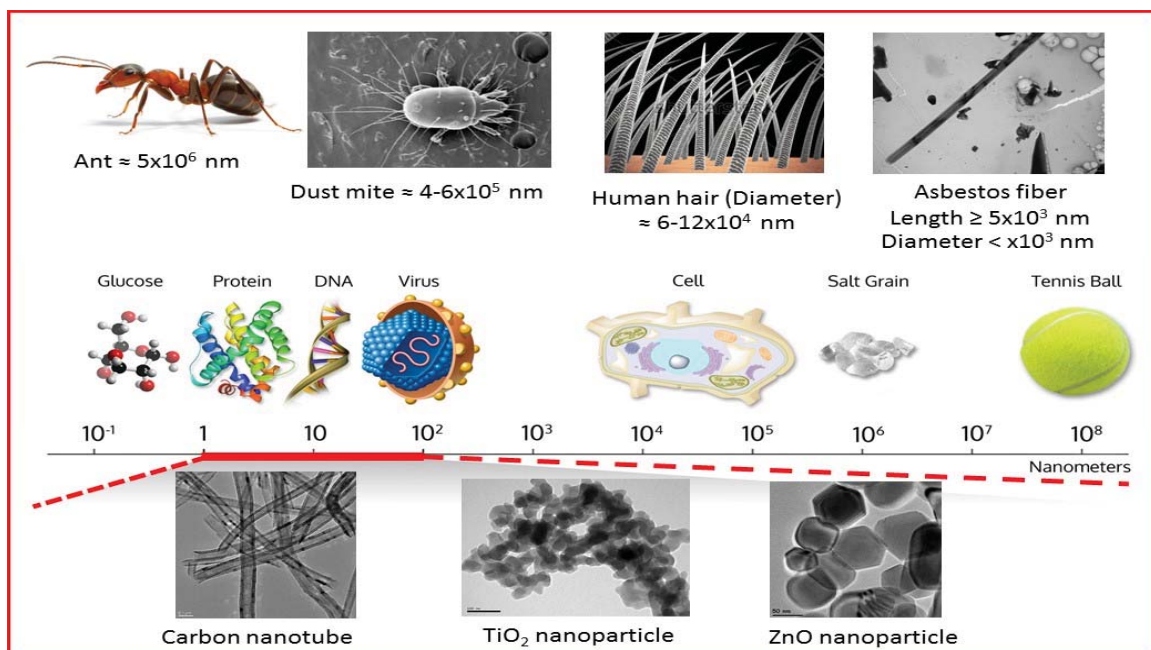


ความปลอดภัยนาโน (Nano safety)

1. บทนำ (Introduction)

นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) คือ เทคโนโลยีที่ศึกษา ทำความเข้าใจ จัดการ และควบคุมอนุภาคที่มีขนาดตั้งแต่ 1 ถึง 100 นาโนเมตร (10^{-9} เมตร) ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดอะตอมของธาตุ (1) (2) (3) (4) เพื่อพัฒนาให้วัสดุมีคุณสมบัติ โครงสร้างใหม่ ตามที่ผู้วิจัยต้องการ เช่น ทำความสะอาดตัวเอง (Self-cleaning) ฆ่าเชื้อโรค (Biocide) ลดมลพิษ (Depollution) ความเป็นฉนวนกัน (Insulation) ตัวนำสาร (Carrier) น้ำหนักเบา (Weightless) รวมถึงมีความแข็งแรงสูง (Strong) ฯลฯ เป็นต้น

อนุภาคนาโน (Nano particle) หรือบางครั้งเรียกว่า **Ultrafine Particle** คืออนุภาคที่มีขนาดตั้งแต่ 1 ถึง 100 นาโนเมตร (10^{-9} เมตร) เราไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า โดยอนุภาคนาโนมีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นผมประมาณ 10,000 เท่า เล็กกว่าขนาดของเส้นใยแอสเบสตอส (Asbestos) ประมาณ 1,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 1 ดังนั้นการที่จะมองเห็นอนุภาคนาโนนั้นจะต้องใช้เครื่องมือที่มีความละเอียดสูงมากจึงจะสามารถมองเห็นอนุภาคนาโนได้ โดยทั่วไปแล้วจะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนในการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology) ของอนุภาค เช่น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Transmission Electron Microscopy: TEM) หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Scanning Electron Microscopy: SEM)



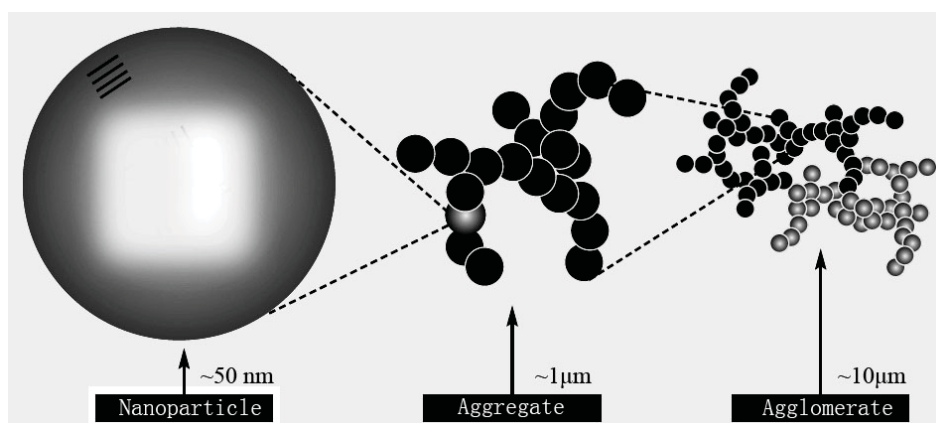
รูปที่ 1: การเปรียบเทียบขนาดอนุภาคนาโน (Particle matter at different sizes) (5) (6)

การจับตัวกันของอนุภาคนาโน

อนุภาคนาโนปฐมภูมิ (Primary nanoparticle หรือ Single nanoparticle) หมายถึง อนุภาคนาโนที่อยู่อิสระ ไม่ได้รวมตัวหรือจับตัวกับอนุภาคนาโนอื่น ๆ แต่โดยทั่วไปแล้วในสภาวะที่เหมาะสมอนุภาคนาโนสามารถจับเกาะกันได้ทั้งสองลักษณะ ได้แก่ การจับตัวกันแบบก้อนรวม (Aggregation) และ การจับตัวกันแบบก้อนเกาะหลวม (Agglomeration)

การจับตัวกันแบบก้อนรวม (Aggregation) หมายถึง การจับตัวกันของอนุภาคนาโนด้วยพันธะที่แข็งแรง (strong forces) เช่น การจับตัวกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalent bonds) ด้วยแรงทางพันธะที่แข็งแรงมากจึงยากที่จะแยกอนุภาคนี้ออกจากกันได้โดยง่าย การเกาะกันของอนุภาคแบบนี้ทำให้พื้นที่ผิวน้อยกว่าผลรวมของอนุภาคพื้นที่ผิวย่อย ๆ (individual components) รวมกัน


การจับตัวกันแบบก้อนเกาะหลวม (Agglomeration) หมายถึง การจับตัวกันของอนุภาคนาโนแบบหลวมๆ ด้วยแรงทางพันธะที่อ่อน (Weak forces) เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals forces) การเกาะกันของอนุภาคนาโนลักษณะนี้ ทำให้อนุภาคนาโนมีพื้นที่ผิวมาก ซึ่งมากพอกับผลรวมของพื้นที่ผิวของอนุภาคนาโนย่อย ๆ รวมกัน เมื่อพื้นที่ผิวมากก็จะสามารถเกิดปฏิกิริยาได้มาก



รูปที่ 2: การจับตัวกันของอนุภาคนาโน (7)

2. การประยุกต์ใช้นาโน (Nanoparticles and application)

ปัจจุบันนี้มีการนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้ในอุตสาหกรรม ทำให้เกิดประโยชน์อย่างมากมายมหาศาล ไม่เพียงแต่ด้านการพัฒนาคุณสมบัติของวัสดุ ยังรวมถึงการอนุรักษ์พลังงานงาน เช่น ใช้เป็นฉนวนกันความร้อน ความเย็น กักเก็บพลังงาน เพิ่มการสะท้อนแสง เป็นต้น ในประเทศสหรัฐอเมริกาพลังงาน 41% พลังงานถูกใช้ในอาคาร ที่อยู่อาศัย สำนักงาน โดยพลังงานส่วนใหญ่สูญหายไปกับความร้อน แสงสว่างและเครื่องปรับอากาศ (8) เมื่อมีการนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้ก็จะสามารถลดปัญหาการใช้พลังงานได้อย่างมาก ตัวอย่างการประยุกต์ใช้นาโนในในด้านต่าง ๆ เช่น ด้านอุตสาหกรรมก่อสร้าง ด้านการแพทย์ ส่วนผสมในสินค้าผลิตภัณฑ์อาหาร เครื่องสำอาง ทางด้านการทหาร ตัวเร่งปฏิกิริยา และด้านการบิน อวกาศและอุตสาหกรรมการขนานยนต์ เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 3

<p>1. Construction</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cement • Steel • Wood • Glass • Coatings • Paints • Solar cell • Window • Ceramics 	<p>2. Medical system</p> <ul style="list-style-type: none"> • Drug carrier • Medical tools 	<p>3. Consumer goods</p> <ul style="list-style-type: none"> • Surfaces and coatings • Textiles • Sports
<p>Nanoparticles and Applications</p>		
<p>4. Foods</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nanotea • Nanoceuticals Slim Shake Chocolate • "nanodrops" designed to carry vitamins 	<p>6. Military</p> <ul style="list-style-type: none"> • Biological sensors • Uniform material • Communication method • Weapons 	
<p>5. Cosmetics</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sunscreen (UV Protection) • Whitening 	<p>7. Catalysis</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fuel and petroleum <p>8. Aerospace and vehicle manufacturers</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aircraft manufacturers • Automotive manufacturers 	

รูปที่3: การประยุกต์ใช้นาโน (Nanoparticles and application)

2.1 อุตสาหกรรมก่อสร้าง (Construction)

เมื่อนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้ในการก่อสร้าง ไม่ว่าจะเป็นการสร้างอาคาร บ้านเรือน โครงสร้างพื้นฐาน (infrastructure) จะทำให้วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้น เมื่อวัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้นก็จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมสิ่งก่อสร้างลดลง รวมทั้งทำให้ขยะที่เกิดจากการก่อสร้างลดลงอีกด้วย (3) (9) มากไปกว่านั้น ผลิตรภัณฑ์ที่ทำจากอนุภาคนาโนยังมีคุณสมบัติพิเศษในการเป็นฉนวนกันความร้อน กักเก็บพลังงาน ทำความสะอาดตัวเองและฆ่าเชื้อโรคได้อีกด้วย (10) (11) (12) (13) ตัวอย่างผลิตรภัณฑ์ในงานก่อสร้างที่มีการผสมอนุภาคนาโน เช่น ปูนซีเมนต์ เหล็กกล้า ไม้ กระจก สี แผงโซลาร์เซลล์ หน้าต่าง และเซรามิค เป็นต้น



รูปที่4: Misericordia church, Rome, Italy (14)

Misericordia church กรุงโรม ประเทศอิตาลี สร้างจาก Photocatalytic cement คือปูนซีเมนต์ผสมนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้ตึกนี้มีคุณสมบัติ อย่างน้อย 4 อย่างได้แก่

1. ทำความสะอาดตัวเอง (Self-cleaning)
2. ฆ่าเชื้อโรค (Biocide)
3. ลดมลพิษ (Depollution)
4. สีขาวคงทนโดยไม่ต้องทาสี เนื่องจากนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มีสีขาว

คุณสมบัติเหล่านี้เกิดจากปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส (Photocatalysis) โดยมีแสงอาทิตย์เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยา

2.2 ด้านการแพทย์ (Medical System)

ในด้านการแพทย์นิยมใช้อนุภาคนาโนเป็นตัวนำยา (Drug carrier) โดยอนุภาคนาโนนี้สามารถนำยาไปยังอวัยวะเป้าหมายที่สำคัญ รวดเร็วและเฉพาะเจาะจงถึงตำแหน่งที่ต้องการนำยาได้ รวมถึงมีการพัฒนาอนุภาคนาโนไปเป็นอุปกรณ์เครื่องมือแพทย์ต่าง ๆ (Medical tools) ด้วยคุณสมบัติที่เบาของวัสดุนาโน

2.3 ส่วนผสมในสินค้า (Customer goods)

ในสินค้าบางประเภทผสมอนุภาคนาโนเข้าไปเพื่อเคลือบผิว (Surfaces and coatings) เพื่อให้วัสดุมีคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น มีพื้นผิวที่ลื่นนุ่ม (Smoothness) ต้านทานความร้อน (Heat resistance) เพิ่มความแข็งแรงของวัสดุ เป็นต้น ตัวอย่างสินค้าที่มีการประยุกต์ใช้อนุภาคนาโน เช่น สิ่งทอต่าง ๆ และในอุปกรณ์กีฬา เป็นต้น



รูปที่ 5: สินค้าที่มีส่วนผสมของอนุภาคนาโน (15) (16)

2.4 อาหาร (Foods)

ในอุตสาหกรรมอาหารบางประเภท โดยเฉพาะอาหารเสริม มีการเติมอนุภาคนาโนเข้าไปในอาหารเพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ เพื่อให้สามารถเก็บอาหารได้นานขึ้น รวมถึงการใช้งานอนุภาคนาโนในการเป็นตัวนำแร่ธาตุ วิตามิน และการปรับปรุงรสชาติและคุณสมบัติของอาหาร ตัวอย่างเช่น Nanotea ช่วยเพิ่มการทำงานของซีลีเนียม (Selenium) 10 เท่า Nanoceutical Slim Shake Chocolate ที่ใช้เทคนิค Nanoclusters ที่ช่วยให้มีรสชาติดีโดยปราศจากการเติมน้ำตาล กำลังเป็นที่สนใจของผู้ที่ต้องการลดและควบคุมน้ำหนัก เป็นต้น

2.5 เครื่องสำอาง (Cosmetics)

ในเครื่องสำอางบางประเภทมีการเติมอนุภาคนาโนเข้าไปเพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการป้องกันแสงแดดและรังสียูวี (Sunscreens and UV protection) และเพิ่มความขาว (Whitening) ให้กับผิวหนัง อนุภาคนาโนชนิดนี้ คือ Titanium dioxide nanoparticle (TiO_2) และ Zinc dioxide nanoparticle (ZnO)



รูปที่ 6: เครื่องสำอางที่มีส่วนผสมของอนุภาคนาโน (17) (18)

2.6 ด้านการทหาร (Military)

ในด้านการทหารมีการนำอนุภาคนาโนเข้ามาพัฒนาขีดความสามารถของกองทัพ เช่น Biological sensor ช่วยในการตรวจจับอาวุธชีวภาพ พัฒนาในวัสดุทำเครื่องแบบทหาร (Uniform material) เพื่อให้เครื่องทหารแบบมีคุณสมบัติพิเศษในการป้องกันอุณหภูมิ ที่ร้อนหรือเย็นจัด ป้องกันสารเคมี และรังสี เป็นต้น การพัฒนาทางด้านการทหารรวมถึงการสื่อสาร (Communication method) และการพัฒนาด้านอาวุธ (Weapons) เพื่อใช้ในการต่อสู้

2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้อนุภาคนาโนถูกพัฒนาอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงและปิโตรเลียม โดยอาศัยคุณสมบัติของวัสดุนาโนที่มีพื้นที่ผิวมากจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีได้ดี ส่งผลให้ลดปริมาณการใช้งานของเชื้อเพลิงได้ รวมถึงส่งผลถึงการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และสม่ำเสมอของเครื่องยนต์ เป็นต้น

2.8 การบิน อวกาศและอุตสาหกรรมยานยนต์ (Aerospace and vehicle manufacturers)

ด้วยคุณสมบัติของอนุภาคนาโนมีน้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรงสูง เช่น Aluminium nanoparticle ถูกพัฒนาให้เป็นชิ้นส่วนของยานอวกาศ เครื่องบิน และยานพาหนะที่ต้องการความเร็วสูง เมื่อยานพาหนะมีน้ำหนักเบาจะส่งผลต่อการประหยัดเชื้อเพลิงในการขับเคลื่อนมากขึ้น



รูปที่ 7: Aluminium nanoparticle ที่ผสมในชิ้นส่วนของยานอวกาศและเครื่องบิน (19)

ปัจจุบันนี้อนุภาคนาโนถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ตัวอย่างเช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotube: CNT) ไอรอนออกไซด์ (FeO) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ซิลเวอร์ออกไซด์ (AuO) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และ ควอนตัมดอท (Quantum dot) เป็นต้น (8) (9) (10) (20) (21)

ถึงแม้ว่าอนุภาคนาโนจะมีประโยชน์อย่างมากต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมและธุรกิจ แต่อย่างไรก็ตามอนุภาคนาโนนี้ก็มีความเสี่ยงสูงต่อผู้ที่สัมผัส ในขณะที่การศึกษาเกี่ยวกับความเป็นพิษและความเป็นอันตรายของอนุภาคนาโนต่อสุขภาพยังมีจำกัดและไม่เพียงพอ มีเพียงงานวิจัยบางส่วนเท่านั้นที่ยืนยันว่าอนุภาคนาโนมีผลต่อสุขภาพของสัตว์ทดลองและสุขภาพของมนุษย์ ดังนั้นผู้ที่มีโอกาสสัมผัสอนุภาคนาโน ควรตระหนักถึงอันตรายที่อาจเกิดขึ้น รวมทั้งหามาตรการในการป้องกันควบคุมอันตรายจากอนุภาคนาโน ก่อนส่งผลเสียต่อสุขภาพและชีวิต

3. ผลกระทบต่อสุขภาพและการศึกษาด้านพิษวิทยาของอนุภาคนาโน (Health Effect of Nanoparticles and Toxicology Study)

ปัจจุบันการศึกษาถึงอันตรายและผลกระทบต่อสุขภาพของอนุภาคนาโนในมนุษย์ยังมีข้อจำกัด ข้อมูลส่วนใหญ่ได้จากการศึกษาในเซลล์สิ่งมีชีวิตและสัตว์ทดลอง แต่อย่างไรก็ตามอนุภาคนาโนสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทางคือ ทางการหายใจ (Inhalation) ทางผิวหนัง (Dermal contact) และการกิน (Digestion) ขึ้นอยู่กับลักษณะการทำงานของผู้ปฏิบัติงาน **โดยทางการหายใจเป็นทางเข้าสู่ร่างกายหลักและมีความเสี่ยงสูงสุด (22) (23) (24)** มีงานวิจัยหลายเรื่องได้แสดงให้เห็นถึงความเป็นพิษและความเป็นอันตรายของอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ขึ้น (Engineered Nanoparticles: ENP) โดยลักษณะอันตรายจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของอนุภาคนาโนนั้น ๆ เป็นหลัก **ความเป็นพิษของอนุภาคนาโนจะสูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ที่เป็นสารชนิดเดียวกัน** เนื่องจากอนุภาคนาโนมีขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวมาก เข้าสู่เซลล์และอวัยวะต่าง ๆ ได้มากและลึกกว่า จึงส่งผลให้เกิดอันตรายที่มากกว่าตามมา

ทางเข้าสู่ร่างกายของอนุภาคนาโนมีความสัมพันธ์กับการเกิดพยาธิสภาพหรือการก่อโรคในร่างกายมนุษย์ ตัวอย่างเช่น TiO_2 nanoparticle มีหลักฐานยืนยันว่าสามารถก่อโรคกับผู้ที่ได้รับสัมผัสทางกายหายใจ เช่น ทำให้เกิดมะเร็งปอด การสัมผัสทางผิวหนังได้รับการยืนยันแล้วว่า TiO_2 nanoparticle ไม่สามารถซึมผ่านผิวหนังได้ เช่นในกรณีผสมในครีมทาผิว ส่วนทางการกินยังไม่มีผลการวิจัยยืนยันว่าสามารถก่อโรคได้หรือไม่ เป็นต้น ความเป็นพิษและความเป็นอันตรายของอนุภาคนาโนที่ถูกสังเคราะห์ขึ้น (ENP) ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของอนุภาคนาโน ดังต่อไปนี้ (25) (26) (27) (28)

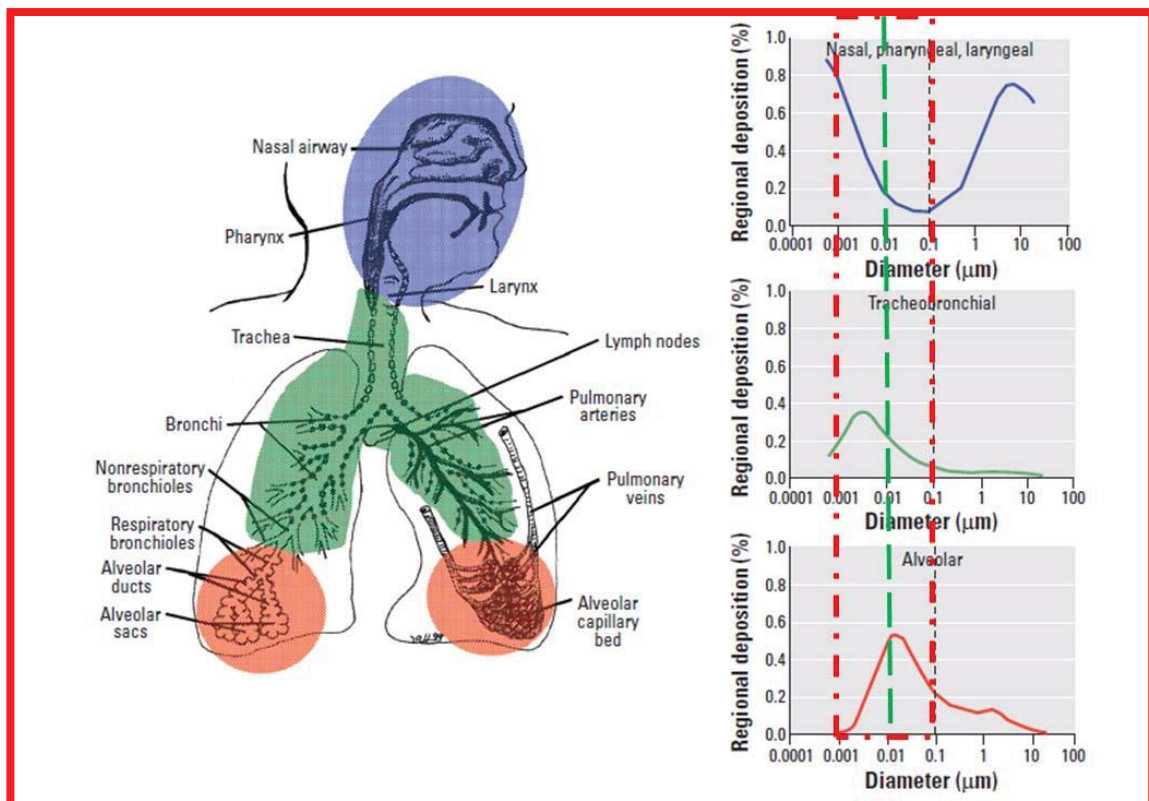
- คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties)
- คุณสมบัติทางเคมี (Chemical properties)
- องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition)
- คุณสมบัติของการจับตัวกัน (Agglomeration state)
- รูปร่าง (Shape)
- โครงสร้างผลึก (Crystal structure)
- ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน (Nanoparticle concentration)
- พื้นที่ผิวของอนุภาคนาโน (Surface area)
- สภาพแวดล้อมการทำงาน (Working condition)

- ระยะเวลาการสัมผัส (Exposure duration)
- ศักยภาพของการเกิดพิษ (Potential hazard identification)
- ขนาดอนุภาค (Particle size)
- การกระจายขนาดของอนุภาค (Size distribution)

มีการศึกษาอนุภาคนาโนและอนุภาคขนาดใหญ่ในปริมาณที่มวลของอนุภาคทั้งสองชนิดเท่ากัน ผลการศึกษาพบว่า อนุภาคนาโนมีความเป็นพิษและความเป็นอันตรายสูงกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ต่อหน่วยมวล (Mass per unit) (29) ยิ่งไปกว่านั้นมีการศึกษาทดลองในหนู แสดงให้เห็นถึงปริมาณการสัมผัสสารที่มีมวลเท่ากัน (equivalent mass doses) **อนุภาคนาโนที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยมีศักยภาพให้เกิดอันตรายสูงกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมือนกัน** รวมทั้งอนุภาคนาโนยังเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการอักเสบของเนื้อเยื่อปอด เนื้อเยื่อปอดถูกทำลาย และเกิดเนื้องอกในปอด (23) (26) (30)

3.1 อนุภาคนาโนในระบบทางเดินหายใจ (Nanoparticle in respiratory tract)

ผลจากการศึกษาอนุภาคนาโนในระบบทางเดินหายใจพบว่า อนุภาคนาโน (ขนาดตั้งแต่ 1 ถึง 100 นาโนเมตร) สามารถสะสมในระบบทางเดินหายใจ ตั้งแต่โพรงจมูกหรือระบบทางเดินหายใจส่วนต้น (nasopharyngeal region) หลอดลมหรือระบบทางเดินหายใจส่วนกลาง (tracheobronchial region) และระบบทางเดินหายใจส่วนปลายหรือถุงลมปอด (alveolar region) (31) (32) (33) (34)

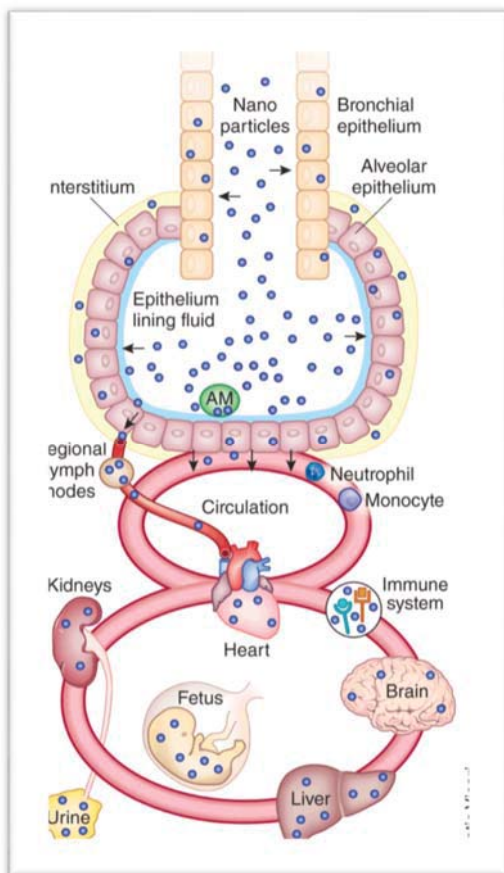


รูปที่ 8: การสะสมของอนุภาคในระบบทางเดินหายใจ (particle deposited in lung) (35) (31)

จากรูปที่ 8 สามารถอธิบายได้ดังนี้ อนุภาคที่มีขนาด 10 นาโนเมตร ($0.01 \mu\text{m}$) สามารถสะสมในถุงลมปอด (alveolar region) ได้ถึง 58 เปอร์เซ็นต์ ประมาณ 21 เปอร์เซ็นต์สะสมในทางเดินหายใจส่วนกลาง (tracheobronchial region) และอีกประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์สะสมในระบบทางเดินหายใจส่วนต้น (nasopharyngeal region) แต่อย่างไรก็ตามอนุภาคนาโนจำนวนหนึ่งที่สะสมในระบบทางเดินหายใจส่วนต้น และระบบทางเดินหายใจส่วนกลางสามารถขับออกได้เองบางส่วน โดยอาศัยกลไกธรรมชาติของร่างกาย เช่น การไอ จาม และออกมากับเสมหะ ส่วนอนุภาคนาโนที่สะสมอยู่ในถุงลมปอดไม่สามารถขับออกมาได้ แต่มีอนุภาคนาโนบางส่วนสามารถเคลื่อนที่ไปยังอวัยวะเป้าหมายอื่นได้

3.2 การเคลื่อนที่ของอนุภาคนาโนจากถุงลมปอดสู่อวัยวะเป้าหมาย (Nano translocation)

(36) (37) (38)



อนุภาคนาโนเมื่อเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจในส่วนปลายหรือในส่วนของถุงลมปอด (Alveoli) สามารถเคลื่อนที่ผ่านผนังของ Alveolar Epithelium ได้ โดยการเคลื่อนที่ผ่านไปกับ air-blood barrier ไปยังระบบไหลเวียนโลหิต (Circulation system) และระบบน้ำเหลือง (lymph nodes) แล้วเคลื่อนที่ไปยังอวัยวะเป้าหมายอื่นที่สำคัญ เช่น ระบบภูมิคุ้มกัน (Immune system) หัวใจ (Heart) สมอง (Brain) ตับ (Liver) ตัวอ่อน (Fetus) และ ไต (Kidneys) อนุภาคนาโนบางส่วนขับออกทางไตมาพร้อมกับปัสสาวะ (Urine)

รูปที่ 9: การเคลื่อนที่ของอนุภาคนาโนจากถุงลมปอดสู่อวัยวะเป้าหมาย (Nano translocation) (37)

มีรายงานการเกิดโรค Pulmonary Alveolar Proteinosis (PAP) (PAP คือ โรคปอดชนิดหนึ่งที่พบได้น้อยมาก เกิดขึ้นจากการสะสมของโปรตีนและไขมันในถุงลมปอด (Alveoli)) ของคนงานที่มีประสบการณ์การทำงานเป็นช่างสีมากกว่า 25 ปี โดยใน 8 ปีคนงานรายนี้ใช้วิธีการพ่นสีเป็นหลัก และใน 1 ปี มีการทำงานพ่นทราย รวมทั้งในขณะที่ทำงานเขาไม่ใช้หน้ากากป้องกันฝุ่น ในรายงานพบว่า ในเนื้อเยื่อปอดของคนงานรายนี้มีไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นจำนวนมาก (ไทเทเนียมไดออกไซด์ คืออนุภาคนาโนชนิดหนึ่ง) (39) (40) คนงานที่สัมผัสไทเทเนียมไดออกไซด์ในระบบทางเดินหายใจทำให้เนื้อเยื่อปอดถูกทำลายและสุดท้ายจะพัฒนาไปเป็นมะเร็งปอดได้ (22)

3.3 การศึกษาความเป็นพิษของอนุภาคนาโน (Toxicology study of nanoparticles)

ในปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่น่าเสนอผลการศึกษาของอนุภาคนาโนที่มีต่อเซลล์สิ่งมีชีวิต ทั้งในรูปแบบ อินวิโทร (in vitro study) และ อินวิโว (In vivo study)

อินวิโทร (in vitro study) คือ การศึกษาผลกระทบต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ในสภาพแวดล้อมที่ควบคุม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความดัน เป็นต้น และทำการทดลองในหลอดทดลอง เซลล์ที่ศึกษาอาจเป็นได้ทั้งเซลล์ของจุลชีพ เซลล์สัตว์ หรือเซลล์ของมนุษย์

การศึกษาแบบอินวิโว (In vivo study) คือ การศึกษาในสภาพแวดล้อมจริง ในร่างกายสิ่งมีชีวิตปกติ โดยใช้สัตว์ทดลอง เช่น หนู กระจ่างย ลิง รวมถึงการศึกษาในมนุษย์ เป็นต้น

ส่วนการศึกษาในเชิงการสัมผัส (Exposure study) และการศึกษาเชิงระบาดวิทยา (Epidemiology study) ยังมีอยู่อย่างจำกัด เนื่องจากยังมีข้อมูลการศึกษาที่ไม่เพียงพอในการก่อโรคของอนุภาคนาโนในมนุษย์ ตัวอย่างผลการศึกษาความเป็นพิษของอนุภาคนาโน แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1: การศึกษาความเป็นพิษของอนุภาคนาโน (Toxicology study of nanoparticles)

ชนิดของอนุภาคนาโน	ผลการศึกษาทางพิษวิทยา
ไทเทเนียมไดออกไซด์ Titanium Dioxide (TiO ₂)	<ul style="list-style-type: none"> ● ทำลายเนื้อเยื่อปอด (16) ● ทำลายดีเอ็นเอ (41) ● ทำลายสารทางพันธุกรรม (Genotoxicity) (42) ● มีความเป็นพิษต่อเซลล์ (Cytotoxicity) (42) ● มะเร็งปอดชนิด 2B (เป็นไปได้ที่จะเกิดมะเร็งปอดในมนุษย์) (40) (43) (44)

ตารางที่ 1: การศึกษาความเป็นพิษของอนุภาคนาโน (Toxicology study of nanoparticles) (ต่อ)

ชนิดของอนุภาคนาโน	ผลการศึกษาทางพิษวิทยา
ไทเทเนียมไดออกไซด์ Titanium Dioxide (TiO ₂)	<ul style="list-style-type: none"> ● ให้เซลล์ตายชนิดเฉียบพลัน (acute lethality) ● ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (Reductive oxygen species: ROS) ค่า ROS แสดงถึงความเป็นอันตรายของเซลล์และแนวโน้มความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็ง (10)
คาร์บอนนาโนทิวบ์ Carbon nanotubes (CNT)	<ul style="list-style-type: none"> ● ทำลายเซลล์แบคทีเรีย (10) ● ทำให้เซลล์ตาย (apoptosis and necrosis) ● ยับยั้งการทำงานของระบบทางเดินหายใจ ● ทำลาย Mitochondrial ในดีเอ็นเอ ● มะเร็งปอดชนิด 2B เป็นไปได้ที่จะเกิดมะเร็งปอดในมนุษย์ (Possibly carcinogenic to humans) (44)
C ₆₀ fullerene ซี 60 ฟูลเลอร์รีน	<ul style="list-style-type: none"> ● ยับยั้งแบคทีเรีย (10) ● เป็นพิษต่อเซลล์มนุษย์ (cytotoxicity) ● ทำให้เซลล์ตาย (apoptosis and necrosis) ● เกิดการสะสมในตับ accumulation in liver ● ทำให้เกิดเนื้องอก (gliomas) ในเซลล์หนูและเซลล์มนุษย์ ● ทำให้เกิดมะเร็ง (sarcomas) ในเซลล์หนูและเซลล์มนุษย์
ควอนตัมดอท Quantum dots	<ul style="list-style-type: none"> ● เป็นพิษต่อแบคทีเรีย (10) ● ทำลายดีเอ็นเอ ● เกิดการสะสมในไต ● เป็นพิษต่อเซลล์ อวัยวะ เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน
ซิลิคอนไดออกไซด์ Silicon dioxide (SiO ₂)	<ul style="list-style-type: none"> ● ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (Reductive oxygen species: ROS) (10) ● ทำให้เซลล์ตาย (Apoptosis) ● ตอบสนองต่อการอักเสบและระบบภูมิคุ้มกัน
Copper/ copper oxide nanoparticles	<ul style="list-style-type: none"> ● ทำลายดีเอ็นเอ (10) ● DNA damage (single strand breaks) ● เกิด lipid peroxidation ซึ่งอาจส่งผลต่อการเกิดโรคหัวใจ ● เป็นพิษเฉียบพลันต่อตับ ไต และม้าม

4. เทคนิคในการตรวจวัดอนุภาคนาโน (Analytical Techniques for Nanoparticles)

เทคนิคในการตรวจวัดอนุภาคนาโนได้รับการพัฒนาอย่างแพร่หลาย ทำให้ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา มีเครื่องมือในการวัดอนุภาคนาโนออกมาวางขายในท้องตลาดอยู่เป็นจำนวนมาก แต่ราคายังสูงมาก ดังนั้นการเลือกเครื่องมือในการตรวจวัดอนุภาคนาโนขึ้นอยู่กับงบประมาณที่มี และวัตถุประสงค์ของการตรวจวัด เช่น

- การตรวจวัดหาขนาดของอนุภาคนาโน (Size)
- การตรวจวัดหาการกระจายขนาดของอนุภาคนาโน (Size distribution)
- การตรวจวัดหาความเข้มข้นของอนุภาคนาโน (Nanoparticle concentration)
- การตรวจวัดหาพื้นที่ผิวของอนุภาคนาโน (Nanoparticle surface area)
- การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโน (Morphology)
- การศึกษาองค์ประกอบของธาตุ (Elemental composition)

อย่างไรก็ตามในการเลือกเทคนิคที่เหมาะสมในการวัดอนุภาคนาโนนั้น อาจใช้หลายเทคนิคร่วมกัน เพื่อให้ได้ตัวอย่างที่ทำการศึกษามีความถูกต้องและชัดเจนมากยิ่งขึ้น ตัวอย่างของเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาอนุภาคนาโนแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 10: ตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้ศึกษาอนุภาคนาโน (45) (46)

ตารางที่ 2: เครื่องมือที่ใช้ศึกษาอนุภาคนาโน (47) (28)

เครื่องมือที่ใช้ศึกษาอนุภาคนาโน	ลักษณะการศึกษา	Sensitivity
1. Transmission Electron Microscopy (TEM)	ขนาดของอนุภาคนาโน ลักษณะของอนุภาค	ขนาดเล็กถึง 1nm
2. Scanning Electron Microscopy (SEM)	ขนาดของอนุภาคนาโน ลักษณะของอนุภาค	ขนาดเล็กถึง 1nm
3. Atomic Force Microscopy (AFM)	ขนาดของอนุภาคนาโน ลักษณะของอนุภาค	1nm - 8 μ m
4. Photon Correlation Spectroscopy (PCS)	ขนาดของอนุภาคนาโนเฉลี่ย การกระจายขนาดอนุภาคนาโน	1nm -10 μ m
5. Nanoparticle Surface Area Monitor (NSAM)	พื้นที่ผิวสะสมของอนุภาคนาโนในปอด (Lung deposited surface area: LDSA)	ขนาดเล็กถึง 10nm
6. Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) (45)	การกระจายขนาดของอนุภาคนาโน ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน ขนาดของอนุภาคเฉลี่ย	0.8 – 1,000nm
7. Nanoparticle Tracking Analysis (NTA)	ขนาดของอนุภาคนาโน การกระจายขนาดของอนุภาคนาโน	10 – 1,000nm
8. X-Ray Diffraction (XRD)	โครงสร้างผลึก องค์ประกอบของธาตุ	ขนาดเล็กถึง 1nm
9. Aerosol Time of Flight Mass Spectroscopy	ขนาดของอนุภาคนาโน องค์ประกอบของธาตุ	100 - 3,000 nm
10. Aerosol Particle Mass Analyzer (APM)	มวลของอนุภาคนาโน (particle mass)	30 - 580 nm
11. Portable Aerosol Mobility Spectrometer (PAMS) (48)	การกระจายขนาดของอนุภาคนาโน ขนาดของอนุภาคเฉลี่ย ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน	10 – 863 nm
12. Dis C Mini (49)	ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน LDSA	10 - 700 nm
13. Partector (50)	พื้นที่ผิวของอนุภาคนาโน	10 nm - 10 μ m
14. Portable Aerosol Spectrometer (PAS) (46)	การกระจายขนาดของอนุภาคนาโน ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน	0.25 - 32 μ m

5. ค่าขีดจำกัดความเป็นอันตรายของอนุภาคนาโน Exposure Limit for Nanomaterials (4)

จริง ๆ แล้วการสัมผัสอนุภาคนาโนไม่มีค่าระดับความเข้มข้นที่ปลอดภัย เนื่องจากเมื่อมีการสัมผัสอนุภาคนาโนเข้าไปในร่างกายไม่ว่ามากหรือน้อยก็ล้วนแล้วแต่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของผู้ที่สัมผัสทั้งสิ้น แต่อย่างน้อยค่าขีดจำกัดความเป็นอันตรายของอนุภาคนาโนเหล่านี้ก็จะเป็นประโยชน์ต่อการเฝ้าระวังและควบคุมระดับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนในสภาพแวดล้อมการทำงาน เนื่องจากผลการศึกษาถึงผลกระทบต่อและอันตรายของอนุภาคนาโนยังมีขีดจำกัด แต่อย่างไรก็ตามหน่วยงาน Occupational Safety and Health Administration (OSHA) และ The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) ของประเทศอเมริกา ได้แนะนำค่าขีดจำกัดความเป็นอันตราย ของอนุภาคนาโนไว้เพียง 2 ชนิด คือ คาบอนนาโนทิวป์ และไทเทเนียมไดออกไซด์

5.1 คาบอนนาโนทิวป์และคาบอนนาโนไฟเบอร์ (Carbon nanotube and carbon nanofiber)

OSHA ได้แนะนำให้ผู้ปฏิบัติงานไม่ควรปฏิบัติงานสภาพแวดล้อมการทำงานที่มีคาบอนนาโนทิวป์และคาบอนนาโนไฟเบอร์ **เกินกว่า 1.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน** (Time-weighted average: TWA) โดยคำแนะนำนี้ภายใต้ผลการศึกษาและคำแนะนำของ NIOSH (NIOSH recommended exposure limit : REL) (4) (51)

5.2 นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide nanoparticles: TiO₂) (4)

OSHA ได้แนะนำให้คนงานที่ปฏิบัติงานสภาพแวดล้อมการทำงาน **ที่มีอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (อนุภาคขนาดเล็กกว่า 100 ไมโครเมตร) ไม่ควรสัมผัสเกินกว่า 0.3 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน** (Time-weighted average: TWA) มากไปกว่านั้น OSHA ได้แนะนำให้ผู้ปฏิบัติงานที่สัมผัสอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ **ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร (fine-sized of TiO₂) ไม่ควรสัมผัสเกินกว่า 2.4 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน** โดยคำแนะนำนี้ภายใต้ผลการศึกษาและคำแนะนำของ NIOSH (NIOSH recommended exposure limit : REL)

คำแนะนำสำหรับในสภาพแวดล้อมที่เป็นอันตรายต่อชีวิตและสุขภาพอย่างเฉียบพลัน (Immediately dangerous to life or health: IDLH) **ไม่ควรสัมผัสอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ เกินกว่า 5,000 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร** (52) (53)

6. การคัดกรองและการเฝ้าระวังทางทางการแพทย์ (30) (54) (4)

(Medical Screening and Surveillance)

ปัจจุบันนี้ยังไม่มีข้อมูลทางการแพทย์ในการกำหนดหลักการ วิธีการคัดกรอง และเฝ้าระวังด้านสุขภาพที่ชัดเจน สำหรับผู้ที่มีความเสี่ยงต่อการได้รับสัมผัสอนุภาคนาโน แต่อย่างไรก็ตาม NOISH ได้แนะนำให้สถานประกอบการควรมีการจัดทำโปรแกรมเฝ้าระวังด้านสุขภาพของพนักงาน โดยมีรายละเอียดอย่างน้อย ดังต่อไปนี้

1. ให้มีการตรวจสุขภาพพนักงานก่อนเข้าทำงาน เพื่อให้ทราบถึงสถานะทางสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน (Occupational health status)
2. ให้มีการตรวจสุขภาพของพนักงานเป็นระยะ ๆ ตามปัจจัยเสี่ยง เช่น ทุก 6 เดือน หรือ 1 ปี ขึ้นอยู่กับความเสี่ยงที่ผู้ปฏิบัติงานได้รับ โดยการตรวจนี้จะต้องมีความเฉพาะเจาะจงกับอนุภาคนาโนที่ผู้ปฏิบัติงานได้รับสัมผัส
3. มีการตรวจสุขภาพหลังเกิดเหตุการณ์ที่ผิดปกติ ที่ไม่ใช่งานประจำ (Non-routine) เช่น การรั่วไหลของอนุภาคนาโน การเกิดเหตุการณ์ฉุกเฉินต่าง ๆ เป็นต้น
4. มีการให้ความรู้ผู้ปฏิบัติงานเพื่อเกิดความตระหนัก และสามารถการสังเกตอาการ อาการแสดง ที่เกิดจากการสัมผัสอนุภาคนาโนด้วยตนเองเบื้องต้นได้
5. มีการเขียน บันทึก จัดเก็บรายงาน รวมถึงจัดทำสถิติ เพื่อดูแลแนวโน้มสถานะทางสุขภาพของพนักงาน เพื่อใช้เป็นประโยชน์ในการเฝ้าระวัง คัดกรองพนักงานต่อไป หรือรายงานให้เหมาะสมกับพนักงานต่อไป
6. เมื่อพนักงานมีการย้ายงาน หรือย้ายสถานประกอบการ ต้องมีการตรวจสุขภาพของพนักงานก่อนออกจากงาน เพื่อประโยชน์ในการป้องกันการร้องเรียน ฟ้องร้อง ด้านสุขภาพต่าง ๆ ในอนาคต



7. มาตรการจัดการเมื่ออนุภาคนาโนเกิดการรั่วไหล (55)

(Measures of nanoparticles release)

มาตรการในการจัดการเมื่ออนุภาคนาโนเกิดการรั่วไหล ให้ดำเนินการตามคำแนะนำตามเอกสารความปลอดภัย (Safety data sheet: SDS) ของอนุภาคนาโนนั้น ๆ อย่างเคร่งครัด ถ้าในกรณีที่ไม่มีข้อมูลความปลอดภัยให้ดำเนินการ เช่นเดียวกับการจัดการสารเคมีอันตราย

7.1 การรั่วไหลเล็กน้อย (Small Spill)

ผู้ที่มีหน้าที่ในการจัดการในกรณีที่มีการหกหรือรั่วไหลของอนุภาคนาโนต้องมั่นใจว่า ได้สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายที่เหมาะสมกับอนุภาคนาโนชนิดนั้น ๆ เช่น หน้ากากกรองอากาศ ถุงมือ ชุดป้องกันอนุภาคนาโน ที่ครอบตา รองเท้า เป็นต้น (โดยรายละเอียดของอุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลจะพูดถึงในหัวข้อที่ 9) พร้อมทั้งปฏิบัติตามคำแนะนำตามเอกสารความปลอดภัย (SDS) ของอนุภาคนาโนนั้น ๆ อย่างเคร่งครัด หลังจากนั้นก็เริ่มดำเนินการ ลดการฟุ้งกระจายโดยใช้เครื่องดูดฝุ่นที่มีถุงกรองอากาศชนิด HEPA Filter ในการจัดการ หรือใช้ผ้าชุบน้ำซับอนุภาคนาโนนั้น ถ้ามีผงของอนุภาคนาโนจำนวนมากให้ใช้อุปกรณ์ตักอนุภาคนาโน เทลงในภาชนะที่เตรียมไว้เฉพาะที่สามารถปิดฝาได้สนิท หลังจากนั้นต้องนำของเสียที่ปนเปื้อนอนุภาคนาโนส่งกำจัดด้วยวิธีที่เหมาะสม เช่นเดียวกับการกำจัดสารเคมีอันตราย รวมถึงต้องมีการสอบสวนรายงานเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นต่อผู้ที่ได้รับมอบหมาย เพื่อหาทางป้องกันแก้ไขและเฝ้าระวังต่อไป

7.2 การรั่วไหลในปริมาณที่มาก (Large Spill)

โดยทั่วไปแล้วสถานประกอบการควรดำเนินการจัดทำแผนฉุกเฉินเมื่ออนุภาคนาโนเกิดการรั่วไหล พร้อมทั้งมีการดำเนินการซ้อมแผนการจัดการเป็นประจำ ในกรณีที่อนุภาคนาโนเกิดการรั่วไหลในปริมาณที่มาก ควรมีการดำเนินการขั้นต่ำ ดังต่อไปนี้

1. ผู้เห็นเหตุการณ์แจ้งทีมจัดการเหตุฉุกเฉินอนุภาคนาโนรั่วไหลหรือผู้ที่เกี่ยวข้อง
2. ทีมจัดการเหตุการณ์ฉุกเฉิน พร้อมอุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลที่เหมาะสมเข้ายังพื้นที่อนุภาคนาโนหกหรือรั่วไหล ประเมินสถานการณ์ กั้นเขตหรือพื้นที่อันตราย ถ้ามีการรั่วไหลในปริมาณที่มาก ต้องมีการใช้แผนอพยพคนงานไปยังจุดรวมพลที่ปลอดภัย
3. ลดการฟุ้งกระจายของอนุภาคนาโนโดยการฉีดน้ำ และใช้เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่เหมาะสมตักอนุภาคนาโนใส่ในภาชนะที่ปิดสนิท (อนุภาคนาโนบางประเภทละลายน้ำและบางประเภทไม่ละลายน้ำ แต่อย่างไรก็ตามการใช้น้ำสามารถลดการฟุ้งกระจายของอนุภาคนาโนในบรรยากาศได้) ยกเว้นอนุภาคนาโนที่ทำ

ปฏิกิริยากับน้ำแล้วทำให้เกิดอันตราย จะต้องหาวิธีการฟุ้งกระจายด้วยวิธีการอื่น เช่น ใช้เครื่องดูดฝุ่นที่มี HEPA filter สำหรับกรองอนุภาคนาโน เป็นต้น

4. น้ำที่เกิดจากการชะล้างอนุภาคนาโน ต้องระมัดระวังไม่ให้ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม รวมทั้งต้องมีการจัดการหรือกำจัดด้วยวิธีการที่เหมาะสม

5. ตรวจวัดระดับความเข้มข้นอนุภาคนาโนในบรรยากาศการทำงานให้อยู่ในระดับปกติ จึงสามารถให้คนงานเข้าปฏิบัติงานตามปกติได้

8. การปฐมพยาบาลเบื้องต้น (First Aid)

การปฐมพยาบาลเบื้องต้น เมื่อได้รับสัมผัสอนุภาคนาโนแบบเฉียบพลัน ควรปฏิบัติตามคำแนะนำตามเอกสารเพื่อความปลอดภัย (Safety data sheet: SDS) ของอนุภาคนาโนนั้น ๆ อย่างเคร่งครัด และเคลื่อนย้ายผู้ที่สัมผัสอนุภาคนาโนออกจากพื้นที่เสี่ยงไปยังพื้นที่ปลอดภัย มีอากาศบริสุทธิ์ถ่ายเท และให้การปฐมพยาบาล ก่อนนำส่งแพทย์ ดังต่อไปนี้

การสัมผัสทางตา (Eye Contact) ถ้าผู้ที่ได้รับสัมผัสอนุภาคนาโนสวมคอนแทคเลนส์ ให้นำคอนแทคเลนส์ออกก่อน หลังจากนั้นเปิดน้ำสะอาดให้ไหลผ่านดวงตาในปริมาณที่มาก ๆ อย่างน้อย 15 นาที แล้วนำผู้ป่วยไปพบแพทย์ เพื่อให้การวินิจฉัยรักษา

การสัมผัสทางผิวหนัง (Skin Contact) ให้ล้างออกด้วยน้ำสะอาดให้มากที่สุดอย่างน้อย 15 นาที ถ้ามีการกรดเสื้อผ้าให้ถอดเสื้อผ้าออกและแยกชักรับเสื้อผ้าปกติ ถ้าพบมีการแพ้ ผื่น คัน ให้รีบนำส่งแพทย์

การสัมผัสทางการหายใจ (Inhalation) ให้เคลื่อนย้ายผู้ที่สัมผัสอนุภาคนาโนไปยังพื้นที่ที่มีอากาศบริสุทธิ์ ถ้าพบมีอาการผิดปกติให้รีบนำส่งแพทย์

การกิน (Ingestion) โดยปกติไม่ควรเกิดขึ้น แต่ถ้ามีการกินอนุภาคนาโนเกิดขึ้นให้ปฏิบัติตามคำแนะนำตาม เอกสารเพื่อความปลอดภัย (SDS) ของอนุภาคนาโนนั้น ๆ อย่างเคร่งครัด เพราะอนุภาคนาโนแต่ละชนิดมีปฏิกิริยาต่อร่างกายที่ต่างกัน และให้รีบนำส่งแพทย์ ประเด็นเรื่องของการทำให้อาเจียนยังไม่มีหลักฐานทางการแพทย์ยืนยัน แต่ถ้าจำเป็นต้องทำให้อาเจียนต้องอยู่ภายใต้คำแนะนำของแพทย์เท่านั้น



9. การป้องกันควบคุมอนุภาคนาโน (Controlling of nanoparticles exposure) (56) (4)

การป้องกันควบคุมอันตรายจากอนุภาคนาโน เป็นส่วนที่มีความสำคัญที่สุด ที่จะช่วยปกป้องคุ้มครองคนงาน ให้ปราศจากอันตรายจากการสัมผัสอนุภาคนาโนนั้น ๆ เมื่อมีการป้องกันควบคุมที่ดี ก็จะทำให้ความเสี่ยงต่อการเกิดโรคจากอนุภาคนาโนลดลง วิธีการป้องกันควบคุมที่ดีที่สุดและคุ้มค่าต่อการลงทุนที่สุดควรพิจารณาตั้งแต่การออกแบบกระบวนการผลิต โดยมีหลักการในการป้องกันควบคุมอนุภาคนาโนพิจารณาตามลำดับความสำคัญ ดังนี้

1. การกำจัดสารที่เป็นพิษหรือเป็นอันตรายออกจากกระบวนการทำงาน (Elimination)
2. การใช้สารที่มีความเป็นพิษหรือความเป็นอันตรายน้อยกว่าทดแทน (Substitution)
3. การป้องกันควบคุมทางด้านวิศวกรรม (Engineering control)

การป้องกันควบคุมอนุภาคนาโนที่ดีและมีประสิทธิภาพที่สุดต้องอาศัยหลักการทั้ง 3 หลักการข้างต้นเป็นอันดับแรก แต่อย่างไรก็ตามถ้าไม่สามารถดำเนินการได้ให้พิจารณา อีก 2 หลักการ ดังต่อไปนี้

4. การป้องกันควบคุมทางการบริหารจัดการ (Administrative control)
5. การใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (Personal Protective Equipment: PPE) ให้พิจารณาเป็นทางเลือกสุดท้ายถ้าไม่สามารถดำเนินการวิธีการอื่นได้

แต่อย่างไรก็ตามการป้องกันควบคุมอนุภาคนาโน สามารถใช้การผสมผสานหลาย ๆ หลักการร่วมกันได้ เพื่อให้การป้องกันควบคุมมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

9.1 การป้องกันควบคุมอนุภาคนาโนทางด้านวิศวกรรม (Engineering control) (4) (54) (56)

การปฏิบัติงานที่ต้องมีการสัมผัสอนุภาคนาโน วิธีการที่ปลอดภัยที่สุดต้องทำในระบบปิด (Enclosure หรือ Close system) เพื่อป้องกันอนุภาคนาโนปนเปื้อนสู่สภาพแวดล้อมภายนอก ตัวอย่างระบบปิดที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่ Glove box containment และระบบระบายอากาศที่มีการติดตั้งตัวกรองอากาศที่มีประสิทธิภาพสูง (high-efficiency particulate air (HEPA) filter) เป็นต้น

แต่อย่างไรก็ตามถ้าไม่สามารถดำเนินการในระบบปิดได้ ควรมีการติดตั้งระบบระบายอากาศเฉพาะที่ (Local exhaust ventilation) เช่น capture hood หรือ enclosing hood ที่มีการติดตั้งตัวกรองอากาศที่มีประสิทธิภาพสูง (HEPA filter) ณ จุดกำเนิดอนุภาคนาโน และจุดก่อนที่จะปล่อยอากาศที่ปนเปื้อนออกสู่ภายนอก



รูปที่ 11: การปฏิบัติงานกับอนุภาคนาโนในระบบปิด (ห้องกระจกป้องกันอนุภาคนาโน)

9.2 การป้องกันความคุมอนุภาคนาโนทางการบริหารจัดการ (Administrative control)

สถานประกอบการที่มีการดำเนินงานเกี่ยวกับอนุภาคนาโน ควรมีแนวปฏิบัติที่ดีทางการบริหารจัดการ เกี่ยวกับการป้องกันการสัมผัสอนุภาคนาโนของคณาจกร โดยใช่วิธีการ ดังต่อไปนี้ (4) (23) (56)

- ให้ความรู้แก่ผู้ปฏิบัติงาน เพื่อลดปริมาณการสัมผัสอนุภาคนาโนให้น้อยที่สุด และหลีกเลี่ยงการสัมผัสอนุภาคนาโนโดยตรง
- จัดเตรียมข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติ อันตรายของอนุภาคนาโนให้กับผู้ปฏิบัติงาน เช่น เอกสารความปลอดภัยของอนุภาคนาโน (Safety data sheet: SDS) รวมถึงแนะนำหลักการในการป้องกันอันตรายจากอนุภาคนาโนที่ผู้ปฏิบัติงานนั้น ๆ สัมผัส
- จัดเตรียมวิธีการปฏิบัติงาน คู่มือการทำงานที่ปลอดภัยให้กับผู้ปฏิบัติงาน
- ส่งเสริมให้ผู้ปฏิบัติงาน ให้มีสุขลักษณะส่วนบุคคลที่ดี เช่น การไม่สูบบุหรี่ การล้างมือ ทำความสะอาดร่างกาย ก่อนรับประทานอาหาร หรือก่อนออกจากพื้นที่ปฏิบัติงาน

- หลีกเลี่ยงการรับประทานอาหารและเครื่องดื่มในพื้นที่การปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับอนุภาคนาโน
- เตรียมมาตรการควบคุมเพิ่มเติม เช่น กำหนดพื้นที่ควบคุมอนุภาคนาโน พื้นที่กันชน (Buffer zone) พื้นที่ปลอดภัย รวมถึงลดการปนเปื้อนอุปกรณ์ เครื่องมือต่าง ๆ เพื่อให้มั่นใจว่าอนุภาคนาโน ไม่สามารถเคลื่อนย้ายออกจากที่ทำงานได้
- มีการจัดเตรียมสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ เช่น ที่อาบน้ำ ที่เปลี่ยนเสื้อผ้า รวมถึงบริการซักเสื้อผ้าที่ปนเปื้อนอนุภาคนาโนในสถานที่ทำงาน ห้ามนำเสื้อผ้าที่ปนเปื้อนอนุภาคนาโนกลับบ้านโดยเด็ดขาด
- มีการจัดเตรียมแนวปฏิบัติเกี่ยวกับเหตุการณ์ไม่ปกติ เช่น กรณีอนุภาคนาโนเกิดการรั่วไหล เหตุการณ์ฉุกเฉินต่าง ๆ รวมทั้งมีการดำเนินการซ้อมแผนฉุกเฉินต่าง ๆ เป็นประจำ
- การจัดการของเสียที่มีการปนเปื้อนของอนุภาคนาโน ควรดำเนินการตามกฎหมายของประเทศนั้น ๆ ถ้าไม่มีกฎหมายให้ดำเนินการจัดการด้วยวิธีการที่ปลอดภัย
- มีการตรวจวัดความเข้มข้นของอนุภาคนาโนในพื้นที่ปฏิบัติงานเป็นประจำ
- มีการตรวจสุขภาพคนงานก่อนเข้าทำงาน ตรวจสุขภาพตามปัจจัยเสี่ยง และตรวจสุขภาพก่อนออกจากงาน

9.3 การใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลสำหรับอนุภาคนาโน (4) (54) (57)

(Personal Protective Equipment: PPE)

อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล เป็นเพียงสิ่งบาง ๆ กั้นกลางระหว่างผู้ปฏิบัติงานและอนุภาคนาโนเท่านั้น ดังนั้นควรเลือกใช้ใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลเป็นมาตรการสุดท้าย ในการป้องกันอันตรายสำหรับผู้ปฏิบัติงานที่ต้องสัมผัสอนุภาคนาโน สถานประกอบการควรเตรียมอุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลให้เหมาะสม และเพียงพอกับอันตรายที่ผู้ปฏิบัติงานอาจจะได้รับ ไม่เพียงแต่ใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลสำหรับการปฏิบัติงานปกติ แต่ควรมีการเตรียมอุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลสำหรับเหตุการณ์ฉุกเฉินด้วย สถานประกอบการต้องมีการฝึกอบรมให้ความรู้ (Training) เกี่ยวกับการใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลที่ถูกต้อง การทดสอบความกระชับ (Fit testing) รวมถึงการบำรุงรักษา (maintenance) อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลตามมาตรฐานและข้อกำหนดของอุปกรณ์แต่ละชนิด

ในพื้นที่ปฏิบัติงานเกี่ยวกับอนุภาคนาโน เมื่ออุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลมีการปนเปื้อนอนุภาคนาโนควรเก็บไว้ในถุงที่ปิดสนิท แล้วส่งให้หน่วยงานกลาง เพื่อทำความสะอาดหรือส่งทำลาย ห้ามนำอุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลที่ใช้แล้ว และมีการปนเปื้อนอนุภาคนาโนออกจากพื้นที่ปฏิบัติงานเด็ดขาด เพราะอาจทำให้อนุภาคนาโนปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก

การเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล ควรเลือกให้เหมาะสมกับประเภทของอันตรายที่ผู้ปฏิบัติงานอาจจะได้รับ โดยอาศัยหลักการพิจารณาจากปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ (58)

- ชนิดของอนุภาคนาโนที่สัมผัส (Type of nanoparticle)
- สภาพแวดล้อมการทำงาน (Working condition)
- ระยะเวลาการสัมผัสอนุภาคนาโน (Exposure duration)
- อันตรายที่อาจจะได้รับ (Potential hazard identification)
- การกระจายตัวขนาดอนุภาค (Size distribution)
- ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน (Nanoparticle concentration)

อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลมีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถลดอันตรายจากแหล่งกำเนิดอันตรายได้ ถ้าอุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลเสียสภาพการป้องกัน จะทำให้ผู้ปฏิบัติงานได้รับอันตรายทันที ทั้ง ๆ ที่มีการใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลอยู่ ซึ่งเป็นอันตรายมากเนื่องจากผู้ปฏิบัติงานคิดว่ามีการป้องกันที่ดีแต่จริง ๆ แล้วไม่สามารถป้องกันอันตรายได้

9.3.1 อุปกรณ์ป้องกันอันตรายระบบทางเดินหายใจ: หน้ากากกรองอากาศ (Respirators, Mask)

หน้ากากกรองอากาศ จัดเป็นอุปกรณ์กรองอากาศชนิด Air purifying respirator โดยอาศัยหลักการกรองอากาศให้บริสุทธิ์ โดยใช้ไส้กรองหรือตลับกรองอากาศ ที่เรียกว่า cartridge หรือ canister ตลับกรองอากาศนี้จะต้องเลือกให้มีความเฉพาะเจาะจงกับอนุภาคนาโนที่ผู้ปฏิบัติงานอาจได้รับสัมผัส โดยอากาศที่ปนเปื้อนอนุภาคนาโนจะถูกกรองให้บริสุทธิ์โดยตลับกรองนี้ หน้ากากกรองอากาศชนิดนี้นิยมใช้ในสภาพแวดล้อมที่มีความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไม่สูงนัก หรือสภาพแวดล้อมการทำงานที่ต้องสัมผัสอนุภาคนาโนในลักษณะการทำงานปกติ ไม่สามารถใช้ได้ในกรณีที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนสูง ๆ ได้ เช่น กรณีเกิดการรั่วไหลของอนุภาคนาโน หรือสภาพสภาพแวดล้อมที่เป็นอันตรายต่อชีวิตและสุขภาพอย่างเฉียบพลัน (Immediately dangerous to life or health: IDLH) เป็นต้น

ดังนั้นสิ่งสำคัญที่สุดคือผู้ปฏิบัติงานต้องเลือกตัวกรองอากาศให้ตรงกับลักษณะอันตรายที่อาจจะได้รับ จึงจะทำให้ป้องกันอันตรายทางระบบทางเดินหายใจมีประสิทธิภาพสูงสุด การปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับอนุภาคนาโน หน้ากากกรองอากาศมีความสำคัญมากในการป้องกันผู้ปฏิบัติงานจากการสัมผัสผ่านระบบทางเดินหายใจ ซึ่งเป็นที่ทราบอยู่แล้วว่าการสัมผัสอนุภาคนาโนในระบบทางเดินหายใจนั้นเกิดได้ง่ายที่สุดและมีความเป็นอันตรายที่สุด ดังนั้นผู้ที่ปฏิบัติงานที่มีความเสี่ยงต่อการสัมผัสอนุภาคนาโน ควรสวมหน้ากากป้องกันอนุภาคนาโนตลอดระยะเวลาที่ต้องปฏิบัติงาน

ปัจจุบันมาตรฐานอุปกรณ์ป้องกันอันตรายระบบทางเดินหายใจหรือหน้ากากกรองอากาศมีหลายมาตรฐาน แต่อย่างไรก็ตาม มี 2 มาตรฐานหลักๆ ที่ได้รับความนิยม ได้แก่ มาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา (US. Standard) และมาตรฐานของสหภาพยุโรป (European Standard) โดยมีรายละเอียดจะได้กล่าวถึงต่อไป

9.3.1.1 หน้ากากกรองอากาศตามมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา (US. Standard for Respirator)

จากคำแนะนำของ NIOSH และ OSHA ให้ผู้ปฏิบัติงานที่ต้องสัมผัสอนุภาคนาโน ควรเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลในระบบทางเดินหายใจ อย่างน้อยที่สุดหน้ากากกรองอากาศต้องมีตัวกรองอากาศที่มีประสิทธิภาพสูง (high-efficiency particulate air : HEPA filter) ตามมาตรฐาน OSHA 29 CFR 1910.134 หรือ มาตรฐานเทียบเท่าตัวกรองอากาศของ NIOSH 42 CFR 84

NIOSH และ OSHA แนะนำให้ใช้หน้ากากกรองอากาศประเภท N100, R100, และ P100 ในการป้องกันอนุภาคนาโน

โดยหน้ากากกรองอากาศชนิด HEPA filter สามารถป้องกันอนุภาคที่มีขนาดตั้งแต่ 0.3 ไมโครเมตร (300 นาโนเมตร) ที่ฟุ้งกระจายในอากาศในระดับความชื้นที่ 99.97 เปอร์เซ็นต์ โดยความชื้นนี้ภายในหน้ากากต้องมีการรั่วไหล (Leak) ของอากาศภายในหน้ากากไม่เกิน 10 % หน้ากากกรองอากาศตามมาตรฐานประเทศสหรัฐอเมริกา สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ หน้ากากกรองอากาศประเภท N หน้ากากกรองอากาศประเภท P และหน้ากากกรองอากาศประเภท R ซึ่งหน้ากากทั้ง 3 ประเภท สามารถป้องกันอนุภาคในลักษณะการทำงานที่ต่างกัน รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3: ประเภทของหน้ากากกรองอากาศตามมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา

ประเภทของหน้ากาก	ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค (เปอร์เซ็นต์)		
	95 (95 %)	99 (99 %)	100 (99.97 %)
N (Not resistant to oil)	N95	N99	N100
P (Resistant to oil)	P95	P99	P100
R (Oil Proof)	R95	R99	R100

N (Not resistant to oil) หน้ากากกรองอากาศประเภทนี้ ไม่สามารถป้องกันอนุภาคที่มีน้ำมันเป็นส่วนประกอบได้ เหมาะสำหรับงานที่มีฝุ่นทั่วไป เช่น ฝุ่นไม้ ฝุ่นโลหะ เป็นต้น

R (Resistant to oil) หน้ากากกรองอากาศประเภทนี้ สามารถป้องกันอนุภาคที่มีน้ำมันเป็นส่วนประกอบได้ เหมาะสำหรับงานที่มีละอองน้ำมัน (Oil mist) หรือส่วนผสมของปรอทโลหะต่าง ๆ

P (Oil Proof) หน้ากากกรองอากาศประเภทนี้ สามารถป้องกันอนุภาคที่มีน้ำมันและไม่มีน้ำมันเป็นส่วนประกอบได้ เช่น เหมาะสำหรับงานเชื่อม งานที่มีเขม่าไอเสียจากเครื่องยนต์ เพราะลักษณะงานเหล่านี้มีองค์ประกอบของอนุภาคหลายประเภทเกิดขึ้นพร้อมกันทั้งที่เป็นน้ำมันและอนุภาค

ส่วนตัวเลขด้านหลังจะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการป้องกันอนุภาคของหน้ากากแต่ละประเภท แบ่งออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่

95 หมายถึง หน้ากากกรองอากาศประเภทนี้ สามารถป้องกันอนุภาคในระบบทางเดินหายใจที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

99 หมายถึง หน้ากากกรองอากาศประเภทนี้ สามารถป้องกันอนุภาคในระบบทางเดินหายใจที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

100 หมายถึง หน้ากากกรองอากาศประเภทนี้ สามารถป้องกันอนุภาคในระบบทางเดินหายใจที่ระดับความเชื่อมั่น 99.97 เปอร์เซ็นต์

ตัวอย่างเช่น N95 หมายถึง หน้ากากป้องกันอันตรายของระบบทางเดินหายใจนี้ สามารถป้องกันอนุภาคขนาด 0.3 ไมโครเมตร ที่ไม่มีน้ำมันเป็นส่วนประกอบ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

R99 หมายถึง หน้ากากป้องกันอันตรายของระบบทางเดินหายใจนี้ สามารถป้องกันอนุภาคขนาด 0.3 ไมโครเมตร ที่มีน้ำมันเป็นส่วนประกอบ ที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

P100 หมายถึง หน้ากากป้องกันอันตรายของระบบทางเดินหายใจนี้ สามารถป้องกันอนุภาคขนาด 0.3 ไมโครเมตร ที่อาจจะมีหรือไม่มีน้ำมันเป็นส่วนประกอบ ที่ระดับความเชื่อมั่น 99.97 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 12: หน้ากากกรองอนุภาคนาโนชนิด N100 และ P100

ในกรณีเกิดการรั่วไหลของอนุภาคนาโนที่มีความเข้มข้นสูงมาก ๆ หรือสภาพแวดล้อมที่เป็นอันตรายต่อชีวิตและสุขภาพอย่างเฉียบพลัน (**Immediately dangerous to life or health: IDLH**) หน้ากากกรองอากาศชนิด Air purifying respirator จะไม่สามารถป้องกันอันตรายได้ ควรเปลี่ยนมาใช้อุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจชนิดส่งอากาศชนิด (Supplied air) โดยใช้ท่อส่งอากาศบริสุทธิ์จากภายนอกให้กับผู้ปฏิบัติงาน หรืออาจใช้ Self-contained breathing apparatus: SCBA แทน ซึ่งจะทำให้ผู้ปฏิบัติงานปลอดภัยมากที่สุด



รูปที่ 13: หน้ากากกรองอากาศชนิด Self-contained breathing apparatus: SCBA (59)

9.3.1.2 หน้ากากป้องกันอนุภาคตามมาตรฐานของสหภาพยุโรป (European Standard for Respirator)

สำหรับมาตรฐานยุโรป (European standard: EN) (60) (61) มี 2 มาตรฐานได้แก่ EN 143 และ EN 149 ทั้งสองมาตรฐานทดสอบมาตรฐานโดยการหาปริมาณการซึมผ่านของอนุภาคของโซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride: NaCl) และ พาราฟินออย (paraffin oil) ที่ 70 องศาเซลเซียส และ -30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามลำดับ

โดยมาตรฐาน EN 143 ทำการทดสอบไส้กรอง (Filter) ที่ติดมากับหน้ากาก ในขณะที่ EN 149 ทดสอบประสิทธิภาพของหน้ากากชนิดครึ่งหน้า (filtering half masks) หรือ (filtering face pieces) โดยมีการทดสอบการรั่วไหลของอากาศภายในหน้ากากและใบหน้า แสดงในตารางที่ 4 และตารางที่ 5

ตารางที่ 4: หน้ากากตามมาตรฐาน EN 143

ชนิดของหน้ากาก	ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค (เปอร์เซ็นต์)
P1	อย่างน้อย 80 %
P2	อย่างน้อย 90 %
P3	อย่างน้อย 99.95 %

หมายเหตุ: ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของหน้ากาก ทดสอบที่อัตราการไหล 95 ลิตร ต่อนาที



รูปที่ 14: หน้ากากป้องกันอนุภาค ชนิด P3

ตารางที่ 5: หน้ากากตามมาตรฐาน EN 149

ชนิดของ หน้ากาก	ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาค (เปอร์เซ็นต์)	การรั่วไหลภายในหน้ากาก (Inward leakage)
FFP1	อย่างน้อย 80 %	น้อยกว่า 22 %
FFP2	อย่างน้อย 90 %	น้อยกว่า 8 %
FFP3	อย่างน้อย 99 %	น้อยกว่า 2 %

หมายเหตุ: ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของหน้ากาก ทดสอบที่อัตราการไหล 95 ลิตร ต่อนาที



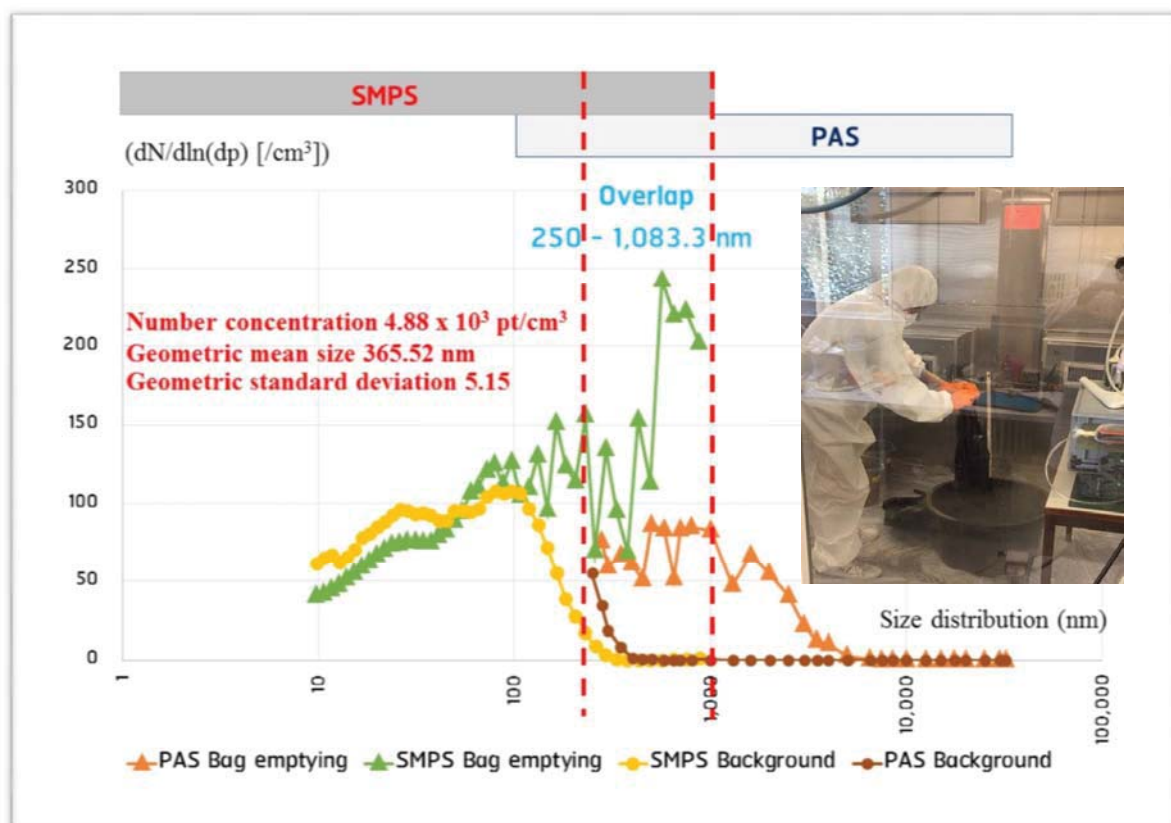
รูปที่ 15: หน้ากากป้องกันอนุภาค ชนิด FFP3

ตามมาตรฐานยุโรปแนะนำให้ผู้ใช้ปฏิบัติงานที่ต้องสัมผัสอนุภาคนาโนทางระบบทางเดินหายใจ ควรใช้หน้ากากกรองอากาศประเภท P3 ตามมาตรฐาน EN 143 หรือ FFP3 ตามมาตรฐาน EN 149

ข้อสังเกต เกี่ยวกับหน้ากากกรองอนุภาคนาโนตามที่ NIOSH และ OSHA แนะนำ ไม่ว่าจะ เป็น N100 R100 และ P100 สามารถกรองอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.3 ไมโครเมตร หรือ 300 นาโนเมตรนั้นจริง ๆ แล้วไม่สามารถกรองอนุภาคนาโนได้ 100 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากอนุภาคนาโนมีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร แต่อย่างไรก็ตาม หน้ากากกรองอากาศที่ NIOSH, OSHA และหน้ากากกรองอากาศมาตรฐานยุโรปแนะนำเป็นมาตรฐานหน้ากากกรองอากาศที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันอนุภาคได้สูงที่สุด ณ ขณะนี้ รวมทั้งบางครั้งอนุภาคนาโนสามารถจับตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ได้ จึงทำให้หน้ากากกรองอากาศประเภทนี้ สามารถกรองอนุภาคนาโนได้ถึงแม้ว่าไม่ 100 เปอร์เซ็นต์ **สิ่งสำคัญที่ต้องตระหนักทุกครั้งสำหรับหน้ากากประเภทนี้คือภายในหน้ากากกรองอากาศประเภทนี้ มีการรั่วไหลของอากาศสูงมาก ซึ่งถ้ามีการรั่วไหลของอากาศภายในหน้ากากในปริมาณที่มาก จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคของหน้ากากลดลง ดังนั้นควรมีการเลือกหน้ากากที่มีความกระชับกับใบหน้าผู้ใช้งานและทำการทดสอบความกระชับ (Fit test) ก่อนใช้งานทุกครั้ง** แต่อย่างไรก็ตามเพื่อให้เกิดความปลอดภัยสูงสุดต่อผู้ใช้งานควรใช้หน้ากากชนิด Self-contained breathing apparatus (SCBA)

หน้ากากกรองอากาศชนิด N100 R100 P 100 และ FFP3 ควรใช้แล้วทิ้ง ไม่ควรนำกลับมาใช้ใหม่ ส่วนหน้ากากที่มีตัวกรองหรือไส้กรองอนุภาคนาโน เช่น หน้ากากประเภท P3 สามารถนำมาใช้ซ้ำได้จนกว่าผู้ใช้งานรู้สึกไม่สามารถหายใจได้สะดวก รู้สึกอึดอัด หรือสีของหน้ากากเปลี่ยนไปอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากมีการสะสมของอนุภาคนาโน ดังนั้นผู้ใช้งานควรเปลี่ยนตัวกรองอากาศ แต่อย่างไรก็ตามต้องทำความสะอาดทั้งภายในและภายนอกหน้ากักด้วยน้ำสบู่หรือน้ำสะอาดเป็นประจำทุกวันหลังใช้งาน รวมถึงเก็บเข้าตู้ให้เรียบร้อยแล้ว เพื่อลดการสะสมของอนุภาคนาโน

การเลือกหน้ากากกรองอากาศที่เหมาะสมกับลักษณะการทำงาน โดยพิจารณาจากขนาดของอนุภาคนาโน ตัวอย่างการศึกษาการกระจายขนาด (Size distribution) และความเข้มข้น (Number concentration) ของอนุภาคปูนซีเมนต์ ในลักษณะการทำงานเขย่าปูนซีเมนต์ออกจากถุงก่อนทำการผสม (Cement bag emptying) จากผลการศึกษาพบว่า ขนาดฝุ่นปูนซีเมนต์มีขนาดเล็กกว่า 10,000 นาโนเมตร (10 ไมโครเมตร) โดยมีขนาดเฉลี่ยอยู่ที่ 365.52 นาโนเมตร แต่ช่วงอนุภาคนาโน (ขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร) มีความเข้มข้นใกล้เคียงกับความเข้มข้นของฝุ่นในบรรยากาศทั่วไป (Background particles) ดังนั้นอนุภาคของฝุ่นปูนซีเมนต์นี้ อาจไม่มีอนุภาคขนาดนาโนผสมอยู่ แต่อย่างไรก็ตามฝุ่นปูนขนาดนี้สามารถสะสมในระบบทางเดินหายใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในถุงลมปอด ดังนั้นลักษณะการทำงานนี้ ผู้ปฏิบัติงานควรเลือกใช้หน้ากากกรองอากาศชนิด N100, FFP3 หรือ P3 ในการป้องกันฝุ่นจากการทำงานนี้ ก็จะสามารถป้องกันฝุ่นได้ที่ความเชื่อมั่น 99.97 เปอร์เซ็นต์ เพราะฝุ่นปูนซีเมนต์นี้มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 300 นาโนเมตร ที่สำคัญประสิทธิภาพในการป้องกันระดับนี้ภายในหน้ากากต้องไม่มีการรั่วไหลของอากาศไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ เหตุผลที่เราไม่ใช้หน้ากาก R100 หรือ P100 เนื่องจากอนุภาคฝุ่นปูนนี้ไม่มีน้ำมันผสมอยู่ เป็นต้น (62) (63) (64)



รูปที่ 16: การกระจายตัวของอนุภาคลักษณะการทำงานเขย่าปูนซีเมนต์ออกจากถุงก่อนทำการผสมปูน

9.3.2 ถุงมือ (Gloves) (65)

ปัจจุบันนี้ยังไม่มีมาตรฐานเกี่ยวกับถุงมือที่เฉพาะเจาะจงกับอนุภาคนาโน เนื่องจากเป็นเรื่องใหม่ยังไม่มีการวิจัยที่ศึกษามากนัก รวมทั้งอนุภาคนาโนแต่ละประเภทมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตาม ผู้ปฏิบัติงานควรเลือกใช้ถุงมือตามเอกสารความปลอดภัย (SDS) ของอนุภาคนาโนนั้น ๆ ที่ผู้ผลิตอนุภาคนาโนนั้น ๆ แนะนำ การเลือกถุงมือที่เหมาะสมกับลักษณะการปฏิบัติงานที่ต้องสัมผัสอนุภาคนาโน ควรพิจารณาจากลักษณะของการปฏิบัติงาน ระยะเวลาในการสัมผัสอนุภาคนาโน ระดับความเข้มข้นของอนุภาคนาโน รวมถึงอันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากการสัมผัสอนุภาคนาโน NOISH แนะนำให้ใช้ถุงมือที่ผลิตจากไนไตร์ (Nitrile gloves) หรือ ถุงมือกันสารเคมีที่อนุภาคนาโนไม่สามารถซึมผ่านได้ (54) และไม่ควรรใช้ถุงมือผ้าในการป้องกันอนุภาคนาโน เนื่องจากผ้าสามารถสะสมอนุภาคนาโนได้

ถุงมือที่มีการปนเปื้อนอนุภาคนาโนไม่ควรนำกลับมาใช้ใหม่ ให้ใช้แล้วทิ้งทุกครั้ง รวมถึงถุงมือที่มีการปนเปื้อนอนุภาคนาโนต้องส่งกำจัดด้วยมาตรการที่เหมาะสม เพื่อลดการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม



รูปที่ 17: ถุงมือที่ผลิตจากไนไตร์ (nitrile gloves)

9.3.3 ชุดป้องกันอนุภาคนาโน (Protective Clothing for nanoparticle) (54) (66)

ปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานหรือคำแนะนำที่ชัดเจนเกี่ยวกับชุดป้องกันอนุภาคนาโน วัตถุประสงค์ของชุดป้องกันอนุภาคนาโน คือเป็นสิ่งกั้นกลางระหว่างผู้ปฏิบัติงานและอนุภาคนาโน เพื่อป้องกันการสัมผัสทางผิวหนังของผู้ปฏิบัติงานเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามผู้ปฏิบัติงานควรเลือกใช้ชุดป้องกันอนุภาคนาโนตามเอกสารความปลอดภัย (SDS) ของอนุภาคนาโน ที่ผู้ผลิตอนุภาคนาโนนั้น ๆ แนะนำ ผู้ปฏิบัติงานต้องเลือกชุดป้องกันอนุภาคนาโนรวมถึงรองเท้าที่เหมาะสม และสามารถป้องกันอันตรายจากอนุภาคนาโนได้ทั้งร่างกาย เช่น เสื้อต้องแขนยาว กางเกงต้องขายาว รวมทั้งต้องเหมาะกับลักษณะของอนุภาคนาโนที่สัมผัส ลักษณะการทำงาน ระยะเวลาที่สัมผัส รวมถึงความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ผู้ปฏิบัติงานได้รับ แต่อย่างไรก็ตามไม่ควรใช้ชุดป้องกันอนุภาคนาโนที่ทำจากผ้าฝ้าย เพราะผ้าฝ้ายสามารถสะสมอนุภาคนาโน รวมทั้งผ้าฝ้ายไม่เหมาะกับการปฏิบัติงานที่พื้นที่ปฏิบัติงานเปียกชื้น เป็นต้น



รูปที่ 18: ชุดป้องกันอนุภาคนาโน

9.3.4 อุปกรณ์ป้องกันดวงตาสำหรับอนุภาคนาโน (Eye Protection for nanoparticle) (57)

ผู้ปฏิบัติงานที่ต้องสัมผัสอนุภาคนาโน ควรเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันดวงตาที่เหมาะสม ตามลักษณะของอันตรายที่สัมผัส ระยะเวลาที่สัมผัส รวมถึงความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่สัมผัส สำหรับแว่นตาธรรมดา (Safety glasses) ไม่สามารถป้องกันอันตรายจากอนุภาคนาโนได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอนุภาคนาโนที่ฟุ้งกระจายในบรรยากาศ (Airborne nanoparticle) ผู้ปฏิบัติงานควรเลือกใช้ที่ครอบดวงตา (Goggles) หรือกระบั้งป้องกันใบหน้า (Face shields) ที่เหมาะสมในการป้องกันการสัมผัสอนุภาคนาโนทางดวงตาแทน สำหรับอนุภาคนาโนที่มีความเข้มข้นสูง เช่นกรณีเกิดการรั่วไหลของอนุภาคนาโน ให้พิจารณาเลือกใช้ที่ครอบดวงตาที่ติดมาพร้อมกับอุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจ (full face piece respirator) เป็นต้น



รูปที่ 19: อุปกรณ์ป้องกันดวงตาสำหรับอนุภาคนาโน

10. บทสรุป (Executive summary)

นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) คือ เทคโนโลยีที่ศึกษา ทำความเข้าใจ จัดการ และควบคุมอนุภาคที่มีขนาดตั้งแต่ 1 ถึง 100 นาโนเมตร (10^{-9} เมตร) เพื่อพัฒนาให้วัสดุมีคุณสมบัติ โครงสร้างใหม่ ตามที่ผู้วิจัยต้องการ เช่น ทำความสะอาดตัวเอง (Self-cleaning) ฆ่าเชื้อโรค (Biocide) ลดมลพิษ (Depollution) ความเป็นฉนวนกัน (Insulation) ตัวนำสาร (Carrier) น้ำหนักเบา (Weightless) รวมถึงมีความแข็งแรงสูง (Strong) ฯลฯ เป็นต้น เราไม่สามารถมองเห็นอนุภาคนาโนด้วยตาเปล่า โดยอนุภาคนาโนมีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นผมประมาณ 10,000 เท่า เล็กกว่าขนาดของเส้นใยแอสเบสตอส ประมาณ 1,000 เท่า

ปัจจุบันนี้มีการนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้ในอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดประโยชน์อย่างมากมายมหาศาล เช่น ด้านอุตสาหกรรมก่อสร้าง ด้านการแพทย์ ส่วนผสมในสินค้า ผลิตภัณฑ์อาหาร เครื่องสำอาง ทางด้านการทหาร ตัวเร่งปฏิกิริยา และด้านการบิน อวกาศและอุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น

การศึกษาถึงอันตรายและผลกระทบต่อสุขภาพของอนุภาคนาโนในมนุษย์ยังมีข้อจำกัด ข้อมูลส่วนใหญ่ได้จากการศึกษาในเซลล์สิ่งมีชีวิตและสัตว์ทดลอง แต่อย่างไรก็ตามอนุภาคนาโนสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้ 3 ทางคือ ทางการหายใจ (Inhalation) ทางผิวหนัง (Dermal contact) และการกิน (Digestion) ขึ้นอยู่กับลักษณะการทำงานของผู้ปฏิบัติงาน โดยทางการหายใจเป็นทางเข้าสู่ร่างกายหลักและมีความเสี่ยงสูงที่สุด

ความเป็นพิษของอนุภาคนาโนจะสูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ที่เป็นสารชนิดเดียวกัน เนื่องจากอนุภาคนาโนมีขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวมาก เข้าสู่เซลล์และอวัยวะต่าง ๆ ได้มากและลึกกว่า จึงส่งผลให้เกิดอันตรายที่มากกว่าตามมา ความเป็นพิษและความเป็นอันตรายของอนุภาคนาโนที่ถูกสังเคราะห์ขึ้น ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติ ของอนุภาคนาโน เช่น คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) คุณสมบัติทางเคมี (Chemical properties) องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition) คุณสมบัติของการจับตัวกัน (Agglomeration state) รูปร่าง (Shape) โครงสร้างผลึก (Crystal structure) ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน (Nanoparticle concentration) พื้นที่ผิวของอนุภาคนาโน (Surface area) สภาพแวดล้อมการทำงาน (Working condition) ระยะเวลาการสัมผัส (Exposure duration) ศักยภาพของการเกิดพิษ (Potential hazards identification) ขนาดอนุภาค (Particles size) และการกระจายขนาดของอนุภาค (Size distribution)

อนุภาคนาโนสามารถสะสมในระบบทางเดินหายใจ ตั้งแต่โพรงจมูก (nasopharyngeal region) หลอดลม (tracheobronchial region) และถุงลมปอด(alveolar region) อนุภาคนาโนเมื่อเข้าสู่ถุงลมปอด (Alveoli) สามารถเคลื่อนที่ผ่านผนังของ Alveolar Epithelium ได้ โดยการเคลื่อนที่ผ่านไปกับ air-blood barrier ไปยังระบบไหลเวียนโลหิต (Circulation system) และระบบน้ำเหลือง (lymph nodes) แล้วเคลื่อนที่ไปยังอวัยวะเป้าหมายอื่นที่สำคัญ เช่น ระบบภูมิคุ้มกัน (Immune system) หัวใจ (Heart) สมอง (Brain) ตับ (Liver) ตัวอ่อน (Fetus) และ ไต (Kidneys) เป็นต้น

จริง ๆ แล้วการสัมผัสอนุภาคนาโนไม่มีค่าระดับความเข้มข้นที่ปลอดภัย เนื่องจากเมื่อมีการสัมผัสอนุภาคนาโนเข้าไปในร่างกายไม่ว่ามากหรือน้อยก็ล้วนแล้วแต่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของผู้ที่สัมผัสทั้งนั้น รวมทั้งค่ามาตรฐานเกี่ยวกับอนุภาคนาโนยังมีจำกัดและอยู่ระหว่างการศึกษาวิจัย แต่อย่างไรก็ตามหน่วยงาน Occupational Safety and Health Administration (OSHA) และ The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) ของประเทศอเมริกา ได้แนะนำค่าขีดจำกัดความเป็นอันตรายของอนุภาคนาโนไว้เพียง 2 ชนิด คือ คาบอนนาโนทิวป์ และไทเทเนียม ไดออกไซด์ เนื่องจากอนุภาคนาโนทั้งสองชนิดนี้ได้รับการยืนยันว่าสามารถก่อมะเร็งปอดชนิด 2B (Possibly carcinogenic to humans)

การป้องกันควบคุมอันตรายจากอนุภาคนาโน เป็นส่วนที่มีความสำคัญที่สุด ที่จะช่วยปกป้องคุ้มครองคนงาน ให้ปราศจากอันตรายจากการสัมผัสอนุภาคนาโนนั้น ๆ เมื่อมีการป้องกันควบคุมที่ดี ก็จะทำให้ความเสี่ยงต่อการเกิดโรคจากอนุภาคนาโนลดลง วิธีการป้องกันควบคุมที่ดีที่สุดและคุ้มค่าต่อการลงทุนที่สุดควรพิจารณาตั้งแต่การออกแบบกระบวนการผลิต ตัวอย่างกลยุทธ์ในการป้องกันควบคุมอนุภาคนาโน อาศัยหลักการพิจารณาตามลำดับความสำคัญ ได้แก่ การกำจัดสารที่เป็นพิษหรือเป็นอันตรายออกจากกระบวนการทำงาน (Elimination) การใช้สารที่มีความเป็นพิษหรือความเป็นอันตรายน้อยกว่าทดแทน (Substitution) การป้องกันควบคุมทางด้านวิศวกรรม (Engineering control) การป้องกันควบคุมทางด้านบริหารจัดการ (Administrative control) และ การใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (Personal Protective Equipment: PPE) ให้พิจารณาเป็นทางเลือกสุดท้ายถ้าไม่สามารถดำเนินการวิธีการอื่นได้

จากคำแนะนำของ NIOSH และ OSHA อุปกรณ์ป้องกันอันตรายระบบทางเดินหายใจสำหรับอนุภาคนาโน อย่างน้อยที่สุดต้องมีไส้กรองอากาศที่มีประสิทธิภาพสูง (high-efficiency particulate air : HEPA filter) ตามมาตรฐาน OSHA 29 CFR 1910.134 หรือ มาตรฐานเทียบเท่าตัวกรองอากาศของ NIOSH 42 CFR 84 ได้แก่ N100, R100, และ P100 ส่วนมาตรฐานยุโรปแนะนำให้ใช้หน้ากากกรองอากาศประเภท P3 หรือ FFP3 ในกรณีเกิดการรั่วไหลของอนุภาคนาโนที่มีความเข้มข้นสูงมาก ๆ หรือสภาพแวดล้อมที่เป็นอันตรายต่อชีวิตและสุขภาพอย่างเฉียบพลัน ต้องใช้หน้ากากกรองอากาศประเภท SCBA (Self-contained breathing apparatus)

สำหรับถุงมือ NOISH แนะนำให้ใช้ถุงมือที่ผลิตจากไนไตร์ (nitrile gloves) หรือ ถุงมือกันสารเคมีที่อนุภาคนาโนไม่สามารถซึมผ่านได้ และไม่ควรใช้ถุงมือผ้าในการป้องกันอนุภาคนาโน เนื่องจากผ้าสามารถสะสมอนุภาคนาโนได้

ปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานหรือคำแนะนำที่ชัดเจนเกี่ยวกับชุดป้องกันอนุภาคนาโน ควรเลือกใช้ชุดป้องกันอนุภาคนาโนตามเอกสารความปลอดภัย (SDS) ของอนุภาคนาโน ที่ผู้ผลิตอนุภาคนาโนนั้น ๆ แนะนำ แต่อย่างไรก็ตามไม่ควรใช้ชุดป้องกันอนุภาคนาโนที่ทำจากผ้าฝ้าย เพราะผ้าฝ้ายสามารถสะสมอนุภาคนาโน รวมทั้งผ้าฝ้ายไม่เหมาะกับการปฏิบัติงานในพื้นที่ปฏิบัติงานเปียกชื้น

อุปกรณ์ป้องกันอันตรายสำหรับดวงตา ควรเลือกใช้ที่ครอบดวงตา (Goggles) หรือกระจับป้องกันใบหน้า (Face shields) ที่เหมาะสมในการป้องกันการสัมผัสอนุภาคนาโน สำหรับอนุภาคนาโนที่มีความเข้มข้นสูง เช่นกรณีเกิดการรั่วไหลของอนุภาคนาโน ให้พิจารณาเลือกใช้ที่ครอบดวงตาที่ติดมาพร้อมกับอุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจ (full face piece respirator)

ถึงแม้ว่าอนุภาคนาโนจะมีประโยชน์อย่างมากต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมและธุรกิจ แต่อย่างไรก็ตามอนุภาคนาโนนี้ก็มีความเสี่ยงสูงต่อผู้ที่ได้รับสัมผัส ในขณะที่การศึกษาเกี่ยวกับความเป็นพิษและความเป็นอันตรายของอนุภาคนาโนต่อสุขภาพยังมีจำกัดและไม่เพียงพอ ดังนั้นผู้ที่มีโอกาสสัมผัสอนุภาคนาโน ควรตระหนักถึงอันตรายที่อาจเกิดขึ้น รวมทั้งหามาตรการในการป้องกันควบคุมอันตรายจากอนุภาคนาโน ก่อนส่งผลเสียต่อสุขภาพและชีวิต

11. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)

Dr. Nancy Hopf: อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (Thesis advisor)

Prof. Dr. Michael Riediker: อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ (Thesis co-advisor)

Dr. Guillaume Suarez: อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ (Thesis co-advisor)

รศ. ดร. เฉลิมชัย ชัยกิตติภรณ์ อาจารย์ผู้ผลักดันการศึกษาด้านความปลอดภัยนาโน



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



สถาบันความปลอดภัยในการทำงาน
ประเทศสวิตเซอร์แลนด์



กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี



โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยโลซาน



สำนักงานคณะกรรมการข้าราชการพลเรือน



มหาวิทยาลัยโลซาน

12. เอกสารอ้างอิง (References)

1. ISO/ TS 27687. ISO/ TS 27687: Nanotechnologies. International Organization for Standardization; 2008.
2. OSHA. Nanotechnology Safety and Health Topic. U.S. Department of Labor, Occupational Safety and Health Administration; 1999.
3. Surinder Mann. Nanotechnology and Construction. Institute of Nanotechnology; 2006.
4. OSHA. Working Safely with Nanomaterials. U.S. Department of Labour, Occupational Safety and Health Administration; 2013.
5. Peter R. Wich. Wich Research Lab [Internet]. Wich Research Lab. 2017 [cited 2017 May 3]. Available from: <http://www.wichlab.com/research/>
6. Hawk's Perch. An Introduction to Nanotechnology [Internet]. Understanding nano. 2007 [cited 2017 May 3]. Available from: <http://www.understandingnano.com/introduction.html>
7. Liu M. Coating Technology of Nuclear Fuel Kernels: A Multiscale View. 2013 [cited 2017 May 11]; Available from: <http://www.intechopen.com/books/modern-surface-engineering-treatments/coating-technology-of-nuclear-fuel-kernels-a-multiscale-view>
8. Nanotechnology in the Construction Industry [Internet]. Nanowerk. 2015 [cited 2015 Dec 17]. Available from: <http://www.nanowerk.com/nanotechnology-in-construction-industry.php>
9. Industrial applications of nanotechnology. In: Wikipedia, the free encyclopedia [Internet]. 2015 [cited 2015 Dec 17]. Available from: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Industrial_applications_of_nanotechnology&oldid=675879569
10. Lee J, Mahendra S, Alvarez PJJ. Nanomaterials in the Construction Industry: A Review of Their Applications and Environmental Health and Safety Considerations. ACS Nano. 2010 Jul 27;4(7):3580–90.

11. Zhi Ge, Zhili Gao. Applications of Nanotechnology and Nanomaterials in Construction. First Int Conf Constr Dev Ctries ICCIDC-I. 2008; Available from: <http://www.neduet.edu.pk/Civil/ICCIDC-I/Conference%20Proceedings/Papers/025.pdf>
12. Li G. Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂. Cem Concr Res. 2004 Jun;34(6):1043-9.
13. Lan Y, Lu Y, Ren Z. Mini review on photocatalysis of titanium dioxide nanoparticles and their solar applications. Nano Energy. 2013 Sep;2(5):1031-45.
14. Michael Chusid. Self-Cleaning Concrete [Internet]. Concrete Decor. 2017 [cited 2017 May 8]. Available from: <http://www.concretedecor.net/index.cfm/decorativeconcretearticles/vol-5-no-4-augustseptember-2005/self-cleaning-concrete/>
15. Alibaba. Nano Titanium New Adult Tennis Racket [Internet]. Alibaba.com. 2017 [cited 2017 May 8]. Available from: https://guide.alibaba.com/shop/head-nano-titanium-ti-conquest-new-adult-tennis-racket-rrp5_4034599.html
16. Nano bicycles. Nano bicycles: Specialized Roubaix SL4 Sport 2016 [Internet]. 2016 [cited 2017 May 8]. Available from: <http://www.nanobicycles.com/Specialized-Roubaix-SL4-2016/index.php/>
17. Melbourne Dermatology Skin Care. Safety of Micronized Zinc Sunscreens [Internet]. 2016 [cited 2017 May 8]. Available from: <http://www.treatment-skincare.com/Sunscreens/Micronized-Safety.html>
18. Viva Woman. Does your sunscreen contain nanoparticles? [Internet]. 2008 [cited 2017 May 8]. Available from: <http://www.vivawoman.net/2008/11/does-your-sunscreen-contain-nanoparticles/>
19. Gupta A. Aluminium-Aluminum Nanoparticles Highly pure [Internet]. Nanoshel a Nanotechnology Company. 2016 [cited 2017 May 8]. Available from: <https://www.nanoshel.com/aluminium-aluminum-nanoparticles/>

20. Yank Keles. ObservatoryNano Economical Assessment / Construction sector [Internet]. 2009. Available from: <http://www.nanowerk.com/nanotechnology/reports/reportpdf/report162.pdf>
21. Broekhuizen P van, Broekhuizen F van, Cornelissen R, Reijnders L. Use of nanomaterials in the European construction industry and some occupational health aspects thereof. *J Nanoparticle Res.* 2011 Jan 11;13(2):447–62.
22. Sha B, Gao W, Cui X, Wang L, Xu F. The potential health challenges of TiO₂ nanomaterials. *J Appl Toxicol JAT.* 2015 Jul 14;
23. NIOSH. Approaches to Safe Nanotechnology Managing the Health and Safety Concerns Associated with Engineered Nanomaterials. U. S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health; 2009.
24. Tedja R, Marquis C, Lim M, Amal R. Biological impacts of TiO₂ on human lung cell lines A549 and H1299: particle size distribution effects. *J Nanoparticle Res.* 2011 Mar 1;13(9):3801–13.
25. OSHA. Nanotechnology, Health Effects and Workplace Assessments and Controls. U.S. Department of Labor, Occupational Safety and Health Administration; 1999.
26. Tsuji JS, Maynard AD, Howard PC, James JT, Lam C, Warheit DB, et al. Research Strategies for Safety Evaluation of Nanomaterials, Part IV: Risk Assessment of Nanoparticles. *Toxicol Sci.* 2006 Jan 1;89(1):42–50.
27. Maynard AD, Kuempel ED. Airborne Nanostructured Particles and Occupational Health. *J Nanoparticle Res.* 2005 Dec;7(6):587–614.
28. Oberdörster G, Maynard A, Donaldson K, Castranova V, Fitzpatrick J, Ausman K, et al. Principles for characterizing the potential human health effects from exposure to nanomaterials: elements of a screening strategy. *Part Fibre Toxicol.* 2005 Oct 6;2:8.
29. The Royal Society. Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties. The Royal Society & The Royal Academy of Engineering; 2004.

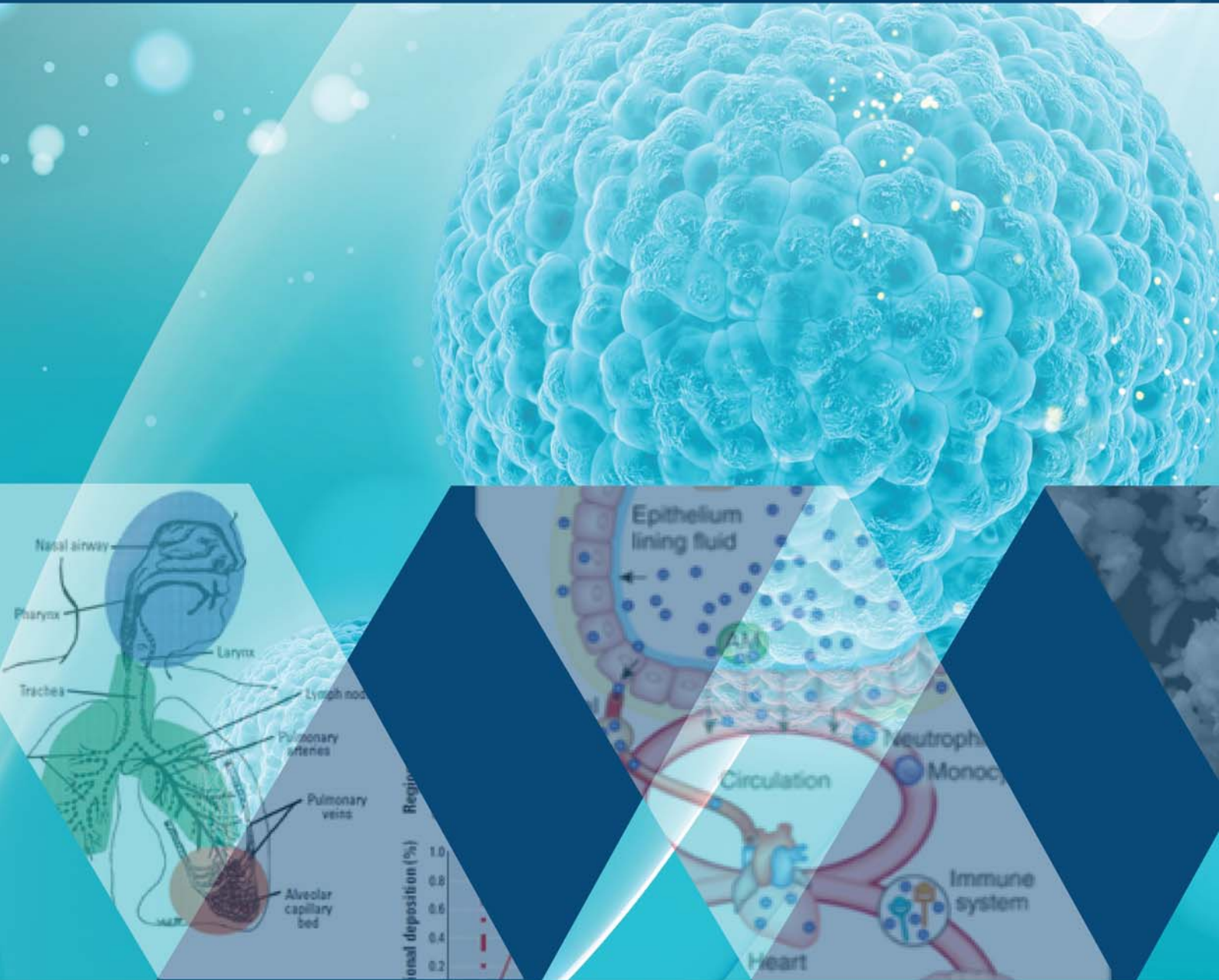
30. NIOSH. Current Intelligence Bulletin 60: Interim Guidance for Medical Screening and Hazard Surveillance for Workers Potentially Exposed to Engineered Nanoparticles. U. S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health; 2009.
31. ICRP. Human respiratory tract model for radiological protection. A report of a Task Group of the International Commission on Radiological Protection. Ann ICRP. 1994;24(1-3):1-482.
32. Oberdörster G, Sharp Z, Atudorei V, Elder A, Gelein R, Kreyling W, et al. Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. Inhal Toxicol. 2004 Jun;16(6-7):437-45.
33. McCreddin A, Gill L, Broderick B, McNabola A. Personal Exposure to Air Pollution in Office Workers in Ireland: Measurement, Analysis and Implications. Toxics. 2013 Dec 2;1(1):60-76.
34. Stephen T. Horhota, Said Saim. Supercritical fluid extraction of mould lubricant from hard shell capsules. 2001
35. Oberdörster G, Oberdörster E, Oberdörster J. Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. Environ Health Perspect. 2005 Jul;113(7):823-39.
36. Wang J, Chen C, Liu Y, Jiao F, Li W, Lao F, et al. Potential neurological lesion after nasal instillation of TiO₂ nanoparticles in the anatase and rutile crystal phases. Toxicol Lett. 2008 Dec 15;183(1-3):72-80.
37. Kreyling WG, Hirn S, Schleh C. Nanoparticles in the lung. Nat Biotechnol. 2010 Dec;28(12):1275-6.
38. Geiser M, Kreyling WG. Deposition and biokinetics of inhaled nanoparticles. Part Fibre Toxicol. 2010;7:2.
39. Keller CA, Frost A, Cagle PT, Abraham JL. Pulmonary alveolar proteinosis in a painter with elevated pulmonary concentrations of titanium. Chest. 1995 Jul;108(1):277-80.
40. NIOSH. Occupational Exposure to Titanium Dioxide. U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health; 2011.

41. Falck GCM, Lindberg HK, Suhonen S, Vippola M, Vanhala E, Catalán J, et al. Genotoxic effects of nanosized and fine TiO₂. *Hum Exp Toxicol*. 2009 Jun;28(6–7):339–52.
42. Ghosh M, Bandyopadhyay M, Mukherjee A. Genotoxicity of titanium dioxide (TiO₂) nanoparticles at two trophic levels: Plant and human lymphocytes. *Chemosphere*. 2010 Nov;81(10):1253–62.
43. WHO. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans: Carbon Black, Titanium Dioxide, and Talc. Vol. 93. World health organization, International Agency for Research on Cancer; 2010.
44. IARC. Agents Classified by the IARC Monographs [Internet]. Vols. 1–114. World health organization, International Agency for Research on Cancer; 2015 [cited 2016 Jan 11]. Available from: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/>
45. GRIMM. Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) [Internet]. GRIMM Technology INC; 2015 [cited 2016 Jan 5]. Available from: http://wiki.grimm-aerosol.de/index.php?title=NANO-SMPS_C
46. GRIMM. Portable Aerosol Spectrometer [Internet]. GRIMM Technology INC; 2010 [cited 2016 Jan 5]. Available from: <http://www.dustmonitor.com/Research/1109.htm>
47. University of Essex for Nanocap. Measurement Techniques For Nanoparticles [Internet]. Available from: <http://www.nanocap.eu/Flex/Site/Downloadf860.pdf>
48. Kanomax. Portable Aerosol Mobility Spectrometer (PAMS) [Internet]. Kanomax The Ultimate Measurements; 2013 [cited 2016 Jan 5]. Available from: <http://www.kanomax-usa.com/research/pams/pams.html>
49. Matter Aerosol. DiS C mini [Internet]. Testo Company; 2001. Available from: http://www.schaefer-tec.com/fileadmin/user_upload/sortiment/Partikelmessung/Matter/DiSCmini_brochure.pdf
50. Partector. The Partector Nanoparticle Detector [Internet]. naneos particle solutions; 2014 [cited 2016 Jan 5]. Available from: <http://www.naneos.ch/partector.html>

51. NIOSH. Occupational Exposure to Carbon Nanotubes and Nanofibers. U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health; 2013.
52. NIST. Safety Data Sheet of Titanium Dioxide Nanomaterial. National Institute of Standards and Technology; 2015.
53. Kobo Products, Inc. Safety Data Sheet of TiO₂ DS-PDL3. Kobo Products, Inc, South Plainfield; 2015.
54. NIOSH. General Safe Practices for Working with Engineered Nanomaterials in Research Laboratories. U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health; 2012.
55. NIOSH. NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards of Titanium dioxide. U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health; 2015.
56. NIOSH. Current Strategies for Engineering Controls in Nanomaterial Production and Downstream Handling Processes. U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health; 2013.
57. AIHA. Personal Protective Equipment for Engineered Nanoparticles Personal Protective Equipment for Engineered Nanoparticles. American Industrial Hygiene Association; 2015.
58. OSHA. General requirements PPE. - 1910.132. U.S. Department of Labour, Occupational Safety and Health Administration; 2011
59. Fire Engineering. SCBA: U.S. vs. International Standards and Procedures [Internet]. 2011 [cited 2017 May 18]. Available from: <http://www.fireengineering.com/articles/print/volume-164/issue-2/features/scba-u-s-vs-international-standards-and-procedures.html>

60. 3M. Respiratory Protection for Airborne Exposures to Biohazards [Internet] . 3M Occupational Health and Environmental Safety Division; 2009 [cited 2017 May 18]. Available from: <http://multimedia.3m.com/mws/media/409903O/respiratory-protection-against-biohazards.pdf>
61. TSI. EN 143 and related standards [Internet]. TSI; 2000 [cited 2017 May 18]. Available from: http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Application_Notes/AF-T-003_EN%20143-appnote.pdf
62. Kiattisak Batsungnoen, Michael Riediker, Guillaume Suárez, Nancy Brenna Hopf. Airborne Portland cement nanoparticles during bag emptying. In The United Kingdom: British Occupational Hygiene Society (BOHS); 2017.
63. Kiattisak Batsungnoen, Nancy Brenna Hopf, Guillaume Suarez, Michael Riediker. Comparison on size distribution and concentration of nanoparticles between photocatalytic and regular cement in an aerosolization system. In Singapore: International Particle Toxicology; 2016.
64. Kiattisak Batsungnoen, Nancy Brenna Hopf, Guillaume Suarez, Michael Riediker. Characterization of nanoparticles in photocatalytic and regular cement using an aerosolizing nanoparticle generator system. In Thailand: NanoThailand2016; 2016.
65. OSHA. Hand Protection. - 1910.138. U.S. Department of Labour, Occupational Safety and Health Administration; 1994.
66. OSHA. Chemical Protective Clothing [Internet]. U.S. Department of Labour, Occupational Safety and Health Administration; 2015.

Nano Safety



สาขาวิชาชีวอนามัยและความปลอดภัย
สำนักวิชาสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถ. มหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา
โทรศัพท์ 044-223000 โทรสาร 044-223920
www.sut.ac.th