Wisdom of the Land

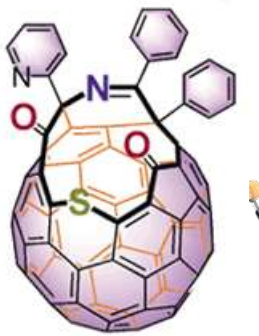
NanoSafety:

อนุภาคนาโนในสภาพแวดล้อมการทำงาน และการตรวจประเมินการสัมผัส

ดร.วิสันติ เลาหอุดมโชค
ภาควิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย
คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology)

เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้าง สังเคราะห์ ควบคุม หรือจัดการวัสดุ/ผลิตภัณฑ์ ที่มีขนาดเล็กอย่างยิ่งยวด (อยู่ในช่วง 1-100 นาโนเมตร) และโครงสร้างในระดับนาโนนี้ ทำให้เกิดคุณสมบัติพิเศษทางด้านกายภาพ เคมี หรือชีวภาพ ที่จะนำไปใช้ประโยชน์ตามจุดประสงค์ที่ต้องการ โดยกระบวนการดังกล่าวสามารถควบคุมได้อย่างมีความถูกต้องแม่นยำ



การเปรียบเทียบขนาดวัสดุนาโน

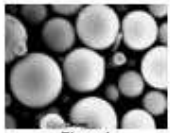
1 นาโนเมตร เท่ากับหนึ่งในพันล้านส่วนของ 1 เมตร

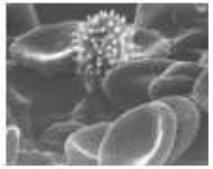
สิ่งที่มีอยู่ในธรรมชาติ

Dust mite
200 µm

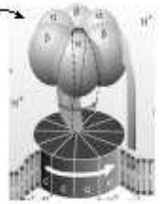
Ant
~ 5 mm

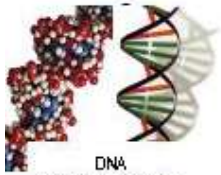
Human hair
~ 60-120 µm wide

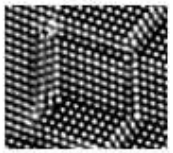

Fly ash
~ 10-20 µm

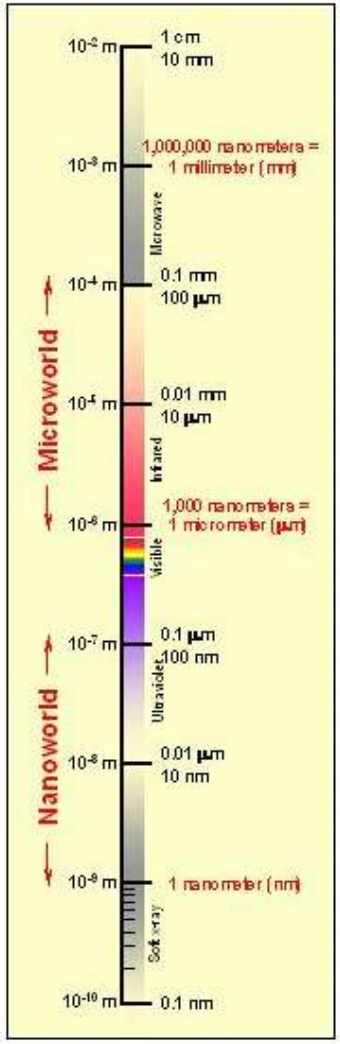

Red blood cells
with white cell
~ 2-5 µm

~10 nm diameter


ATPsynthase

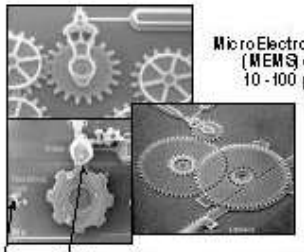

DNA
~2-12 nm diameter

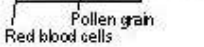

Atoms of silicon
spacing ~tenths of nm

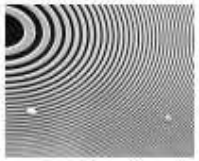


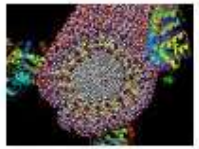
สิ่งที่มนุษย์สร้างขึ้น

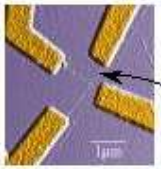
Head of a pin
1-2 mm

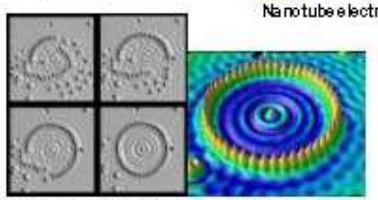

MicroElectroMechanical
(MEMS) devices
10 -100 µm wide

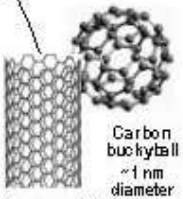

Pollen grain
Red blood cells


Zone plate x-ray "lens"
Outer ring spacing ~35 nm

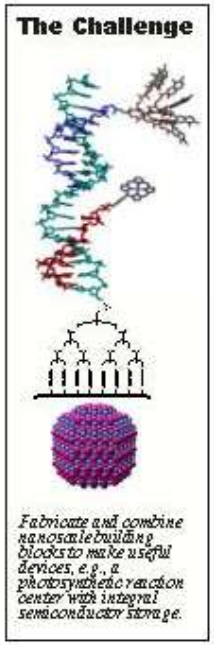

Self-assembled,
Nature-inspired structure
Many 10s of nm


Nanotube electrode

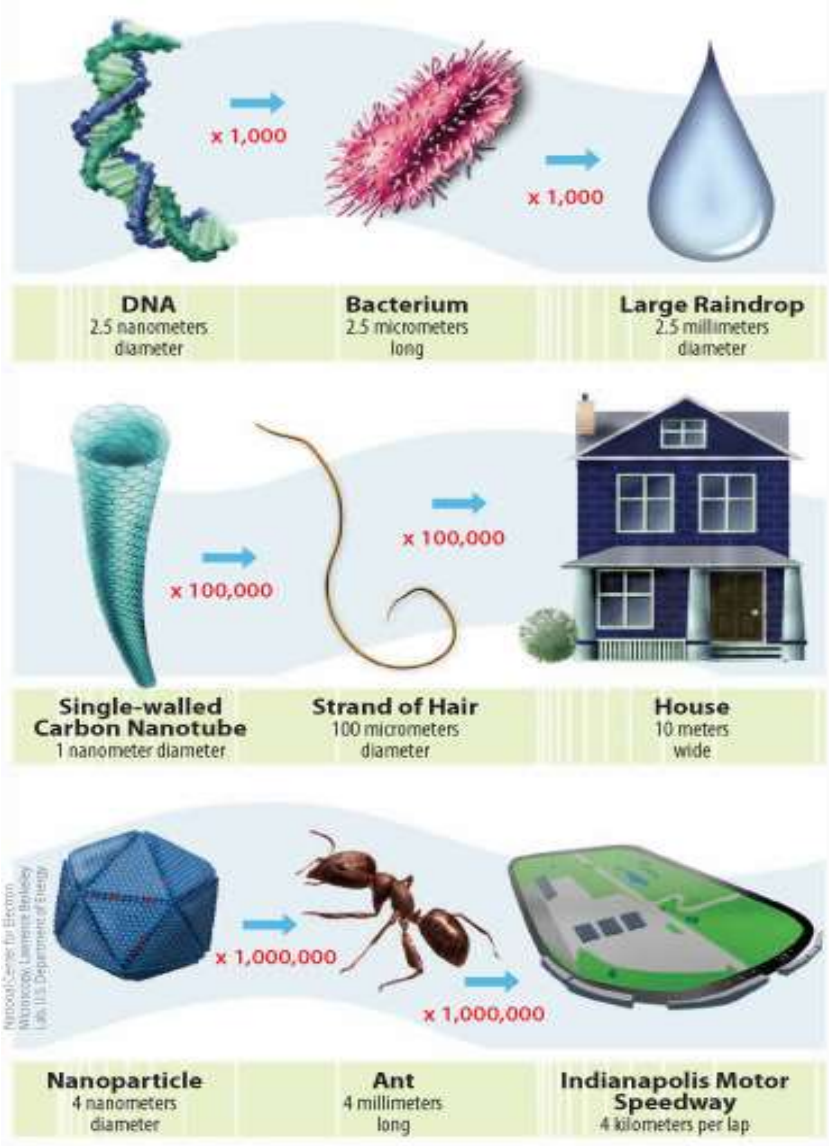

Quantum corral of 48 iron atoms on copper surface
positioned one at a time with an STM tip
Corral diameter 14nm


Carbon
buckyball
~1 nm
diameter

Carbon nanotube
~1.3 nm diameter

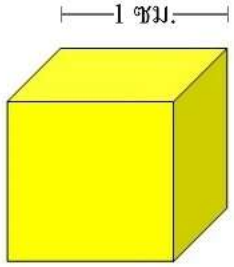


การเปรียบเทียบขนาดวัสดุนาโน

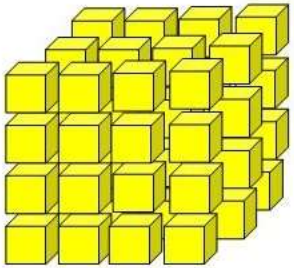


การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างและคุณสมบัติ

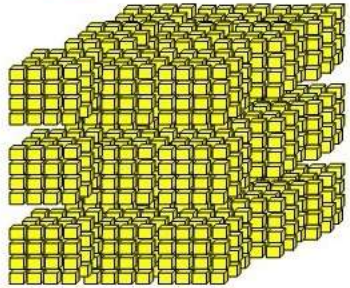
ตัวอย่างการแบ่งวัตถุออกเป็นหน่วยย่อยระดับนาโนเมตร



จำนวน : 1 ชิ้น
ปริมาตร : 1 ซม.^{3}
พื้นผิว : 6 ซม.^{2}



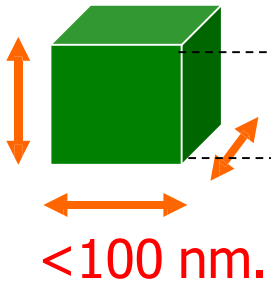
จำนวน : 10^{12} ชิ้น
ปริมาตร : 1 ไมโครเมตร^3/ชิ้น
พื้นผิว : 6×10^{12} ไมโครเมตร^2
หรือ 60,000 ซม.^{2}



จำนวน : 10^{21} ชิ้น
ปริมาตร : 1 นาโนเมตร^3/ชิ้น
พื้นผิว : 6×10^{21} นาโนเมตร^2
หรือ 60,000,000 ซม.^{2}

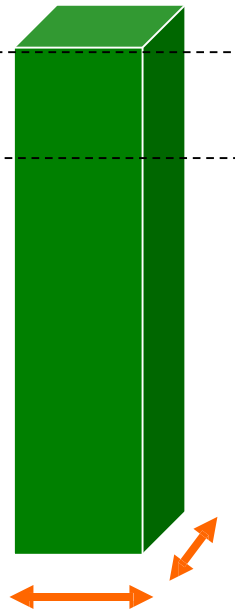
การจำแนกวัสดุนาโนตามขนาดและมิติ

3 Nano-dimensions



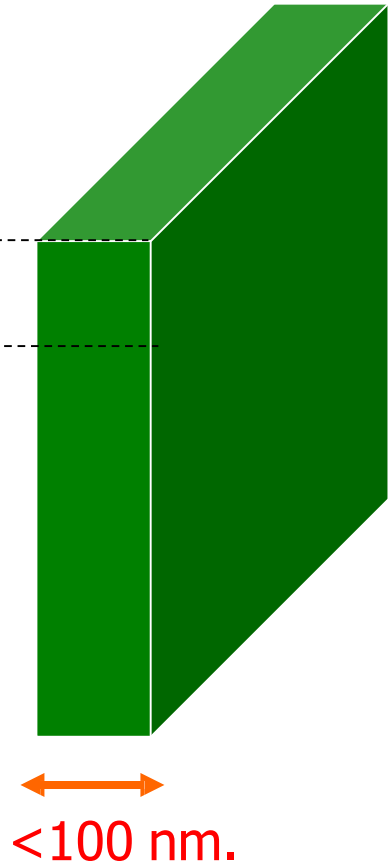
- **Nanoparticles**
- **Nanopowders**
- **Nanocapsules**
- **Fullerenes**
- **Dendrimers**
- **Quantum dots**
- **Nanostructures**
- **Nanopores**

2 Nano-dimensions



- **Nanofibers**
- **Nanowires**
- **Nanotubes**

1 Nano-dimension



- **Nano thin-film**

ความเป็นมาของนาโนเทคโนโลยี

- ค.ศ. 1965 มีการเสนอแนวคิดการศึกษาเกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยี โดย Dr. Richard Feynman
- ค.ศ. 2000 รัฐบาลสหรัฐฯ ได้เริ่มแผนยุทธศาสตร์นาโนเทคโนโลยี และ NIOSH ได้มีการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาแนวทางดำเนินงานด้านความปลอดภัยนาโนเทคโนโลยี โดยให้ความสำคัญเป็นลำดับต้นๆ ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา
- พ.ศ. 2546 ครม. มีมติให้จัดตั้งศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC) ในประเทศไทย

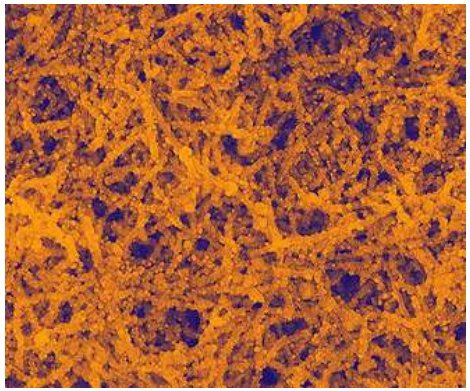
ประเภท และชนิดของวัสดุนาโน

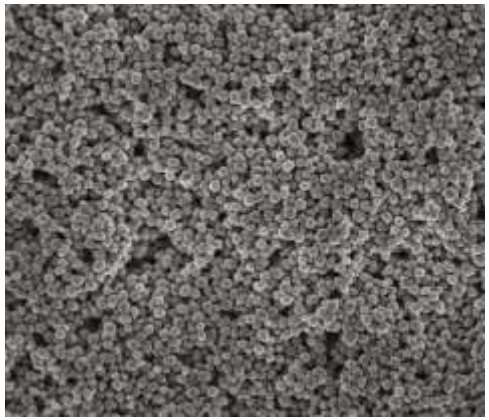
แบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มประเภท

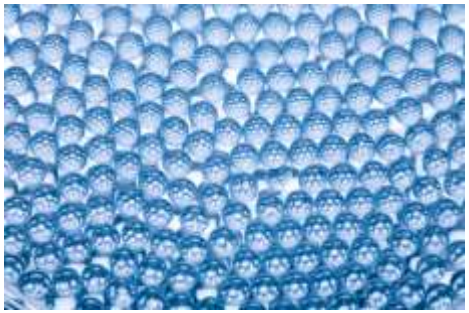
- โลหะ ออกไซด์ของโลหะ อัลลอยด์ และเซรามิคส์ (Metals, Metal oxides, Alloys and Ceramics)
- นาโนคอมโพสิต (Nanocomposites)
- นาโนคอมโพสิตโพลิเมอร์ (Polymer Nanocomposites; PCN)
- นาโนคาร์บอน (Carbon-based Nanomaterials)

โลหะ ออกไซด์ของโลหะ อัลลอยด์

- เป็นออกไซด์ของโลหะที่มีขนาดอนุภาคเล็กในระดับนาโน ได้แก่ TiO_2, ZnO, CuO, CdS, Fe, Nano-Silver, Nano-Alumina, Nano-Silica, Nano-Gold เป็นต้น

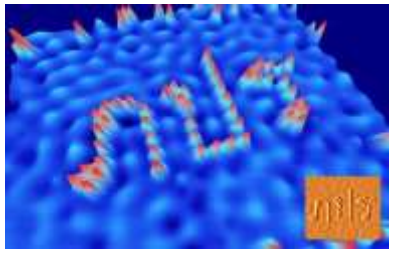


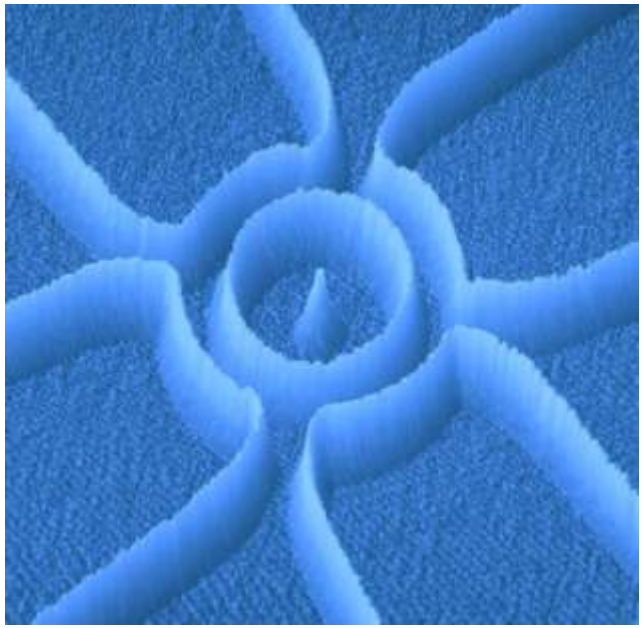


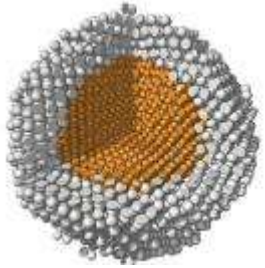


นาโนคอมโพสิต

- ได้แก่ Quantum Dots, Core Shell Nanoparticles, etc.

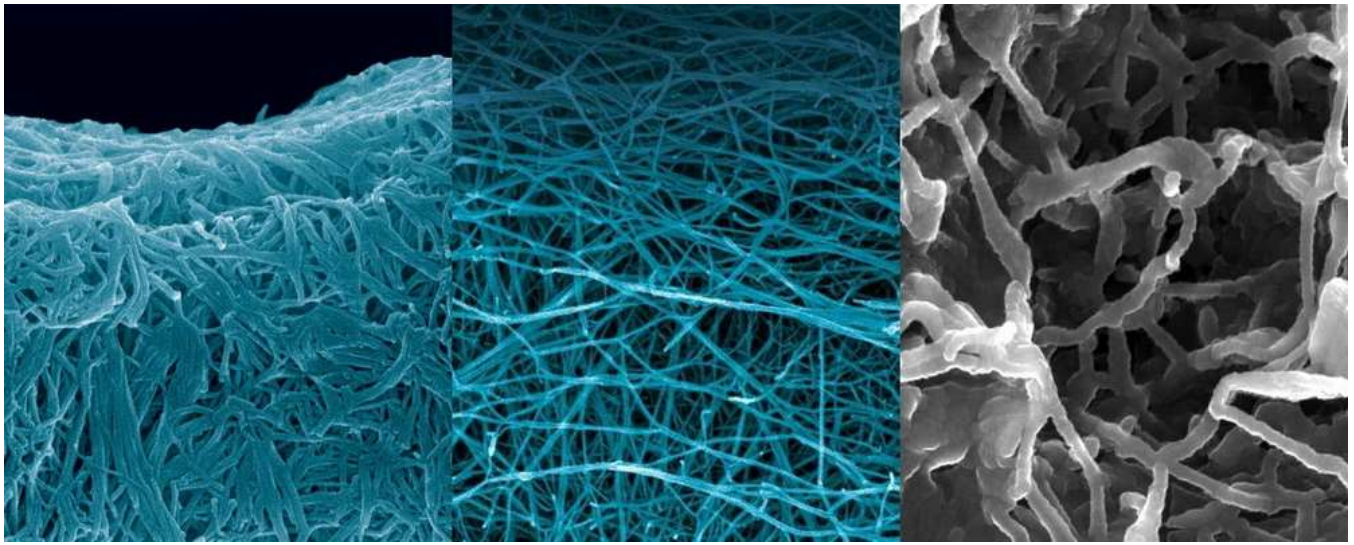






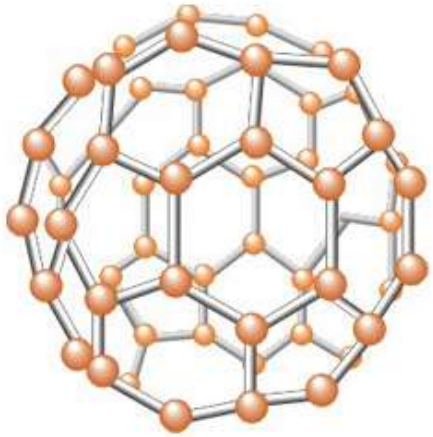
นาโนคอมโพสิตโพลิเมอร์

- โดยทั่วไปเป็นของผสมระหว่างโพลิเมอร์ (หรือโคโพลิเมอร์) กับวัสดุนาโน

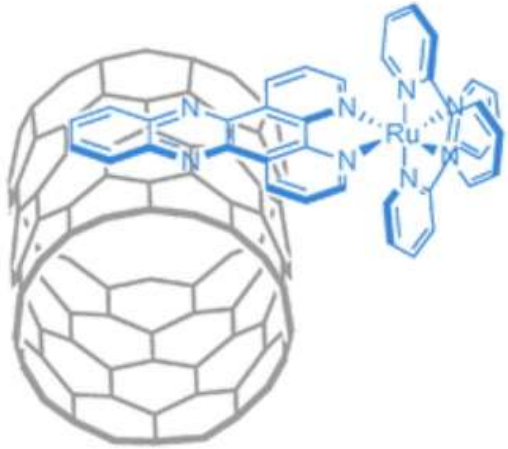


นาโนคาร์บอน

- เป็นอนุภาคคาร์บอนที่ถูกจัดเตรียมให้มีขนาดเล็กระดับนาโน เช่น Carbon Black, Fullerence, Single Wall Carbon Nanotube (SWCNT), Multi Wall Carbon Nanotube (MWCNT)



(a) Fullerene C_{60}



(b) Carbon nanotubes

การพัฒนาทางนาโนเทคโนโลยี

- นวัตกรรมที่เกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยี มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา
- รัฐบาลประเทศต่างๆ โดยเฉพาะสหรัฐอเมริกาและญี่ปุ่น ได้จัดสรรงบประมาณเพื่อการศึกษาวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง
- ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีในอุตสาหกรรมต่างๆ หลายประเภท

การประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรม

- อุตสาหกรรมสิ่งทอ (สิ่งทอนาโน)
- อุตสาหกรรมโลหะและวัสดุก่อสร้าง
- อุตสาหกรรมยานยนต์
- อุตสาหกรรมพลังงาน
- อุตสาหกรรมอิเลคทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์
- อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า/สินค้าค้าอุปโภคในบ้าน
- อุตสาหกรรมเครื่องสำอางค์
- อุตสาหกรรมยา/การแพทย์

อุตสาหกรรมสิ่งทอ (สิ่งทอนาโน)

- **เสื้อผ้านาโน** มีการใช้อนุภาคนาโนซิลเวอร์ผสมหรือเคลือบเส้นใยผ้า ทำให้สวมใส่สบายขึ้น เนื่องจากตัวอนุภาคจะช่วยดูดความชื้น ป้องกันความร้อนและ UV รวมทั้งฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ระงับกลิ่นเหงื่อ
- **ที่นอน/ชุดเครื่องนอน** ใช้อนุภาคนาโนซิลเวอร์เพื่อต้านกลิ่นอับ
- **ชุดว่ายน้ำ** มีการใช้อนุภาคนาโนเคลือบทำให้ผ้าไม่เปียกน้ำ ทำให้มีแรงเสียดทานจากน้ำน้อยลง
- **สิ่งทอ เส้นใย หรือวัสดุสังเคราะห์อื่นๆ** มีการใช้ CNT เคลือบเสริมความแข็งแรงของเส้นใย

อุตสาหกรรมโลหะและวัสดุก่อสร้าง

- **เหล็ก โครงสร้างอาคาร** มีการใช้วัสดุนาโนเสริมให้เหล็กมีคุณสมบัติในการยืดหยุ่นตัวสูงขึ้นและมีความเหนียวมากขึ้น
- **กระเบื้อง คอนกรีต** มีการใช้เส้นใยนาโนเป็นส่วนประกอบคอนกรีต ทำให้มีความละเอียดมากขึ้น ส่งผลให้การยึดเกาะดีขึ้น เพิ่มความแข็งแรง ทนทาน
- **สีทาบ้าน** มีการผสมอนุภาคนาโนไททาเนียม (TiO_2) เพื่อให้สีดูสว่าง เกิดคุณสมบัติฆ่าเชื้อ และสามารถทำความสะอาดตัวเองได้

อุตสาหกรรมยานยนต์

- **ตัวถังและโครงรถยนต์** มีการใช้ CNT เสริมความแข็งแรง
- **ห้องเครื่อง/ภายในตัวรถ** มีการนำวัสดุนาโน เช่น CNT Composite และ Ceramics มาพัฒนาเป็นส่วนประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ทำให้มีน้ำหนักเบา ไม่เป็นสนิม แข็งแรง ทนรอยขีดข่วน ฯลฯ
- **กระจกรถยนต์** มีการใช้วัสดุนาโนเคลือบเพื่อช่วยลดการสะท้อนแสง เพิ่มความใส ป้องกันคราบน้ำเกาะ ฯลฯ ซึ่งช่วยให้การมองเห็นดีขึ้น
- **ยางรถยนต์** มีการผสม Carbon Black, Nano-silica เพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะถนน ช่วยให้ประหยัดเชื้อเพลิงยิ่งขึ้น
- **ผ้าเบรค** มีการพัฒนาวัสดุนาโนจาก CNT เพื่อทดแทนแร่ใยหิน

อุตสาหกรรมพลังงาน

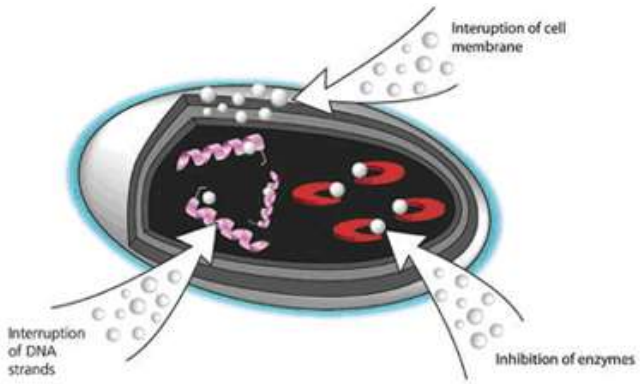
- **เซลล์แสงอาทิตย์** มีการใช้ Nanomotor ซึ่งสามารถดูดกลืนแสงได้ในช่วงคลื่นที่กว้างขึ้น เพื่อเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานกล
- **เซลล์เชื้อเพลิง** ใช้ Nanoplatinum ผลิตตัวเร่งปฏิกิริยาที่เปลี่ยนไฮโดรเจนหรือเชื้อเพลิงอื่น เช่น เมธานอล ให้เป็นไฮโดรเจนอิออน
- **แบตเตอรี่** ใช้ Nanopolymer เป็นฉนวนกั้นกลางเซลล์ไฟฟ้าขณะที่ไม่ใช้งาน ช่วยยืดอายุการเก็บรักษาแบตเตอรี่
- **ตัวเก็บประจุ** ใช้ CNT ซึ่งมีพื้นที่ผิวมากและสม่ำเสมอ พัฒนาตัวเก็บประจุให้มีความจุมากขึ้น และมีกำลังไฟสูงขึ้น

อุตสาหกรรมอิเลคทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์

- **วงจรรวม** มีการใช้นาโนโกลด์ เป็นองค์ประกอบในสารกึ่งตัวนำในการผลิตชิป/แผงวงจร ทำให้อุปกรณ์ความหนาแน่นสูงขึ้น มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าดีขึ้น และมีสมรรถนะโดยรวมสูงขึ้น
- **หน่วยความจำ** มีการพัฒนาเป็น nanoRAM (NRAM) โดยใช้ CNT ทำให้สามารถเก็บข้อมูลได้ด้วยความหนาแน่นสูง ประหยัดไฟมากขึ้น
- **จอภาพแสดงผล** ได้ถูกพัฒนาให้เป็นจอภาพที่แบน บางและพับงอได้ ใช้พลังงานน้อยลง ภาพเคลื่อนไหวได้เร็ว ดูได้ด้วยมุมกว้างขึ้น โดยชิ้นวัสดุ/ส่วนประกอบมีขนาดเล็กระดับนาโน

อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและสินค้าอุปโภค

- **เครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้าน** เช่น ตู้เย็น เครื่องปรับอากาศ/ฟอกอากาศ เครื่องซักผ้า ฯลฯ มีการใช้นาโนซิลเวอร์ในตัวกรอง เพื่อฆ่าเชื้อโรคและดับกลิ่น
- **สินค้าอุปโภค** เช่น ผงซักฟอก น้ำยาทำความสะอาด ผงดูดซับกลิ่น สเปรย์ปรับอากาศ ฯลฯ มีการผสมนาโนซิลเวอร์ เพื่อจุดประสงค์ในการฆ่าเชื้อโรคและดับกลิ่น



อุตสาหกรรมเครื่องสำอางค์

- **โลชั่นทากันแดด** มีการผสมนาโนซิงค์ (ZnO) หรือนาโนไททาเนียม (TiO_2) ซึ่งมีคุณสมบัติช่วยปกป้อง UV ได้ดี และไม่ทำให้โลชั่นขุ่น
- **ครีมหรือเจลเวชสำอางค์** ผลิตภัณฑ์ที่ผสมอนุภาคนาโน จะช่วยรักษาความชุ่มชื้น ทั้งยังช่วยให้การดูดซึมตัวยาเข้าสู่ผิวหนังดีขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของครีมหรือเจล
- **ผลิตภัณฑ์แป้งทาหน้า** เนื้อแป้งที่เป็นอนุภาคนาโน ทำให้มีคุณสมบัติไม่สะท้อนแสง ช่วยให้ใบหน้าไม่ขาววอกและดูอ่อนเยาว์ขึ้น

อุตสาหกรรมยาและการแพทย์

- **ยารักษาโรค** ตัวยาที่เป็นอนุภาคนาโนทำให้ถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้ดีและออกฤทธิ์ได้เร็วขึ้น ใช้ปริมาณยาน้อยลง และถึงเป้าหมายเฉพาะที่ ลดการส่งผลข้างเคียงต่อเซลล์หรือเนื้อเยื่ออื่น
- **เวชภัณฑ์/ยาฆ่าเชื้อโรค** มีใช้บรรจุภัณฑ์ที่เคลือบนาโนซิลเวอร์ หรือใส่ในผ้าปิดแผล เพื่อฆ่าเชื้อโรค ช่วยให้แผลหายสนิทโดยไม่ติดเชื้อ
- **การรักษาทางการแพทย์** มีการพัฒนาไปเป็นการผ่าตัดระดับนาโน (Nanosurgeons) การใช้อนุภาค Nanoshell ในการทำลายเซลล์มะเร็ง นอกจากนี้ ยังมีการผลิตตัวเซนเซอร์ทางการแพทย์ อวัยวะเทียม กระดูกเทียมที่มีอนุภาคนาโน

อุตสาหกรรมอื่นๆ

- **สารเคมี** ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นอนุภาคขนาดนาโน จะเพิ่มอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อมวล ทำให้มีความไวต่อปฏิกิริยาทางเคมีมากขึ้น
- **อาหารและบรรจุภัณฑ์** เช่น กักเก็บกลิ่นรสไว้ใน Nanocapsule น้ำปลานาโน ภาชนะที่ทำจากนาโนที่ช่วยคงความสดของเนื้อสัตว์ ใช้นาโนซิลเวอร์เคลือบภาชนะเพื่อฆ่าจุลินทรีย์ ทำให้อาหารไม่บูด
- **อุปกรณ์กีฬา** เช่น ไม้เทนนิสเสริม CNT เพิ่มความแข็งแรง ลูกเทนนิสที่ภายในเป็น PCN ซึ่งทนทานกว่าปกติเท่าตัว ไข (Wax) นาโนสำหรับเคลือบใต้ไม้สกี เพื่อลดแรงเสียดทาน ฯลฯ

ผลิตภัณฑ์นาโนในเชิงพาณิชย์

- ปัจจุบันมีฐานการผลิตส่วนใหญ่อยู่ในประเทศกำลังพัฒนา โดยเฉพาะภูมิภาคเอเชีย (รวมทั้งประเทศไทย)
- มีการคาดประมาณว่ามูลค่าของผลิตภัณฑ์นาโน อยู่ที่ร้อยละ 1 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ (~ 120,000 ล้านบาท)

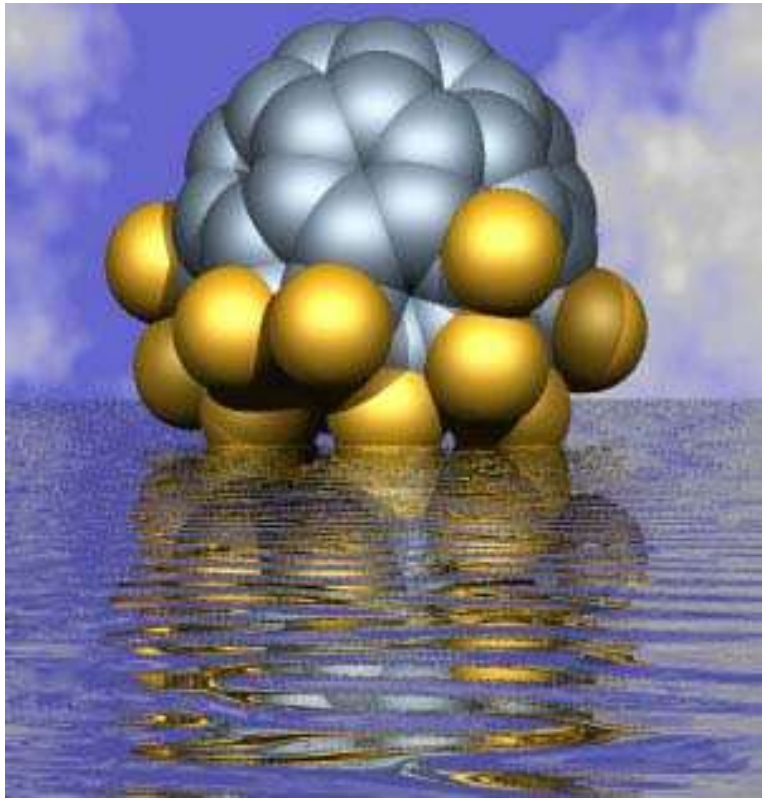
ตัวอย่างผลิตภัณฑ์นาโนในชีวิตประจำวัน

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์นาโนในชีวิตประจำวัน

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์นาโนในชีวิตประจำวัน

โลกแห่งอนาคต : Dilemma of Nanotechnology

Utopian dreams

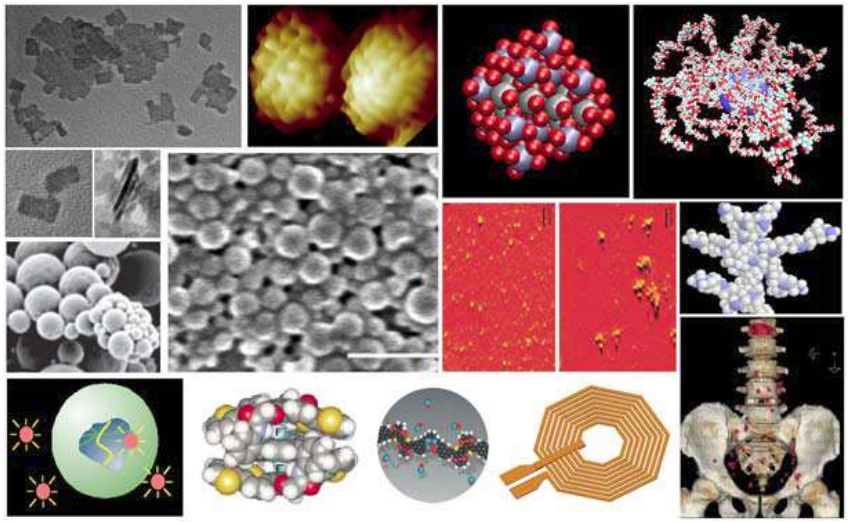


Apocalyptic nightmares

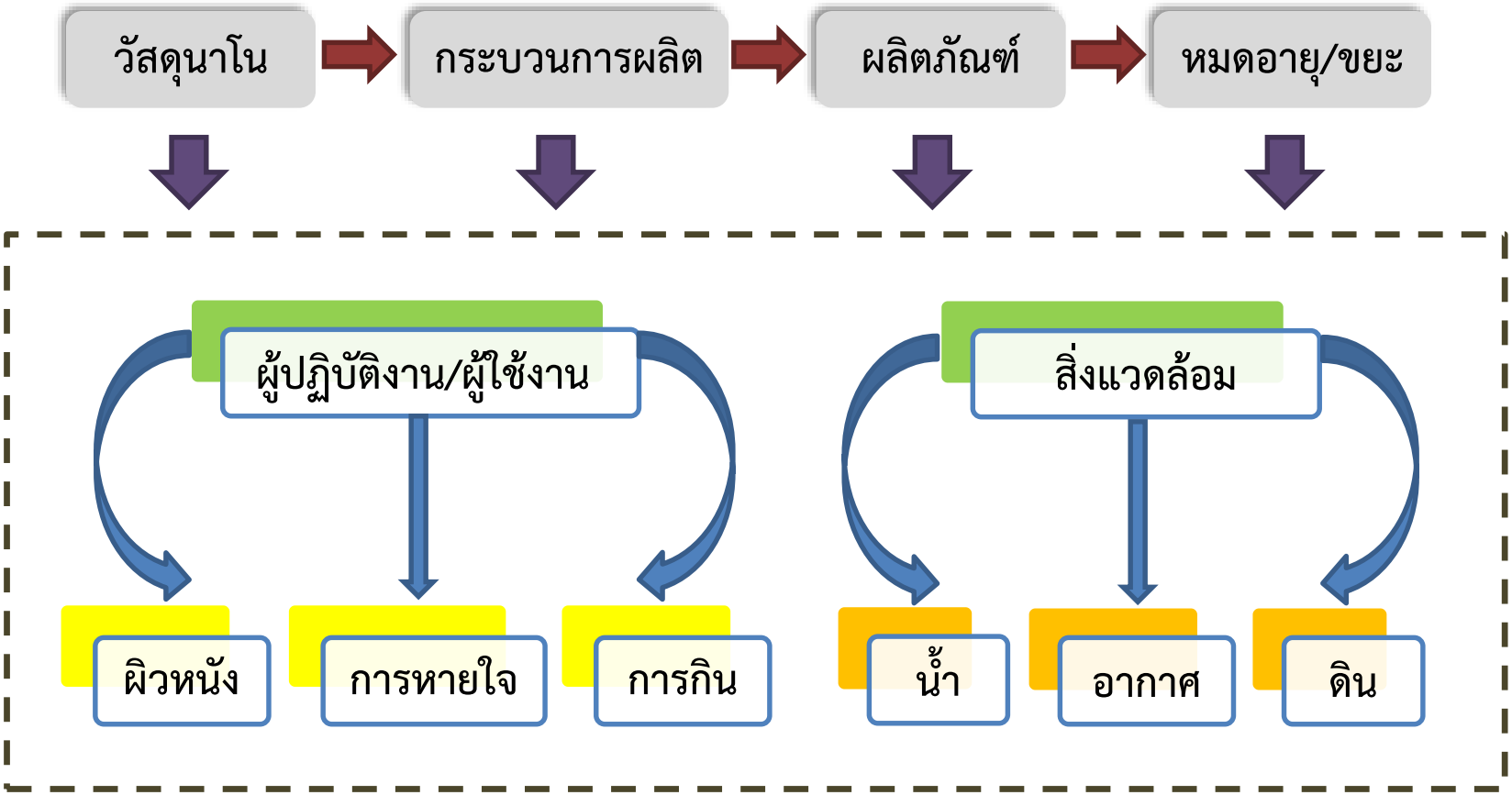
อนุภาคนาโนในสิ่งแวดล้อม

มีที่มาจาก 3 แหล่งคือ

- อนุภาคนาโนที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติ
- จากกิจกรรมของมนุษย์ โดยมิได้ตั้งใจให้เกิดอนุภาคนาโน
- จากการเตรียมขึ้นด้วยนาโนเทคโนโลยี



วัฏจักรชีวิต (Life Cycle) ของวัสดุนาโน

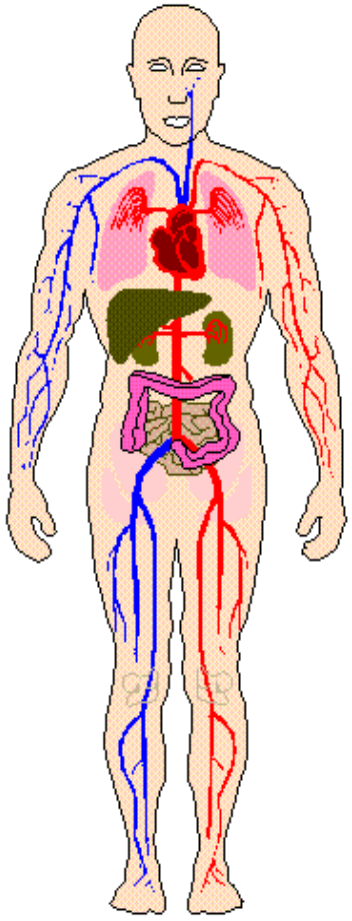


Source: European Parliament's Committee on the Environment, Public Health and Food Safety

การได้รับอนุภาคนาโนเข้าสู่ร่างกาย

มนุษย์ได้รับอนุภาคนาโนเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทางคือ

- **ทางการหายใจ** (เน้นในกรณีผู้ปฏิบัติงาน)
  - อนุภาคนาโนสามารถเข้าถึงถุงลมปอด (Alveoli) และถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือด
- **ทางการสัมผัส** (เน้นในกรณีผู้บริโภค)
  - อนุภาคนาโนสามารถแทรกซึมผ่านเนื้อเยื่อผิวหนังเข้าสู่กระแสเลือด
- **ทางการกิน**
  - อนุภาคนาโนจะถูกดูดซึมและสะสมในตับ



การสัมผัสในสภาพแวดล้อมการทำงาน

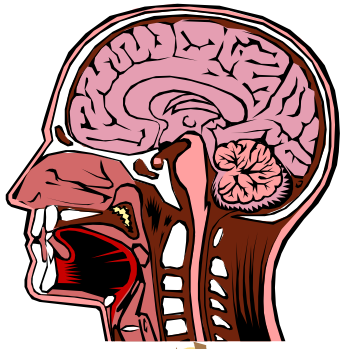
- **วัสดุนาโนที่เป็นผงฝุ่น**
  - เกิดการสัมผัสได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางการหายใจเข้าสู่ปอด รวมทั้งการดูดซึมผ่านผิวหนังด้วย
- **วัสดุนาโนที่แขวนลอยอยู่ในของเหลว**
  - เช่น นาโน TiO_2 ที่แขวนลอยในน้ำ จะมีโอกาสฟุ้งปลิวได้ยาก ยกเว้นกระเซ็นเป็นฝอย
- **วัสดุนาโนที่ฝังอยู่ในโครงข่ายโพลิเมอร์ หรือในวัสดุอื่น**
  - อนุภาค/วัสดุนาโน จะหลุดออกมาได้ยาก เช่น CNT ที่ฝังอยู่ในไม้เทนนิส

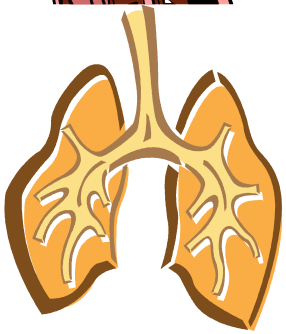
กระบวนการทำงานที่อาจมีการสัมผัสอนุภาคนาโน

- การเปิดภาชนะบรรจุ รวมทั้งผู้ควบคุมห้องเก็บวัตถุดิบ
- การสังเคราะห์โดยวิธีการต่างๆ รวมทั้งการบด
- การชั่ง ตวง วัด
- การผสม การเตรียมการผสม
- การฉีดพ่น หรือทำให้กระจายตัวลงบนชิ้นงาน
- การขึ้นรูป ตัดแต่งด้วยเครื่องจักร
- การบรรจุหีบห่อ
- การทำความสะอาดเครื่องจักร บริเวณการทำงาน
- การจัดการของเสีย

ความเสี่ยงต่อการได้รับอันตรายจากอนุภาคนาโน

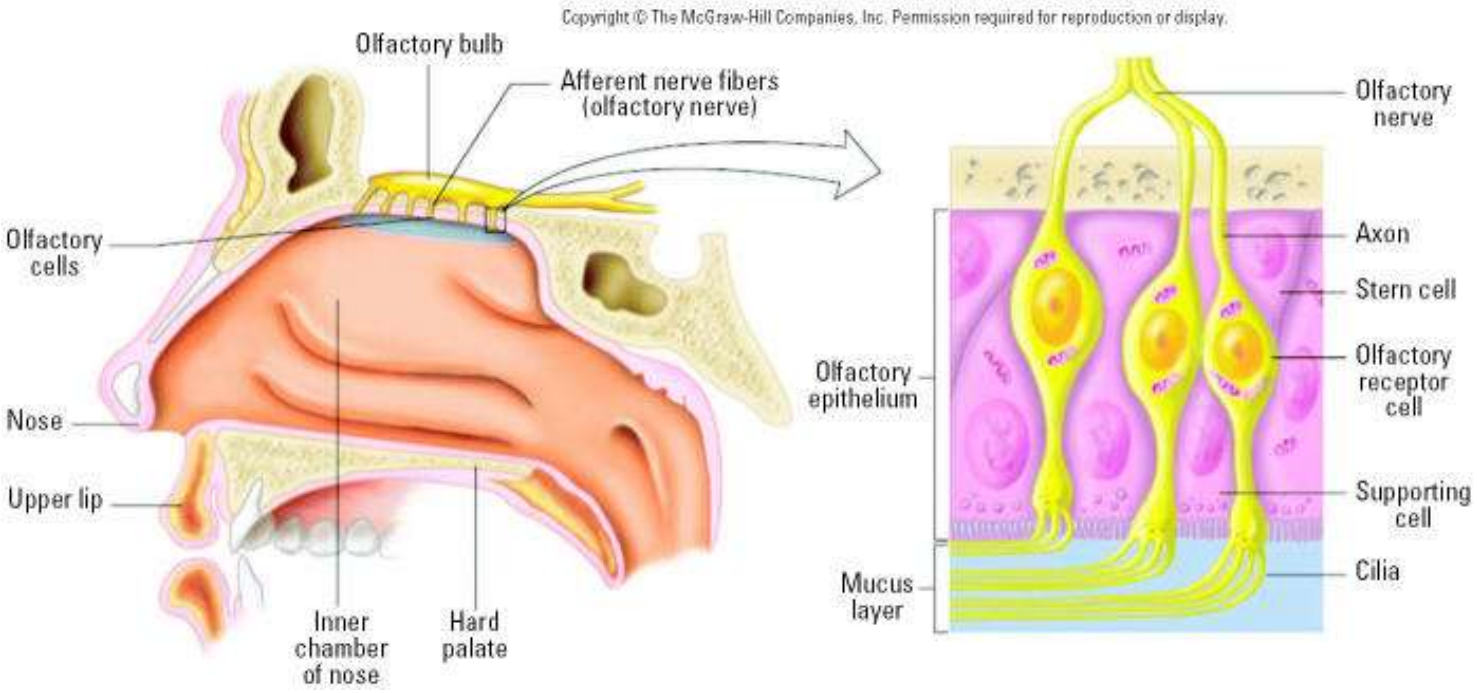
- อนุภาคขนาดนาโนที่ฟุ้งกระจายอยู่ในสิ่งแวดล้อมการทำงาน สามารถลอยตัวอยู่ในอากาศได้นานกว่าอนุภาคขนาดใหญ่
- อนุภาคนาโนมีศักยภาพในการแทรกซึมผ่านเนื้อเยื่อเข้าสู่กระแสเลือดไปยังอวัยวะเป้าหมาย เช่น หัวใจ ตับ สมอง ได้ง่ายและรวดเร็วกว่า
- เนื่องจากอนุภาคนาโนมีขนาดเล็กมาก สามารถสะสมตามอวัยวะต่างๆ ได้มาก
- ทำให้เกิดการอักเสบของเนื้อเยื่อต่างๆ ได้ง่าย





ศักยภาพในการก่ออันตรายรูปแบบอื่นๆ

- NIOSH ศึกษาพบว่าวัสดุนาโนบางชนิดเข้าสู่สมองและอวัยวะต่างๆ ทำให้เกิดการอักเสบเฉียบพลัน หรือผลกระทบอื่นๆ ได้

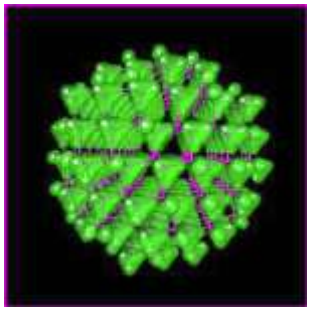


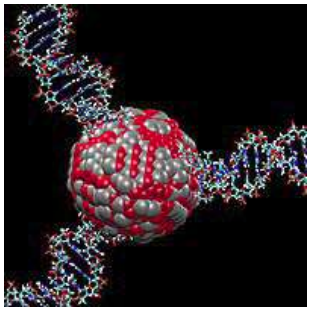
ปัจจัยที่มีผลต่อความเป็นอันตรายของวัสดุนาโน

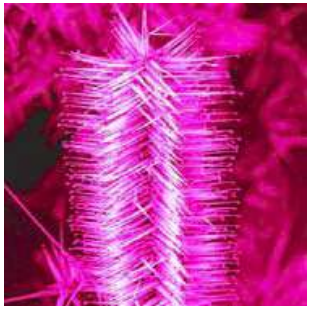
ศักยภาพการก่ออันตรายของอนุภาคนาโน ขึ้นอยู่กับ

- Size – ขนาดของอนุภาค
- Shape – รูปทรงของอนุภาค
- Surface Area – ปริมาณพื้นที่สัมผัส
- Surface Chemistry – คุณสมบัติทางเคมีของพื้นผิว
- Solubility – ความสามารถในการละลายน้ำ

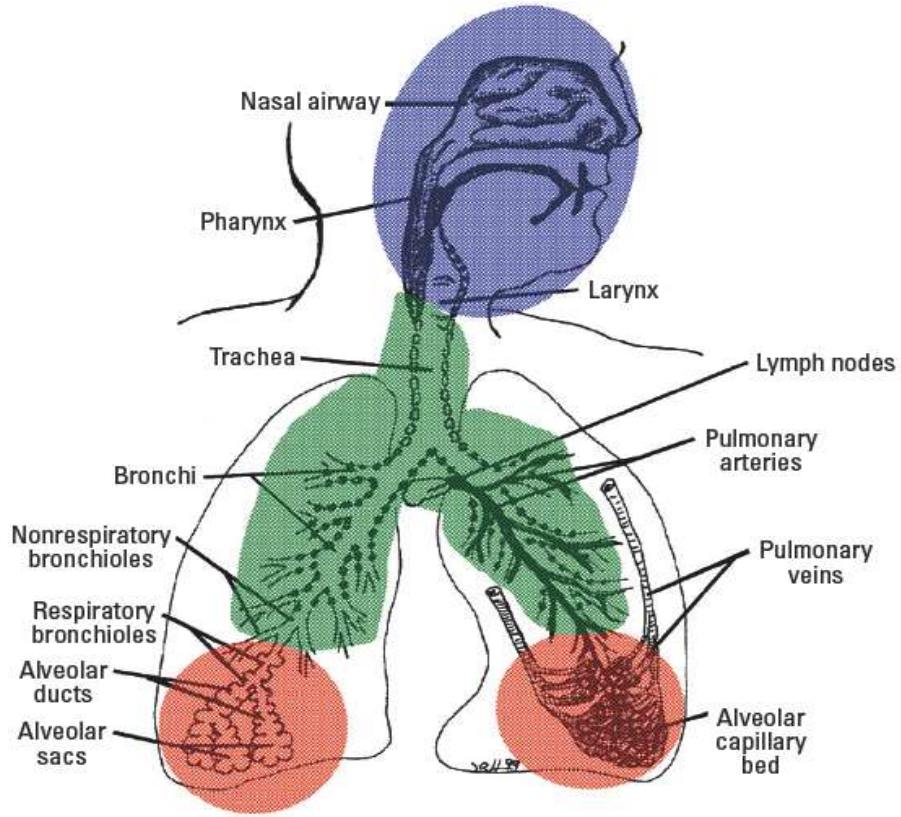
คุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพของวัสดุนาโนหนึ่งๆ อาจเหมือนหรือแตกต่างจากวัสดุเดิม

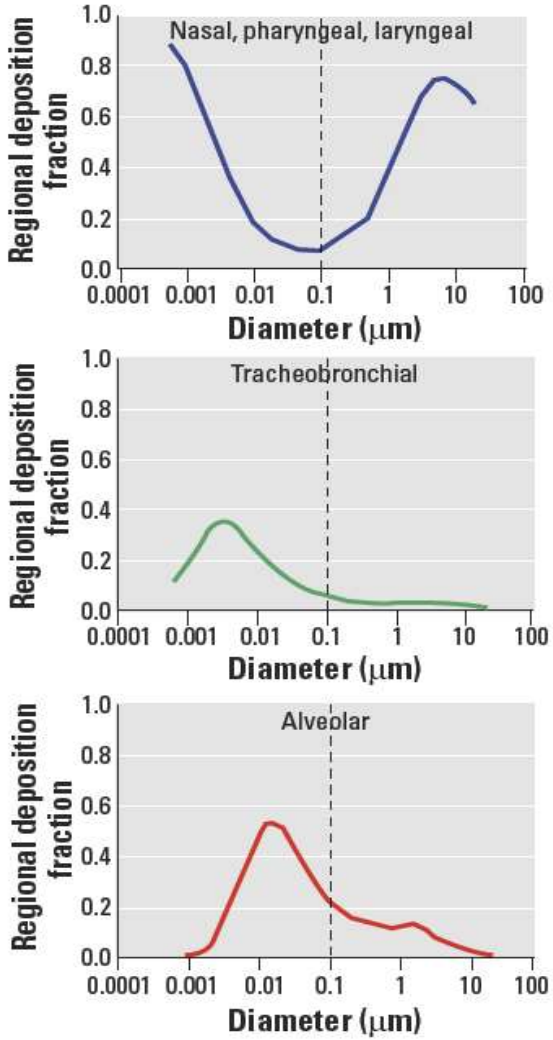






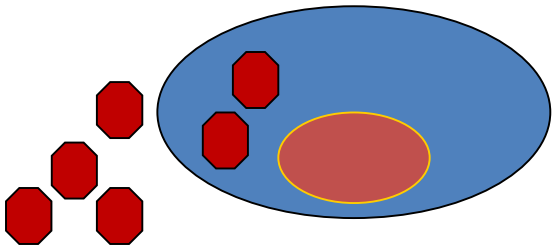
การสะสมตัวของอนุภาคขนาดต่างๆ ในทางเดินหายใจ



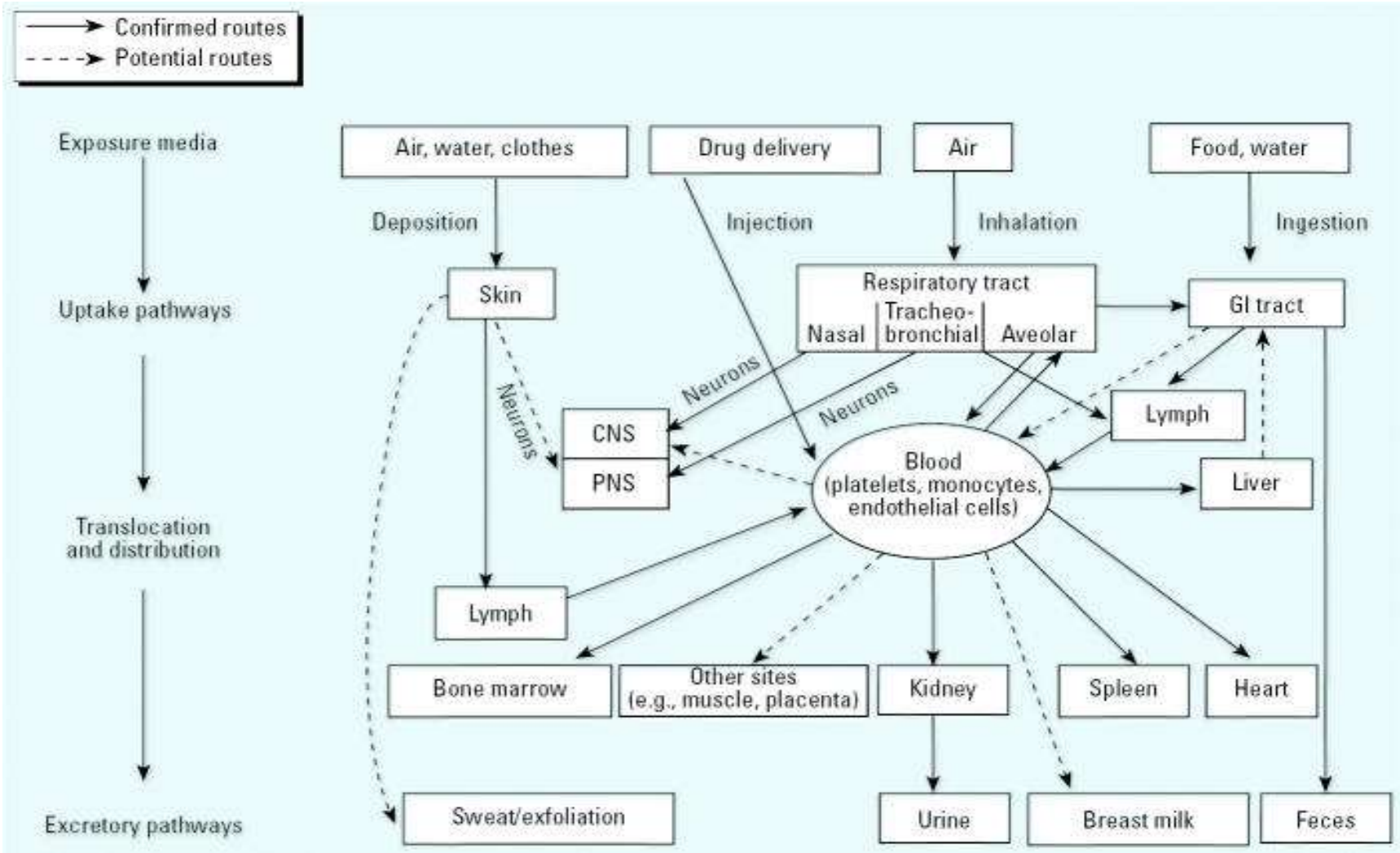


การดูดซึมและการกำจัดอนุภาคนาโนออกจากร่างกาย

- อนุภาคนาโนที่ละลายน้ำได้ – จะละลายในเยื่อเมือก แล้วถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสโลหิต
- อนุภาคนาโนที่ละลายน้ำได้ยาก หรือไม่ละลายน้ำ
  - เกาะตามผนังเซลล์ – ไอออกมา
  - ในถุงลม – ถูกจับกินโดย Macrophages
    - สะสมอยู่ในปอด
    - ถูกขนส่งในกระแสโลหิต (ส่วนน้อย) ไปสะสมยังอวัยวะอื่นๆ



กระบวนการในร่างกายของอนุภาคนาโน



ผลกระทบที่สำคัญของอนุภาคนาโนต่อสุขภาพ

ความสามารถในการทำให้เกิดมะเร็ง ก่อการระคายเคืองหรือภูมิแพ้	• ระคายเคืองเซลล์ปอด ปอดอักเสบเรื้อรัง • ทำให้เกิดเป็นพังผืด (Fibrosis) • กระตุ้นการเกิดอาการหอบหืด • กระตุ้นให้เซลล์เกิดความผิดปกติ มะเร็ง
ความเป็นพิษต่อสารพันธุกรรม	• ก่อให้เกิดการสร้างสารอนุมูลอิสระ • รบกวนการทำงาน/ทำลาย DNA
ความเป็นพิษต่อเซลล์	• ทำลายเซลล์ ก่อให้เกิดเซลล์ตาย

- ข้อมูลเกี่ยวกับอันตรายจากอนุภาคนาโนชนิดต่างๆ ต่อร่างกายมนุษย์ยังคงมีอยู่จำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลกระทบในระยะยาว

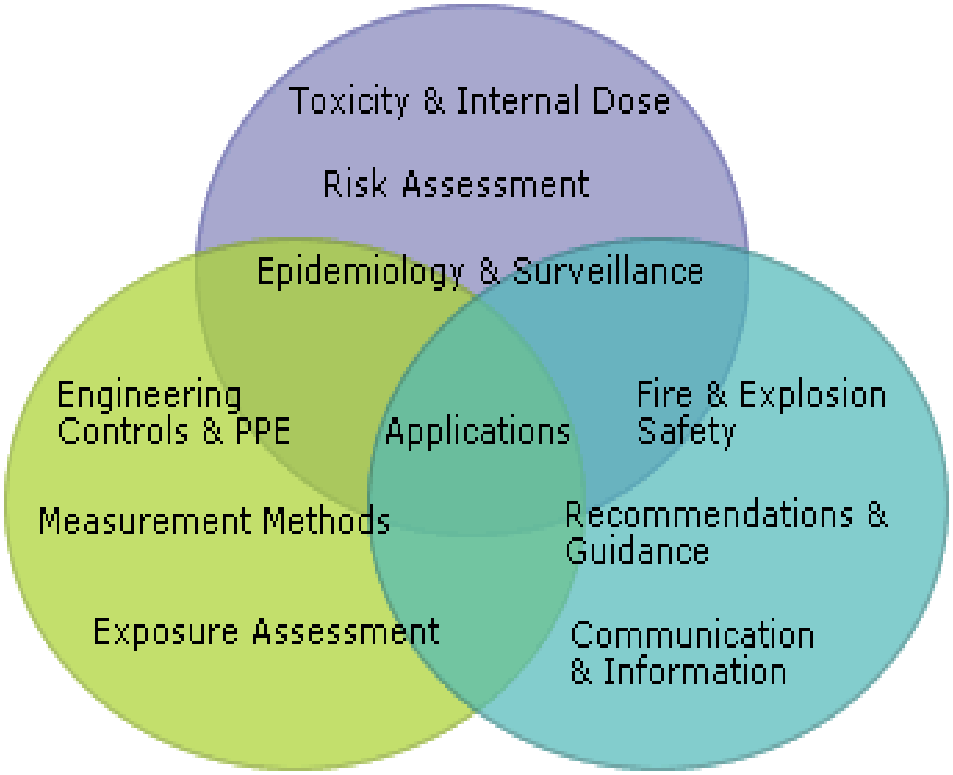
การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับความปลอดภัยนาโน

- หลายประเทศมีการทุ่มเทงบประมาณเพื่อการศึกษาวิจัยด้านนาโนเทคโนโลยี
  - » การพัฒนาและประยุกต์ใช้
  - » อันตรายต่อสุขภาพ
  - » นโยบาย/การจัดการ ฯลฯ

- ช่วง 10 ปีที่ผ่านมา NIOSH ได้เน้นประเด็นในด้านนาโนเทคโนโลยีกับความปลอดภัยในการทำงาน โดยให้ความสำคัญเป็นลำดับต้นๆ
- ในระดับสากล ยังมิได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานความปลอดภัยในการทำงานสำหรับการสัมผัสอนุภาคนาโน เป็นการเฉพาะ

การดำเนินงานด้านความปลอดภัยในการทำงาน

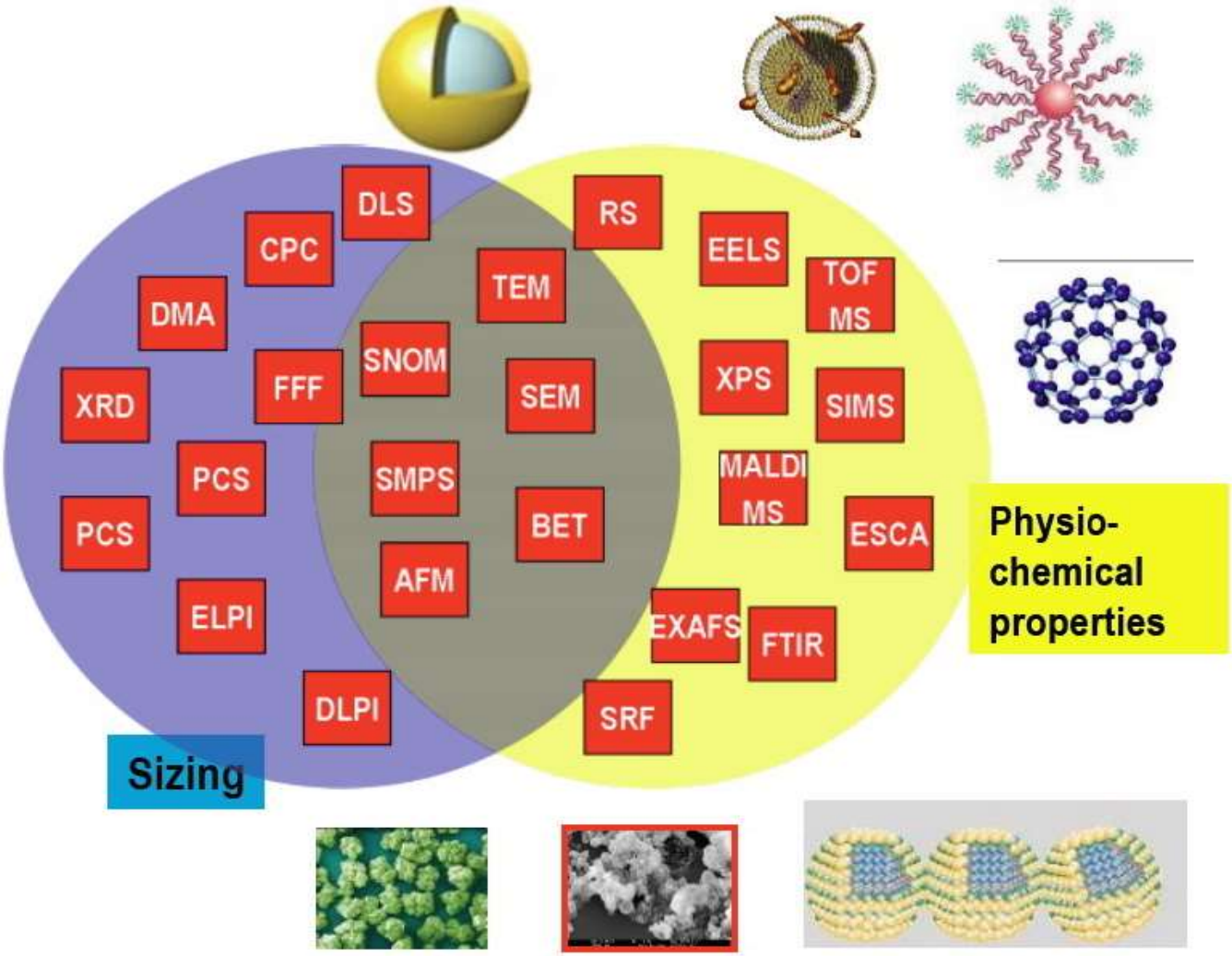
NIOSH ได้พัฒนาแนวทางการดำเนินงานด้านอาชีวอนามัยและความปลอดภัยเกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยี โดยแบ่งเป็น 10 หัวข้อสำคัญ



การตรวจวัดอนุภาคนาโนในสิ่งแวดล้อมการทำงาน

- การตรวจวัดแบบไม่จำเพาะ (Non-specific Measurement)
  - เป็นการวัดขนาด (Particle Size) จำนวนหรือการกระจายตัว และมวลรวม
- การตรวจวัดแบบจำเพาะ (Specific Measurement)
  - เป็นการวัดที่บอกถึงชนิดของอนุภาคนาโน (Characterization) ในตัวอย่างด้วย

เทคโนโลยีการตรวจวิเคราะห์ที่มีอยู่ในปัจจุบัน



เครื่องมือตรวจวิเคราะห์ที่มีการใช้แพร่หลาย

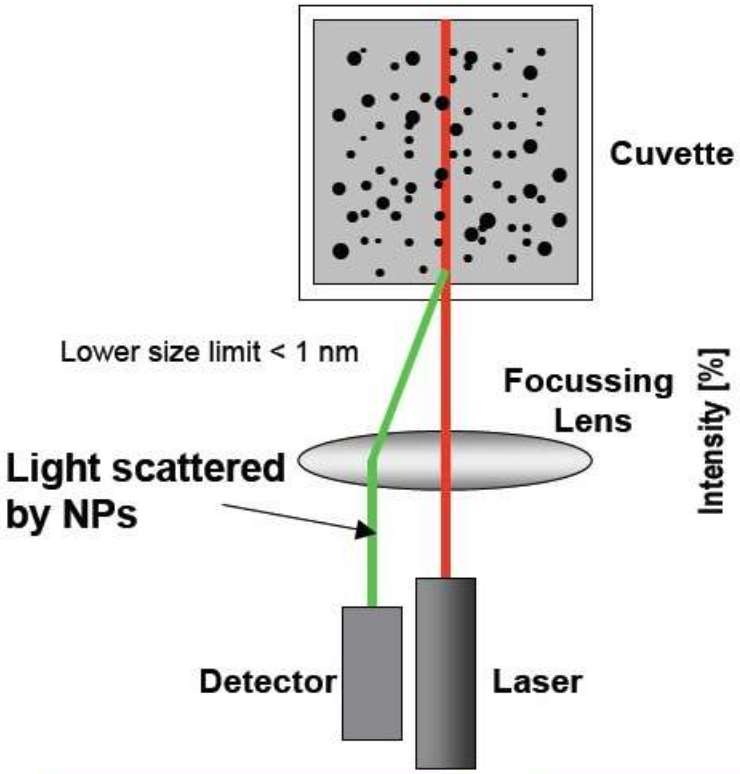
ปัจจุบันการประยุกต์ใช้เครื่องมือตรวจวัดอนุภาคนาโนที่กระจายตัวในอากาศ (Nanoaerosol) ที่แพร่หลายได้แก่

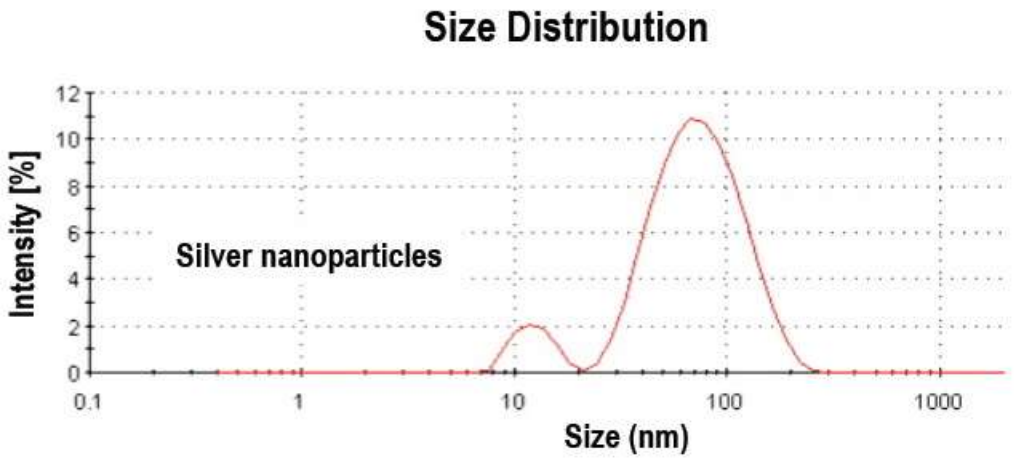
- Dynamic Light Scattering (DLS)
- Condensation Particle Counter (CPC)
- Differential Mobility Analyzer (DMA)
- Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)
- Aerosol Particle Mass Analyzer (APM)
- Electrostatic Deflection
- Low Pressure Cascade Impactor
- Nanoparticle Surface Area Monitor (NSAM)
- Aerosol Mass Spectrometry

Dynamic Light Scattering (DLS)

- ใช้ Quasielastic Laser Light Scattering เพื่อตรวจจับและสร้างกราฟการกระจายตัวของอนุภาคนาโนตามขนาด
- ส่วนใหญ่เป็นแบบใช้วัดอนุภาคนาโนที่ถูกดักจับผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลว
- ถ้าเป็นแบบที่ใช้วัดอนุภาคนาโนในอากาศได้โดยตรง จะมีข้อจำกัดเกี่ยวกับความไว (Sensitivity) ในการตรวจจับค่อนข้างต่ำ และมีขีดจำกัด (Limit of Detection) ~50 nm ทำให้ไม่ครอบคลุมอนุภาคนาโนทุกขนาด

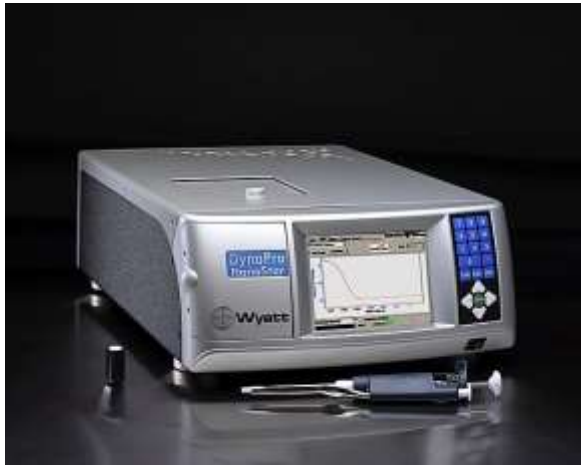
แผนภาพแสดงหลักการทำงานของ DLS





Particles move due to Brownian Motion → Measure Fluctuations in Intensity of Scattered Light → Apply algorithm to determine size distribution

เครื่องมือตรวจวัดกลุ่ม DLS ชนิดต่างๆ



เครื่องมือตรวจวัดอนุภาคนาโนผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำ

เครื่องมือตรวจวัดอนุภาคนาโนในอากาศโดยตรง

ข้อพิจารณาอื่นๆ ในการเลือกใช้ DLS

ข้อดี

- ตรวจวัดแบบอ่านค่าได้ทันที รวดเร็ว สามารถประมวลผล/เก็บข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์ต่อไปได้
- ตัวเครื่องมีขนาดไม่ใหญ่มาก สามารถใช้ในภาคสนามได้คล่องตัว
- มีราคาค่อนข้างถูกเมื่อเทียบกับเครื่องมือประเภทอื่น

ข้อเสีย

- ตรวจจับเฉพาะอนุภาคที่มีการกระเจิงของแสง เหมาะกับอนุภาคที่มิติโดยรวมเป็นทรงกลม (Spherical)
- อาจมีผลกระทบจากตัวกลางที่ใช้

Condensation Particle Counter (CPC)

- วัดจำนวน/ความเข้มข้นของอนุภาค (0-100,000 particle/cc.)
- ใช้หลักการทำให้ไอของของเหลว เช่น เอธานอล ควบแน่นลงบนอนุภาคนาโนที่เย็น ทำให้ได้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จนสามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิค DLS
- สามารถตรวจจับอนุภาคได้ถึงขนาดเล็กประมาณ 3 นาโนเมตร (โดยทำให้เป็นขนาด 10 นาโนเมตร)
- มีการพัฒนาให้เป็นแบบใช้น้ำ (Water-based CPC)
- เป็นเครื่องมือที่มีราคาค่อนข้างสูง

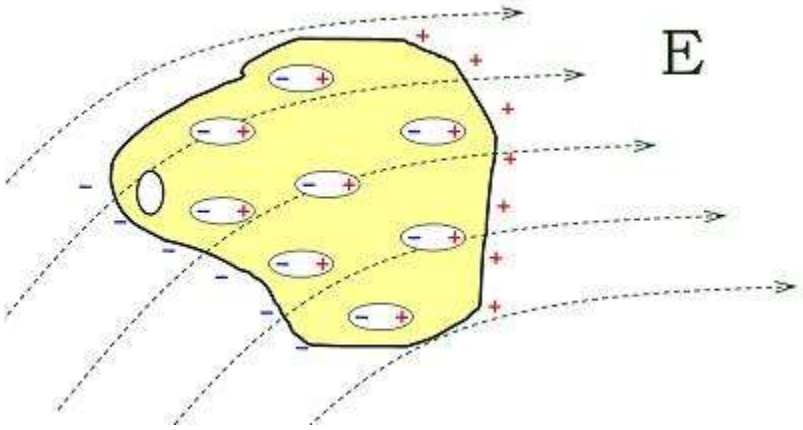
เครื่องมือตรวจวัดแบบ CPC ชนิดต่างๆ

Condensation Particle Counter (CPC)

Water-based Condensation Particle Counter (WCPC)

Electrostatic Deflection

- ใช้หลักการทำให้อนุภาคนาโนมีประจุไฟฟ้าเสียก่อน แล้วจึงใช้สนามไฟฟ้าแยกอนุภาคขนาดเล็กกับขนาดใหญ่ออกจากกัน
- มีความไวสูง และมี LOD เล็กกว่า 1 นาโนเมตร
- เป็นเครื่องมือที่มีราคาค่อนข้างสูง

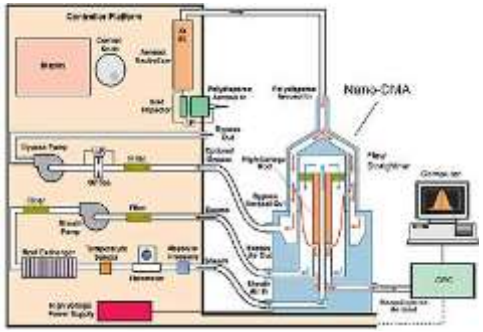


Differential Mobility Analyzer (DMA)

- ใช้รังสีแกมมาที่ปลดปล่อยจาก Am-241 ทำให้อนุภาคนาโนมีประจุไฟฟ้า แล้วจึงใช้สนามไฟฟ้าแยกอนุภาคตามขนาด คล้ายกับ Electrostatic Deflection แต่ทำขณะที่อากาศไหลผ่านท่อทรงกระบอกกลม โดยอนุภาคขนาดเล็กจะถูกคัดแยกออกมาทางแกนกระบอก

Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)

- ใช้การแยกขนาดของอนุภาคนาโนในอากาศด้วย DMA ก่อน จากนั้นนำมาผ่าน CPC เพื่อให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น แล้วจึงตรวจวัดด้วยวิธี DLS
- ประกอบด้วยส่วนต่างๆ คือ
  - Pre-conditioner ได้แก่ Impactor หรือ Cyclone
  - Bipolar Charger (Neutralizer) ปรับประจุอนุภาค
  - Electrostatic Classifier ได้แก่ DMA
  - Nanoparticle Detector ได้แก่ CPC



Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)

- มีการประยุกต์ใช้ในงานศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอนุภาคนาโนอย่างแพร่หลาย
- เครื่องมีราคาสูงมาก และต้องใช้โดยผู้เชี่ยวชาญ
- ถ้าเป็นเครื่องที่วัดแบบคร่าวๆ เรียกว่า Stepped Mobility Particle Sizer ซึ่งจะมีราคาถูกลงมา

Aerosol Particle Mass Analyzer (APM)

- เป็นวิธีที่ใช้สนามไฟฟ้าแยกอนุภาค โดยให้อากาศที่มีอนุภาคนาโนแขวนลอยหรือกระจายตัวอยู่ ผ่านเข้าไปในช่องแคบๆ ระหว่างทรงกระบอกลูกนอกกับทรงกระบอกลูกในที่ต่างกำลังหมุนร่วมแกนกัน โดยใช้หลักการว่าอนุภาคนาโนที่มีอัตราส่วนมวล/ประจุ (M/C ratio) ค่าใดค่าหนึ่งที่พอดีทำให้แรงลัพธ์บนอนุภาคนาโนนั้นเป็นศูนย์ จะวิ่งข้ามช่องแคบระหว่างทรงกระบอกลูกในกับลูกนอกได้ตลอดทาง ขณะที่อนุภาคอื่นที่มีค่า ratio ไม่ตรงกับที่ตั้งไว้ ก็จะพุ่งชนทรงกระบอกลูกใดลูกหนึ่ง ไม่สามารถผ่านเข้าไปได้

Low Pressure Cascade Impactor

- ใช้หลักว่าอนุภาคยิ่งมีขนาดใหญ่จะยิ่งมีมวลมาก จนลอยตัวไปตามการไหลของอากาศได้ยาก
- ตัวเครื่องจะมี Impactor เป็นแผ่นโลหะขวางทางเดินอากาศ ซึ่งดักให้อนุภาคขนาดใหญ่ที่มี M/C ratio มากพุ่งชน ส่วนอนุภาคขนาดเล็กที่รอดไปได้ ก็จะมี Impactor ชั้นถัดไป
- Nanoaerosol จะถูกเติมประจุไฟฟ้า ซึ่งเมื่อชน Impactor ก็จะถ่ายประจุไฟฟ้า เกิดเป็นสัญญาณไฟฟ้าส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อนับจำนวนอนุภาคที่ชนกับ Impactor ในแต่ละชั้น แล้วสร้างกราฟการกระจายตัว

Nanoparticle Surface Area Monitor (NSAM)

- เป็นวิธีการวัดเพื่อบ่งบอกปริมาณพื้นที่ผิว
- เริ่มด้วยการให้ประจุไฟฟ้าแก่อากาศที่มีอนุภาคนาโนอยู่ จากนั้นใช้ Electrometer วัดประจุที่อยู่บนอนุภาค โดยใช้หลักการว่ายิ่งวัดประจุบนอนุภาคได้มาก แสดงว่าอนุภาคยิ่งมีพื้นที่ผิวมาก
- ค่าความเที่ยงตรงแม่นยำ ประมาณ $\pm$ 20%
- มักใช้ในงานวิจัยประเมินผลกระทบจากการหายใจเข้าสู่ร่างกาย

Aerosol Mass Spectrometry

- เป็นวิธีที่ใช้แพร่หลายกับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 100 nm (ใหญ่กว่าขนาดนาโน) เช่น อนุภาคนาโนที่มีการเกาะตัว (Agglomerate) รวมกัน

เทคโนโลยีอื่นๆ

- โครงการ NanoBadge ของสหภาพยุโรป อยู่ในระหว่างการศึกษาพัฒนา Badge ขนาดเล็กใช้ติดเสื้อเพื่อบอกจำนวนสะสมของอนุภาคนาโนขนาดต่างๆ ที่ผู้ปฏิบัติงานในได้รับในระหว่างวัน
- การพัฒนาเครื่องมือสำหรับการวัดอนุภาคนาโนแบบจำเพาะ (ซึ่งปัจจุบันยังคงเป็นเครื่องต้นแบบแทบทั้งสิ้น)

การตรวจวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการ

- การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของอนุภาคนาโน
  - วิเคราะห์ขนาด การกระจายตัว (เช่น NanoSizer)
  - วิเคราะห์ตามคุณสมบัติทางเคมี (เช่น XRD)
- การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวของอนุภาคนาโน (AFM/STM/E-SEM)
- การวิเคราะห์/ทดสอบทางชีวภาพ
  - ทดสอบความเป็นพิษ การต้านเชื้อจุลชีพ (AATCC)
- การจัดเตรียมอนุภาคนาโนในรูปผงแป้งหรืออีมัลชั่น

เครื่องมือตรวจวิเคราะห์อนุภาคนาโน

Scanning Electron Microscope

Scanning Tunneling Microscope

Transmission Electron Microscope

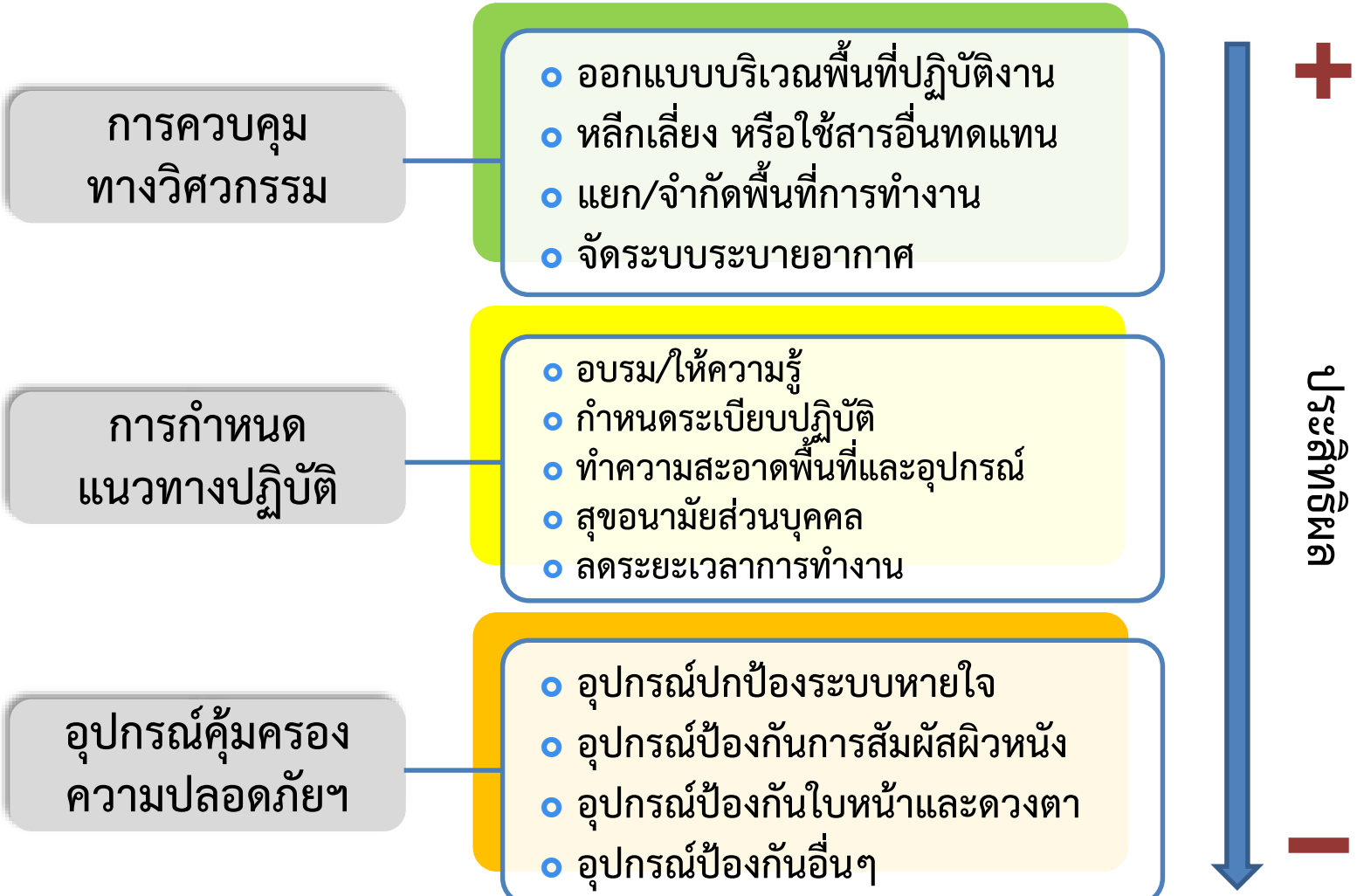
High Pressure Homogenizer

Atomic Force Microscope

Antibacterial test

Nanosizer

หลักการควบคุมป้องกันอันตราย



การควบคุมป้องกันทางด้านวิศวกรรม

- ออกแบบพื้นที่ปฏิบัติงาน
  - ทำผนังกั้นพื้นที่ทำงาน
  - จัดมาตรการอื่นๆ เพื่อลดการปนเปื้อน
- การระบายอากาศ ความชื้น
  - ไม่ระบายอากาศที่คาดว่ามีการปนเปื้อนอนุภาคนาโนออกสู่ภายนอกโดยไม่มีการควบคุม
  - ใช้การกรอง (HEPA Filter) หรือการดักจับด้วยของเหลว (Scrub)
  - เพิ่มความชื้นในบรรยากาศการทำงาน
  - ตรวจสอบประสิทธิภาพ บำรุงรักษาตามข้อกำหนด

การควบคุมป้องกันที่ตัวผู้ปฏิบัติงาน

- อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล
  - อุปกรณ์ปกป้องระบบหายใจ เช่น หน้ากากที่มีตัวกรอง P-100
  - อุปกรณ์ป้องกันการสัมผัสผิวหนัง เช่น ถุงมือไนโตร ชุดป้องกันลำตัว
  - อุปกรณ์ป้องกันดวงตา เช่น แว่นครอบตาที่ทนต่อสารเคมี
- ประเมินและปรับปรุงอุปกรณ์ฯ ที่ใช้งาน เช่น ทดสอบประสิทธิภาพในการใส่หน้ากาก (Respirator Fit Testing)
- หากจำเป็น ควรประเมินมาตรการควบคุมการสัมผัสสารเคมี (Control Banding Technique) และประเมินประสิทธิภาพของวัสดุทางเลือกอื่นๆ

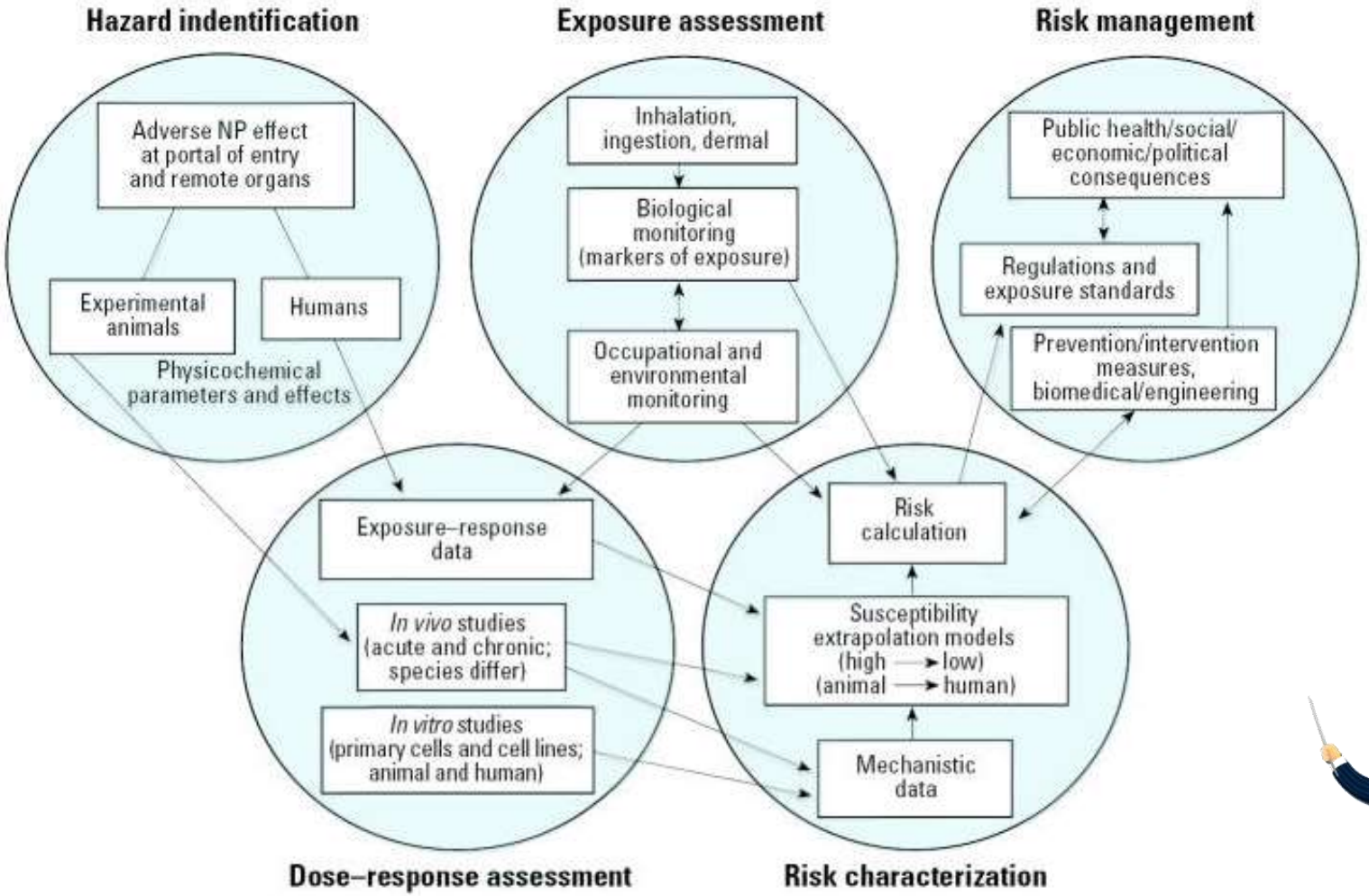
มาตรการด้านการจัดการอื่นๆ

- จัดทำข้อเสนอแนะ/แนวทางการปฏิบัติ เพื่อความปลอดภัยในการทำงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง
- จัดระบบข้อมูล/การสื่อสาร ที่สามารถเข้าถึงได้โดยง่ายและรวดเร็ว
- จัดฝึกอบรม/ให้ความรู้แก่ผู้ปฏิบัติงาน เกี่ยวกับความปลอดภัยและสุขอนามัยในการใช้วัสดุนาโน

มาตรการด้านการจัดการอื่นๆ

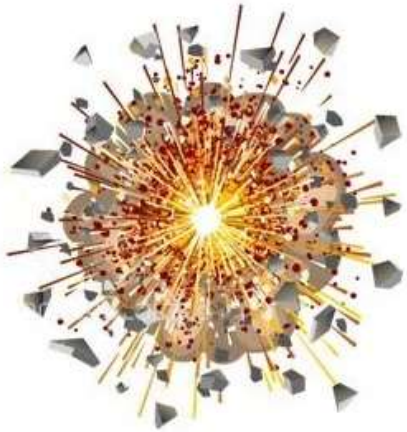
- จัดการเฝ้าระวังทางสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน ได้แก่ การตรวจสุขภาพตามความเสี่ยง และเก็บข้อมูล/รายงานผลการตรวจอย่างเป็นระบบ เพื่อการติดตามผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น
- จัดให้มีการประเมินความเสี่ยง (Risk Assessment) เพื่อใช้เป็นกรอบในการควบคุมป้องกันผลกระทบต่อสุขภาพ ตลอดจนการเกิดอุบัติเหตุจากระเบิดหรือไฟไหม้

กรอบการประเมินความเสี่ยงจากอนุภาคนาโน



การลดความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุ

- วัสดุนาโนที่อาจเกิดการระเบิด
  - โลหะออกไซด์
  - วัสดุนาโนคาร์บอน



- วัสดนาโนที่อาจติดไฟ/ไวไฟ
  - วัสดุนาโนที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ
  - วัสดุนาโนคาร์บอน

กฎหมายและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันยังไม่มีกฎหมายและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยด้านนาโนเทคโนโลยี ที่มีผลบังคับใช้ในประเทศไทย

- พรบ. วัตถุอันตราย 2525
  - ควรปรับปรุงแก้ไข โดยเพิ่มวัสดุนาโนเป็นหนึ่งในวัตถุอันตราย
- พรบ. ส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม 2535
  - ควรกำหนดมาตรฐานการปลดปล่อยมลพิษนาโน และบทลงโทษ
- พรบ. ความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมฯ 2554
  - ยังไม่มีข้อกำหนดเกี่ยวกับความปลอดภัยในการทำงานในสถานประกอบการที่มีการใช้วัสดุนาโน

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนาโนเทคโนโลยี

ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ และผู้ทรงคุณวุฒิจากหน่วยงานต่างๆ ได้ร่วมกันจัดทำ“มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนาโนเทคโนโลยี” ขึ้น จำนวน 7 เรื่อง เสนอสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) ซึ่งปัจจุบันได้มีการประกาศใช้แล้ว ดังนี้

- เล่ม 1 แนวทางการระบุข้อกำหนดวัสดุนาโนจากการผลิต
- เล่ม 2 แนวทางการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะสำหรับวัสดุนาโนจากการผลิต
- เล่ม 3 แนวทางการจัดกระทำ และกำจัดวัสดุนาโนอย่างปลอดภัย

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนาโนเทคโนโลยี (ต่อ)

- เล่ม 4 แนวทางการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางฟิสิกส์ – เคมี สำหรับการประเมินพิษวิทยาของวัสดุนาโนจากการผลิต
- เล่ม 5 แนวทางการประเมินความเสี่ยงของวัสดุนาโน
- เล่ม 6 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการกระเจิงแสงแบบพลวัต
- เล่ม 7 วิธีปฏิบัติเกี่ยวกับสุขภาพและความปลอดภัยสำหรับผู้มีอาชีพที่เกี่ยวข้องกับนาโนเทคโนโลยี

แผนยุทธศาสตร์ความปลอดภัยฯ นาโนเทคโนโลยี

ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ และภาคีหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้ร่วมกันจัดทำ **“แผนยุทธศาสตร์ด้านความปลอดภัยและจริยธรรมนาโนเทคโนโลยี”** ขึ้น เพื่อเป็นกรอบแนวทางการดำเนินงานให้เป็นไปในทิศทางเดียวกันและสอดคล้องกับสภาพการณ์ปัจจุบัน

- แผนยุทธศาสตร์ด้านความปลอดภัยและจริยธรรมนาโนเทคโนโลยี (พ.ศ. 2555 – 2559)
- แผนยุทธศาสตร์ด้านความปลอดภัยและจริยธรรมนาโนเทคโนโลยี **ฉบับที่ 2** (พ.ศ. 2560 – 2564)

แผนยุทธศาสตร์ความปลอดภัยฯ นาโนเทคโนโลยี

- องค์ประกอบของการดำเนินงาน:
  - **การวิจัยและพัฒนา** เพื่อสร้างและจัดการองค์ความรู้ทางด้านความปลอดภัยฯ ในการใช้ประโยชน์อย่างมั่นคงและยั่งยืน
  - **การผลิต** มุ่งเน้นให้ทั้งกระบวนการผลิต รวมทั้งผู้บริโภคได้ใช้ผลิตภัณฑ์นาโนเทคโนโลยีที่มีความปลอดภัย
  - **การประยุกต์ใช้** โดยส่งเสริมให้ใช้ประโยชน์จากนาโนเทคโนโลยีและ/หรือวัสดุนาโน ได้อย่างปลอดภัย และผู้ที่เกี่ยวข้องมีความรู้ความเข้าใจที่ถูกต้อง

โครงการด้านความปลอดภัยนาโนฯ

- การดำเนินงานที่ผ่านมา
  - ร่วมกับศูนย์นาโนเทคโนโลยี สำรวจสถานประกอบกิจการเพื่อประเมินการสัมผัสอนุภาคนาโนในผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้อง โดยใช้เครื่องมือ/อุปกรณ์ตรวจวัด (Area/Personal Sampling)

คำถาม / ข้อสงสัย ?

- แหล่งศึกษาข้อมูลเพิ่มเติม:

  ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC)

  อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี

  Website: www.nanotec.or.th