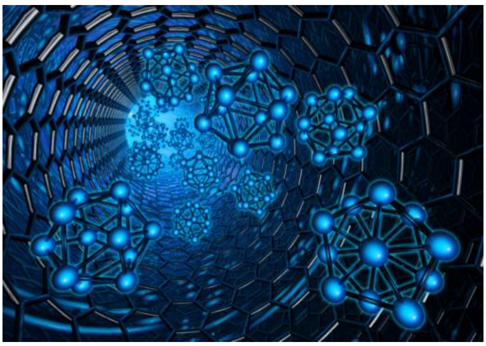
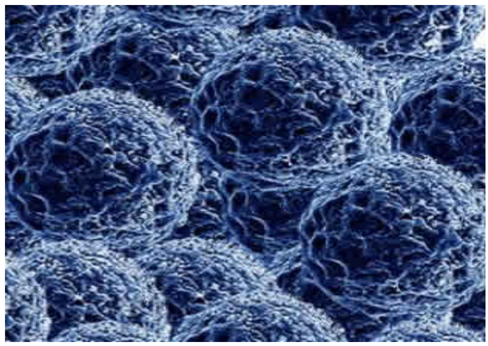
กรมโรงงานอุตสาหกรรม
DEPARTMENT OF INDUSTRIAL WORKS

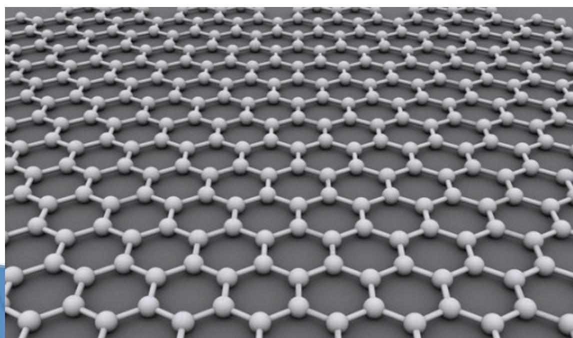
แนวปฏิบัติเบื้องต้นด้านความปลอดภัยนาโน

สำหรับภาคอุตสาหกรรม

Nanosafety Guideline for Industries







กรมโรงงานอุตสาหกรรม

Department of Industrial Works

แนวปฏิบัติเบื้องต้นด้านความปลอดภัยนาโนสำหรับภาคอุตสาหกรรม

NanoSafety Guideline for Industries

กรมโรงงานอุตสาหกรรม

Department of Industrial Works

มิถุนายน 2555

June 2012

แนวปฏิบัติเบื้องต้นด้านความปลอดภัยนาโนสำหรับภาคอุตสาหกรรม

Nanosafety Guideline for Industries

ภายใต้โครงการถ่ายทอดเทคโนโลยีด้านความปลอดภัยแก่สถานประกอบการ:
โครงการจัดทำแนวปฏิบัติเบื้องต้นด้านความปลอดภัยนาโนสำหรับภาคอุตสาหกรรม

ISBN: 978-616-551-494-1

จัดทำโดย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

พิมพ์ครั้งที่ 1

มิถุนายน 2555 จำนวนพิมพ์ 100 เล่ม

พิมพ์ที่

โชกุน ก็อปปี้
330/34 หมู่ 4 แขวงสายไหม เขตสายไหม กรุงเทพฯ 10220

คำนำ

ด้วยประเทศไทย เป็นประเทศหนึ่งที่มีการผลิตวัสดุนาโน และมีการใช้นาโนเทคโนโลยี ซึ่งเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีการใช้แพร่หลายทั่วโลก ทำให้นานาชาติเริ่มให้ความสนใจเกี่ยวกับความปลอดภัยและจริยธรรมของการนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้ ด้วยมีความกังวลว่าอาจมีผลกระทบทางลบต่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน ผู้บริโภค และคุณภาพของสิ่งแวดล้อมจากการใช้นาโนเทคโนโลยี กรมโรงงานอุตสาหกรรมจึงได้ดำเนินโครงการถ่ายทอดเทคโนโลยีด้านความปลอดภัยแก่สถานประกอบการ: โครงการจัดทำแนวปฏิบัติเบื้องต้นด้านความปลอดภัยนาโนสำหรับภาคอุตสาหกรรม (Nanosafety Guideline for Industries) เพื่อศึกษาสถานภาพและแนวโน้มการใช้นาโนเทคโนโลยีหรือวัสดุนาโนในแต่ละประเภทอุตสาหกรรม รวมทั้งสำรวจและศึกษาในเบื้องต้นเกี่ยวกับกระบวนการผลิต และมาตรการความปลอดภัย ของโรงงานในประเทศที่มีการใช้วัสดุนาโนหรือนาโนเทคโนโลยี ผลสำเร็จจากโครงการดังกล่าว ทำให้ได้**แนวปฏิบัติเบื้องต้นด้านความปลอดภัยนาโนสำหรับภาคอุตสาหกรรม** เพื่อเป็นแนวปฏิบัติให้แก่ผู้ประกอบการ และผู้ปฏิบัติงานในโรงงาน ให้เกิดความปลอดภัยในการปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนาโนหรือนาโนเทคโนโลยี รวมทั้งเป็นการเตรียมความพร้อมสำหรับการขยายตัวของอุตสาหกรรมนาโนในประเทศไทย

ในโอกาสนี้ กรมโรงงานอุตสาหกรรมขอขอบคุณผู้ประกอบการอุตสาหกรรม และผู้เชี่ยวชาญ ในการให้ข้อมูล และข้อคิดเห็นต่าง ๆ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า **แนวปฏิบัติเบื้องต้นด้านความปลอดภัยนาโนสำหรับภาคอุตสาหกรรม** จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ประกอบการอุตสาหกรรม ผู้ปฏิบัติงานในโรงงานอุตสาหกรรมและผู้เกี่ยวข้องเป็นอย่างดี

อนึ่ง เนื่องจากองค์ความรู้ด้านความปลอดภัยนาโน มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาตามหลักฐานใหม่ทางวิทยาศาสตร์ ส่วนนิยามและมาตรฐานต่าง ๆ ก็มีการพัฒนาอยู่ตลอดเวลาตามความตกลงระหว่างประเทศ และตามข้อกำหนดของหน่วยงานด้านความปลอดภัย ดังนั้นผู้นำแนวปฏิบัติฉบับนี้ไปใช้ประโยชน์ ควรพิจารณาให้เหมาะสมในการนำไปใช้งานด้วย

สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย
กรมโรงงานอุตสาหกรรม

สารบัญ

สารบัญรูป

สารบัญตาราง

ตัวย่อ

คพ. กรมควบคุมมลพิษ
วช. สภาวิจัยแห่งชาติ, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
มกอช. สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ
สกว. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
สช. สำนักงานคณะกรรมการสุขภาพแห่งชาติ
สมอ. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
สวทช. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
อย. สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา
AARA Asian Aerosol Research Assembly
ACFS National Bureau of Agriculture Commodity and Food Standards
สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ
ACGIH American Conference of Governmental Industrial Hygienists
AFTA ASEAN Free Trade Area, ASEAN Free Trade Agreement
ความตกลงเขตการค้าเสรีอาเซียน
AIST National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (Japan)
APEC Asia-Pacific Economic Cooperation
ความร่วมมือทางเศรษฐกิจเอเซีย-แปซิฟิก
APM aerosol particle mass analyzer
APR air purifying respirator
ASEAN Association of Southeast Asian Nations
อาเซียน
ATSDR Agency for Toxic Substance and Disease Registry
APF assigned protection factor
BAuA German Federal Institute for Occupational Safety and Health
BIAC Business and Industry Advisory Committee
คณะกรรมการที่ปรึกษาของ OECD จากภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม
BPP beneficiary pay principle
BSI British Standard Institute
สถาบันมาตรฐานแห่งสหราชอาณาจักร
CAART Chinese Association for Aerosol Research (Taiwan)
CBEN Center for Biological and Environmental Nanotechnology (USA)
cefic European Chemical Industry Council
CEN European Committee for Standardization
CENELEC European Committee for Electrotechnical Standardization
CENR Committee on Environment and Natural Resources (USA)
CHNS Committee on Homeland and National Security (USA)
CMAR Carcinogenic, mutagenic, asthmagenic or a reproductive toxin
CMD count median diameter
CNS Center for Nanotechnology in Society (USA)
CNT carbon nanotube
COMEST Commission on the Ethics of Scientific Knowledge and Technology (UNESCO)
คณะกรรมาธิการโลกว่าด้วยจริยธรรมในความรู้ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
COS Committee on Science (USA)
COT Committee on Technology (USA)
CPC Condensation Particle Counter
CSIRO Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (Australia)
CVD Chemical Vapor Deposition
DEFRA Department for Environment Food and Rural Affairs (UK)
กระทรวงสิ่งแวดล้อม อาหาร และกิจการชนบท

DERA	Defence Evaluation and Research Agency (USA)
DLS	dynamic light scattering
DMA	differential mobility analyzer
DOE	Department of Energy (US)
DOP	dioctyl phthalate
DRAM	Dynamic RAM
EC	European Commission
EDF	Environmental Defense Fund
ELPI	electrical low pressure impactor
EPA	Environmental Protection Agency (USA)
ES&H	environmental safety and health
ETC	Et Cetera (NGO ระหว่างประเทศเดิมชื่อ RAFI)
ETP	European Technology Platform
ETPIS	European Technology Platform on Industrial Safety
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EU	European Union
EUPHORE	European Photoreactor
FAO	Food and Agriculture Organisation องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ
FFP3	Filtering Face Piece 3
FOE	Friends of the Earth
FOEI	Friends of the Earth International
FOI	Swedish Defence Research Agency
FP	Framework Programme
GATT	General Agreement on Tariff and Trade ความตกลงทั่วไปว่าด้วยภาษีศุลกากรและการค้า
GHS	Globally Harmonized System of Classification and Labeling of Chemicals ระบบการจำแนกและการติดฉลากสารเคมีที่เป็นระบบเดียวกันทั่วโลก
GMO	genetically modified organism
GPA	Global Plan of Action (แผนปฏิบัติการของ SAICM)
HEPA	high-efficiency particulate air
IARC	International Agency for Research on Cancer, World Health Organization สำนักงานวิจัยมะเร็งระหว่างประเทศ องค์การอนามัยโลก
ICCM	International Conference on Chemicals Management การประชุมระหว่างประเทศว่าด้วยการจัดการสารเคมี
ICON	International Council on Nanotechnology (USA)
IFCS	Intergovernmental Forum on Chemical Safety เวทีความร่วมมือระหว่างรัฐบาลว่าด้วยความปลอดภัยด้านสารเคมี
ILO	International Labour Organisation องค์การแรงงานระหว่างประเทศ
IOMC	Inter-Organization Program for the Sound Management of Chemicals โครงการระหว่างองค์กรเพื่อการจัดการสารเคมีอย่างมีเหตุผล
IPCS	International Programme on Chemical Safety
IRGC	International Risk Governance Council
ISN	Institute of Soldier Nanotechnologies (MIT)
ISO	International Organization for Standardization องค์การระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐาน
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry สหภาพเคมีบริสุทธิ์และเคมีประยุกต์ระหว่างประเทศ
JNIOSH	National Institution of Occupational Safety and Health, Japan
JWG	Joint Working Group
LED	light emitting diode
LIBS	light-induced break-down spectroscopy
MA	mechanical alloying
MDGs	Millennium Development Goals
METI	Ministry of Economy, Trade and Industry (Japan)
MEXT	Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (Japan)
MHLW	Ministry of Health, Labor and Welfare (Japan)
MIT	Massachusetts Institute of Technology

MMAD	mass median aerodynamic diameter
MMD	mass mean diameter
MN	manufactured nanomaterials
μm	micrometer ไมโครเมตร, ไมครอน (1 ไมโครเมตร เท่ากับ 1 ในล้านเมตร เท่ากับ 10^{-6} เมตร)
MPPS	most penetrating particle size
MRI	Magnetic Resonance Imaging การสร้างภาพด้วยเรโซแนนซ์แม่เหล็ก
MSDS	material safety data sheet เอกสารข้อมูลความปลอดภัยสารเคมี
NaCl	sodium chloride
NAFTA	North American Free Trade Area, North American Free Trade Agreement
NANOTEC	National Center for Nanotechnology ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ
NBIO	Nano-Bio Interface Center (USA)
NCLT	Nanotechnology Center for Learning and Teaching (USA)
NEDO	New Energy and Industrial Technology Development Organization (Japan) องค์การพัฒนาพลังงานใหม่และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
NEM	nano electro-mechanical
NES	National Institute for Environmental Studies (Japan)
NGO	non-government organization องค์กรที่ไม่ใช่ของรัฐ, องค์กรสาธารณประโยชน์ องค์กรพัฒนาเอกชน (private development organization, PDO) องค์กรอาสาสมัครเอกชน (private voluntary organization, PVO)
NHC	National Health Commission (Thailand)
NHS	National Institute of Health Science (Japan)
NIEHS	National Institute of Environmental Health Sciences (USA)
NIES	National Institute for Environmental Studies (Japan)
NIHS	National Institute of Health Science (Japan)
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health (USA) สถาบันอาชีวอนามัยและความปลอดภัยแห่งสหรัฐอเมริกา
NISE	Network for Nanoscale Informal Science Education (USA)
NM	nanomaterial
nm	nanometer นาโนเมตร (1 นาโนเมตรเท่ากับ 1 ในพันล้านของ 1 เมตร หรือ 10^{-9} เมตร)
NMS	National Institute of Materials Science (Japan)
NNCO	National Nanotechnology Coordination Office (USA)
NNI	National Nanotechnology Initiatives (USA)
NP	New Proposal (ISO)
NRAM	nano Read-Only Memory
NSEC	Nanoscale Science and Engineering Center (USA)
NSET	Nanoscience, Engineering and Technology (USA)
NSF	National Science Foundation (USA)
NSTC	National Science and Technology Council (USA)
NSTDA	National Science and Technology Development Agency สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)
NTB	non tariff barrier อุปสรรคทางการค้าที่มิใช่ภาษี
NTM	non tariff measure มาตรการกีดกันที่มิใช่ภาษี
NZVI	nano zero-valence iron
ODS	ozone depleting substances
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development องค์การเพื่อความร่วมมือทางเศรษฐกิจและการพัฒนา
OEEC	Organisation for European Economic Co-operation
OEL	Occupational Exposure Limit
OLED	organic light emitting diode

OSHA	Occupational Safety and Health Administration องค์การบริหารความปลอดภัยและอาชีวอนามัย
PAPR	powered air purifying respirator
PCD	Pollution Control Department (Thailand)
PEL	Permissible Exposure Limit (กำหนดโดย OSHA)
POP	persistent organic pollutant
PPE	personal protective equipment
PPP	polluters pay principle
PRF	Proof of a new International Standard (ISO)
QC	quality control การควบคุมคุณภาพ
RAFI	Rural Advancement Foundation International (ปัจจุบันคือ ETC)
RAM	Random Access Memory
REL	Recommended Exposure Limit (กำหนดโดย NIOSH)
SAICM	Strategic Approach to International Chemical Management ยุทธศาสตร์การดำเนินงานระหว่างประเทศว่าด้วยการจัดการสารเคมี
SDS	safety data sheet
SET	single electron transistor
SG	Steering Group of OECD-WPMN
SG1	Steering Group 1: Development of an OECD Nanotechnology Research Database
SG2	Steering Group 2: Human Health and Environment Research Strategies on Manufactured Nanomaterials
SG3	Steering Group 3: Safety Testing of a Representative Set of Manufactured Nanomaterials
SG4	Steering Group 4: Manufactured Nanomaterials Test Guidelines
SG5	Steering Group 5: Co-operation on Voluntary Schemes/Prevention
SG6	Steering Group 6: Co-operation on Risk Assessment and Exposure Measurement
SG7	Steering Group 7: The Role of Alternative Methods in Nano Toxicology
SG8	Steering Group 8: Exposure Measurement and Mitigation
SG9	Steering Group 9: Potential Environmental Benefits of Nanotechnology
SMPS	scanning mobility particle sizer
STREP	Specific Targeted Research or Innovation Project
TC	Technical Committee (ISO)
TIL	total inward leakage
TIS	Thai Industrial Standard
TISI	Thai Industrial Standards Institute
TLV	Threshold Limit Value (กำหนดโดย ACGIH)
TR	Technical Report (ISO)
TS	Technical Standard (ISO)
UNDP	United Nations Development Programme โครงการพัฒนาแห่งสหประชาชาติ
UNEP	United Nations Environment Programme โครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization องค์การการศึกษา วิทยาศาสตร์ และวัฒนธรรมแห่งสหประชาชาติ
UNIDO	United Nations Industrial Development Organization องค์การเพื่อการพัฒนาอุตสาหกรรมแห่งสหประชาชาติ
UNITAR	United Nations Institute for Training and Research สถาบันสหประชาชาติเพื่อการฝึกอบรมและการวิจัย
US-EPA	Environmental Protection Agency (USA)
USPTO	US Patent and Trademark Office สำนักงานสิทธิบัตรและเครื่องหมายการค้าสหรัฐ
VCI	German Chemical Industry Association
WEL	workplace exposure limit
WHO	World Health Organization องค์การอนามัยโลก
WPMN	Working Parties on Manufactured Nanomaterials (OECD)

	คณะทำงานวัสดุนาโนขององค์การเพื่อความร่วมมือทางเศรษฐกิจและการพัฒนา
WPN	Working Parties on Nanotechnologies (OECD) คณะทำงานนาโนเทคโนโลยีขององค์การเพื่อความร่วมมือทางเศรษฐกิจและการพัฒนา
WSSD	World Summit on Sustainable Development
WTO	World Trade Organization องค์การการค้าโลก
WWICS	Woodrow Wilson International Center for Scholars

1. ความเป็นมาของนาโนเทคโนโลยี วัสดุนาโน และผลิตภัณฑ์นาโน

1.1. ความสำคัญของนาโนเทคโนโลยีต่อเศรษฐกิจ

นาโนเทคโนโลยีเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีความสำคัญทั้งในปัจจุบันและอนาคต บริษัทที่ปรึกษา Lux Research เคยคาดการณ์ไว้ว่า ภายในเวลา 10 ปีนับตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 เป็นต้นไป ตัวเลขมูลค่ารวมของสินค้านาโนกว่า 3 หมื่นล้านเหรียญสหรัฐจะเพิ่มขึ้นหลายสิบเท่า เป็นกว่าสองล้านล้านเหรียญสหรัฐในปี พ.ศ. 2558[1] สำหรับมูลค่าการลงทุนวิจัยและพัฒนาด้านนาโนเทคโนโลยีในภาครัฐ ภาคเอกชน และกองทุนเสี่ยง (venture capitals เป็นแหล่งเงินทุนของบริษัทเกิดใหม่ก่อนที่จะเข้าตลาดหลักทรัพย์ในต่างประเทศ) มีมูลค่ารวมประมาณ 9.6 พันล้านเหรียญสหรัฐในปี พ.ศ. 2548 โดยแบ่งออกเป็นรายจ่ายการวิจัยและพัฒนาในภาครัฐ และภาคเอกชน เท่ากับ 4.6 และ 4.5 พันล้านเหรียญสหรัฐตามลำดับ ดังตารางที่ 1.1 สำหรับการลงทุนของกองทุนเสี่ยงมีมูลค่า 0.5 พันล้านเหรียญสหรัฐ ต่อมาภาครัฐจะใช้จ่ายในด้านการวิจัยเกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยีน้อยลง ส่วนภาคเอกชนจะใช้จ่ายด้านการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ด้านนาโนเทคโนโลยีมากขึ้น ซึ่งคาดคะเนว่าในอนาคตรายจ่ายเหล่านี้จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยภาคเอกชนมีอัตราการเติบโตสูงกว่าภาครัฐมาก

ผลของการลงทุนเหล่านี้ ก็คือเทคโนโลยีและทรัพย์สินทางปัญญาต่าง ๆ ดังจะเห็นได้จากตัวเลขตั้งแต่ปี พ.ศ. 2519 ถึง 2553 สิทธิบัตรสหรัฐที่มีคำว่า “นาโน” (nano) อยู่ด้วย มีรวมทั้งสิ้นถึง 23,077 ฉบับ (ไม่นับสิทธิบัตรเกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยีและวัสดุนาโนอีกเป็นจำนวนมากที่อาจจะไม่มีคำว่า “นาโน” อยู่ในเอกสารสิทธิบัตรด้วย) อีกตัวอย่างหนึ่งของทรัพย์สินทางปัญญาคือเครื่องหมายการค้า ในปี พ.ศ. 2553 เครื่องหมายการค้าสหรัฐที่มีคำว่า “nano” อยู่ด้วย มีถึง 1,697 รายการ ในขณะที่มีเพียง 1,408 รายการในปี พ.ศ. 2548

ภูมิภาค	รายจ่ายภาครัฐ (พันล้านเหรียญสหรัฐ)	รายจ่ายภาคเอกชน (พันล้านเหรียญสหรัฐ)
อเมริกาเหนือ (ตัวเลขมาจากสหรัฐอเมริกาแทบทั้งหมด)	1.7	1.9
เอเชีย (ตัวเลขส่วนใหญ่มาจากญี่ปุ่น)	1.7	1.7
ยุโรปตะวันตก (ตัวเลขส่วนใหญ่มาจากเยอรมนี)	1.1	0.85
ภูมิภาคอื่น ๆ	0.1	0.07
รวม	4.6	4.5

ตารางที่ 1.1: รายจ่ายเกี่ยวกับการวิจัยและพัฒนานาโนเทคโนโลยีในภาครัฐและภาคเอกชน ในปี พ.ศ. 2548

ที่มา: Holman, M. W. et al. 2006. *The Nanotech Report, 4th ed.* Lux Research, Inc. ดูสรุปได้จาก http://www.luxresearchinc.com/pdf/TNR4_TOC.pdf

สำหรับตัวเลขการลงทุนด้านนาโนเทคโนโลยีของกองทุนเสี่ยงในปี พ.ศ. 2548 ดังกล่าวแล้วนั้น บริษัทที่ปรึกษา Lux Research ได้ตั้งข้อสังเกตว่า ในขณะที่จำนวนโครงการที่นำนาโนเทคโนโลยีไปใช้ในอุตสาหกรรมลดลง (ลดลงร้อยละ 17 จากปี พ.ศ. 2547 เหลือ 45 โครงการ) แต่ปริมาณของเงินลงทุนในอุตสาหกรรมดังกล่าวต่อโครงการกลับเพิ่มขึ้น (ในปี พ.ศ. 2548 มีค่าเฉลี่ยถึง 10.9 ล้านเหรียญสหรัฐต่อโครงการ) แสดงว่าโครงการมีจำนวนลดลงแต่มีขนาดใหญ่ขึ้น ในบรรดาอุตสาหกรรมนาโนด้วยกัน อุตสาหกรรมที่กองทุนเสี่ยงลงทุนมากที่สุดคืออิเล็กทรอนิคส์ ตามด้วยเทคโนโลยีชีวภาพ เทคโนโลยีวัสดุ และเครื่องมือนาโน (nanotools)[2]

ในประเทศไทยมีการคาดคะเนไว้ว่าในปี พ.ศ. 2556 มูลค่าของผลิตภัณฑ์จากนาโนเทคโนโลยีน่าจะอยู่ที่ระดับร้อยละ 1 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ หรือประมาณ 120,000 ล้านบาท[3] ในขณะที่เมื่อเทียบกับตัวเลขของต่างประเทศแล้ว พบว่าผลิตภัณฑ์นาโนเทคโนโลยีในสิบปีข้างหน้าจะมีมูลค่ารวมมากกว่า 40 ล้านล้านบาท[4] โดยเฉพาะอย่างยิ่งภาคอุตสาหกรรมไทยมีโอกาสที่จะได้ส่วนแบ่งในหมวดเครื่องสำอางและหมวดสารเคลือบผิว เช่น เคลือบผ้ากันน้ำและฝุ่นละออง และสีทาอาคารทำความสะอาดตัวเอง

1.2. ความสำคัญของนาโนเทคโนโลยีต่อสังคม

นาโนเทคโนโลยี มีศักยภาพสูงมาก ในการสร้างสินค้าและบริการแปลกใหม่ที่ไม่เคยมีใช้มาก่อนรวมทั้งงานบริการสังคมในด้านต่าง ๆ ขณะเดียวกันก็มีศักยภาพในความเป็นอันตรายต่อมนุษย์

ในยุคปัจจุบันมีความพยายามจากวงการวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม ที่จะนำนาโนเทคโนโลยีไปใช้ช่วยแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อม จนเกิดเป็นความพยายามระดับนานาชาติโดยที่คณะทำงานนาโนเทคโนโลยีขององค์การเพื่อความร่วมมือทางเศรษฐกิจและการพัฒนา (OECD Working Parties on Nanotechnologies หรือ OECD-WPN) ที่จะทำให้วัสดุนาโนกลายเป็นสิ่งที่ช่วยแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยก่อปัญหาสิ่งแวดล้อมเสียเองให้น้อยที่สุด

ในอนาคตอีกไม่กี่ทศวรรษ คาดกันว่าเป็นยุคของ Nanobiologicals ซึ่งเป็นการเชื่อมต่อระหว่างนาโนเทคโนโลยีกับเซลล์ของสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งเซลล์กล้ามเนื้อและเซลล์ประสาท ทำให้มนุษย์สามารถคิดและใช้ทักษะของการทำงานร่วมกันระหว่างสมองและกล้ามเนื้ออย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากกว่าปกติ สิ่งที่จะเกิดขึ้นตามมาก็คือจะมีกลุ่มคนที่ไม่เคยหรือไม่ยอมปลูกถ่ายวัสดุนาโน กับกลุ่มคนที่ยอมรับวัสดุนาโนเป็นส่วนหนึ่งของร่างกาย

นาโนเทคโนโลยีเปิดโอกาสให้เกิดเทคโนโลยีต่าง ๆ ตามมาอย่างมากมาย และทำให้สังคมมีผลิตภัณฑ์แปลกใหม่ที่ไม่เคยมีใช้มาก่อน ดังนั้น นาโนเทคโนโลยีจึงถือว่าเป็น เทคโนโลยีก่อกำเนิด (enabling technology) ในขณะเดียวกันก็เป็นเทคโนโลยีล้มล้าง (disruptive technology) โดยเทคโนโลยีใหม่ ๆ เหล่านี้อาจทำให้เทคโนโลยีอื่น ๆ ที่มีใช้กันอยู่กลายเป็นเทคโนโลยีล้าสมัย

อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันและในอนาคตอันใกล้ คือภายในปี พ.ศ. 2563 ความห่วงใยที่จัดได้ว่าเป็นประเด็นทางสังคมที่เกี่ยวข้องกับนาโนเทคโนโลยี ได้แก่ ความปลอดภัยของนาโนเทคโนโลยีและวัสดุนาโนต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม ซึ่งในส่วนของผลกระทบต่อสุขภาพนั้น ผู้ได้รับผลกระทบโดยตรง ได้แก่ ผู้บริโภคสินค้านาโน และผู้ปฏิบัติงานในโรงงานอุตสาหกรรมนาโน

1.3. ความตื่นตัวด้านความปลอดภัยนาโน

ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 เป็นต้นมา ความปลอดภัยของนาโนเทคโนโลยีเป็นสิ่งที่นานาชาติเริ่มให้ความสนใจต่อผลกระทบทางลบที่นาโนเทคโนโลยีอาจจะมีต่อสังคม ผ่านทางสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน ผู้บริโภค คุณภาพของสิ่งแวดล้อม สิทธิมนุษยชน และความเหลื่อมล้ำในสังคม เป็นต้น ด้วยเหตุนี้เอง ประเทศไทย โดย “คณะกรรมการนโยบายนาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ” จึงมีมติเห็นชอบให้แต่งตั้ง “คณะอนุกรรมการความปลอดภัยและจริยธรรมด้านนาโนเทคโนโลยี” ขึ้น ซึ่งคณะอนุกรรมการดังกล่าวได้มีแนวคิดให้มีการศึกษาเกี่ยวกับความปลอดภัยและจริยธรรมด้านนาโนเทคโนโลยี โดยมีเป้าหมายเพื่อวางแนวทางความปลอดภัยในระดับการวิจัยและพัฒนา กระบวนการผลิต และการบำบัดของเสียจากกระบวนการผลิต และการใช้ผลิตภัณฑ์นาโนเทคโนโลยี ต่อมาในปี พ.ศ. 2553 คณะอนุกรรมการความปลอดภัยและจริยธรรมด้านนาโนเทคโนโลยีได้แต่งตั้ง “คณะทำงานร่างยุทธศาสตร์ทางด้านความปลอดภัยของนาโนเทคโนโลยี” ซึ่งได้ร่างยุทธศาสตร์แล้วเสร็จในปลายปี พ.ศ. 2553 ยุทธศาสตร์ดังกล่าวมีส่วนเกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานในภาคอุตสาหกรรม และภาคเกษตรกรรม ซึ่งอาจต้องสัมผัสกับวัสดุนาโน ในปี พ.ศ. 2555 ยุทธศาสตร์ด้านความปลอดภัยนาโนในระดับชาติที่กล่าวถึงข้างต้นกำลังรอการเสนอต่อคณะรัฐมนตรีเพื่อให้ความเห็นชอบ

ปัจจุบัน ในต่างประเทศได้ให้ความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในเรื่องความปลอดภัยในการปฏิบัติงานกับวัสดุนาโน ทั้งในห้องปฏิบัติการและโรงงานอุตสาหกรรม จึงได้มีการจัดทำแนวปฏิบัติเบื้องต้นไว้ในลักษณะต่าง ๆ เช่น Guideline และ Code of Conduct เป็นต้น โดยใช้ข้อมูลและองค์ความรู้ที่มีอยู่ในปัจจุบัน ต่อมาเมื่องานวิจัยด้านพิษวิทยาของวัสดุนาโนมีจำนวนมากขึ้น แนวปฏิบัติเบื้องต้นก็จะได้รับการแก้ไขปรับปรุงให้เป็นแนวปฏิบัติที่ชัดเจนและมีข้อมูลทางวิทยาศาสตร์มาสนับสนุนมากขึ้นด้วย

อีกสิ่งหนึ่งที่แสดงให้เห็นถึงความตื่นตัวด้านความปลอดภัยนาโน คือจำนวนของบทความวิจัย เกี่ยวกับอันตรายของวัสดุนาโน ซึ่งมีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 เป็นต้นมา ซึ่งสะท้อนถึงตัวเลขรวม ของทุนวิจัยจากภาครัฐของทุกประเทศในโลก สำหรับในประเทศไทย ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติเริ่มให้ทุนวิจัยด้านความปลอดภัยนาโนในปี พ.ศ. 2550 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยเริ่มให้ทุนวิจัยด้านความปลอดภัยนาโนในปี พ.ศ. 2553 และสำนักงาน

คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ เริ่มเปิดให้เสนอขอรับทุนในสาขานาโนเทคโนโลยี (รวมทั้งความปลอดภัยนาโนด้วย) ในปี พ.ศ. 2553 เพื่อรับทุนในปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

ในส่วนของกระทรวงอุตสาหกรรมนั้น กรมโรงงานอุตสาหกรรมมีภารกิจตามกฎหมายในการกำกับดูแลด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสิ่งแวดล้อม ในโรงงานอุตสาหกรรม[5] จึงได้จัดทำแนวปฏิบัติเบื้องต้นด้านความปลอดภัยนาโนซึ่งเน้นสำหรับภาคอุตสาหกรรมโดยเฉพาะ เพื่อเป็นการเตรียมความพร้อมสำหรับการขยายตัวของอุตสาหกรรมนาโนในอนาคต

1.4. คำนิยามและความหมาย

นาโนเทคโนโลยี วัสดุนาโน และผลิตภัณฑ์นาโน มีการนิยามโดยอิงตามมาตรฐานขององค์การระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐาน (ISO) ที่ออกมาในระหว่างปี พ.ศ. 2549 ถึง 2554 ดังนี้

1.4.1. ขนาดนาโน

ถึงแม้ว่านาโนเทคโนโลยีมักจะได้รับการกล่าวถึงอยู่เสมอ ๆ แต่ในที่นี้เราจำเป็นต้องพิจารณาอย่างละเอียดถึงความแตกต่างระหว่าง นาโนเทคโนโลยี (องค์ความรู้หรือวิทยาการ) วัสดุนาโน (เน้นที่เนื้อวัสดุ) วัตถุนาโน (วัตถุซึ่งอาจเล็กมากหรืออาจมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าเป็นก้อนเป็นแผ่นหรือเป็นเส้น) อุตสาหกรรมนาโน (เน้นที่อุตสาหกรรม) และผลิตภัณฑ์นาโน (เน้นว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วยวัสดุนาโน) โดยนิยามจากคำศัพท์พื้นฐานสองคำ คือคำว่า **ขนาดนาโน (nanoscale)** ซึ่งหมายถึงขนาดประมาณ 1 ถึง 100 นาโนเมตร[6] กับคำว่า **โครงสร้างนาโน (nanostructure)** ซึ่งหมายถึงโครงสร้างที่ประกอบด้วยหน่วยย่อย โดยอย่างน้อยหนึ่งหน่วยต้องมีขนาดนาโน[7]

1.4.2. นาโนเทคโนโลยี

นาโนเทคโนโลยี (nanotechnology) หมายถึงวิทยาการที่ใช้ ขึ้นรูป สังเคราะห์ ควบคุม จัดระเบียบ ดัดแปลง และวิเคราะห์สสาร ในระดับอะตอมหรือโมเลกุล หรือที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนาโน[8]

ในวงการนาโนเทคโนโลยี มีคำศัพท์หลายคำซึ่งเป็นที่ใช้กันแพร่หลาย แต่องค์การระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐานไม่ได้บัญญัติศัพท์หรือให้นิยามไว้ เช่น เครื่องมือนาโน (nanotool) เป็นต้น[9]

1.4.3. วัสดุนาโน

วัสดุนาโน (nanomaterial) หมายถึงวัสดุที่มีขนาดอย่างน้อยหนึ่งมิติเป็นขนาดนาโน หรือมีโครงสร้างของพื้นผิวหรือของโพรงภายในอยู่ในระดับนาโน[10]

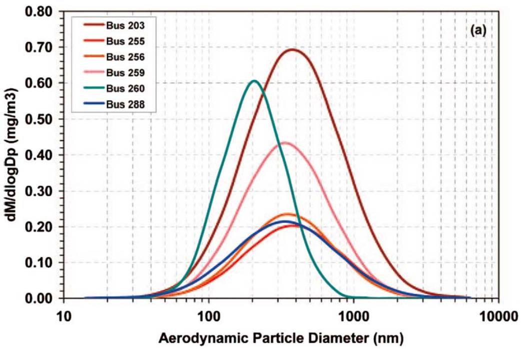
วัสดุนาโนสามารถแบ่งออกเป็นประเภทย่อย ๆ 2 วิธีด้วยกัน ได้แก่

วิธีที่ 1 แบ่งโดยพิจารณาว่าวัสดุนั้นได้รับการผลิตขึ้นโดยจงใจหรือไม่ วิธีนี้จะแบ่งวัสดุนาโนออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

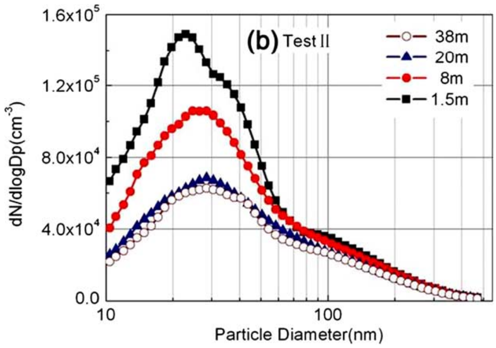
1. **วัสดุนาโนที่พบได้ตามธรรมชาติ (natural nanomaterial)** หมายถึงวัสดุนาโนที่มีปะปนอยู่กับสิ่งแวดล้อม (ดิน น้ำ บรรยากาศ) ทั่วไป เช่น อนุภาคของแร่ต่าง ๆ จากไฟไหม้ป่า ฯลฯ
2. **วัสดุนาโนที่มนุษย์สร้างขึ้นโดยบังเอิญ (incidental nanomaterial)** หมายถึงวัสดุนาโนที่ไม่ได้มีอยู่เดิมในธรรมชาติ แต่ก็ไม่ได้รับการสังเคราะห์ขึ้นมาอย่างจงใจ[11] เป็นต้นว่าอนุภาคในควันไฟที่พบได้เสมอในครัว หรือแม้แต่ที่มองไม่เห็นว่าเป็นควัน เช่นจากการเผาเชื้อเพลิงที่เรียกว่าแอลกอฮอล์แข็ง หรือในไอเสียจากเครื่องยนต์ชนิดต่าง ๆ วัสดุนาโนที่มนุษย์สร้างขึ้นโดยบังเอิญมักจะมีขนาดต่าง ๆ กัน ทั้งในระดับนาโนและใหญ่กว่านาโน ปะปนกันอยู่ ดังรูปที่ 1.1
3. **วัสดุนาโนที่ผลิตขึ้น (manufactured nanomaterial)** หมายถึงวัสดุนาโนที่ไม่พบปกติในธรรมชาติ แต่ได้รับการออกแบบ และผลิตขึ้นอย่างจงใจ ให้มีสมบัติโดยเฉพาะเจาะจง และมักมีขนาดใกล้เคียงกัน[12] ดังรูปที่ 1.2 อนึ่ง ในแนวปฏิบัติฉบับนี้ จะเรียก “วัสดุนาโนที่ผลิตขึ้น” ว่า “วัสดุนาโน” เพื่อความกระชับของภาษา

วิธีที่ 2 แบ่งโดยพิจารณาโครงสร้างของวัสดุนั้น ว่ามีขนาดภายนอกเป็นขนาดนาโนหรือไม่ วิธีนี้จะแบ่งวัสดุนาโนออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

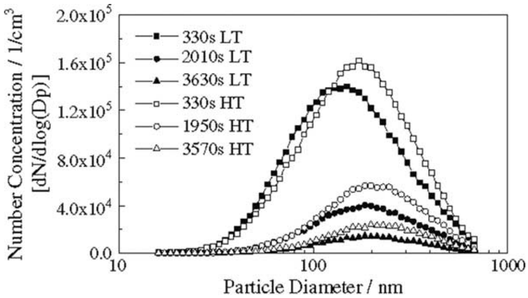
1. **วัตถุนาโน (nano-object)** มีขนาดภายนอก ไม่ว่าจะ 1 หรือ 2 หรือทั้ง 3 มิติเป็นขนาดนาโน
2. **วัสดุที่มีโครงสร้างนาโน (nanostructured material)** ถึงแม้ภายนอกจะมีขนาดใหญ่กว่านาโน แต่ก็มีโพรง มีรู หรือมีส่วนประกอบที่มีขนาดนาโน ผสมหรือเป็นส่วนประกอบอยู่ด้วย ตัวอย่างเช่น **ผงที่มีโครงสร้างนาโน (nanostructured powder)**, **วัสดุผสมนาโน (nanocomposite)**, **วัสดุนาโนกระจายตัว (dispersion)**, **วัสดุนาโนที่มีรูพรุน (nanoporous material)**, **วัสดุที่มีนาโนบนพื้นผิว (surface-structured nanomaterial)**, และ **อนุภาคที่มีโครงสร้างนาโนเป็นแกนและ**



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 1.1: การกระจายของขนาดของอนุภาคนาโน

แกนนอนเป็นขนาดของอนุภาค แกนตั้งเป็นความเข้มข้นของอนุภาค

(a) ควันไอเสียจากเครื่องยนต์ดีเซลจากรถเมล์ 6 คัน (b) อากาศในเมืองใหญ่ที่ระดับความสูงต่าง ๆ

(c) ควันบุหรี่ ซึ่งประกอบด้วยวัสดุนาโนที่มนุษย์สร้างขึ้นโดยบังเอิญ คือมีอนุภาคมากมายหลายขนาดผสมกันอยู่

ที่มา: Brain, J. D. et al 2009. BIologic responses to nanomaterials depend on exposure, clearance, and material characteristics. *Nanotoxicology* **3**(3):174-180.

เปลือก (nanostructured core-shell particle)[13] นอกจากนั้น **ละอองนาโน (nanoaerosol)** หมายถึงละอองที่ประกอบด้วยอนุภาคนาโนและอนุภาคที่มีโครงสร้างนาโน[14] และในแนวปฏิบัติเบื้องต้นนี้ อาจเรียกวัตถุนาโนที่ปลิวไปในอากาศในลักษณะฝุ่นละเอียดว่าเป็น **ฝุ่นนาโน (nano dust)**

1.4.4. วัตถุนาโน

วัตถุนาโน (nano-object) หมายถึงวัตถุที่มีมิติภายนอก 1 หรือ 2 หรือ 3 มิติ เป็นขนาดนาโน[15] วัตถุนาโนอาจมีได้มากมายหลายรูปแบบ เป็นต้นว่า อนุภาคนาโน (nanoparticle) แผ่นนาโน (nanoplate) เส้นใยนาโน (nanofiber) ผลึกนาโน (nanocrystal) และวัตถุนาโนรูปซับซ้อน (complex form)

- **อนุภาคนาโน (nanoparticle)** หมายถึงวัตถุนาโนที่มิติภายนอกทั้ง 3 มิติมีขนาดนาโน[16] อนุภาคนาโนมีขนาดตรงกับอนุภาคที่เรียกกันมาก่อนว่า **อนุภาคขนาดเล็กยิ่งยวด (ultrafine particle)**
- **แผ่นนาโน (nanoplate)** หมายถึงวัตถุนาโนที่หนึ่งมิติภายนอกมีขนาดนาโน แต่อีกสองมิติภายนอกมีขนาดใหญ่กว่ามาก[17] อาจแบ่งได้เป็น
  - **ฟิล์มนาโน (nanofilm)** อยู่ระหว่างการจัดทำนิยามโดย ISO[18]
  - **ริบบิ้นนาโน (nanoribbon)** หมายถึงแผ่นนาโนที่มีความหนาขนาดนาโน ส่วนอีกสองมิติที่เหลือมิติหนึ่งมีขนาดยาวกว่ามาก[19]
- **เส้นใยนาโน (nanofiber)** หมายถึงวัตถุนาโนที่มิติภายนอกที่คล้ายกันสองมิติมีขนาดนาโน แต่อีกหนึ่งมิติมีขนาดยาวกว่ามาก[20] ซึ่งอาจแบ่งเป็น
  - **แท่งนาโน (nanorod)** หมายถึงเส้นใยนาโนที่ไม่กลวง[21]
  - **ท่อนาโน (nanotube)** หมายถึงเส้นใยนาโนกลวง[22]
  - **ลวดนาโน (nanowire)** หมายถึงเส้นใยนาโนที่เป็นตัวนำไฟฟ้าหรือเป็นสารกึ่งตัวนำ[23]
- **ผลึกนาโน (nanocrystal)** หมายถึงอนุภาคนาโนที่เป็นผลึก[24]
  - **ควอนตัม ด็อท (quantum dot)** หมายถึงผลึกอนุภาคนาโน ซึ่งมีสมบัติหลายอย่างที่ขึ้นกับขนาดเนื่องมาจากระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนถูกจำกัดโดย quantum confinement effects[25]

- **วัตถุนาโนรูปซับซ้อน (complex form)** มีรูปร่างแตกต่างจากรูปร่างเบื้องต้นที่นิยามไว้แล้ว ในปัจจุบันได้แก่เปลือกนาโน (nanoshell) และกรวยนาโน (nanocone)[26]
  - **เปลือกนาโน (nanoshell)** หมายถึงเปลือกหุ้มห่อวัตถุ ซึ่งตัวเปลือกมีความหนาขนาดนาโน[27]
  - **กรวยนาโน (nanocone)** หมายถึงเส้นใยนาโน หรืออนุภาคนาโน ที่มีรูปกรวย[28]

อนุภาคนาโนที่ไม่ได้เกาะตัวกับอนุภาคนาโนอื่น เรียกว่าเป็น **อนุภาคนาโนปฐมภูมิ (primary nanoparticle)** ซึ่งในสภาวะที่เหมาะสมอาจรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นได้ในสองลักษณะ คือ

- **ก้อนหลอม หรือ กลุ่มก้อน (aggregate)** หมายถึง อนุภาคที่ประกอบขึ้นด้วยอนุภาคที่เชื่อมกันอย่างแน่นหนาหรือหลอมเข้าด้วยกัน ทำให้พื้นที่ผิวด้านนอก มีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับผลบวกของพื้นที่ผิวของอนุภาคย่อย ๆ[29]
- **กลุ่มมวล หรือ รวมมวล (agglomerate)** หมายถึง อนุภาค หรือก้อนหลอม หรือของผสมของทั้งสองอย่าง ที่มาเกาะกันอย่างหลวม ๆ ทำให้พื้นที่ผิวภายนอก มีขนาดใกล้เคียงกับผลบวกของพื้นที่ผิวของอนุภาคย่อย ๆ[30]

1.5. ตัวอย่างวัสดุนาโน

ต่อไปนี้ เป็นวัสดุนาโน ที่เรามักได้ยินชื่ออยู่เสมอ แต่บางครั้งอาจไม่ทราบว่าเป็นวัสดุนาโน เพราะบางชื่อไม่มีคำว่า “นาโน” อยู่ในชื่อด้วย

1.5.1. ฟูลเลอรีน (fullerenes)

ฟูลเลอรีนเป็นอันยรูปหนึ่งของคาร์บอน มีลักษณะเป็นเปลือกกลม เรียกว่า บัคกีบอลล์ (buckyballs) เช่น บักมินสเตอร์ฟูลเลอรีน (buckminsterfullerene หรือ C_{60}) และเป็นปลอกหรือท่อยาว เรียกว่าท่อคาร์บอนนาโน ฟูลเลอรีนมักเกิดผสมกันในสัดส่วนต่าง ๆ และอาจผสมกับคาร์บอนแบล็ค เป็นควันจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีคาร์บอน ไม่ว่าจะเป็นการจุดเทียนไข หรือการเผายางรถยนต์ ฟูลเลอรีนที่สำคัญได้แก่บัคกีบอลล์และท่อคาร์บอนนาโน

บัคกีบอลล์ (buckyballs)

บัคกีบอลล์ (C_{60}) เป็นฟูลเลอรีนชนิดหนึ่ง มีลักษณะเป็นเปลือกกลม เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1.2 นาโนเมตร บัคกีบอลล์ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายอย่าง เช่น ในอุตสาหกรรมหน่วยความจำสำหรับคอมพิวเตอร์ อุตสาหกรรมเซลล์เชื้อเพลิง และอุตสาหกรรมจอภาพแอลซีดี เป็นต้น แต่ที่มีการศึกษาค้นคว้ากันมาก คือการประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ ทั้งในการวินิจฉัยโรค เช่น ใช้เป็นวัตถุดิบของสีเอ็มอาร์ไอ (MRI contrast agent) ที่ละลายน้ำได้ และในการรักษาโรค เช่น ใช้เป็นยาต้านโรคภูมิแพ้ และใช้เป็นสารลำเลียงยาเข้าไปทำลายเซลล์มะเร็งตับ เป็นต้น

ท่อคาร์บอนนาโน (carbon nanotubes หรือ CNT หรือ buckytube)

ท่อคาร์บอนนาโน เป็นสารในกลุ่มฟูลเลอรีน ที่มีลักษณะเป็นปลอกหรือท่อยาว เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.2 นาโนเมตร แต่มีความยาวได้มาก แบ่งเป็น

- ชนิดชั้นเดียว (single-walled carbon nanotubes หรือ SWCNT)
- ชนิดสองชั้น (double-walled carbon nanotubes หรือ DWCNT)
- ชนิดหลายชั้น (multi-walled carbon nanotubes หรือ MWCNT)

ท่อคาร์บอนนาโนถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรม เพื่อให้ความแข็งแรง เช่น ใช้เป็นส่วนประกอบของไม้เทนนิส ใช้เป็นสวิทช์ไฟฟ้าในแต่ละบิทของหน่วยความจำสำหรับคอมพิวเตอร์ เป็นต้น

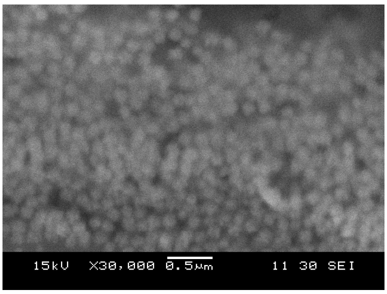
1.5.2. กราฟีน (graphene)

กราฟีน ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน จับกันเป็นรูปหกเหลี่ยมด้านเท่า และแผ่ขยายเป็นรูปหกเหลี่ยมด้านเท่าไปทุกทิศทางในระนาบเดียวกัน เป็นรูปทรงเหมือนลวดตาข่าย กราฟีนเป็นตัวอย่างของแผ่นนาโนความหนาหนึ่งอะตอม แต่เมื่อกราฟีนซ้อนกันหลาย ๆ ชั้น ก็จะได้เป็นกราไฟต์ (graphite) ซึ่งจัดเป็นอันยรูปของถ่านที่มนุษย์รู้จักมานานแล้วว่ามีลักษณะเป็นแผ่น กราฟีนมีสมบัติทางกายภาพที่น่าสนใจมาก อาทิ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม กราฟีนสามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าเงิน ซึ่งเป็นโลหะที่นำไฟฟ้าได้ดีที่สุด หรือการที่กราฟีนสามารถดูดแสงได้มาก ทั้ง ๆ ที่มีความหนาเพียง

อะตอมเดียว สมบัติพิเศษหลายอย่างของกราฟีน ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับแสง (photonics industry)

1.5.3. อนุภาคทองแดงนาโน (copper nanoparticles)

อนุภาคทองแดงนาโน คือโลหะทองแดง (copper) ที่มีขนาดนาโน มักเตรียมขึ้นจากปฏิกิริยาการรีดิวซ์อนุมูลทองแดง (copper ion) ให้กลายเป็นโลหะทองแดง โดยใช้สารช่วยการกระจายตัวเพื่อไม่ให้อนุภาคเกาะกันเป็นก้อนใหญ่ อนุภาคทองแดงนาโนใช้ผสมในสารเคลือบผิว พลาสติก และเส้นใย เพื่อฆ่าเชื้อจุลินทรีย์และฆ่าเชื้อรา ใช้ต่อเชื่อมอุปกรณ์ในวงจรรวม (integrated circuit) เพื่อให้ไฟฟ้าผ่านได้ ใช้เป็นส่วนผสมของสารเร่งปฏิกิริยาเคมี ใช้เป็นส่วนผสมของน้ำมันหล่อลื่น นอกจากนั้นยังมีรายงานว่าอนุภาคทองแดงนาโนมีสมบัติดูดซับไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุซีเซียม (cesium) ได้ จึงมีที่ใช้ในการบำบัดขยะรังสี



รูปที่ 1.2: ตัวอย่างอนุภาคทองแดงนาโน

อนุภาคทองแดงนาโน ส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscope) โปรดสังเกตว่าอนุภาคนาโนมีขนาดใกล้เคียงกัน

ที่มา: สังเคราะห์จากเกลือของทองแดงกับสารสกัดจากใบชา โดย นายชนินทร ใจชน และนายธนรัชต์ ปฐมสุนทรชัย นิสิตคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อเดือนกันยายน พ.ศ. 2554

1.5.4. อนุภาคเงินนาโน (silver nanoparticles)

อนุภาคเงินนาโน คือโลหะเงิน (silver metal) ที่มีขนาดนาโน มักเตรียมขึ้นจากปฏิกิริยาการรีดิวซ์อนุมูลเงิน (silver cation) ให้กลายเป็นโลหะเงิน โดยใช้สารช่วยการกระจายตัวเพื่อไม่ให้อนุภาคเกาะกันเป็นก้อนใหญ่ อนุภาคเงินนาโนมีความเป็นพิษต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิต จึงนิยมใช้ฆ่าเชื้อโรค

1.5.5. อนุภาคทองนาโน (gold nanoparticles)

อนุภาคทองนาโน คือ โลหะทอง (gold metal) ที่มีขนาดนาโน มักเตรียมขึ้นจากปฏิกิริยาการรีดิวซ์อนุมูลทอง (gold cation) ให้กลายเป็นโลหะทอง โดยใช้สารช่วยการกระจายตัวเพื่อไม่ให้อนุภาคเกาะกันเป็นก้อนใหญ่ อนุภาคทองนาโนมีความเป็นพิษต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิตน้อยกว่าอนุภาคเงินนาโนที่ใช้ในอุตสาหกรรมการแพทย์

1.5.6. อนุภาคเหล็กนาโน (iron nanoparticles)

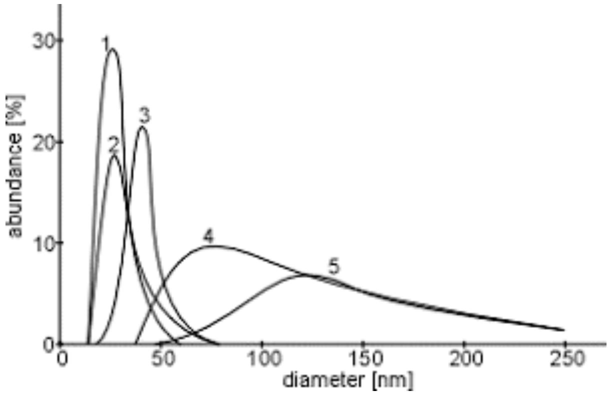
อนุภาคเหล็กนาโน คือโลหะเหล็ก (iron metal) ที่มีขนาดนาโน (nano zero-valence iron หรือ NZVI) มักเตรียมขึ้นจากปฏิกิริยาการรีดิวซ์อนุมูลเหล็กให้กลายเป็นอนุภาคของเหล็ก โดยใช้สารช่วยการกระจายตัวเพื่อไม่ให้อนุภาคเกาะกันเป็นก้อนใหญ่ อนุภาคเหล็กนาโนมีสมบัติในการทำปฏิกิริยารีดิวซ์สารอื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารที่เป็นพิษหรือก่อให้เกิดมลภาวะ ให้กลายเป็นสารที่มีพิษน้อยลงหรือไม่เป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ถูกนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม นอกจากนั้นยังใช้ในการผลิตเหล็กหล่อ ที่หล่อขึ้นด้วยอุณหภูมิที่ต่ำกว่าการหลอมเหล็กปกติ

1.5.7. คาร์บอนแบล็ค (carbon black)

คาร์บอนแบล็ค เป็นเขม่าสีดำที่ได้จากการเผาแบบย่อยสลายภายใต้การควบคุม (controlled vapor-phase pyrolysis and partial combustion) ของเชื้อเพลิงประเภทไฮโดรคาร์บอน โดยอาจเกิดปนกันอยู่กับสารกลุ่มฟูลเลอรีน คาร์บอนแบล็คมีหลายชนิด บางชนิดก็มีขนาดนาโนเท่านั้น แต่บางชนิดก็เป็นส่วนผสมของอนุภาคขนาดนาโนและอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าบ้าง ดังรูปที่ 1.3

คาร์บอนแบล็คแบ่งออกได้เป็น เกรด (grade) และกรุป (group) จำนวนมาก (เฉพาะที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางมีมากกว่า 40 เกรด) อย่างไรก็ตามสามารถแบ่งกลุ่มใหญ่ ๆ เป็น 5 กลุ่ม[31] ตามระบบของ IUPAC ได้แก่

แชนแนลแบล็ค (channel black) มีลักษณะเป็นอนุภาคสีดำที่ได้จากการขูดตะแกรงเหล็ก (iron channel) ซึ่งเป็นตัวรองรับคราบเขม่า ที่เกิดจากการพ่นเปลวไฟและควันไฟ ออกจากหัวฉีดเชื้อเพลิง แชนแนลแบล็คมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิประมาณ 10-30 นาโนเมตร และมีขนาดของกลุ่มมวลประมาณ 50-200 นาโนเมตร



รูปที่ 1.3: ตัวอย่างลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็ค

(1) channel black หรือเรียกอีกอย่างว่า impingement, (2) furnace black, (3) acetylene black, (4) lamp black, (5) thermal black **ที่มา:** http://www.dyespigments.com/carbon-black.html เข้าถึงเมื่อ 29 พฤษภาคม 2554

เฟอร์นาซแบล็ค (furnace black) มีลักษณะเป็นอนุภาคสีดำที่เกิดในเตาเผาน้ำมัน (oil furnace หรือ refractory chamber) หรือไฮโดรคาร์บอนในสภาวะที่เป็นไอ มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิประมาณ 10-400 นาโนเมตร และมีขนาดของกลุ่มมวลประมาณ 50-400 นาโนเมตร

อะเซทิลีนแบล็ค (acetylene black) มีลักษณะเป็นอนุภาคสีดำที่ได้จากการเผาย่อยสลายก๊าซอะเซทิลีนในสภาวะไร้อากาศ อนุภาคที่เกิดขึ้นมีการนำไฟฟ้าที่ดี จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตถ่านไฟฉาย อะเซทิลีนแบล็คมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิประมาณ 30-50 นาโนเมตร และมีขนาดของกลุ่มมวลประมาณ 350-400 นาโนเมตร

แล็มพ์แบล็ค (lamp black) มีลักษณะเป็นอนุภาคสีดำที่ได้จากการเผาน้ำมัน (oil) โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารสกัดจากน้ำมันดิน (coal tar creosote) โดยเผาในถาดแบนภายในเตาเผาที่ควบคุมอากาศเพื่อให้ได้ควันดำ มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิประมาณ 60-200 นาโนเมตร และมีขนาดของกลุ่มมวลประมาณ 300-600 นาโนเมตร

เทอร์มัลแบล็ค (thermal black) มีลักษณะเป็นอนุภาคสีดำที่ได้จากการเผาย่อยสลายก๊าซธรรมชาติ (natural gas) ในสภาวะไร้อากาศ โดยพ่นเชื้อเพลิงดังกล่าวลงบนผิวของเตาที่ร้อน (heated refractory) มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิประมาณ 120-500 นาโนเมตร และมีขนาดของกลุ่มมวลประมาณ 400-600 นาโนเมตร

คาร์บอนแบล็ค เป็นวัสดุนาโนที่อาจจะได้รับการใช้งานในอุตสาหกรรมมากที่สุดในโลก ประมาณไว้ในปี พ.ศ. 2548 ว่ามีการผลิตคาร์บอนแบล็คทั่วโลกไม่ต่ำกว่าปีละ 10 ล้านตัน โดยที่ร้อยละ 70 ใช้ในอุตสาหกรรมยางรถยนต์ ร้อยละ 20 ใช้ผสมในสินค้ายางประเภทอื่นให้มีสีดำ ส่วนอีกร้อยละ 10 ใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ[32] ในปี พ.ศ. 2453 เริ่มมีการผสมคาร์บอนแบล็ค ซึ่งบางส่วนมีขนาดนาโน เข้าไปในยางรถยนต์เพื่อไม่ให้ยางสึกเร็ว โดยมีผลพลอยได้ในการทำให้ยางรถยนต์เกาะถนนได้ดีขึ้นบ้าง

1.5.8. อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโน (nano titanium dioxide)

อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโน เป็นอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดนาโน (อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขายตามปกติมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเป็นไมโครเมตร) มีสมบัติการกระเจิงแสง (light scattering)[33] ที่ตามองเห็น (visible light) ได้ค่อนข้างน้อย แต่กระเจิงแสงเหนือม่วง (ultraviolet) ได้ค่อนข้างมาก จึงนิยมใช้เป็นส่วนประกอบของครีมกันแดดที่ทาแล้วกันรังสีเหนือม่วงในแสงแดดได้แต่ไม่ทำให้ผิวดูขาวมากผิดปกติ นอกจากนั้นยังสามารถดูดแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานในการย่อยสลายสารอื่นที่มีลักษณะเป็นคราบสกปรก ดังนั้นสีหรือน้ำยาเคลือบผิวที่ผสมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนจึงมีสมบัติทำความสะอาดตัวเอง (self cleaning) ด้วยการย่อยสลายคราบสกปรกเมื่อแดดออก ครั้นเมื่อฝนตก น้ำฝนก็จะชะล้างคราบสกปรกที่ถูกย่อยสลายแล้วให้หลุดออกไปจากผิว ดังนั้นบ้านหรือกำแพงที่เคลือบด้วยอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนไว้ จึงดูสะอาดอยู่เสมอ

1.5.9. อนุภาคอะลูมิเนียมออกไซด์นาโน (nano aluminum oxide)

อนุภาคอะลูมิเนียมออกไซด์นาโนถูกใช้งานเป็นผงขัดละเอียด เช่น ใช้ทำผงขัดแผ่นซิลิกอน (silicon wafer) ในอุตสาหกรรมผลิตวงจรรวม ให้ความแข็งแรงทนทานต่อสีรถยนต์ และใช้เป็นวัสดุสำหรับให้สารเร่งปฏิกิริยาเกาะ (catalyst support) นอกจากนั้นยังใช้ทำวัสดุเซรามิกสำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิคส์ด้วย

1.5.10. อนุภาคซีเรียมออกไซด์นาโน (nano cerium oxide)

อนุภาคซีเรียมออกไซด์นาโน มีสมบัติคล้ายอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนและอนุภาคซิงค์ออกไซด์นาโน ทั้งการตอบสนองต่อรังสีเหนือม่วง และความสามารถดูดรังสีเหนือม่วงมาเป็นพลังงานในการทำความสะอาดตัวเอง นอกจากนั้นยังใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (catalytic converter) ของรถยนต์ และใช้เป็นส่วนผสมของอิเล็กโตรไลท์ (electrolyte) ในเซลล์เชื้อเพลิงด้วย

1.5.11. อนุภาคสังกะสีออกไซด์นาโน (nano zinc oxide)

อนุภาคสังกะสีออกไซด์นาโน ใช้งานคล้ายคลึงกับอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโน เช่น ใช้เป็นสารกันแดดในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง เป็นต้น ปัจจุบันมีวิธีสังเคราะห์อนุภาคสังกะสีออกไซด์นาโนให้มีรูปร่างได้หลายแบบ เช่น ลวดนาโน (nanowire) แท่งนาโน (nanorod) เข็มขัดนาโน (nanobelt) ดอกไม้นาโน (nanoflower) ฯลฯ

1.5.12. อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์นาโน หรือทรายนาโน (nano silicon dioxide)

อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์นาโนไม่ได้ผลิตขึ้นจากการบดทรายให้เป็นผงละเอียด แต่เตรียมจากการออกซิเดชั่น (oxidation) และพอลิเมอไรเซชั่น (polymerization) ในสภาวะที่เป็นไอ (vapor phase) หรือไม่ก็ใช้การไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และคอนเดนเซชั่น (condensation) ของสารที่มีซิลิกอนเป็นองค์ประกอบ เช่น เตตราเอทิล ออโทซิลิเคต (tetraethyl orthosilicate หรือ TEOS) อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์นาโนใช้ในอุตสาหกรรมมากมาย โดยใช้เป็นสารกึ่งตัวนำ สร้างควอนตัมด็อท สร้างตัวหยั่งรู้ (sensor) เป็นส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิง ฯลฯ

1.5.13. อนุภาคพอลิสไตรีนนาโน (polystyrene nanosphere)

พอลิสไตรีน (polystyrene) เป็นพอลิเมอร์ที่มนุษย์ค้นพบและประดิษฐ์เลียนแบบธรรมชาติได้เมื่อกว่าหนึ่งศตวรรษมาแล้ว ทั้งยังสามารถขึ้นรูปเป็นทรงกลมเล็กๆ (polystyrene microsphere)

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 ไมโครเมตร เพื่อใช้เป็นอนุภาคขนาดมาตรฐาน สำหรับอนุภาคพอลิสไตรีนนาโนนั้น มักใช้เป็นแกน (core) สำหรับให้หมู่ทางเคมี (functional group) เกาะรอบ ๆ เพื่อสร้างอนุภาคนาโนที่มีพื้นผิวต่าง ๆ กัน

1.5.14. เด็นดริเมอร์ (dendrimers)

เด็นดริเมอร์เป็นโมเลกุลที่แตกแขนงออกไปเรื่อย ๆ ทุกทิศทางรอบจุดศูนย์กลางจนมีรูปร่างเป็นทรงกลม สมบัติของเด็นดริเมอร์ ขึ้นอยู่กับสมบัติของหมู่ทางเคมีที่อยู่บนผิวนอก เด็นดริเมอร์ที่มีการใช้งานมากที่สุดในปัจจุบัน ได้แก่ พอลิอะมิโดอะมีน (PAMAM) ซึ่งประกอบด้วยแกน อัลคิลไดอะมีน เสริมด้วยกิ่งก้านสาขา อะมีนตติยภูมิ สมบัติพิเศษของเด็นดริเมอร์ (Dendritic Effect) ที่ได้รับการค้นพบแล้วมีหลายประการ เช่น สามารถเร่งปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วกว่าที่คำนวณได้จากวิธีปกติทางเคมีเป็นสิบเท่า หรือมีความสามารถในการจับตัวกับอนุมูลบางชนิดได้ดีกว่าปกติเป็นสิบเท่า เด็นดริเมอร์มักถูกใช้เป็นแกนสำหรับให้หมู่ทางเคมีเกาะ หรือให้สิ่งอื่นเกาะ เช่น สีย้อมและดีเอ็นเอ เพื่อใช้สำหรับลำเลียงสิ่งเหล่านั้น ในอนาคตเด็นดริเมอร์มีศักยภาพที่จะถูกใช้เป็นโมเลกุลที่ช่วยรวบรวมแสงอาทิตย์จากพื้นผิวของอนุภาคเข้าไปสู่จุดศูนย์กลาง เพื่อเปลี่ยนให้เป็นพลังงานรูปอื่น คือใช้เป็นส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ในอนาคต

1.5.15. ดินเหนียวนาโน หรือ นาโนเคลย์ (nanoclays)

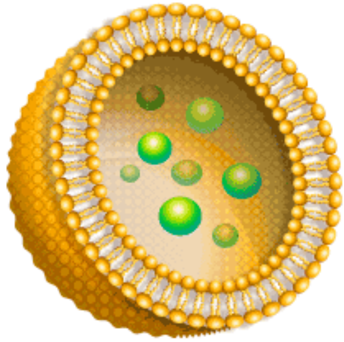
นาโนเคลย์ เป็นอนุภาคนาโนที่ประกอบด้วยแร่ซิลิเคตซ้อนกันเป็นชั้น ๆ (layered mineral silicate) แบ่งได้เป็นหลายชนิดขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมี เช่น montmorillonite, bentonite, kaolinite, hectorite และ halloysite นาโนเคลย์มีที่ใช้ในอุตสาหกรรม เป็นวัสดุเสริมแรงเพื่อเพิ่มสมบัติทางกายภาพในวัสดุผสมนาโน (polymer nanocomposite) เป็นสารเพิ่มความหนืด เป็นสารดูดก๊าซ และเป็นตัวพาสารออกฤทธิ์ หรือตัวยา

1.5.16. ลิโปโซม (liposomes)

ลิโปโซมที่ใช้ในยาและเครื่องสำอาง มีผิวเป็นเยื่อลิพิดคู่ (lipid bilayer) ที่เตรียมขึ้นจากไขมันพืช อย่างไรก็ตาม บ่อยครั้งเมื่อมีการใช้คำว่าลิโปโซม อาจหมายถึงสารประกอบลิพิดเชิงซ้อน (lipid complex) ชนิดอื่น ที่มีอยู่หลายชนิด เช่น อนุภาคนาโนลิพิดแข็ง (solid lipid nanoparticle) ซึ่งใช้

รูปที่ 1.4: ลิโปโซม

ลิโปโซม (liposome) เป็นเยื่อลิพิดคู่ (lipid bilayer) ล้อมรอบของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซไว้ภายใน ในกรณีที่มีตัวยา หรือสารออกฤทธิ์ (active ingredient) สารนั้นอาจจะแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของลิพิดในเยื่อลิพิดคู่ (กรณีสารออกฤทธิ์ที่ไม่ละลายน้ำ) หรือเข้าไปอยู่ในโพรงตรงกลาง (กรณีสารออกฤทธิ์ที่ละลายน้ำ ซึ่งในรูปเขียนเป็นเม็ดสีเขียว) ลิโปโซมอาจมีผิวชั้นเดียวอย่างในรูป (unilamellar) หรือที่ใช้กันมากในทางเภสัชกรรมและเครื่องสำอาง อาจมีผิวหลายชั้นซ้อนกันเหมือนหัวหอม (multilamellar) **ที่มา:** http://bioteach.ubc.ca/Bio-industry/Inex/



สำหรับลำเลียงตัวยา และปลดปล่อยตัวยาออกมาอย่างช้าๆ (slow, controlled release) ทำให้คนไข้ไม่ต้องทายา หรือรับประทานยา หรือฉีดยาบ่อยๆ

ถึงแม้ลิโปโซมในตัวเองไม่มีอันตราย แต่มีสมบัติช่วยให้สารออกฤทธิ์ซึ่งถูกเติมเข้าไประหว่างขั้นตอนการผลิตลิโปโซม ถูกดูดซึมลงไปยังชั้นผิวหนังที่ต้องการ ได้มากกว่าเมื่อไม่ใช้ลิโปโซมระหว่าง 5 ถึง 10 เท่า สารออกฤทธิ์ดังกล่าว อาจเป็นสารที่ละลายในน้ำ หรือเป็นสารที่ละลายในน้ำมันก็ได้

ในขั้นตอนการผลิต ลิโปโซมจะถูกเตรียมเป็นสารแขวนลอยเข้มข้น (ความเข้มข้นสูงกว่าหนึ่งล้านเม็ดต่อหนึ่งมิลลิลิตร) ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวข้นสีขาวนวลคล้ายนมข้น จากนั้นจึงนำไปเจือจางด้วยส่วนผสมอื่นๆ รวมทั้งสี กลิ่น สารเพิ่มความหนืด สารต้านจุลชีพ ฯลฯ ให้ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น ครีมทาหน้า เจลนวดผิว ฯลฯ

1.6. อุตสาหกรรมนาโน

อุตสาหกรรมนาโนหมายถึงกรณีใดกรณีหนึ่งหรือทุกกรณีดังต่อไปนี้

- อุตสาหกรรมที่ใช้วัสดุนาโนเป็นวัตถุดิบ เช่น อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ซึ่งใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนเป็นวัตถุดิบของครีมกันแดด

- อุตสาหกรรมที่สังเคราะห์ให้เกิดวัสดุนาโนขึ้นในเนื้อผลิตภัณฑ์หรือเคลือบอยู่บนผิวของผลิตภัณฑ์ โดยใช้วัสดุนาโนเป็นวัตถุดิบหรือไม่ก็ได้ เช่น อุตสาหกรรมผลิตผ้านาโน อุตสาหกรรมในกลุ่มนี้อาจเรียกได้ว่า เป็น อุตสาหกรรมที่ใช้นาโนเทคโนโลยีเป็นเทคโนโลยีการผลิต คือใช้สำหรับการขึ้นรูป สังเคราะห์ ควบคุม จัดระเบียบ ดัดแปลง หรือวิเคราะห์สสาร ในระดับอะตอมหรือโมเลกุล ผลผลิตจากอุตสาหกรรมกลุ่มนี้ อาจเป็นผลิตภัณฑ์ปลายน้ำที่ขายให้ผู้บริโภค เช่น ถุงเท้านาโน มุ้งนาโน ฯลฯ แต่ส่วนใหญ่เป็นการสังเคราะห์วัสดุนาโน เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมอื่น

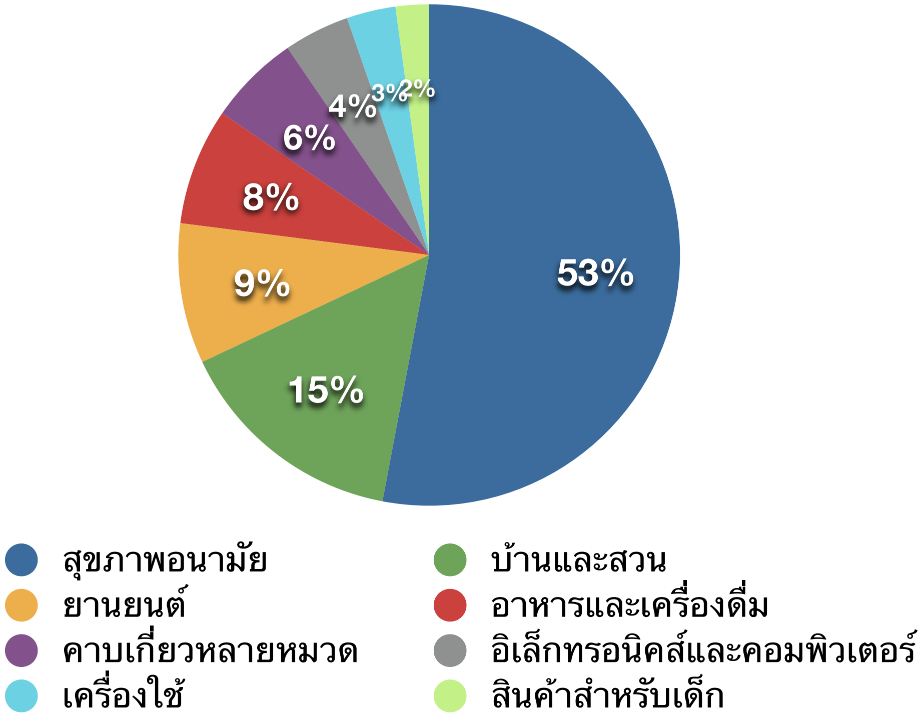
1.7. ผลิตภัณฑ์นาโน

ผลิตภัณฑ์นาโน (nanoproduct หรือ nano product) หมายถึง กรณีใดกรณีหนึ่งหรือทุกกรณีดังต่อไปนี้

- ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นโดยใช้นาโนเทคโนโลยี
- ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นจากวัตถุดิบที่เป็นวัสดุนาโน
- ผลิตภัณฑ์ที่มีวัสดุนาโนเป็นองค์ประกอบ ไม่ว่าในการผลิตจะใช้วัสดุนาโนเป็นวัตถุดิบหรือไม่

ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 เป็นต้นมา สถาบันวูดโรว์ วิลสัน (Woodrow Wilson) ในประเทศสหรัฐอเมริกา ได้สำรวจผลิตภัณฑ์นาโนที่มีขายอยู่บนเครือข่ายอินเทอร์เน็ตทั่วโลก จนพบว่าจำนวนผลิตภัณฑ์นาโนทั้งหมดเพิ่มอย่างต่อเนื่อง จากผลการสำรวจสินค้าจำนวน 1,393 รายการเมื่อเดือนมีนาคม 2554 โดย สถาบันวูดโรว์ วิลสัน สรุปได้ว่า ผลิตภัณฑ์นาโนสามารถแบ่งเป็นกลุ่ม โดยมีสัดส่วนดังนี้

- **สุขภาพอนามัย** (Health and Fitness) จำนวน 738 รายการ (ประมาณร้อยละ 53 ของจำนวนสินค้านาโนทั้งหมด)
- **บ้านและสวน** (Home and Garden) จำนวน 209 รายการ (ประมาณร้อยละ 15 ของจำนวนสินค้านาโนทั้งหมด)
- **ยานยนต์** (Automobile) จำนวน 126 รายการ (ประมาณร้อยละ 10 ของจำนวนสินค้านาโนทั้งหมด)



รูปที่ 1.5: **สัดส่วนของผลิตภัณฑ์นาโน**

ที่มา: การสำรวจสินค้านาโนจำนวน 1,393 รายการเมื่อเดือนมีนาคม 2554 จัดทำโดย สถาบันวูดโร วิลสัน แห่งสหรัฐอเมริกา

- **อาหารและเครื่องดื่ม** (Food and Beverages) จำนวน 105 รายการ (ประมาณร้อยละ 7.5 ของจำนวนสินค้านาโนทั้งหมด)
- **คาบเกี่ยวหลายหมวด** (Cross Cutting) จำนวน 82 รายการ (ประมาณร้อยละ 6 ของจำนวนสินค้านาโนทั้งหมด)
- **อิเล็กทรอนิคส์และคอมพิวเตอร์** (Electronics and Computers) จำนวน 59 รายการ (ประมาณร้อยละ 4 ของจำนวนสินค้านาโนทั้งหมด)
- **เครื่องใช้** (Appliances) จำนวน 44 รายการ (ประมาณร้อยละ 3 ของจำนวนสินค้านาโนทั้งหมด)
- **สินค้าสำหรับเด็ก** (Goods for Children) จำนวน 30 รายการ (ประมาณร้อยละ 2 ของจำนวนสินค้านาโนทั้งหมด)

ตัวอย่างข้างล่างนี้แสดงความหลากหลายของสินค้านาโนที่มีขายบนเครือข่ายอินเทอร์เน็ต (จากรายการสินค้าของ TheONI: Oklahoma Nanotechnology Initiative, http://www.oknano.com/pdf/NanoProductsShowroom.pdf)

- แผ่นยางคลุมคีย์บอร์ดคอมพิวเตอร์เคลือบอนุภาคเงินนาโนเพื่อฆ่าเชื้อโรคจากมือผู้ใช้
- เลนส์เคลือบวัสดุนาโนป้องกันการสะท้อนแสง
- หน่วยเก็บความจำ 16 GB NAND Flash Memory ผลิตด้วยนาโนเทคโนโลยี
- ผลิตภัณฑ์อีป๊อกซี่นาโนสำหรับเคลือบผิว (Nano Epoxy Coating)
- ผลิตภัณฑ์นาโนล้างรถได้โดยไม่ต้องใช้น้ำ
- เครื่องดูดฝุ่นใช้อนุภาคเงินนาโนฆ่าเชื้อโรค
- ครีมทาหน้าผสมอนุภาคทองนาโนที่ติดอยู่บนใยไหม
- โลชั่นถนอมผิว ผสมวัสดุนาโนดูดแสงอัลตราไวโอเล็ต
- มาสค์ (mask) และครีมนวดหน้าผสมวัสดุนาโน
- กระเป๋าเดินทางที่แข็งแรงแต่เบามาก ทำจากแผ่น Nano-Tex Fabric
- เหยื่อล่อปลาเคลือบวัสดุนาโน ทำให้มีสีเหลือบวาววับ ล่อให้ปลามากินเหยื่อ
- ลูกโบว์ลิ่งทำจากท่อคาร์บอนนาโน เพิ่มความแข็งแรงและความทนทาน
- กาวนาโนที่มีพื้นฐานจากนาโนเทคโนโลยี
- น้ำยาทำความสะอาด Nano micelle product
- กระดาษเคลือบอนุภาคนาโนกันน้ำ
- ยางรถยนต์โฆษณาว่าผสมสารซิลิกานาโน ทำให้เกาะถนนดีขึ้น
- ถ่านไฟฉาย ประจุไฟได้ในเวลาเพียง 15 นาที
- น้ำยาทำความสะอาดเบาะรถยนต์ผสมอนุภาคนาโน
- พลาสติกผสมเส้นใยท่อนาโน ช่วยลดไฟฟ้าสถิต ใช้สำหรับเคลือบชิ้นส่วนยานยนต์
- ขั้วแคโทดของแบตเตอรี่ ผสมผลึก phosphate nanocrystals ใช้ในเครื่องมือไฟฟ้าไร้สาย
- เครื่องกีฬาที่ต้องการความเบาและความแข็งแรง ใช้ Nanoflex Alloy เป็นส่วนประกอบ
- ไม้เบสบอลและไม้ฮ็อกกี้ที่มีท่อคาร์บอนนาโนเป็นส่วนประกอบ
- ไม้กอล์ฟที่มีวัสดุผสมนาโน (nanocomposite) เป็นส่วนประกอบ
- เสื้อโค้ทสำหรับนักล่าสัตว์ ใช้วัสดุนาโนช่วยควบคุมกลิ่นตัวของผู้สวมใส่
- เครื่องซักผ้าเคลือบอนุภาคเงินนาโน ช่วยฆ่าเชื้อโรคที่ติดมากับเสื้อผ้า

- โถส้วมใช้วัสดุนาโนผสมในเคลือบผิว เพื่อฆ่าเชื้อแบคทีเรีย และทำความสะอาดผิว
- ก๊อกน้ำ ลูกบิดประตู มีด ส้อม กรรไกร ถาด ฯลฯ เคลือบอนุภาคเงินนาโนเพื่อฆ่าเชื้อโรค
- ดินสอใช้วัสดุนาโนค่อย ๆ ปล่อยกลิ่นหอมออกมาให้ผู้ใช้สูดดมในขณะที่ใช้ดินสอ
- น้ำยาทำความสะอาดฟันปลอมผสมอนุภาคเงินนาโน
- น้ำยาเคลือบผ้าป้องกันคราบสกปรกเกาะ ผสมวัสดุนาโน
- อุปกรณ์ประหยัดน้ำมันรถยนต์ ด้วยอนุภาคนาโนที่เคลือบไว้ภายในท่อส่งน้ำมัน

2. การใช้นาโนเทคโนโลยีและวัสดุนาโนในอุตสาหกรรม

มนุษย์รู้จักนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างตั้งแต่ยุคสุโขทัย (ราวพุทธศตวรรษที่ 17) โดยการผสมอนุภาคทองนาโนขนาดต่าง ๆ เพื่อทำให้กระจกของโบสถ์ (stained glass) มีสีต่าง ๆ กัน โดยผู้คนในยุคนั้นไม่ทราบเหตุผลทางวิทยาศาสตร์เบื้องหลังการเกิดสีของหมึกทองคำ

ในศตวรรษที่ผ่านมา เริ่มมีการผสมคาร์บอนแบล็คในยางรถยนต์ เพื่อไม่ให้ยางสึกเร็ว โดยผู้ผสมอาจไม่ทราบว่าคาร์บอนแบล็คที่ใช้มีบางส่วนเป็นอนุภาคนาโนด้วย และต่อมาในศตวรรษนี้เองก็มีการผสมอนุภาคซิลิกานาโนในยางรถยนต์ เพื่อให้ยางเกาะถนนมากขึ้น

ในยุคปัจจุบัน การใช้นาโนเทคโนโลยีและวัสดุนาโนในอุตสาหกรรม มีมาแล้วอย่างน้อย 20 ปี แต่ยังมีการใช้น้อย ภาคอุตสาหกรรมของประเทศอุตสาหกรรมเริ่มตื่นตัวในการนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้ในราวปี พ.ศ. 2543 ซึ่งเป็นปีเดียวกันกับที่สหรัฐอเมริกาได้ก่อตั้ง National Nanotechnology Initiatives (NNI) ขึ้น โดยมีตัวอย่างลักษณะของการใช้งานดังต่อไปนี้

- อนุภาคเงินนาโน (nanosilver) ใช้ฝังหรือเคลือบบนพื้นผิวเพื่อฆ่าเชื้อโรค
- อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโน (nano TiO_2) ใช้ผสมหรือเคลือบผิวเพื่อสมบัติทำความสะอาดตัวเอง (self-cleaning)
- อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนใช้ผสมในเครื่องสำอางเพื่อบดบังแสงอัลตราไวโอเล็ต (physical sunscreen)
- ท่อคาร์บอนนาโน (CNT) ชนิดต่าง ๆ ใช้เป็นส่วนประกอบในวัสดุผสม (composite material) เพื่อให้ความแข็งแรง ทนต่อการโค้งงอได้โดยไม่หักง่าย
- อนุภาคซิลิโคนนาโน ใช้เคลือบพื้นผิวเพื่อไม่ให้เปียกน้ำ และไม่ให้คราบสกปรกเกาะได้ง่าย
- อนุภาคนาโนหลายชนิด มีพื้นผิวที่ยึดเกาะกับพื้นผิวอื่นได้ดีและกว้าง ทำให้ใช้เป็นกาวได้อย่างดี

- ฟิล์มนาโน (nanofilm) มีสมบัติไม่สะท้อนแสง (antireflective) ดังนั้นจึงใช้สำหรับเคลือบผิวเลนส์กันการสะท้อนแสงได้
- อนุภาคทองนาโน (gold nanoparticle) และเปลือกทองนาโน (gold nanoshell) รวมทั้ง ควอนตัมด็อท (quantum dot) และอนุภาคซิลิกาที่มี dye-doped silica nanoparticles ใช้สำหรับเป็นตัวติดฉลาก (label) เพื่อระบุตำแหน่งในเซลล์หรือเนื้อเยื่อ

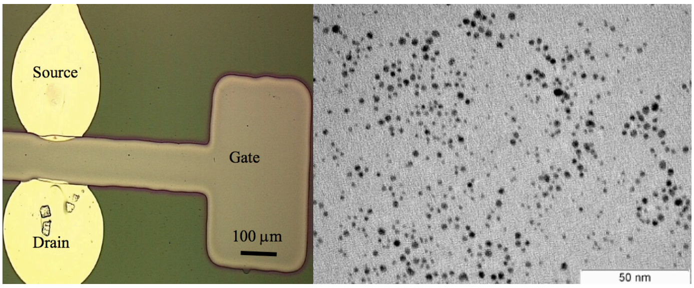
เนื่องจากนาโนเทคโนโลยีได้รับการนำมาใช้ในหลายอุตสาหกรรม ในบทนี้จึงจะให้ตัวอย่าง 14 อุตสาหกรรมสำคัญ ที่ได้มีการนำนาโนเทคโนโลยี และ/หรือ วัสดุนาโนไปใช้ประโยชน์

2.1. อุตสาหกรรมวงจรรวมและอิเล็กทรอนิคส์ทางแสง

เทคนิคทางวัสดุศาสตร์ในระดับนาโน ทำให้มนุษย์สามารถสร้างชั้นวัสดุ ที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ขึ้นเป็นส่วนประกอบของชิปสารกึ่งตัวนำ ส่งผลดีในการระบายความร้อน ลดการรั่วของกระแสไฟฟ้าระหว่างเส้นตัวนำ และลดค่าความจุที่ไม่พึงประสงค์อันเป็นเหตุให้สัญญาณรั่วไหลเป็นต้น วงจรรวมในยุคต่อ ๆ ไป จะมีความหนาแน่นของทรานซิสเตอร์สูงขึ้น ใช้กระแสไฟฟ้าและปล่อยความร้อนน้อยลงในขณะที่ทำงานได้เร็วขึ้น จึงเป็นที่คาดหวังว่า นาโนเทคโนโลยีจะช่วยให้สามารถผลิตวงจรรวมที่ใช้ทรานซิสเตอร์ขนาดเล็กสุดที่เรียกว่า Single Electron Transistor (SET) ได้

ผลิตภัณฑ์ของอุตสาหกรรมเหล่านี้ เป็นองค์ประกอบของอุปกรณ์ (device) ที่โดยทั่วไปประกอบขึ้นจากสารกึ่งตัวนำต่อเชื่อมกันด้วยตัวนำไฟฟ้า รวมกันอยู่บนชิ้นวัสดุเดียวกัน (substrate) โดยอาจวางอยู่บนชิ้นวัสดุ หรือฝังอยู่ตื้น ๆ หรือลึก ๆ ในชิ้นวัสดุก็ได้ โดยทั่วไปสารกึ่งตัวนำ จะได้รับการสังเคราะห์ขึ้นรูปบนชิ้นวัสดุ ด้วยปฏิกิริยาเคมีซึ่งใช้วัตถุดิบที่เป็นสารพิษหลายชนิด ออกมาเป็นอุปกรณ์ที่ส่วนมากมีขนาดนาโน สำหรับตัวนำไฟฟ้านั้น ในปัจจุบันมีการขึ้นรูปจากอนุภาคโลหะนาโนโดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะทองนาโน (nanogold)

ขั้นตอนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยีหรือเกี่ยวกับวัสดุนาโนนั้นเป็นขั้นตอนในการสร้างชั้นวัสดุที่มีขนาดนาโน ด้วยการระเหยไอของโลหะหรือสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.1: การใช้หมึกผสมทองนาโนในวงจรรวม

รูปซ้าย: Thin Film Transistor (TFT) ที่สร้างขึ้นจากการใช้เครื่องพิมพ์แบบ ink jet พิมพ์ขั้วไฟฟ้าด้วยหมึกทองนาโน
รูปขวา: อนุภาคทองนาโน เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5 นาโนเมตร ในน้ำหมึก จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน
ที่มา: โฆษณาของ NanoMas Technologies, Inc. http://www.nanomastech.com/docs/Ink-Gold.pdf

ให้สะสมเป็นของแข็งอยู่บนชิ้นงานโดยผ่านหน้ากาก (mask) ตามลวดลายที่ต้องการ หรือยิงด้วยลำอิเล็กตรอนให้เป็นลวดลายที่ต้องการ หรือกัดวัสดุด้วยสารเคมี ให้เป็นร่อง มีขนาดกว้างยาวและลึกตามต้องการเป็นต้น ดังนั้นในกรณีนี้วัสดุนาโนที่เกิดขึ้นจะติดอยู่บนชิ้นวัสดุเดียวกัน หรือฝังอยู่ภายในชิ้นวัสดุนั้นเพื่อเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้าด้วยกันบนวงจรรวมชิ้นเดียวกัน ผู้ออกแบบอาจกำหนดให้ใช้โลหะทองเป็นตัวนำไฟฟ้า โดยใช้หัวฉีดที่มีหลักการทำงานคล้ายกับเครื่องพิมพ์แบบ ink jet หรือใช้ไอของโลหะทองที่ร้อนจัด ให้เกิดเป็นหมึกทองนาโน ซึ่งมีส่วนผสมของอนุภาคทองนาโนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่กี่นาโนเมตร เพื่อพิมพ์ลายเส้นทองที่ต้องการลงไปบนพื้นผิว ซึ่งอาจจะเป็นแผ่นพอลิเมอร์บางๆ ซึ่งโค้งงอได้ แล้วใช้ความร้อนหลอมให้ผิวนอกของอนุภาคทองในหมึกเชื่อมตัวกัน (sinter) ก็จะได้เส้นตัวนำไฟฟ้าโดยที่ไม่จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงมาก เพราะอนุภาคทองยิ่งขนาดเล็กยิ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำ แต่เมื่อเชื่อมตัวกันแล้วจุดหลอมเหลวจะสูงขึ้นเป็นปกติเพราะหมดสภาพความเป็นอนุภาคนาโนไปแล้ว ขนาดความบางของเส้นทองทำให้สามารถใช้แผ่นพลาสติกบางๆ เป็นชิ้นวัสดุได้ นาโนเทคโนโลยีในลักษณะนี้ จึงรองรับการผลิตจอภาพแบบแบนที่ม้วนเก็บได้ในขณะที่ไม่ใช้งาน จากขั้นตอนการผลิตดังกล่าว มีกิจกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนาโน ได้แก่ การเปิดภาชนะบรรจุหมึก การผสมหรือกวนหมึก การเก็บตัวอย่างหมึกเพื่อควบคุมคุณภาพ การเติมหมึกพิมพ์ การพิมพ์ (สร้างละอองน้ำหมึกโดยการยิงหรือการระเหยเป็นไอและสะสมเป็นของแข็งบนชิ้นงาน) การทำความสะอาดหัวพิมพ์ เครื่องพิมพ์ บริเวณรอบๆ เครื่องพิมพ์ การอบให้หมึกแห้ง การหลอมอนุภาคทองให้เป็นเส้น การล้างภาชนะบรรจุสารเคมี ฯลฯ

ในด้านความเป็นพิษของวัสดุนาโนนั้น ในกรณีสารกึ่งตัวนำนาโนที่ขึ้นรูปด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition) ความเป็นพิษขึ้นอยู่กับชนิดของสารนั้นๆ ที่มีขนาดนาโน ส่วนในอุตสาหกรรมที่ใช้หมึกทองนาโน ความเป็นพิษก็ขึ้นอยู่กับความเป็นพิษของตัวอนุภาคทองนาโน ซึ่งมีความเป็นพิษค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับอนุภาคเงินนาโน

ในด้านจอแสดงผล นาโนเทคโนโลยีอยู่เบื้องหลังการพัฒนาจอแบนแบบโค้งงอได้ ซึ่งสามารถดูได้ด้วยมุมกว้างมาก และภาพสามารถเคลื่อนไหวได้เร็วโดยไม่ติดจอ ใช้กระแสไฟฟ้าน้อยลง และมีต้นทุนในการผลิตต่ำ โดยใช้ Organic Light Emitting Dioded (OLED) ซึ่งทำให้จอคอมพิวเตอร์มีความละเอียดและสว่างพอที่จะใช้งานได้ในสภาพแสงสว่างต่าง ๆ กัน

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ทางแสง มีขั้นตอนในโรงงานที่ใช้วัสดุนาโน ความเป็นพิษของวัสดุนาโน และโอกาสในการสัมผัสวัสดุนาโน คล้ายคลึงกันมากกับอุตสาหกรรมหน่วยเก็บความจำของคอมพิวเตอร์ และ อุตสาหกรรมวงจรรวม

ขั้นตอนในโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยนาโน ได้แก่ ขั้นตอนการจัดเรียงวัสดุนาโน (ไม่ว่าจะเป็นสารกึ่งตัวนำ หรือสารอินทรีย์) ให้เป็นระเบียบ มีรูปทรงสามมิติ (topography) ตามที่ออกแบบไว้ (layout design) โดยแม่แบบอยู่ในรูปของฟิล์มเนกาตีฟของลวดลายที่สุดท้ายจะให้เหลือเป็นชิ้นวัสดุหลังการกัด (etch) ด้วยสารเคมี หรือการระเหยเป็นไอและสะสมเป็นของแข็งบนชิ้นงาน (deposition) ด้วยสารกึ่งตัวนำ หรือถ้าไม่ใช้ฟิล์ม ก็อาจจะใช้การวาดลวดลายด้วยลำอิเล็กตรอน (electron beam) โดยตรง ถึงแม้ขั้นตอนส่วนใหญ่ทำในระบบปิดซึ่งเป็นสุญญากาศ แต่ก็ต้องมีการทำความสะอาดเครื่องมือเครื่องจักร และนำวัสดุเข้าและออกจากห้อง (chamber) ซึ่งอาจมีความเสี่ยงต่อการฟุ้งกระจายของวัสดุนาโนที่เป็นผลพลอยได้จากกรรมวิธี

ผู้ปฏิบัติงานในโรงงานผลิตวงจรรวม อาจสัมผัสกากหรือวัสดุที่เกิดเป็นผลพลอยได้ ซึ่งอาจมีขนาดนาโน และอยู่ในรูปที่อาจทำให้เกิดการระคายเคืองหรือเกิดการเป็นพิษได้ ในกรณีหมึกนาโน ผู้ปฏิบัติงานอาจสัมผัสอนุภาคทองนาโนที่ปลิวจากผงหมึกแห้ง ซึ่งป้องกันได้โดยใช้อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลที่เหมาะสม

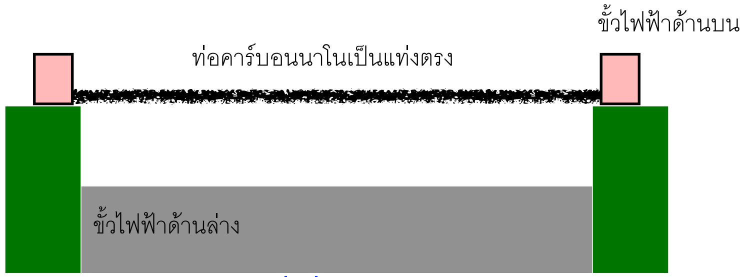
รูปที่ 2.2: จอคอมพิวเตอร์ชนิด OLED แบบแบนและโค้งได้
ที่มา: http://www.ubergizmo.com/2007/10/bendable-oled-display-from-samsung/

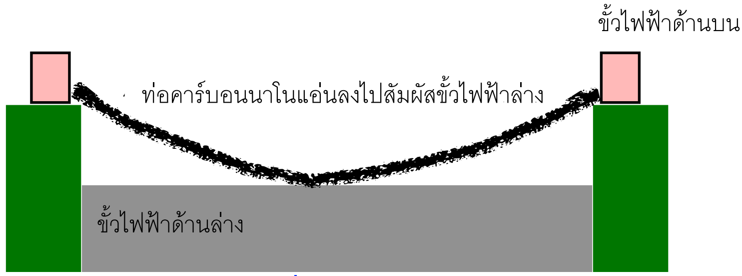
2.2. อุตสาหกรรมหน่วยเก็บความจำ

ในอุตสาหกรรมหน่วยเก็บความจำ มีการใช้เทคนิคทางวัสดุศาสตร์ระดับนาโน โดยพัฒนาชิปรูปแบบเดิม ให้เป็น Millipede Chip ซึ่งเป็นหัวอ่านแบบขนานของฮาร์ดดิสก์ยุคใหม่ ทำให้มีความหนาแน่นของข้อมูลเพิ่มขึ้นมาก

นอกจากการพัฒนาหัวอ่านแบบขนานของฮาร์ดดิสก์แล้ว ยังได้มีการนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้เป็นหน่วยเก็บความจำ เรียกว่านาโนแรม (nanoRAM) หรือเอ็นแรม (NRAM) ซึ่งใช้พลังงานน้อยทั้งในขณะทำงาน และในขณะหยุดทำงาน นอกจากนั้นยังมีศักยภาพที่จะมีความหนาแน่นสูงกว่าหน่วยเก็บความจำชนิดเดิม และสามารถขึ้นรูปอยู่บนโครงสร้างที่ผลิตโดยใช้เทคโนโลยีวงจรรวมที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน ทำให้ผลิตภัณฑ์มีราคาถูกกว่าหน่วยความจำที่เห็นกันอยู่ในปัจจุบันได้อีกมาก

จากรูปที่ 2.3 ความจำถูกหน่วยเก็บความจำชนิดนาโนแรมเก็บไว้ในสถานะที่เสถียรสองสถานะ (bistable) คือ สถานะที่หนึ่ง (OFF หรือ 0) เกิดเมื่อท่อคาร์บอนนาโนไม่แตะกับขั้วไฟฟ้า โดยท่อคาร์บอนนาโนลอยอยู่ในอากาศด้วยความเค้นภายในตัวของท่อคาร์บอนนาโนเอง ทำให้ท่อ





รูปที่ 2.3: หลักการของหน่วยเก็บความจำชนิด NRAM

รูปบน: หน่วยความจำอยู่ในสถานะ "0" คงความเสถียรด้วยความเค้นภายในตัวท่อคาร์บอนนาโน

รูปล่าง: หน่วยความจำอยู่ในสถานะ "1" คงความเสถียรด้วยแรง Van der Walls

ที่มา: วาดขึ้นตามข้อมูลจาก: http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/NRAM
เข้าถึงเมื่อ 29 มิถุนายน 2554

คาร์บอนนาโนมีความเสถียรในสถานะนั้น ส่วนสถานะที่สอง (ON หรือ 1) หลังจากท่อคาร์บอนนาโนถูกสนามไฟฟ้าดึงไปแตะกับขั้วไฟฟ้าด้านล่าง และแตะกันอยู่อย่างเสถียรโดยแรงดูดชนิดแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals interaction) ระหว่างขั้วไฟฟ้านั้นกับท่อคาร์บอนนาโน

ในอดีต การผลิตหน่วยเก็บความจำชนิดนาโนแรมในรูปที่ 2.3 เริ่มด้วยการเคลือบวัสดุ (สี่เหลี่ยมสีเขียวในรูปที่ 2.3) โดยการโปรย CNT ลงไปให้พาดอยู่อย่างระเกะระกะ จากนั้น CNT ที่ไม่อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม จะถูกกำจัดออกไปด้วยการกัดทางเคมี แต่ในปัจจุบันนิยมใช้เทคโนโลยีจัด

รูปแบบ (pattern) ของ CNT ซึ่งแขวนลอยไว้ในของเหลว ให้อยู่ในทิศทางที่ขนานกัน และพาดอยู่บนวัสดุและขั้วไฟฟ้าได้อย่างเป็นระเบียบ[34]

2.3. อุตสาหกรรมพลังงาน

นาโนเทคโนโลยีและวัสดุนาโน มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมพลังงาน ไม่ว่าจะเป็นขั้นตอนการดูดซับ การเปลี่ยนรูป การเก็บสะสม และการนำเอาพลังงานที่สะสมไว้มาใช้งาน ตลอดจนการประหยัดพลังงาน ซึ่งอุตสาหกรรมหลายประเภทได้นำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง ดังตัวอย่างต่อไปนี้

เซลล์แสงอาทิตย์

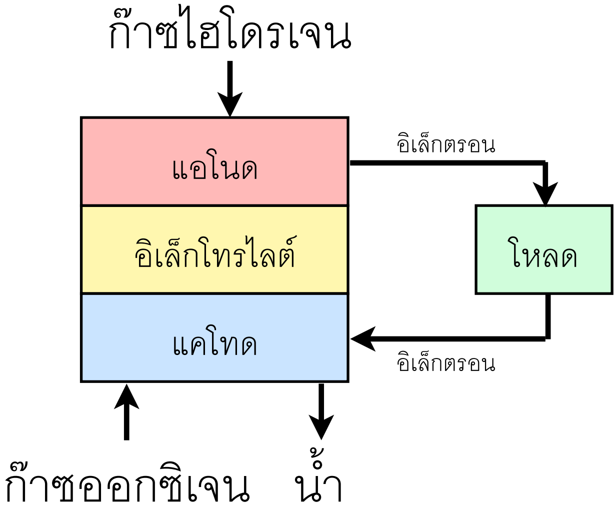
ในอุตสาหกรรมเซลล์แสงอาทิตย์ มีการใช้นาโนเทคโนโลยีในด้านการดูดซับและเปลี่ยนรูปพลังงาน โดยให้ดูดแสงได้ในช่วงคลื่นที่กว้างขึ้น เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนั้นนาโนเทคโนโลยียังช่วยในการสร้างมอเตอร์นาโน ซึ่งเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานกลโดยตรง[35]

เซลล์เชื้อเพลิง

ในอุตสาหกรรมเซลล์เชื้อเพลิง มีการใช้นาโนเทคโนโลยีในการเปลี่ยนรูปพลังงาน โดยเปลี่ยนจากพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า ดังแสดงหลักการทำงานไว้ในรูปที่ 2.4 เซลล์เชื้อเพลิงรับก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจน มารวมกันเป็นน้ำ และให้อิเล็กตรอนออกมาเป็นกระแสไฟฟ้า ในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงนั้น จำเป็นต้องใช้ตัวเร่ง (catalyst) ทั้งที่ขั้วแอโนด และแคโทด โดยเฉพาะที่ขั้วแอโนดนั้น ตัวเร่งมักเป็นโลหะทองคำขาว (platinum) ซึ่งถ้าสังเคราะห์ให้เป็นอนุภาคทองคำขาวนาโนแล้ว จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นมาก

แบตเตอรี่

ในอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ มีการใช้นาโนเทคโนโลยีและวัสดุนาโน ในการเพิ่มสมรรถนะของแบตเตอรี่โดยเคลือบอิเล็กโทรดด้วยอนุภาคนาโนเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรด ทำให้สามารถลด



รูปที่ 2.4: หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

อนุภาคทองคำขาวนาโนช่วยให้ตัวเร่ง (catalyst) ที่ขั้วแอโนด (anode) แยกไฮโดรเจนออกเป็นไฮโดรเจนไอออนและอิเล็กตรอนได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง

เวลาการอัดประจุไฟฟ้า และปล่อยกระแสไฟฟ้าได้เร็วขึ้น ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในกรณีที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง นอกจากนั้นอาจมีการใช้วัสดุนาโนเป็นฉนวนกั้นกลางแบตเตอรี่ในขณะไม่ใช้งาน เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาของแบตเตอรี่[36]

นอกจากแบตเตอรี่ปกติแล้ว ยังมีความพยายามที่จะนำวัสดุนาโนไปใช้ในการพัฒนาตัวเก็บประจุ (capacitor) ให้มีความจุมากขึ้น และปล่อยประจุไฟฟ้าได้กำลังสูงขึ้น ซึ่งเหมาะสำหรับรถไฟฟ้าที่กำลังเร่งเครื่องหรือขับขึ้นพื้นเอียงหรือขึ้นเขา[37]

หลอดแอลอีดี (Light Emitting Diode)

ในอุตสาหกรรมผลิตหลอดแอลอีดี มีการนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้ในการลดพลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้เพื่อเปลี่ยนเป็นแสงสว่าง

2.4. อุตสาหกรรมยานยนต์

อุตสาหกรรมยานยนต์ หรือแม้จะนับเฉพาะอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ก็ตาม ประกอบด้วยอุตสาหกรรมย่อย ๆ เป็นจำนวนมาก ซึ่งต่างก็มีธรรมชาติต่างกัน มีขั้นตอนในโรงงานอุตสาหกรรมต่างกัน

ยางรถยนต์

ยางรถยนต์ที่ผสมวัสดุนาโนช่วยให้เกาะถนนดีขึ้น ในปี พ.ศ. 2453 เริ่มมีการผสมคาร์บอนแบล็ค ซึ่งบางส่วนมีขนาดนาโน เข้าไปในยางรถยนต์เพื่อไม่ให้ยางสึกเร็ว โดยมีผลพลอยได้ในการทำให้ยางรถยนต์เกาะถนนได้ดีขึ้นบ้าง แต่ที่สำคัญคือในช่วงปี พ.ศ. 2530-2540 มีการผสมซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica) ซึ่งมีขนาดนาโน เข้าไปในส่วนผสมของยางรถยนต์เพื่อให้เกาะถนนดีขึ้น อันส่งผลให้ประหยัดเชื้อเพลิงได้ถึงระหว่างร้อยละ 2 ถึง 3[38]

ตัวถัง โครงรถ และเครื่องยนต์

ในปัจจุบันมีการใช้วัสดุผสมนาโนของท่อคาร์บอนนาโนและเซรามิกส์ เป็นส่วนประกอบของห้องเครื่องยนต์และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้เบาและแข็งแรงกว่าการใช้โลหะ

มีการคาดคะเนว่า จะมีการนำวัสดุนาโน เช่น ท่อคาร์บอนนาโน เป็นต้น มาใช้เป็นองค์ประกอบของตัวถังรถและโครงรถยนต์ เพื่อเพิ่มความแข็งแรง เช่นเดียวกับที่ใช้ในเครื่องบินรบ รุ่น F-35

กระจก

นาโนเทคโนโลยีและวัสดุนาโน มีส่วนช่วยพัฒนาเทคโนโลยีสารเคลือบผิวกระจกรถยนต์

- เทคโนโลยีการเคลือบกระจกด้วยวัสดุนาโนช่วยลดการสะท้อนแสงของผิวกระจก ทำให้เห็นภาพได้ชัดขึ้น
- ผลิตภัณฑ์เคลือบนาโนเพื่อกันน้ำจับกระจก

- สารเคลือบกระจกใส เพื่อให้มีความใสอยู่เสมอ เพราะฝุ่นละอองนาโนไม่สามารถเกาะกระจกได้ ในผลิตภัณฑ์หลายชนิด ฝุ่นละอองจะถูกย่อยเป็นชิ้นเล็ก ๆ โดยการทำงานของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโน ที่ถูกกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตในแสงแดด แล้วเมื่อฝนตก ฝุ่นละอองที่ถูกย่อยแล้วก็จะถูกชะออกไปจากผิวกระจก เป็นต้น
- กระจกส่องหลังชนิดที่ลดการสะท้อนได้เองโดยใช้วัสดุนาโน เมื่อรถคันหลังเปิดไฟสูง ทำให้คนขับตาไม่พร่า

เบรครถยนต์

นาโนเทคโนโลยีช่วยพัฒนาวัสดุมาทดแทนแร่ใยหินในเบรครถยนต์ เนื่องจากแร่ใยหินเป็นอันตรายต่อสุขภาพโดยก่อให้เกิดมะเร็งของเยื่อหุ้มปอด (mesothelioma) ปัจจุบันผลิตภัณฑ์เบรคที่ผสมด้วยวัสดุนาโนมีจำหน่ายแล้ว[39]

ประดับยนต์

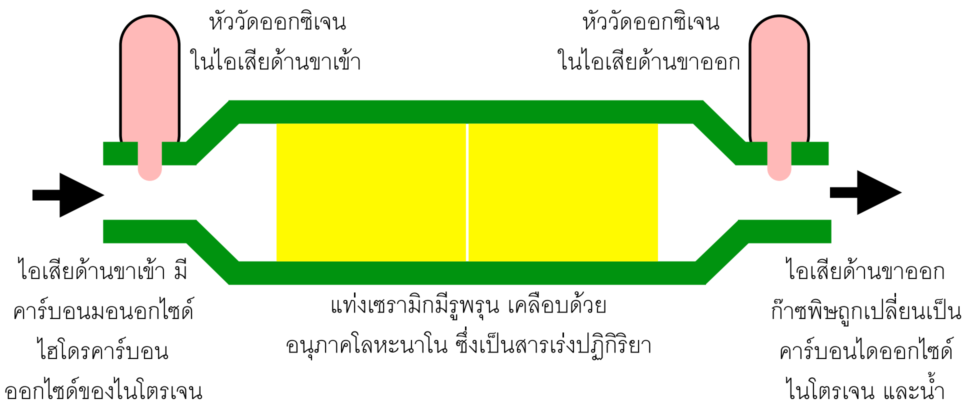
ในอุตสาหกรรมประดับยนต์ มีการใช้วัสดุนาโนที่มีสมบัติฆ่าเชื้อโรคเป็นส่วนผสมในชิ้นส่วนพลาสติกและสิ่งทอต่าง ๆ ที่ใช้ทำคอนโซลและทำผ้าหุ้มเบาะรถยนต์

2.5. อุตสาหกรรมผลิตสารเร่งปฏิกิริยา

อุตสาหกรรมผลิตสารเร่งปฏิกิริยาสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ รวมทั้งที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง และในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา มีการนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้ในการเพิ่มอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อมวล เพื่อช่วยให้สารเร่งปฏิกิริยามีความไวต่อปฏิกิริยาทางเคมีมากขึ้น

ตัวอย่างของสารเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ ออกไซด์ของโลหะหนัก เช่น ทองคำขาว วานาเดียม และนิเกิล ที่ใช้เร่งปฏิกิริยาเคมีในโรงงานอุตสาหกรรม และสารในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา

สารเร่งปฏิกิริยาสำหรับใช้ในท่อกำจัดมลภาวะ มักจะใช้วัสดุนาโนประเภทอนินทรีย์ เพื่อให้ทนต่อความร้อนจากไอเสีย ส่วนสารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงนั้น จะต้องทนต่อความร้อนเท่าใด ขึ้นอยู่กับประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงนั้น ซึ่งมีตั้งแต่อุณหภูมิห้องไปจนถึงหลายร้อยองศา



รูปที่ 2.5: เครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ที่ติดตั้งอยู่ในระบบท่อไอเสียรถยนต์

ที่มา: วาดขึ้นโดยอาศัยข้อมูลจาก: http://www.importcatalytic.com/ เข้าถึงเมื่อ 29 พฤษภาคม 2554

เซลเซียส ดังรูปที่ 2.5 แสดงภาพผ่าตามยาว (longitudinal section) ของเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (catalytic converter) ที่ติดตั้งอยู่ในระบบท่อไอเสียรถยนต์ อนุภาคโลหะนาโนซึ่งเป็นสารเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ได้รับการเคลือบไว้ภายในรูพรุนของแท่งเซรามิก (ceramic monolith) สัญญาณไฟฟ้าจากหัววัดออกซิเจนในไอเสียด้านขาเข้า (บางรุ่นมีหัววัดออกซิเจนด้านขาออกด้วย) ถูกต่อไปยังคอมพิวเตอร์ที่ควบคุมเครื่องยนต์ เพื่อปรับสัดส่วนระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ ให้สารเร่งปฏิกิริยาทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด

สูตรการผลิตของตัวเร่ง เป็นความลับของแต่ละบริษัท อย่างไรก็ตาม ในขั้นตอนการขึ้นรูปตัวเร่งนั้น ก็ใช้กรรมวิธีคล้ายคลึงกับอีกหลายอุตสาหกรรม ซึ่งต้องมีการรับวัตถุดิบซึ่งอาจมีทั้งที่เป็นผงและที่เป็นของเหลว ตรวจสอบคุณภาพ ชั่งน้ำหนัก อาจมีการบดวัตถุดิบ ผสมวัตถุดิบเข้าด้วยกันตามสูตร รอให้วัตถุดิบทำปฏิกิริยากัน ณ อุณหภูมิที่กำหนดไว้ในสูตร ซึ่งส่วนมากจะต้องมีการให้ความร้อนในเตาอบ รอให้เย็นลง ตรวจสอบคุณภาพ บรรจุหีบห่อ

หลังจากได้รับการขึ้นรูปและอบร้อนในเตาอบแล้ว วัสดุนาโนก็จะฝังตัวอยู่ในเนื้อของวัสดุอื่น (matrix) จนไม่น่าจะฟุ้งออกมาได้ นอกจากอาจจะหลุดออกมาได้บ้างที่ผิว แต่ก่อนขั้นตอนการผสมวัสดุนาโนก็มีโอกาสสัมผัสกับผู้ปฏิบัติงานในโรงงานอุตสาหกรรมได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าวัสดุนาโนอยู่ในรูปผง หรืออยู่ในรูปแขวนตะกอนในของเหลว จึงมีความจำเป็นที่โรงงานจะต้องกั้นห้องปิดทึบมีระบบ

กรองอากาศ ไม่ให้เกิดการฟุ้งกระจายของวัสดุนาโนที่เป็นฝุ่น (ถ้ามี) ออกมานอกห้อง และภายในห้องเองผู้ปฏิบัติงานก็ต้องใช้อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลที่เหมาะสมด้วย

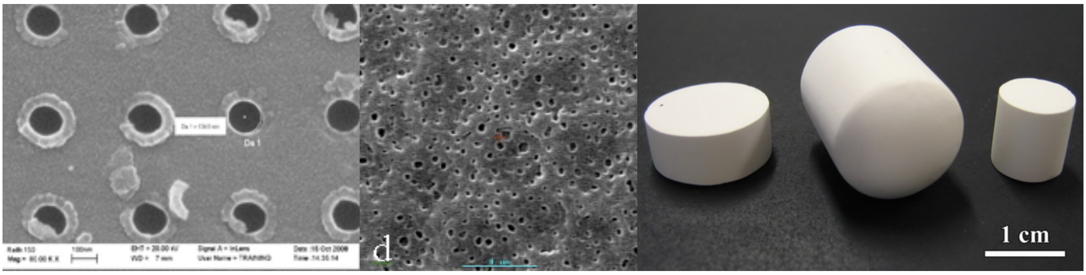
2.6. อุตสาหกรรมผลิตไส้กรอง

ไส้กรองที่ผลิตด้วยนาโนเทคโนโลยี สามารถออกแบบให้กรองสารต่าง ๆ ชนิดได้ หรืออาจจะออกแบบให้รูของไส้กรองเล็กกว่า 10 นาโนเมตร (nanofiltration) เพื่อกรองไอออนชนิดต่าง ๆ การปรับขนาดของรู และเปลี่ยนชนิดของวัสดุ ทำให้สามารถเลือกชนิดของสารที่ต้องการให้ผ่านหรือไม่ให้ผ่านรูของไส้กรองได้ รวมถึงไส้กรองสำหรับกรองเกลือออกจากน้ำทะเล ให้ได้เป็นน้ำจืดด้วย

ไส้กรองที่ผลิตด้วยนาโนเทคโนโลยีอาจแบ่งได้เป็นหลายชนิด แต่ในที่นี้จะยกตัวอย่าง 3 ชนิด ดังในรูปที่ 2.6

- ไส้กรองชนิดแรก (รูปที่ 2.6 ซ้าย) ทำจากวัสดุพอลิเมอร์ปกติ แล้วใช้นาโนเทคโนโลยี สร้างหรือกัด (etch) รูพรุนขึ้นในชิ้นวัสดุ
- ไส้กรองชนิดที่สอง (รูปที่ 2.6 กลาง) ขึ้นรูปจากไคโตซาน ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของพอลิเมอร์ธรรมชาติไคติน ซึ่งพบในเปลือกกุ้ง ปู และแมลงหลายชนิด โดยเติมสารปรุงแต่ง เช่น โซเดียมกลูตาเมต เพื่อสร้างรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่กี่นาโนเมตร ทะลุผ่านเยื่อไคโตซาน
- ไส้กรองชนิดที่สาม (รูปที่ 2.6 ขวา) ผลิตขึ้นจากวัสดุที่มีรูพรุนตามธรรมชาติ เช่น อะลูมิโนซิลิเคต (aluminosilicate) หรือซีโอไลท์ (zeolite) ซึ่งสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นแท่งสำหรับทำเป็นไส้กรองได้

วัสดุนาโนในอุตสาหกรรมนี้ มีธรรมชาติที่แตกต่างอย่างสิ้นเชิง จากวัสดุนาโน ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่กล่าวมาแล้วทั้งหมด เนื่องจากความเป็น “นาโน” ของวัสดุนาโนที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตไส้กรองนั้น ไม่ได้อยู่ที่ขนาดภายนอก ว่าเล็กจนอยู่ในระดับนาโนหรือไม่ แต่อยู่ที่ขนาดภายใน คือขนาดของรู เล็กกว่าประมาณ 100 นาโนเมตร ดังนั้น ความเป็นนาโนของวัสดุนาโนเหล่านี้ จึงไม่ได้มีผลต่อการปลิวฟุ้ง หรือต่อการแทรกผ่านผิวหนัง หรือต่อการแทรกผ่านผิวของถุงลมในปอดแต่อย่างใด ตัวอย่างเช่น ไส้กรองในรูปที่ 2.6 (กลาง) มีรูเล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่



รูปที่ 2.6: ไส้กรองสามชนิดที่มีรูพรุนขนาดนาโน (nanopores)

รูปซ้าย: chromium coated polyamide film ที่กัดรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 130 นาโนเมตร ห่างกัน 400 นาโนเมตร ไว้ กรณีนี้รูได้รับการออกแบบให้ใหญ่กว่าขนาดนาโนเล็กน้อย Bar = 100 นาโนเมตร **ที่มา**: http://www.creatvmicrotech.com/nanofilters.html **รูปกลาง**: เยื่อไคโตซานที่ผสมสารสร้างรู Bar = 1 ไมโครเมตร = 1,000 นาโนเมตร **ที่มา**: http://www.mdpi.org/cji/cji/2005/076045pe.htm **รูปขวา**: ไส้กรองขึ้นรูปจาก zeolite **ที่มา**: http://www.cerameurop.com/spip.php?article667 ทั้งสามรูปเข้าถึงเมื่อวันที่ 2 กรกฎาคม 2554

ถึง 100 นาโนเมตร (เทียบจากเส้นอ้างอิงขนาด 1 ไมโครเมตร ด้านล่างของภาพ) แต่ขนาดภายนอกของแผ่นไส้กรองดังกล่าวอาจใหญ่ถึงขนาด A4 ก็ได้ จึงไม่มีโอกาสปลิวฟุ้ง หรือในรูปที่ 2.6 (ขวา) ก็น่าจะเป็นการขึ้นรูปหรือสังเคราะห์จากสารละลายจนได้แท่งไส้กรองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่ต่ำกว่า 1 เซนติเมตร (แต่ถ้ามีการตัด ก็ต้องระวังฝุ่นที่เกิดขึ้นด้วย ว่าเป็นฝุ่นละเอียดเพียงใด) อนึ่ง ถึงแม้สารเคมีที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนการผลิต อาจจะมีความเป็นอันตรายได้บ้างตามชนิดของสารที่ใช้ แต่อันตรายที่กล่าวถึงนี้ ไม่ได้มีความเกี่ยวข้องกับความเป็นวัสดุนาโน

ตัวอย่างของไส้กรองนาโนที่ใช้งานได้จริงในเครื่องไตเทียม (hemodialysis) ซึ่งช่วยกรองของเสียออกจากเลือด คือไส้กรองอะลูมินาเมมเบรน (alumina membrane) ซึ่งขึ้นรูปด้วยการใช้สนามไฟฟ้าออกซิไดซ์แผ่นฟิล์มอะลูมิเนียมบาง (aluminum thin film) ที่เรียกว่าเยื่อเซรามิก (ceramic membrane) ให้กลายเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ (อะลูมินา) ในสภาพที่เป็นกรด จะได้แผ่นฟิล์มอะลูมินาบาง (alumina thin film) ที่มีรูนาโนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10 นาโนเมตร เหมาะสำหรับการใช้เป็นไส้กรองในเครื่องไตเทียม กรรมวิธีดังกล่าวไม่ได้ทำให้เกิดอนุภาคนาโนแต่อย่างใด

อย่างไรก็ตาม ในทางทฤษฎีอาจมีไส้กรองนาโนบางชนิด ที่ได้รับการขึ้นรูปโดยใช้วัสดุนาโนเป็นวัตถุดิบ คือเริ่มต้นจากการนำอนุภาคนาโน มาเกลี่ยหรือกระจายให้เป็นแผ่น แล้วยึดเข้าด้วยกันโดยใช้สารเคมีกลุ่มที่เรียกว่าสารเชื่อมโยงข้าม (crosslinker) จนได้ก้อนหลอม (aggregate) ของอนุภาคนาโน ที่มีความหนาแน่นไม่มากนัก คือมีรูพรุนขนาดนาโน ก็จะได้เป็นไส้กรองนาโนเช่นกัน ในกรณีนี้

อันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน ไม่ได้เกิดมาจากความเป็นนาโนของรูพรุน แต่เกิดจากความเป็นนาโนของวัตถุดิบ ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีตัวอย่างโรงงานอุตสาหกรรมชนิดนี้ในประเทศไทย

อนึ่ง มีเครื่องกรองน้ำบางรุ่น ที่ใช้ไส้กรองธรรมดา แต่เพิ่มอนุภาคเงินนาโนเคลือบหรือฝังอยู่ในเนื้อวัสดุที่เป็นไส้กรองเพื่อฆ่าเชื้อโรค ซึ่งยังไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับความเป็นอันตรายทั้งต่อผู้บริโภคและต่อผู้ปฏิบัติงานในโรงงานผลิตเครื่องกรองน้ำดังกล่าว

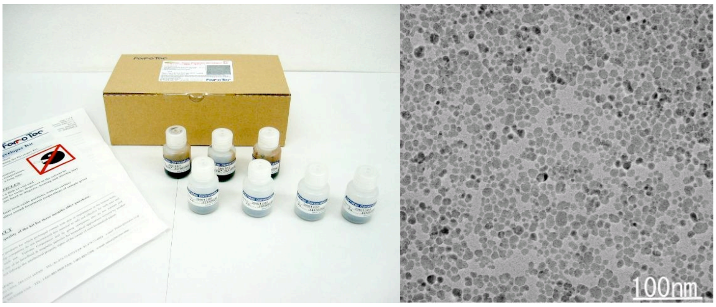
2.7. อุตสาหกรรมชุดตรวจโรค

นาโนเทคโนโลยีและวัสดุนาโน ถูกนำมาใช้ในการผลิตชุดตรวจโรค (diagnostic kit) เพื่อช่วยเพิ่มสมบัติพิเศษต่าง ๆ ดังนี้

1. **มีความจำเพาะ** (specificity) ต่อสารที่ต้องการตรวจ ไม่ว่าจะเป็นแอนติเจนของเชื้อโรคหรือฮอร์โมน HCG ในชุดตรวจตั้งครรภ์ โดยไม่ยอมให้สารอื่นรบกวน
2. **มีความไว** (sensitivity) ต่อสารที่ต้องการตรวจ เพื่อให้สามารถตรวจหาสารปริมาณน้อย ๆ ได้ และมีช่วงความเข้มข้นของสาร (dynamic range) ที่สามารถตรวจวัดได้ในช่วงกว้าง
3. **มีส่วนแสดงผลที่เห็นชัด** อ่านได้ง่าย มีช่วงเวลาที่อ่านได้นานกว่าสีจะเปลี่ยนหรือขีดจะเลื่อนหรือจางไป

ชุดตรวจโรคส่วนมากแบ่งได้เป็นส่วนที่ใส่สารตัวอย่าง (เช่นเลือด) และแสดงผล กับส่วนที่เป็นน้ำยา แต่บางชนิดก็มีตัวยาบรรจุอยู่ในชุดตรวจโรค ทำให้สามารถแสดงผลได้ทันที

ชุดพัฒนาชุดตรวจโรค เป็นผลิตภัณฑ์ที่จำหน่ายให้ห้องปฏิบัติการและโรงพยาบาลหลายแห่งที่นิยมพัฒนาชุดตรวจโรคของตนขึ้นเอง แทนที่จะซื้อผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป (ซึ่งสำหรับหลายโรคอาจจะยังไม่มีขาย) ตัวอย่างในรูปที่ 2.7 แสดงชุดพัฒนาชุดตรวจโรค ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคแม่เหล็กนาโนแขวนลอยไว้ในน้ำ เมื่อผู้ใช้ผสมสารตัวอย่างที่สงสัยเข้ากับอนุภาคแม่เหล็กนาโนซึ่งเคลือบไว้ด้วยสารที่ว่องไวในการจับตัวกับสารที่ต้องการตรวจ อนุภาคแม่เหล็กก็จะช่วยให้ความสะดวกในการแยกสารที่สงสัย ซึ่งถูกจับไว้บนอนุภาคแม่เหล็กนาโน ออกจากส่วนอื่นของสารตัวอย่าง



รูปที่ 2.7: ตัวอย่างชุดพัฒนาชุดตรวจโรค ที่ใช้อนุภาคแม่เหล็กนาโน

รูปซ้าย: ชุดคิท Ferro Tec ประกอบด้วยอนุภาคแม่เหล็กชนิดผง และชนิดแขวนลอยในน้ำ

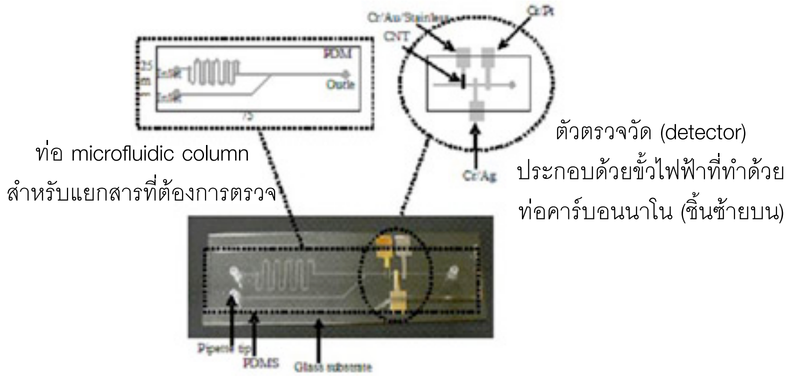
รูปขวา: Electron micrograph ของอนุภาคแม่เหล็ก แสดงขนาดว่าเป็นนาโนจริง

ที่มา: http://www.ferrotec-europe.de/en/htmls/fluid.mnpkit.php เข้าถึงเมื่อ 29 พฤษภาคม 2554

สำหรับในด้านผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปนั้น ชุดตรวจโรคที่ตรวจหลายโรคอย่างซับซ้อนได้พร้อมกัน หรือตรวจยีนเพื่อหาความเสี่ยงต่อโรคต่าง ๆ ของแต่ละบุคคล ในลักษณะห้องปฏิบัติการบนแผ่นชิป (Lab-on-a-Chip) เริ่มเป็นที่ใช้กันแพร่หลายมาหลายปีแล้ว

รูปที่ 2.8 เป็นตัวอย่างชุดตรวจโรคแบบห้องปฏิบัติการบนแผ่นชิป คือเป็นเสมือนห้องปฏิบัติการทั้งห้องอยู่บนวัสดุเล็ก ๆ เพียงแผ่นเดียวที่เรียกว่าชิป (chip) ตามตัวอย่างนี้ นาโนเทคโนโลยีและวัสดุนาโน มีบทบาทเป็นตัววัดความเข้มข้นของสารที่เราต้องการตรวจ (detector) โดยหลังจากที่ใช้เทคโนโลยีแบบไมโครฟลูอิดิกส์ (microfluidics) ให้สารหลายชนิดที่ผสมปนกันมาในสารตัวอย่าง ไหลผ่านหลอดที่เล็กและคดเคี้ยวจนสารต่าง ๆ ถูกแยกออกจากกัน ซึ่งเป็นวิธีปกติที่นักชีวเคมีใช้ในการแยกสารในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องมือที่มีขนาดใหญ่กว่ามากแล้ว สารที่ไหลมาถึงปลายท่อด้านขวามือก็จะผ่านเข้าไปในส่วนวัดความเข้มข้น ซึ่งในกรณีนี้ ใช้ท่อคาร์บอนนาโน (เห็นเป็นเส้นขีดดำทึบในรูปที่ 2.8) เป็นอิเล็กโทรด วัดสัญญาณทางไฟฟ้าเทียบกับขั้วอ้างอิง

ในโรงงานอุตสาหกรรม มีขั้นตอนในการขึ้นรูปชิป และขึ้นรูปท่อ microfluidic column ให้มีรูปร่างคดเคี้ยว ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับนาโนเทคโนโลยี กับขั้นตอนการสร้างอิเล็กโทรดด้วยท่อคาร์บอนนาโน ซึ่งในปัจจุบันใช้วิธีระเหยสารลงบนตัวชิ้นงาน (Chemical Vapor Deposition หรือ CVD) โดยทำในห้องปิดทึบ (chamber) เนื่องจากส่วนมากต้องทำภายใต้ความดันต่ำกว่าความดันของบรรยากาศ หรือทำในสุญญากาศด้วย ดังนั้นในขณะที่สังเคราะห์ท่อคาร์บอนนาโน จึงไม่น่าจะมีการสัมผัสวัสดุนาโนได้ แต่เมื่อสังเคราะห์เสร็จแล้ว ต้องมีการนำชิ้นงานออกจากห้อง และล้างทำความสะอาดเครื่องมือ



รูปที่ 2.8: ตัวอย่างชุดตรวจโรคแบบ Lab-on-a-Chip

สี่เหลี่ยมสีดำ ๆ เป็น Chip ที่รองรับท่อ microfluidic column สำหรับแยกสารที่จะตรวจ ส่วน electrochemical detector ประกอบด้วย CNT electrode กับ Ag reference electrode จะเห็นได้ว่า ส่วนที่เป็นวัสดุนาโนในกรณีนี้ มีอยู่เฉพาะตรง detector เท่านั้น

ที่มา: http://161.246.34.120/mems/research.html เข้าถึงเมื่อ 29 พฤษภาคม 2554

ซึ่งอาจมีการสัมผัสกับท่อคาร์บอนนาโนทั้งในรูปฝุ่น และในรูปแขวนลอยในของเหลวที่ใช้ทำความสะอาด

2.8. อุตสาหกรรมยา

แคปซูลนาโน (nanocapsule) ได้รับการออกแบบให้กักเก็บยาไว้ แล้วปล่อยออกมาในตำแหน่งและเวลาที่พอเหมาะ (controlled release) ซึ่งในต่างประเทศมีการสังเคราะห์แคปซูลนาโนเหล่านี้จากสารชีวโมเลกุลหลายประเภท เช่น ลิพิด (ไขมัน) โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต แต่ในประเทศไทยมีการใช้เฉพาะลิพิดเป็นหลัก เช่น ใช้ทำแคปซูลนาโนประเภทที่เรียกว่าลิโปโซม (liposome) ซึ่งเป็นเปลือกลิพิดสองชั้น (lipid bilayer shell) อุ้มของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซไว้ตรงกลาง

ในประเทศไทยมีการใช้ลิโปโซมในสูตรตำรับยาในระดับกึ่งอุตสาหกรรมโดยแพทย์ผิวหนัง ซึ่งผลิตและใช้ในสถานพยาบาลมาตั้งแต่ราวปี พ.ศ. 2534 เพื่อพาตัวยาทั้งที่ละลายน้ำ และที่ละลายในไขมัน เข้าสู่ชั้นผิวหนังที่ต้องการ โดยให้ซึมเข้าสู่กระแสโลหิตน้อยที่สุด ตัวยาส่วนใหญ่เป็นยาแก้สิว แก้ฝ้า ไปจนถึงปลูกผม และต้านไวรัสที่เป็นสาเหตุของโรคเริม เป็นต้น ในส่วนของลิโปโซมนั้น ส่วนมากเป็นชนิดมีเปลือกหลายชั้น (multilamellar) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกตั้งแต่สิบนาโนเมตร

ขึ้นไป ตามลักษณะการใช้งาน วิธีการเตรียมที่นิยมกันมีสองวิธี สำหรับลิโปโซมขนาดเล็กมาก ใช้วิธีเขย่า (hand shake) ส่วนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเกือบหนึ่งร้อยนาโนเมตรขึ้นไปจนถึงหลายร้อยนาโนเมตร ใช้วิธีระเหยแบบกลับเฟส (reverse phase evaporation) ซึ่งสามารถเตรียมลิโปโซมได้ในความเข้มข้นที่สูงมาก (ตั้งแต่ราวหนึ่งล้านเม็ดไปจนถึงราวร้อยล้านเม็ดต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ในปริมาณครั้งละหลายลิตรจนถึงหลายสิบลิตรขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องมือ

ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 มาจนถึงปัจจุบัน มีการใช้แคปซูลนาโนอีกหลายแบบ ที่พัฒนามาจากไขมันเช่นเดียวกับลิโปโซม โดยมีขนาดนาโนเช่นกัน แต่มีโครงสร้างและวิธีเตรียมแตกต่างจากลิโปโซม เช่น บางชนิดเตรียมในสารละลายเอทานอลแทนที่จะเป็นน้ำ หรือบางชนิดเตรียมจากของแข็งเป็นสารเชิงซ้อน (complex) แบบต่าง ๆ ของไขมันกับตัวยา

ในด้านความเป็นพิษนั้น ตัวแคปซูลนาโนที่ยังไม่ได้บรรจุตัวยา ไม่ว่าจะเป็นลิโปโซมหรือแคปซูลลิพิดชนิดอื่น ซึ่งโดยทั่วไปใช้วัตถุดิบเป็นไขมันจากถั่วเหลือง ทั้งนี้ยังไม่พบอาการเป็นพิษหรืออาการแพ้จากแคปซูลนาโน ดังนั้นความเป็นพิษหรืออันตรายของแคปซูลนาโนน่าจะขึ้นอยู่กับสารตัวยาหรือสารออกฤทธิ์ (active ingredient) ที่บรรจุไว้ในแคปซูลนั้น ซึ่งมีความเข้มข้นสูงมากกว่าปกติของระดับที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ ก่อนจะถูกเจือจางในขั้นตอนการผสมให้เป็นผลิตภัณฑ์ ดังนั้น หากแคปซูลนาโนเข้มข้นที่แขวนลอยอยู่ในของเหลว หกหรือกระฉอกถูกผิวหนัง ก็อาจทำให้ตัวยาซึมเข้าสู่ผิวหนังได้ในความเข้มข้นที่สูงกว่าปกติมาก ด้วยเหตุผล 3 ประการ คือ

1. ความเข้มข้นที่สูงกว่าปกติอยู่แล้ว
2. สมบัติการซึมเข้าผิวของแคปซูลนาโนที่ใช้ (เช่นลิโปโซมทำให้ตัวยาซึมเข้าผิวหนังได้ดีกว่าปกติ 5-10 เท่า)
3. ในกรณีที่ส่วนผสมมีสารช่วยการซึมเข้าผิวหนังอยู่ด้วย เช่น เอทานอล การซึมเข้าผิวหนังก็จะยิ่งเกิดได้ดีและรวดเร็วขึ้นอีก

นอกจากนี้ ยังมีการนำอนุภาคเงินนาโนเข้าไปผสมกับผ้ากอซสำหรับทำแผล (nano silver wound dressing) เพื่อฆ่าเชื้อโรค ซึ่งในขั้นตอนความปลอดภัยก็เป็นไปในทำนองเดียวกันกับอุตสาหกรรมอื่นที่ใช้อนุภาคเงินนาโน คือในขณะที่อนุภาคเงินนาโนอยู่ในของเหลว ก็ต้องป้องกันการ

หกกระฉอก ส่วนเมื่อพ่นสเปรย์ ก็ต้องป้องกันการสูดดมละอองของของเหลว โดยใช้ห้องปิดทึบ และ/หรือ หน้ากากกันฝุ่นที่เหมาะสม

2.9. อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง

ในปัจจุบันเครื่องสำอางและเวชสำอาง มีการนำอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนมาผสมในโลชั่นทาผิวกันแดด ทำให้สามารถสกัดกั้นแสงเหนือม่วงได้ในขณะที่ไม่มีสีขาวขุ่นเหมือนกับอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดใหญ่กว่า จึงนิยมใช้เป็นสารกันแดดเชิงกายภาพ (physical sunscreen) นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการกันแดดได้ดีกว่าและเมื่อใช้ทาบนใบหน้าแล้วไม่ทำให้หน้ามีสีขาวจนดูผิดปกติ

ขั้นตอนในโรงงานอุตสาหกรรม ปกติเป็นการผสม โดยเป็นการผสมครั้งเดียว ระหว่างอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนกับส่วนผสมอื่น โดยที่อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนที่เป็นวัตถุดิบ อาจอยู่ในรูปผง (powder) หรืออยู่ในรูปแขวนตะกอน (suspension) ในน้ำ ซึ่งในกรณีหลังนี้ตัวอนุภาคอาจมีการเคลือบผิวด้วยสารต่าง ๆ ตามสูตรของเครื่องสำอาง

การสัมผัสในโรงงานอุตสาหกรรม ขึ้นอยู่กับว่าวัตถุดิบเป็นอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนชนิดผง หรือที่แขวนตะกอนมาในของเหลว (น้ำ) เรียบร้อยแล้ว ถ้าหากวัตถุดิบเป็นผง ก็ทำให้มีโอกาสสัมผัสโดยการหายใจฝุ่นนาโน ถ้าวัตถุดิบอยู่ในรูปของเหลว ก็ต้องระวังการหกหรือกระฉอกในขณะป้อนเข้าในเครื่องผสม เนื่องจากของเหลวนั้นมีความเข้มข้นของวัสดุนาโนมาก และถ้าหกเลอะเสื้อผ้าหรือผ้ากันเปื้อน เมื่อแห้งอาจมีฝุ่นฟุ้งกระจายออกมาได้

นอกจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนแล้ว อนุภาคสังกะสีออกไซด์นาโน ถูกใช้งานเป็นสารกันแดดเชิงกายภาพ (physical sunscreen) ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง และในอุตสาหกรรมสี อย่างไรก็ตาม อนุภาคสังกะสีออกไซด์นาโนแตกต่างจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโน ตรงที่อนุภาคสังกะสีออกไซด์นาโนมีความเสถียรเมื่อได้รับรังสีเหนือม่วง จึงไม่มีสมบัติทำความสะอาดตัวเอง (self-cleaning) เหมือนกับอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโน แต่ข้อดีก็คือเมื่อใช้ผสมในเครื่องสำอางแล้ว ไม่ต้องห่วงว่าจะทำให้เกิดการแพ้หรืออักเสบเมื่อได้รับแสงอาทิตย์

อนุภาคนาโนอีกชนิดหนึ่งที่อาจพบได้ในเครื่องสำอาง คือ อนุภาคเงินนาโน ซึ่งมีตัวอย่างการใช้เป็นสารฆ่าเชื้อโรค เพื่อให้เก็บผลิตภัณฑ์ไว้ในสต๊อคได้นานขึ้นก่อนนำออกจำหน่าย และเพื่อให้ผู้ใช้ผลิตภัณฑ์สามารถใช้ผลิตภัณฑ์นั้นได้นานขึ้นก่อนจะมีสัญญาณแสดงการหมดอายุของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การเติบโตของจุลินทรีย์จนผลิตภัณฑ์นั้นเกิดตะกอนเป็นต้น ผู้ผลิตบางรายอาจไม่ได้จงใจเติมอนุภาคเงินนาโนลงไปในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง แต่ใช้บรรจุภัณฑ์สำหรับเครื่องสำอางที่เคลือบภายในขวดด้วยอนุภาคเงินนาโน เพื่อยืดอายุของผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าอนุภาคเงินนาโนอาจจะหลุดออกมาปะปนอยู่กับเครื่องสำอางบ้าง

สำหรับเครื่องสำอางที่เป็นผลิตภัณฑ์กลุ่มที่ใช้ไขมันในรูปของลิโปโซม หรือใช้สารเชิงซ้อนระหว่างไขมันกับสารออกฤทธิ์ เช่นใช้ solid lipid carrier (SLC) หรือ nanostructure lipid carrier (NLC) ทำหน้าที่เป็นพาหนะ (vehicle) ช่วยพาให้สารออกฤทธิ์ที่ผสมอยู่ในสูตร เข้าไปถึงชั้นของผิวหนังที่ต้องการเป็นส่วนใหญ่ โดยไม่ซึมลงลึกจนเกินไปจนถึงกระแสโลหิตซึ่งจะพาตัวยาไปทั่วร่างกาย (systemic)

2.10. อุตสาหกรรมการแพทย์

เป็นที่คาดหวังกันว่าในอนาคต นาโนเทคโนโลยีจะช่วยในการทำวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (tissue engineering) โดยการกระตุ้นให้เซลล์ของคนไข้สร้างเนื้อเยื่อที่จำเป็นต่อการปลูกถ่ายเพื่อทดแทนเนื้อเยื่อที่ถูกทำลายไป หรือกระตุ้นให้สิ่งมีชีวิตชนิดหนึ่งสร้างเนื้อเยื่อหรือแม้แต่อวัยวะของสิ่งมีชีวิตอีกชนิดหนึ่งสำหรับเป็นอะไหล่ แต่ก็อาจจะก่อให้เกิดประเด็นจริยธรรมขึ้นได้

ในปัจจุบันการใช้นาโนเทคโนโลยีหรือวัสดุนาโนในทางการแพทย์ (nanomedicine หรือการแพทย์นาโน) ที่มีใช้อยู่จริงในอุตสาหกรรมยา ซึ่งมีการใช้วัสดุนาโนเป็นตัวพา ให้ตัวยาเข้าสู่ร่างกายโดยทางผิวหนังและทางการหายใจ หรือใช้ยาในรูปของอนุภาคนาโนที่ผลิตขึ้น นอกจากนั้นการแพทย์นาโน ยังครอบคลุมถึงอุตสาหกรรมชุดตรวจโรค เช่น ใช้ในการตรวจวัดและแสดงผลเชื้อโรค ภูมิต้านโรค หรือระดับฮอร์โมนในเลือดหรือในปัสสาวะเป็นต้น

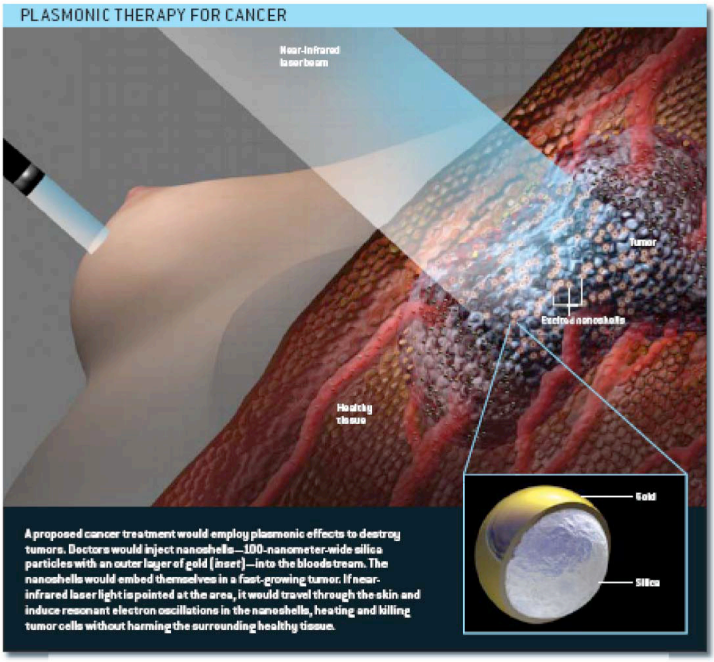
ในทางการแพทย์ เทคโนโลยีที่คล้ายกันกับเทคโนโลยีในชุดตรวจโรค อาจนำมาใช้ตรวจวินิจฉัยโรคในตัวผู้ป่วยโดยตรง ทำให้เกิดความสะดวก รวดเร็ว และลดขั้นตอนของการที่จะต้องเจาะเลือดหรือส่วนประกอบอื่นของร่างกายมาทดสอบในชุดตรวจโรค

เทคโนโลยีอีกแขนงหนึ่งของการแพทย์นาโน ที่ได้รับความสนใจและมีการวิจัยเกิดขึ้นมาก เนื่องจากมีศักยภาพในการทำประโยชน์แก่มนุษย์ได้จริง คือการใช้วัสดุนาโนในการหยั่งรู้ (sense) เซลล์ที่ผิดปกติ เซลล์มะเร็ง และในการทำลายเซลล์เหล่านี้

จากรูปที่ 2.9 อนุภาคทองนาโนชนิดที่เรียกว่าเปลือกนาโน (nanoshell) ถูกใช้ในการทำลายเซลล์มะเร็ง โดยอาศัยสมบัติของเปลือกนาโนที่ดูดแสงในช่วงคลื่นใต้แดง (near infrared) ทำให้สะสมความร้อน เกิดเป็นการเพิ่มของอุณหภูมิจนร้อนจัด ทำให้เซลล์มะเร็งตาย

การสังเคราะห์เปลือกนาโนตามรูปที่ 2.9 ไม่ได้ทำเสร็จในขั้นตอนเดียวเหมือนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะทั่วไป แต่เป็นกรรมวิธีหลายขั้นตอน (multistep process) ดังนี้

1. สังเคราะห์อนุภาคทองนาโน (nanogold) จากสารตั้งต้นคือทอง นำไปทำให้เป็นเกลือ ละลายในกรด แล้วรีดิวซ์ให้เป็นอนุภาคทองนาโนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 ถึง 2 นาโนเมตร
2. นำอนุภาคทองนาโนที่สังเคราะห์ได้ มาเกาะบนผิวของอนุภาคอโลหะนาโน (dielectric nanoparticle) เช่น สังกะสีเซเลไนด์ (zinc selenide), เฮมาไทต์ (hematite), แซฟฟาย (sapphire) หรือซิลิกา (silica) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 10 นาโนเมตรขึ้นไป จะได้แกนอโลหะซึ่งถูกหุ้มเป็นหย่อม ๆ ด้วยทอง
3. เติมทองลงไปด้วยการรีดิวซ์แบบเดิม ให้หุ้มอนุภาคนาโนอโลหะจนมิด ได้เป็นเปลือกนาโนตามต้องการ[40]



รูปที่ 2.9: เทคโนโลยี Autolase™ ใช้แสงเลเซอร์กระตุ้นเปลือกนาโนให้ฆ่ามะเร็ง

นักวิทยาศาสตร์ของศูนย์วิจัย Center for Biological and Environmental Nanotechnology ของมหาวิทยาลัย Rice ที่เมือง Houston สหรัฐอเมริกา ได้ฉีดเปลือกนาโน (อนุภาคนาโนมีแกนกลางเป็น silica หุ้มด้วยเปลือกทอง) เข้าไปในผู้ป่วยมะเร็งเต้านม เปลือกนาโนจะหลุดจากเส้นเลือดซึ่งผิดปกติ เข้าไปฝังตัวอยู่ในเนื้อเยื่อของมะเร็งเต้านม จากนั้นเมื่อฉายด้วยแสงเลเซอร์ในย่านอินฟราเรด (near IR) แสงนี้ก็จะทะลุผ่านเนื้อเยื่อปกติเข้าไปถึงและถูกดูดไว้โดยเปลือกนาโนซึ่งจะร้อนจัดจนทำลายเซลล์และเนื้อเยื่อที่อยู่รอบ ๆ **ที่มา:** http://cben.rice.edu/highlights.aspx เข้าถึงเมื่อวันที่ 29 มิถุนายน 2554

2.11. อุตสาหกรรมอาหารและบรรจุภัณฑ์

เมื่อราวสองทศวรรษก่อน นักวิทยาศาสตร์รู้จักห่อหุ้มกลิ่นรสธรรมชาติไว้ในอนุภาคนาโน เช่น ลิโปโซม เพื่อให้กลิ่นรสอยู่ในอาหารได้นานขึ้น[41] ปัจจุบันบริษัทอาหารขนาดใหญ่ในต่างประเทศกำลังศึกษาการบรรจุสีกับกลิ่นรสต่าง ๆ ไว้ในอนุภาคนาโน แล้วให้อนุภาคนาโนปล่อยสารที่เก็บไว้ออกมาตามที่กำหนด (อาจจะกำหนดอยู่ในรูปของคลื่นไมโครเวฟความถี่ต่าง ๆ กัน) ซึ่งเมื่อพัฒนาสำเร็จเรียบร้อยก็จะได้เครื่องดื่มที่ผู้บริโภคสามารถเลือกสีกลิ่นรสได้ตามต้องการ[42]

รูปที่ 2.10: ภาชนะพลาสติกสำหรับใส่อาหาร ซึ่งผสมอนุภาคเงินนาโนไว้ในเนื้อวัสดุ

ที่มา: http://www.kinetic-cookware.com/product.asp?cat=59&subcat=113 เข้าถึงเมื่อวันที่ 21 สิงหาคม 2554

ขั้นตอนของการผลิต ได้แก่การเตรียมอนุภาคลิโปโซม หรืออนุภาคไขมันเชิงซ้อนชนิดอื่น ที่ใช้ในการกักเก็บกลิ่นรส จากนั้นจึงนำไปผสมคลุกเคล้ากับเครื่องปรุงอื่นๆ ที่อาจจะต้องทำให้สุกเสียก่อน โดยไม่สามารถใช้ความร้อนในการปรุงหลังจากการผสมได้ เนื่องจากจะทำให้ลิโปโซมหลอมละลาย หรือกลิ่นรสรั่วออกมาจากอนุภาคไขมันที่ผสมไว้

สำหรับบรรจุภัณฑ์ที่เป็นวัสดุผสมนาโน (nanocomposite) อาจช่วยยืดอายุของอาหารด้วยการควบคุมการแพร่ของก๊าซแต่ละชนิด และอาจจะเปลี่ยนสี เพื่อเตือนผู้บริโภคว่าอาหารนี้ถูกปนเปื้อนด้วยน้ำพิษหรือเชื้อโรค เป็นต้น

รูปที่ 2.10 แสดงภาชนะพลาสติก ที่มีอนุภาคเงินนาโนฝังอยู่ในเนื้อพลาสติก เพื่อฆ่าเชื้อโรคโดยเฉพาะอย่างยิ่งเชื้อรา นอกจากนั้น อนุภาคเงินนาโนยังใช้ผสมในเยื่อกระดาษ และไคโตซาน (chitosan) เพื่อผลิตกระดาษห่ออาหารที่ฆ่าเชื้อโรคได้ในตัว (biocidal food wrapper)[43]

ในการผลิตภาชนะเหล่านี้ จำเป็นต้องมีขั้นตอนการผสมอนุภาคเงินนาโน เข้ากับเนื้อของภาชนะ (matrix) ไม่ว่าจะเป็นพอลิโพรพิลีน (polypropylene), เยื่อกระดาษ หรือไคโตซาน (chitosan) ก่อนจะขึ้นรูปให้เป็นกล่อง หรือเป็นแผ่นเคลือบหรือฝังไว้ด้วยอนุภาคเงินนาโนที่ใช้เป็นวัตถุดิบ ก็ต้องมีการเปิดภาชนะบรรจุ การตรวจควบคุมคุณภาพของวัตถุดิบ และการกำจัดถังบรรจุวัตถุดิบที่ใช้หมดแล้ว อย่างไรก็ตามหลังจากขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แล้ว อนุภาคเงินนาโน ถูกออกแบบให้รั่วออกมาจากพอลิเมอร์ที่อุ้มมันไว้อย่างช้าๆ เพื่อให้ฆ่าเชื้อโรคได้เป็นระยะเวลานาน

2.12. อุตสาหกรรมเครื่องใช้ในบ้าน

เครื่องใช้ในบ้าน เป็นกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่วัสดุนาโนมีบทบาทเกี่ยวข้องด้วย เช่น การใช้อนุภาคเงินนาโนเพื่อช่วยในการฆ่าเชื้อโรคที่สัมผัสกับพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ เช่น ตู้เย็นที่เคลือบภายในด้วยอนุภาคเงินนาโน เครื่องดูดฝุ่นนาโน เครื่องปรับอากาศนาโนซึ่งใช้ไส้กรองที่เคลือบด้วยอนุภาคเงินนาโน เพื่อป้องกันเชื้อราเข้าไปเจริญเติบโต และเครื่องซักผ้านาโน ซึ่งใช้อนุภาคเงินนาโนฆ่าเชื้อโรคในถังซัก (ในประเทศไทย มีการผลิตผงซักฟอกผสมอนุภาคเงินนาโน เพื่อประโยชน์ในการฆ่าเชื้อโรคและทำให้ผ้าที่ซักเวลากลางคืนไม่มีกลิ่นอับ)

2.13. อุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่ม

ในปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์ในท้องตลาดหลายรายการ ที่ผลิตด้วยนาโนเทคโนโลยี หรือใช้วัสดุนาโนเป็นส่วนประกอบ เช่น ผ้าเคลือบสารกันน้ำ กันเปื้อน กันกลิ่น หรือฆ่า เชื้อโรค ผ้ากันลมกันน้ำที่ทำจากเส้นใยนาโน (nanofibers) ผ้าฝ้ายที่ปรับผิวของเส้นใยเพื่อกันยับ และผ้าผสมอนุภาคตัวนำไฟฟ้าทำให้ไม่เก็บประจุไฟฟ้าสถิต ในอนาคตอาจจะมีสิ่งทอที่ทำหน้าที่ทางอิเล็กทรอนิคส์ เช่น วัดอุณหภูมิ วัดการเต้นของหัวใจผู้สวมใส่ ฯลฯ ที่เรียกว่า “เสื้อผ้าฉลาด” (smart clothes)

เสื้อนาโนในประเทศไทยถือกำเนิดขึ้นประมาณปี พ.ศ. 2548 จากงานวิจัยในสถาบันโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีสัญญาความร่วมมือ ส่งน้ำยาเข้มข้นไปให้บริษัทเอกชนใช้ในกรรมวิธีผลิตเสื้อ ได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ประชาชนรู้จักกันในรูปแบบของเสื้อนาโนสีเหลือง (รูปที่ 2.11 ซ้าย)[44]

ในปัจจุบันเครื่องนุ่งห่มที่ประกอบด้วยวัสดุนาโนจริง ก็มักผลิตโดยใช้วิธีเคลือบด้วยวัสดุนาโน เช่น การเคลือบสิ่งทอด้วยน้ำยาเงินนาโนเข้มข้น (วัสดุนาโนไม่ได้ฝังตัวอยู่ภายในโครงสร้างของเส้นใยหรือของสิ่งทอ) หรือสังเคราะห์วัสดุนาโนให้ทั้งเคลือบและติดอยู่ (trapped) ในเส้นใย เพื่อให้มีสมบัติกันน้ำ หรือ ฆ่าเชื้อโรคได้เป็นระยะเวลานาน

ในต่างประเทศ มีตัวอย่างการใช้อนุภาคเงินนาโนผสมลงไปในเนื้อของเส้นใย ทำให้ได้เส้นใยนาโน ชนิดที่มีความคงทนของสมบัติการฆ่าเชื่อโรค[45] เส้นใยดังกล่าว สามารถนำมาทอเป็นผ้า เพื่อ

รูปที่ 2.11: ตัวอย่างเสื้อนาโนชนิดต่างๆ

รูปซ้าย: เสื้อเหลืองเคลือบวัสดุนาโน พัฒนาขึ้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย **ที่มา**: http://www.thainame.net/project/plamsiam/test1.html; **รูปกลาง**: เสื้อนาโนของมหาวิทยาลัยมหิดล **ที่มา**: http://nanotech.sc.mahidol.ac.th/; **รูปขวา**: เสื้อผ้าที่เสริมความแข็งแรงด้วยท่อคาร์บอนนาโน **ที่มา**: สิทธิบัตรสหรัฐอเมริกาหมายเลข 7,354,877 เข้าถึงเมื่อวันที่ 16 มิถุนายน 2554

ทำเป็นเครื่องแต่งกาย หรือนำไปผลิตเป็นสินค้าอื่น เช่น นำเส้นใยดังกล่าวไปทอกับเส้นผม ได้เป็นวิกผม (ผมปลอม) ที่มีสมบัติฆ่าเชื้อโรคได้[46]

นอกจากการเคลือบเส้นใยหรือสิ่งทอด้วยวัสดุนาโนแล้ว ท่อคาร์บอนนาโนก็สามารถนำไปเสริมความแข็งแรงให้กับเนื้อผ้าได้ โดยเข้ากรรมวิธีในขณะที่ขึ้นรูปผ้า ไม่ว่าจะด้วยการทอหรือไม่ (woven or non-woven) โดยแสดงไว้ในรูปที่ 2.11 (ขวา) ผ้าที่ได้สามารถนำไปตัดเย็บเป็นเสื้อผ้าหรือนำไปทำเป็นของใช้อื่นๆ เช่น เกราะกันกระสุน ร่มชูชีพ เรือยาง หรือแม้แต่ใช้เสริมความแข็งแรงให้ดาวเทียม ในกรณีที่ใช้ท่อคาร์บอนนาโนที่เสริมแต่งคุณลักษณะพิเศษ เนื้อผ้าที่ได้ก็จะมีสมบัติพิเศษตามไปด้วย เช่น ถ้าใช้ท่อคาร์บอนนาโนที่เป็นฉนวนไฟฟ้า สลับชั้นกับท่อคาร์บอนนาโนที่เป็นตัวนำไฟฟ้า ก็จะได้เนื้อผ้าที่สามารถป้องกันไม่ให้ผู้สวมใส่ถูกไฟฟ้าดูด หรือถูกรบกวนจากสนามไฟฟ้า (ท่อคาร์บอนนาโนทำหน้าที่เป็นกรงของฟาราเดย์หรือ Faraday Cage) หรือถ้าใช้ท่อคาร์บอนนาโนที่นำความร้อน ก็จะได้เนื้อผ้านำความร้อน ซึ่งเมื่อนำไปต่อเชื่อมกับเครื่องปรับอากาศหรือกับแหล่งความร้อน ก็จะได้เสื้อผ้าที่ป้องกันผู้สวมใส่จากสภาวะร้อนจัดหรือเย็นจัดเป็นต้น

2.14. อุตสาหกรรมเครื่องกีฬา

ในปัจจุบันเริ่มมีการใช้นาโนเทคโนโลยีในอุตสาหกรรมเครื่องกีฬา เช่น ไขสำหรับทาใต้พื้นสกี (high-performance ski wax) ที่ผสมด้วยวัสดุนาโนสำหรับเคลือบพื้นล่างของสกีที่สัมผัสกับหิมะให้ไถลได้รวดเร็วขึ้น ไม้เทนนิสที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนให้มีความแข็งแรงมากขึ้น และลูกเทนนิสที่เคลือบภายในแกนด้วยวัสดุดินเหนียวผสมพอลิเมอร์นาโน (clay polymer nanocomposite) เพื่อให้มีอายุการใช้งานยาวนานกว่าลูกเทนนิสปกติ เป็นต้น

สำหรับไม้เทนนิสที่ผสมท่อคาร์บอนนาโน อาจขึ้นรูปเป็นแท่งโดยตรง หรือผลิตเป็นผ้าเสริมด้วยท่อคาร์บอนนาโน เสียก่อน แล้วจึงนำผ้ามาซ้อนกันเป็นชั้น ๆ หรือม้วนทับกันหลาย ๆ ชั้น แล้วจึงนำไปหล่อขึ้นรูปด้วยพอลิเมอร์ที่เรียกว่า เรซิน (resin) ให้เป็นแท่งหรือเป็นรูปร่างตามต้องการ

ไขสำหรับทาใต้พื้นสกีที่ใช้นาโนเทคโนโลยี (nano-CFC technology) นั้น มีสิทธิบัตรประเทศสหรัฐอเมริกาที่อ้างผลการทดลองว่าเมื่อเคลือบพื้นล่างของแผ่นทดสอบด้วยวัสดุนาโนเบส (nano base) แล้วจะทำให้แผ่นทดสอบสามารถไถลลงเนินไปบนพื้นหิมะได้เร็วกว่าแผ่นที่ใช้เบสแบบธรรมดาช่วยกันน้ำ และทำให้ไถลได้คล่องกว่าปกติ[47]

ในวงการกีฬาว่ายน้ำ ก็มีการใช้ผ้านาโนที่ไม่เปียกน้ำเนื่องจากถูกปกคลุมด้วยตุ่มเล็ก ๆ ที่มีขนาดนาโนที่มีสมบัติเดียวกับผิวของใบบัว ตัดเย็บเป็นชุดว่ายน้ำ ทำให้ชุดว่ายน้ำแห้งเร็วหรือไม่เปียกน้ำและเปรอะเปื้อนยาก [48] นอกจากนี้ผู้ผลิตยังคาดว่าน่าจะทำให้ว่ายน้ำได้เร็วขึ้นและแห้งเร็วมากเมื่อขึ้นจากน้ำด้วย[49]

3. ความเป็นอันตรายของวัสดุนาโน

อันตราย (hazard) จากวัสดุนาโนไม่ได้เกิดขึ้นเสมอไป อันตรายจะเกิดขึ้นเฉพาะเมื่อไม่มีการป้องกันที่ถูกต้อง แต่หากมีการปฏิบัติตามมาตรการป้องกันที่ถูกต้องอย่างเพียงพอ ดังเช่นการควบคุมที่จะกล่าวต่อไป อันตรายดังกล่าวก็อาจจะไม่เกิดขึ้นเลย ซึ่งถือเป็นเป้าประสงค์ (outcome) ของแนวปฏิบัติเบื้องต้นด้านความปลอดภัยนาโน

การป้องกันอันตรายจากวัสดุนาโน ใช้หลักการเดียวกันกับการป้องกันอันตรายจากสารเคมี โดยแบ่งเป็น 3 กิจกรรม ได้แก่

1. **การประเมินอันตราย** (hazard assessment) ของสารเคมีที่เกี่ยวข้องกับการทำงาน อาจแบ่งเป็น
    - **อันตรายทางกายภาพ** (physical hazard) ประเมินจากความไวในการทำปฏิกิริยาเคมี เช่น การเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอย่างรุนแรงกับน้ำ การสลายตัว การปะทุ การระเบิด และอันตรายจากการติดไฟ (flammability)
    - **อันตรายต่อสุขภาพ** (health hazard) เช่น การระคายเคือง การเจ็บป่วยเฉียบพลัน และผลต่อสุขภาพในระยะยาว
    - **อันตรายต่อสิ่งแวดล้อม** (environmental hazard) เช่น การสะสมของสารเคมีในเนื้อเยื่อหรืออวัยวะของสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ตลอดห่วงโซ่อาหาร

2. **การสื่อสารอันตราย** (hazard communication) เพื่อให้ผู้มีส่วนได้เสีย โดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้ปฏิบัติงานได้ทราบและเข้าใจความเป็นอันตรายนั้น เช่น การพัฒนาข้อมูลความปลอดภัยสารเคมี (safety data sheet, SDS) และการพัฒนาแนวปฏิบัติเบื้องต้นด้านความปลอดภัยนาโนสำหรับภาคอุตสาหกรรม

3. **การฝึกอบรมพนักงาน** (employee training) ให้สามารถปฏิบัติงานกับสารเคมีอันตรายได้อย่างปลอดภัย โดยใช้เครื่องมือสื่อสารที่พัฒนาขึ้นในขั้นตอนที่ 2

วัสดุนาโนที่นักวิทยาศาสตร์สามารถสรุปข้อมูลความเป็นอันตรายต่อสุขภาพได้ชัดเจนที่สุดในปัจจุบันคือท่อคาร์บอนนาโน รองลงมาคืออนุภาคไทเทเนียมนาโน แต่สำหรับวัสดุนาโนอื่น ๆ การประเมินทำได้เพียงในเชิงคุณภาพ (qualitative) เพราะขาดตัวเลขที่เกี่ยวกับความปลอดภัยที่จำเป็นและเพียงพอต่อการวิเคราะห์ความเสี่ยง หรือไม่เช่นนั้น ก็มีการค้นพบที่ขัดแย้งกันเองจนยังหาข้อสรุปไม่ได้

3.1. อันตรายจากการติดไฟและระเบิด

เป็นที่ทราบกันดี ถึงความเสี่ยงของฝุ่นในโรงงานอุตสาหกรรมแป้ง และฝุ่นในเหมืองถ่านหินที่จะเกิดระเบิดขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวต่อมวลของฝุ่นที่มีสูง ทำให้มีความว่องไวในการรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศมากเป็นพิเศษ และจะระเบิดเมื่อถูกจุดชนวนด้วยประกายไฟฟ้าสถิต หรือการขัดสีกัน หรือประกายไฟฟ้าจากมอเตอร์หรือสวิทช์ หรือแม้แต่จากการเคลื่อนที่ผ่านชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่มีอุณหภูมิสูง

ในกรณีที่ฝุ่นเป็นอนุภาคละเอียดลงไปถึงระดับนาโน พื้นที่ผิวต่อมวลยิ่งมีค่ามากขึ้น ทำให้มีความเป็นไปได้ของการระเบิดมากขึ้น ยิ่งไปกว่านั้น เนื่องจากอนุภาคนาโนกระเจิง (scatter) แสงค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่านาโน เราจึงอาจมองแทบไม่เห็นว่ามีฝุ่นนาโนกระจายอยู่ในอากาศ แม้จะมีความเข้มข้นมากพอที่จะเกิดการระเบิดได้

สารหลายอย่างที่ตามธรรมดาไม่ติดไฟ แต่เมื่อเป็นวัสดุนาโนกลับติดไฟและระเบิดได้ด้วย ตัวอย่างเช่น ซิลิกอน มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1,414 องศาเซลเซียส และมีจุดเดือดที่อุณหภูมิ 3,265 องศาเซลเซียส จึงติดไฟได้ยาก แต่ พอรัส ซิลิกอน (porous silicon) ซึ่งมีรูพรุนขนาดนาโน ทำให้มีพื้นที่ผิวถึงประมาณ 500 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สามารถระเบิดอย่างรุนแรงได้เมื่อมีประกายไฟ

วัสดุนาโนบางชนิด เช่น อนุภาคสังกะสีนาโน ติดไฟได้อย่างรวดเร็วและรุนแรง คล้ายกับอนุภาคสังกะสีที่ไม่ใช่นาโน

3.2. อันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมที่เป็นผลมาจากขนาดนาโน

ปัจจัยที่ส่งผลต่อความเป็นอันตรายของวัสดุนาโน แบ่งได้เป็น 5 ประการ ได้แก่

1. ความสามารถในการเข้าถึงบริเวณที่วัสดุขนาดปกติไม่สามารถเข้าถึงได้ เนื่องจากขนาดที่เล็กมากของอนุภาคนาโน อาจทำให้สามารถผ่านจากเส้นเลือดเข้าไปถึงเนื้อสมองหรืออวัยวะสำคัญอื่นได้
2. ความไวในการทำปฏิกิริยาเคมี เนื่องมาจากพื้นที่ผิวซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างมากของวัสดุนาโนเมื่อเทียบกับวัสดุขนาดปกติ อาจเพิ่มความเป็นพิษของวัสดุนั้น
3. ความสามารถในการละลายน้ำของวัสดุนาโนบางชนิด ทำให้วัตถุนั้นเข้าถึงเซลล์ได้มากขึ้น และเป็นอันตรายต่อร่างกายได้มากขึ้นด้วย ในขณะที่การไม่ละลายน้ำของวัสดุนาโนบางชนิด ทำให้เมื่อรับเข้าไปในร่างกาย เช่นโดยทางการหายใจแล้ว ร่างกายไม่สามารถกำจัดวัสดุนาโนนั้นออกมาได้โดยง่าย ทำให้เป็นอันตรายต่อร่างกายได้มากขึ้นเช่นกัน
4. สมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่เปลี่ยนไปของวัสดุนาโน มีความเป็นไปได้ว่าอาจทำให้เป็นพิษมากขึ้น
5. รูปทรงคล้ายกับวัสดุที่เป็นพิษ เช่น ท่อคาร์บอนนาโน เส้นใยนาโน และลวดนาโน มีรูปทรงคล้ายแร่ใยหิน (asbestos) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของมะเร็งเยื่อหุ้มปอด จึงมีการวิจัยว่าวัสดุนาโนเหล่านี้จะทำให้เกิดมะเร็งเยื่อหุ้มปอดเช่นเดียวกับแร่ใยหินหรือไม่[50]

นักวิทยาศาสตร์ทั่วโลก กำลังพยายามหาวิธีเชื่อมโยงโครงสร้างของวัสดุนาโน เข้ากับอันตรายของวัสดุนั้น (quantitative structure activity relationship หรือ QSAR) ด้วยความหวังว่า เมื่อพบวัสดุนาโนชนิดใหม่ เพียงแต่หาตัวแปรด้านโครงสร้างไม่กี่ตัว และใส่ข้อมูลดังกล่าวในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ก็จะสามารถทำนายความเป็นอันตรายของวัสดุนาโนนั้นๆ ออกมาได้ทันที ตัวแปรด้านโครงสร้างดังกล่าวเรียกว่า minimum required characteristics (MRC) ซึ่งในปัจจุบันก็ยังไม่เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่าตัวแปรเหล่านั้นคือสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีอะไรบ้าง

อันตรายของวัสดุนาโนชนิดต่าง ๆ สรุปได้ดังนี้

3.2.1. อันตรายของฟูลเลอรีนกลุ่มบัคกีบอลล์[51]

บักมินสเตอร์ฟูลเลอรีน (buckminsterfullerene หรือ C_{60}) เป็นสารที่ถูกค้นพบเป็นชนิดแรกและถูกศึกษามากที่สุดในตระกูลฟูลเลอรีน โดยทั่วไปถือกันว่าไม่มีอันตรายแบบเฉียบพลันต่อสิ่งมีชีวิต

อย่างไรก็ตาม มีการศึกษาความเป็นอันตรายของ C_{60} โดยการสร้างแบบจำลองทางทฤษฎี พบว่า C_{60} ที่ละลายน้ำสามารถจับกับดีเอนเอสายเดี่ยวได้ นอกจากนี้ C_{60} สามารถเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างดีเอนเอสายคู่ ทำให้เสถียรภาพทางโครงสร้างของดีเอนเอลดลง และกิจกรรมตามปกติอาจถูกขัดขวางได้[52] แต่ขณะนี้ยังไม่มีหลักฐานจากการทดลอง หรือจากกรณีศึกษาในประเด็นนี้

สำหรับอันตรายต่อสภาวะแวดล้อม ถึงแม้การศึกษาส่วนมากจะไม่พบความเป็นพิษ แต่มีรายงานผลการวิจัยจากนักวิทยาศาสตร์ที่มีชื่อเสียงว่า C_{60} ที่เติมลงไปในน้ำที่ความเข้มข้น 0.5 ส่วนในล้านส่วน อาจจะทำลายสมองและทำให้ตับอักเสบ[53] ในปลา largemouth bass (ปลาตระกูลเดียวกับปลากะพงแต่ไม่มีในประเทศไทย)

3.2.2. อันตรายของท่อคาร์บอนนาโน

ท่อคาร์บอนนาโน จัดเป็นวัสดุนาโนกลุ่มที่น่าจะมีความเป็นอันตรายมากกว่าวัสดุนาโนชนิดอื่น ๆ เนื่องจากมีรูปทรงเป็นแท่งยาว (high aspect ratio) จึงมีโอกาสติดอยู่ในปอดและทำอันตรายต่อเซลล์ได้มากกว่าอนุภาคนาโนอื่น โดยอาจจะทำให้เกิดมะเร็งเยื่อหุ้มปอด (mesothelioma) ทั้งนี้ยังไม่มีข้อสรุปเกี่ยวกับอันตรายที่ชัดเจน จึงจำเป็นต้องเก็บข้อมูลสุขภาพระยะยาวของผู้ที่สัมผัสกับท่อคาร์บอนนาโนเป็นประจำ

ความเป็นอันตรายของท่อคาร์บอนนาโน ได้รับการจัดสรรทุนการวิจัยอย่างค่อนข้างมากในทศวรรษที่ผ่านมา จนปัจจุบันเริ่มจะมีตัวเลขที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของท่อคาร์บอนนาโน เช่น เมื่อเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2553 สถาบันอาชีวอนามัยและความปลอดภัยแห่งสหรัฐอเมริกา (NIOSH) ได้ตีพิมพ์ร่างเอกสารเพื่อขอความเห็นจากภาคส่วนต่าง ๆ เรียกว่า NIOSH Current Intelligence Bulletin: Occupational Exposure to Carbon Nanotubes and Nanofibers[54] โดยแนะนำ

ระดับ Exposure Limit ไว้ที่ 7 μg/m^3 (ปัจจุบันมีแนวโน้มว่า NIOSH อาจจะลดตัวเลขนี้ลงมาเหลือประมาณ 1 μg/m^3 เนื่องจากอุปกรณ์วัดสมัยใหม่สามารถวัดความเข้มข้นลงไปได้ถึงระดับนี้) แต่ที่ระดับความเข้มข้นนี้ ความเสี่ยงของการเกิดพังผืดของถุงลมในปอด (pulmonary fibrosis) ยังคงสูงถึง 1 ใน 1,000 ตลอดอายุการทำงาน[55]

อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมมีทั้งการใช้ท่อคาร์บอนนาโนซึ่งผลิตขึ้นจากไอของคาร์บอนในเครื่องระเหยเป็นไอและสะสมบนชิ้นงาน (Chemical Vapor Deposition, CVD) และการใช้ท่อคาร์บอนนาโน ที่แขวนลอยมาในของเหลว ดังนั้น ค่า exposure limit ดังกล่าว ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นในอากาศ จึงใช้ได้เฉพาะขั้นตอนการผลิตจากท่อคาร์บอนนาโนชนิดผง ส่วนในขั้นตอนการผลิตที่ใช้ท่อคาร์บอนนาโนที่แขวนลอยในของเหลว โอกาสสัมผัสจะอยู่ในรูปของการทำของเหลวหกกระฉอก และการทำความสะอาดเครื่องมือไม่เรียบร้อย และของเหลวที่แห้งอาจเป็นแหล่งของฝุ่นที่มาจากท่อคาร์บอนนาโนได้

ส่วนองค์การพัฒนาพลังงานใหม่และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (NEDO) ของประเทศญี่ปุ่นได้ทำการศึกษาตั้งแต่ พ.ศ. 2549 จนถึง 2553 และกำหนดค่าระดับที่ยอมรับได้ (Acceptable Exposure) ของท่อคาร์บอนนาโนชนิดหลายชั้น (MWCNT) และของเส้นใยนาโน (CNF) เท่ากับ 3 μg/kg/day[56]

3.2.3. อันตรายของคาร์บอนแบล็ค

คาร์บอนแบล็คส่วนใหญ่เป็นอนุภาคนาโน และส่วนน้อยเป็นส่วนผสมระหว่างอนุภาคนาโนกับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่านาโนเล็กน้อย โดยชื่อของมันไม่มีคำว่า “นาโน” อยู่ด้วย จึงทำให้สาธารณชนไม่ทราบว่ามันเป็นอนุภาคนาโน

คาร์บอนแบล็คถูกจัดเป็นวัสดุที่มีอันตรายค่อนข้างน้อย โดยก่อให้เกิดความระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ (non-specific respiratory irritant) และการอักเสบของทางเดินหายใจ ซึ่งสันนิษฐานว่าเกี่ยวข้องกับพื้นที่ผิวของอนุภาคนาโน และหากสูดดมเข้าไปมาก จะทำลายระบบทางเดินหายใจได้ (lung overload) ทำให้เกิดเป็นการอักเสบอย่างรุนแรง (ในหนูก็พบการทำลายทางเดินหายใจเช่นกัน) อนึ่ง สำนักงานวิจัยมะเร็งระหว่างประเทศ (IARC) องค์การอนามัยโลก จัดคาร์บอนแบล็คว่าอาจเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ได้ หรือ “possibly carcinogenic to humans”

3.2.4. อันตรายของอนุภาคเงินนาโน

เป็นที่ทราบกันมานานแล้วว่า การรับประทานเงินนาโนที่แขวนลอยในน้ำ (colloidal silver) ทำให้เกิดภาวะอาไจเรีย (argyria)[57] ซึ่งเกิดจากการตกค้างของอนุภาคเงินนาโนในส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย จนผิวของผู้ป่วยเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน เทา และเกิดความเป็นพิษต่อตับด้วย

ในการทดลองกับสิ่งมีชีวิตไม่ว่าในพืชหรือสัตว์ พบว่าอนุภาคเงินนาโน มีความเป็นอันตรายต่อเซลล์ของแบคทีเรีย เห็ดรา พืช สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง สัตว์มีกระดูกสันหลัง ตลอดจนถึงคน โดยกลไกของการเกิดพิษ คือการทำลายดีเอ็นเอ การสร้างความเครียดจากการออกซิเดชัน (oxidative stress) และการก่อให้เกิดมะเร็ง

ในปัจจุบันมีรายงานผลการวิจัยทางวิทยาศาสตร์ซึ่งได้รับการตีพิมพ์แล้วกว่าหนึ่งร้อยเรื่อง ที่แสดงความเป็นพิษของอนุภาคเงินนาโนต่อพืช ปลา แมลง ฯลฯ ไปจนถึงจุลชีพ แต่ก็มีผู้เขียนบทความแสดงความคาดคะเนว่าจะไม่เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมมาก เนื่องจากอนุภาคเงินนาโนที่ปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม เช่น จากอนุภาคเงินนาโนที่เคลือบไว้ในถังซักของเครื่องซักผ้าบางรุ่น หรือจากผงซักฟอกผสมอนุภาคเงินนาโน จะจับตัวกับสารอินทรีย์ต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับอนุมูลของกำมะถันที่มีอยู่ในธรรมชาติ กลายเป็นเงินซัลไฟด์ซึ่งไม่ละลายน้ำ จึงตกตะกอนทำให้มีความเป็นอันตรายน้อย[58] อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับขีดความสามารถดูดซับอนุภาคเงินนาโนในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ

3.2.5. อันตรายของอนุภาคทองนาโน

เป็นที่ทราบกันดีว่าทองคำเป็นโลหะที่มีความเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยาเคมี และไม่เป็นพิษต่อมนุษย์ จึงนิยมใช้ทำเป็นเครื่องประดับ โดยไม่ทำให้เกิดอาการผิวหนังอักเสบ

ในทางการแพทย์มีการใช้ทองเป็นส่วนผสมของยาอายุวัฒนะและยารักษาโรคประสาทมาหลายพันปีแล้วทั้งในจีนโบราณและอินเดียโบราณ ในปลายคริสต์ศตวรรษที่ 19 มีการใช้โลหะทองและสารประกอบของทอง (โดยเฉพาะอย่างยิ่งยาในกลุ่ม gold thiolates ซึ่งอนุมูลของทองประจุบวก เข้าแทนที่ไฮโดรเจนในหมู่ซัลฟ์ไฮดริล) ในการรักษาโรคปวดข้อชนิดต่าง ๆ ถึงแม้โลหะทองจะมีความเป็นพิษน้อยแต่อนุมูลของทองก็มีฤทธิ์ทำลายไต จึงได้มีการค้นคิดสารประกอบของทองที่เป็นยาออกมา

อีกหลายชนิด ที่มีความเป็นพิษต่อไตน้อยลง ในระยะหลังๆ มีการทดลองใช้สารประกอบของทองในการรักษาโรคหลายชนิด ตั้งแต่มาเลเรียจนถึงเอดส์

ผลการศึกษาความเป็นพิษของอนุภาคทองนาโนในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ยังไม่สามารถหาข้อสรุปได้ว่าเป็นพิษหรือไม่ เนื่องจากเป็นเรื่องค่อนข้างใหม่ เช่นเดียวกับการศึกษาอนุภาคนาโนส่วนมาก ซึ่งมีทั้งรายงานผลการวิจัยที่พบความเป็นพิษในสภาวะหนึ่ง แต่ไม่พบความเป็นพิษในอีกสภาวะหนึ่ง จากรายงานผลการทดลองนอกกาย *(in vitro)* หลายฉบับ สรุปว่าอนุภาคทองนาโนไม่เป็นอันตรายต่อเซลล์หลายชนิดที่มีต้นกำเนิดจากเซลล์ของมนุษย์ เช่น human leukemia cell line หรือ immune system cell line หรือ dendritic cells ไม่ว่าอนุภาคทองนาโนนั้นจะเคลือบผิวนอกไว้ด้วยสารชนิดใดก็ตาม เช่น citrate, cysteine, glucose, biotin, หรือ cetyltrimethyl ammonium bromide เป็นต้น และไม่ว่าอนุภาคดังกล่าวจะเข้าไปในเซลล์หรือไม่

ในขณะเดียวกัน ก็มีรายงานการวิจัยอีกหลายฉบับที่สรุปว่า อนุภาคทองนาโนเป็นพิษต่อเซลล์[59] ในการทดลองเติมอนุภาคทองนาโนลงไปในเซลล์ชนิด HeLa cervix carcinoma epithelial cells, SK-Mel-28 melanoma cells, L929 mouse fibroblasts และ mouse monocytic macrophage cells ที่เพาะเลี้ยงไว้ นักวิทยาศาสตร์พบว่า เซลล์บวม และหลุดจากพื้นผิวที่มันเคยเกาะอยู่ หรืออาจพบว่าเยื่อหุ้มเซลล์โป่งออกมาเป็นถุงเล็กๆ และหลุดออกมาจากเซลล์ก่อนที่เซลล์จะตาย[60]

ความเป็นพิษของอนุภาคทองนาโนมีความเกี่ยวข้องกับสมบัติทางกายภาพหลายประการ เช่น ประจุไฟฟ้าบนผิวนอกของอนุภาค (ประจุลบไม่เป็นพิษ ประจุบวกเป็นพิษเนื่องจากทำให้มีปฏิสัมพันธ์บางประการกับผิวของเซลล์ซึ่งมักมีประจุลบได้) ขนาดของอนุภาค (เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.4 นาโนเมตร เป็นพิษ แต่ที่ใหญ่กว่าไม่เป็นพิษ) และสภาวะอื่นๆ ในการทดสอบ เป็นต้น

ในปัจจุบันการศึกษาความเป็นอันตรายของทองนาโน เน้นที่การฉีดเข้าไปในร่างกาย เนื่องจากการใช้งานของทองนาโนแทบทั้งหมดเป็นการใช้ทางการแพทย์ ทั้งการวินิจฉัยและการรักษา แต่สภาวะในร่างกายมีความซับซ้อนกว่าในเซลล์ที่เพาะเลี้ยงไว้มาก ผลการทดลองที่น่าเชื่อถือมากกว่าจึงมาจากการทดลองในสัตว์ทดลอง (*in vivo*) แต่การแปลความหมายของผลการทดลองก็ซับซ้อนมากขึ้นไปด้วย เป็นต้นว่า อนุภาคทองนาโนขนาดเล็ก (เส้นผ่าศูนย์กลาง 3 และ 5 นาโนเมตร) และขนาดใหญ่ (เส้นผ่าศูนย์กลาง 50 และ 100 นาโนเมตร) ไม่แสดงความเป็นพิษในขนาดที่ใช้ แต่อนุภาคทองนาโนขนาดกลาง (เส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 8 ถึง 37 นาโนเมตร) สามารถฆ่าหนูทดลองได้[61] ทั้งนี้ยัง

ไม่มีคำอธิบายว่าเพราะเหตุใดอนุภาคทองนาโนขนาดกลางจึงมีความเป็นพิษต่อหนูทดลองมากกว่าขนาดใหญ่และขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามอนุภาคทองนาโนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 และ 50 นาโนเมตร ที่เคลือบผิวนอกด้วยซิเตรท ไม่แสดงความเป็นพิษต่อเซลล์เม็ดเลือดของมนุษย์ ซึ่งเรียกว่า blood compatible อนุภาคทองนาโนจึงเป็นที่นิยมใช้ในการแพทย์

3.2.6. อันตรายของอนุภาคซิลิกานาโน

ก่อนที่จะมีการผลิตอนุภาคซิลิกานาโน มนุษย์ได้ใช้อนุภาคไมโครซิลิกา (เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5-10 ไมโครเมตร) มาเป็นเวลานานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมโม่หิน อุตสาหกรรมขัดโลหะด้วยการพ่นทราย อุตสาหกรรมเครื่องเคลือบเซรามิค อุตสาหกรรมหลอมโลหะ เป่าแก้ว เผาอิฐทนไฟ ฯลฯ จนทราบดีถึงอันตรายของอนุภาคไมโครซิลิกา ว่าการสูดดมต่อเนื่องกันเป็นระยะเวลานาน ทำให้เกิดพังผืดขึ้นในถุงลมเล็ก ๆ ของปอด เรียกว่าโรคปอดฝุ่นทราย (silicosis) ซึ่งเป็นโรคเรื้อรังและทวีอาการขึ้นเรื่อย ๆ แม้จะหยุดทำงานที่ต้องสัมผัสกับฝุ่นซิลิกาแล้ว โดยอาการที่พบได้แก่ ถุงลมโป่งพอง หายใจลำบาก ไม่สามารถรักษาให้หายได้ ยิ่งได้รับฝุ่นซิลิกามาก หรือสุขภาพอ่อนแอ หรือสูบบุหรี่ ก็ยิ่งถึงแก่ชีวิตเร็วมากขึ้น โรคปอดฝุ่นทรายได้รับการเชื่อมโยงไปหาการสัมผัสกับซิลิกาที่เป็นผลึก (crystalline silica ซึ่งส่วนใหญ่เป็น quartz) ซึ่งสำนักงานวิจัยมะเร็ง (IARC) ขององค์การอนามัยโลก จัดให้ซิลิกาที่เป็นผลึกอยู่ในกลุ่ม 1 (group 1) ซึ่งหมายถึงสารที่มีหลักฐานว่าก่อมะเร็งในสัตว์ทดลองและมนุษย์ ส่วนสมบัติสำคัญที่สุดที่มีผลต่อความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต น่าจะได้แก่ความเป็นผลึกของอนุภาค

ส่วนซิลิกาอสัณฐาน (amorphous หรือ colloidal silica) จัดอยู่ในกลุ่ม 3 คือไม่มีหลักฐานพอที่จะถือว่าเป็นสารก่อมะเร็งได้ ซิลิกาอสัณฐานอาจแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. ซิลิกาอสัณฐานตามธรรมชาติ หากได้รับเข้าสู่ร่างกายเป็นระยะเวลานาน ไม่ทำให้เกิดโรคปอดฝุ่นทรายแต่ทำให้หลอดลมอักเสบ ถุงลมโป่งพอง และหลอดลมฝอยอุดตัน และเป็นโรคภูมิแพ้อื่น ๆ ได้อีก แต่ตามธรรมชาติซิลิกาอสัณฐานก็มักมีผลึกซิลิกาปนมาด้วยไม่มากก็น้อย จึงไม่สามารถสรุปอันตรายของซิลิกาอสัณฐานตามธรรมชาติได้

2. ซิลิกาอสัณฐานที่สังเคราะห์ขึ้น (colloidal silica, fumed silica, precipitated silica) สามารถทำให้หลอดลมอักเสบ โดยไม่เกิดโรคปอดฝุ่นทราย แต่ถ้าสูดดมเข้าไปทีละมาก ๆ อาจทำให้เกิดอาการ

อักเสบอย่างเฉียบพลันและอาจมีความเสียหายระยะยาวตามมา อันตรายของการสูดดมซิลิกาขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค รูปทรงของอนุภาค ขนาดของพื้นที่ผิว และความชอบน้ำหรือชอบน้ำมันของผิวอนุภาค

ในกรณีของอนุภาคซิลิกานาโน ซึ่งแทบทั้งหมดเป็นซิลิกาอสัณฐาน การทดสอบอันตรายแบ่งได้เป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกเป็นการทดสอบความเป็นพิษของอนุภาคนาโนซิลิกาในเซลล์ชนิดต่าง ๆ ที่เพาะเลี้ยงไว้ (ส่วนมากเป็นเซลล์ที่มาจากปอดหนูหรือปอดมนุษย์) ส่วนกลุ่มที่สอง เป็นการทดสอบความเป็นพิษของอนุภาคซิลิกานาโนในสัตว์ทดลอง

ในเซลล์หลายชนิด อนุภาคซิลิกานาโนสามารถผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เข้าไปในไซโตพลาสซึมได้ และอนุภาคซิลิกานาโนที่มีขนาดพอเหมาะ (เส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 40-70 นาโนเมตร) สามารถผ่านเข้าไปถึงในนิวเคลียสได้ ในขณะที่อนุภาคซิลิกานาโนที่มีขนาดเล็กกว่านี้หรือใหญ่กว่านี้สามารถเข้าไปได้ถึงในไซโตพลาสซึม และสามารถยับยั้งการแบ่งตัวและการทำงานตามปกติของเซลล์ได้ อย่างไรก็ตาม ความเป็นพิษของอนุภาคซิลิกานาโนขึ้นกับชนิดและขนาดของอนุภาค กับชนิดของเซลล์ที่ทดสอบด้วย จึงยังไม่สามารถกำหนดเป็นหลักการได้ว่าอนุภาคซิลิกานาโนที่มีลักษณะทางกายภาพอย่างใดจะเป็นพิษต่อเซลล์ชนิดใดเพียงใด[62]

ส่วนการทดลองฉีดอนุภาคซิลิกานาโนเข้าใต้ผิวหนัง (subcutaneous injection) ในสัตว์ทดลอง พบว่าไม่ทำให้เกิดปัญหา แต่ถ้าฉีดเข้าเยื่อบุช่องท้อง (intraperitoneal) หรือเข้าเส้นเลือดดำจะเป็นพิษถึงตาย อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองในเซลล์ กับผลการทดลองจากสัตว์ทดลอง ยังเทียบกันได้ลำบาก และกลไกของการเป็นพิษต่อเซลล์ ยังอยู่ในระหว่างการศึกษา

ความเป็นอันตรายของอนุภาคซิลิกานาโน ยังต้องมีการศึกษากันต่อไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเด็นที่อนุภาคนาโนที่เคลือบด้วยซิลิกาสามารถผ่านกระแสโลหิตเข้าไปในสมองได้

3.2.7. อันตรายของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโน

มีรายงานผลการทดสอบพบความเป็นอันตรายของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนเป็นจำนวนมาก โดยส่วนใหญ่ทำการทดสอบในผลิตภัณฑ์ซึ่งมีที่ใช้มาก ทั้งในอุตสาหกรรมสี และในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง การศึกษาในไม่กี่ปีที่ผ่านมา อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนที่หนูกิน

เข้าไป สามารถกระจายตัวไปยังอวัยวะต่าง ๆ[63] และทำให้เกิดความผิดปกติทางพันธุกรรม[64] สำหรับการศึกษาเกี่ยวกับอันตรายของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนในโรงงานอุตสาหกรรม ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาพิษของฝุ่นไทเทเนียมนาโนในอากาศ

การทดลองในเซลล์นอกกาย ส่วนใหญ่เป็นการติดตามความเครียดจากออกซิเดชั่น[65] การตายอย่างเป็นระบบของเซลล์[66] และความผิดปกติของสารพันธุกรรม[67] โดยความเป็นพิษเหล่านี้อาจเกี่ยวข้องกับขนาดของอนุภาคปฐมภูมิ (primary particle size) ซึ่งขนาดเล็กมีพิษมากกว่าขนาดใหญ่[68] แต่ที่น่าเป็นห่วงก็คือ การศึกษาในหนูได้พบการเคลื่อนที่ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนเข้าไปสะสมในสมองด้วย[69]

ความเป็นพิษของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนที่แขวนลอยในน้ำ ขึ้นกับการเกาะตัวกันของอนุภาคเป็นก้อนหลอม (aggregation) หรือเป็นกลุ่มมวล (agglomeration) เนื่องจากถ้ายิ่งเกาะตัวกันเป็นก้อนใหญ่ขึ้น พื้นที่ผิวภายนอกก็จะลดลงทำให้ความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีลดลง ทั้งความสามารถในการทะลุทะลวงเข้าไปทำอันตรายต่อเซลล์และเนื้อเยื่อจะลดลงด้วย อนุภาคที่เกาะตัวกันมีโอกาสสูงที่จะตกตะกอน หรือถูกกักเก็บไว้ในโคลน ฯลฯ ได้ง่ายกว่าอนุภาคที่อยู่เป็นเอกเทศ

ปัจจัยสำคัญของการเกาะตัวกันได้แก่ความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายที่อยู่ล้อมรอบ ตัวอย่างเช่น อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนขนาดเล็ก (เส้นผ่าศูนย์กลาง 3.6 นาโนเมตร) มีค่า pH ที่ทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ (isoelectric point หรือ pI) เท่ากับ 4.8 ในขณะที่อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนขนาดใหญ่ (เส้นผ่าศูนย์กลาง 8.1 นาโนเมตร) มีค่า pI เท่ากับ 6.2 (คือเป็นกรดอ่อน ๆ) ถ้าหากปรับความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายไปที่ pI จะทำให้ประจุสุทธิบนอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนทุกอนุภาคเป็นศูนย์ เมื่อไม่มีประจุชนิดเดียวกันให้ผลักกัน อนุภาคก็จะเกาะตัวกันง่ายขึ้นแล้วตกตะกอน โดยที่ยิ่งความแรงไอออน (ionic strength ซึ่งเป็นตัวเลขที่บอกระดับความเข้มข้นของเกลือในสารละลาย) มีค่าสูง การเกาะตัวกันเพื่อตกตะกอนก็ยิ่งจะง่ายขึ้น และเมื่อตกตะกอนแล้วอันตรายก็จะน้อยลงหรือหมดไป[70]

3.2.8. อันตรายของอนุภาคสังกะสีออกไซด์นาโน

สังกะสีออกไซด์สามารถปลดปล่อยอนุมูลสังกะสีซึ่งมีประจุบวกออกไปทำให้เซลล์ตายได้ ดังนั้นการทดสอบอันตรายของอนุภาคสังกะสีออกไซด์นาโน จึงต้องพยายามแยกผลของโลหะสังกะสีนาโน ออกจากผลของอนุมูลสังกะสี

ผลการทดลองที่ปรากฏในรายงานการวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการแล้ว มีลักษณะทำนองเดียวกับผลการทดลองที่ใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโน คือ มีการทดลองในเซลล์นอกร่างกาย พบความเครียดจากออกซิเดชั่น (oxidative stress) ความเป็นพิษต่อเซลล์ (cytotoxicity)[71] การออกซิไดซ์ลิพิดซึ่งทำให้เยื่อต่าง ๆ รั่วซึม และความเป็นพิษต่อสารพันธุกรรม[72] โดยเฉพาะอย่างยิ่งถึงแม้อนุภาคสังกะสีออกไซด์นาโนจะถูกจัดว่าเสถียรเมื่อได้รับรังสีเหนือม่วงดังกล่าวแล้ว แต่ก็มีรายงานผลการวิจัยว่า รังสีเหนือม่วงสามารถกระตุ้นอนุภาคสังกะสีออกไซด์นาโน ให้ทำลายโครโมโซม (clastogen)[73]

สำหรับอันตรายของอนุภาคสังกะสีออกไซด์นาโนต่อสิ่งแวดล้อมนั้น ยังอยู่ในระหว่างการศึกษา

3.2.9. อันตรายของลิโปโซม

ลิโปโซมที่ใช้ในยาและเครื่องสำอาง มีผิวเป็นเยื่อลิพิดคู่ (lipid bilayer) ที่เตรียมขึ้นจากไขมันพืช เช่น ฟอสโฟลิปิดจากถั่วเหลือง ซึ่งไม่ปรากฏว่ามีความเป็นพิษหรือทำให้เกิดการแพ้

ในขณะที่ลิโปโซมอยู่ในรูปสารแขวนลอยเข้มข้นในสายการผลิตนั้น ถ้าหากเกิดการหกหรือกระเด็นใส่ผู้ปฏิบัติงาน ก็อาจเกิดปัญหาขึ้นได้ เนื่องจากถึงแม้โดยตัวของมันเองแล้ว ลิโปโซมเปล่า ๆ นับว่าไม่เป็นอันตรายก็ตาม แต่ด้วยความเข้มข้นที่สูงมาก และความสามารถในการทำให้สารออกฤทธิ์ที่ผสมอยู่ แทรกซึมลงไปในชั้นผิวหนังได้ระหว่าง 5 ถึง 10 เท่า เทียบกับเมื่อไม่มีลิโปโซม ทำให้ความเข้มข้นของสารออกฤทธิ์ที่ซึมเข้าไปในชั้นผิวหนัง อาจสูงกว่าความเข้มข้นที่ใช้กันตามปกติ เป็นร้อยเท่าหรือมากกว่านั้นได้

ปัจจัยสำคัญหนึ่งของอันตรายของการที่สารลิโปโซมแขวนลอยเข้มข้นหกใส่ผิวหนัง ก็คือชนิดของสารออกฤทธิ์ ว่าเป็นสารอะไร ถ้าสารออกฤทธิ์เป็นสารให้ความชุ่มชื้น การที่ได้รับสารความเข้มข้นสูงกว่าปกติมาก ก็อาจจะไม่เป็นอันตรายเท่ากับสารออกฤทธิ์ที่เป็นสารกระตุ้นผิวหนัง ซึ่งในความเข้มข้นสูงอาจจะทำให้แสบร้อน หรือเกิดการแพ้ขึ้นได้ อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่พบเป็นประจำก็คือ การขาดข้อมูลและองค์ความรู้ เกี่ยวกับสารออกฤทธิ์ที่เป็นสมุนไพร (natural products) ซึ่งผู้ปฏิบัติงานมักจะคิดเข้าข้างตัวเองให้สบายใจไว้ก่อนว่าคงจะไม่มีอันตราย แม้จะมีความเข้มข้นสูงและมีตัวช่วยพาเข้าผิวหนังเช่นลิโปโซมเป็นต้น แต่ที่จริงก็ไม่แน่เสมอไป

ดังนั้น เพื่อความมั่นใจตามหลักการระวังไว้ก่อน (precautionary principle) ผู้ปฏิบัติงานจึงควรให้ความสำคัญต่อสารลิโปโซมแขวนลอยเข้มข้น ในแง่ที่ว่ามีความเป็นไปได้ว่าอาจมีอันตราย โดยขึ้นกับธรรมชาติของสารออกฤทธิ์ดังกล่าวแล้ว

อนึ่ง หลักการนี้ใช้ได้กับอนุภาคอีกหลายชนิดที่เตรียมจากไขมัน และใช้กักเก็บตัวยาหรือสารออกฤทธิ์ เช่น SLN (Solid Lipid Nanoparticles) หรือ SLC (Solid Lipid Carrier), NLC (Nanostructure Lipid Carrier), NCS (Nano Caposome), ฯลฯ ซึ่งบางกรณีแขวนลอยอยู่ในสารละลายเอทานอล ซึ่งมีสมบัติเป็นสารช่วยซึม (penetration enhancer) คือมีส่วนช่วยให้สารออกฤทธิ์ ซึมลงไปในผิวหนังได้ดีขึ้นอีก

3.2.10. อันตรายของเด็นดริเมอร์

เนื่องจากเด็นดริเมอร์ (dendrimer) มีลักษณะเป็นแกน (core) หุ้มด้วยเปลือกซึ่งสังเคราะห์ขึ้นจากการให้โมเลกุลแตกกิ่งก้านสาขาออกไปเป็นชั้น ๆ เหมือนหัวหอม ความเป็นพิษหรือไม่เป็นพิษของเด็นดริเมอร์จึงขึ้นอยู่กับสมบัติทางเคมีของกลุ่มที่เป็นเปลือกชั้นนอกสุด

เด็นดริเมอร์ถูกสังเคราะห์ขึ้นจากสารเคมีหลายกลุ่มเพื่อทดลองใช้เป็นพาหนะสำหรับยารักษาโรค โดยต้องมีการทดสอบว่าเป็นอันตรายต่อสุขภาพหรือไม่ เป็นต้นว่าเด็นดริเมอร์ที่เตรียมขึ้นจากเมลามีน (melamine)[74] อย่างไรก็ตามได้มีการประมาณไว้ว่า ร้อยละ 75 ของบทความวิจัยที่ตีพิมพ์เกี่ยวกับการสังเคราะห์เด็นดริเมอร์ เป็นการสังเคราะห์ทางเคมีแท้ ๆ ไม่ได้ตั้งใจสังเคราะห์สำหรับอุตสาหกรรมยา เด็นดริเมอร์ส่วนใหญ่ที่สังเคราะห์ได้ จึงไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยมาก และ

มีโครงสร้างที่ทำให้นักชีวเคมีคาดเดาได้ว่า น่าจะมีความเป็นอันตรายต่อเซลล์และเนื้อเยื่อค่อนข้างมากแม้จะยังไม่ได้ทำการทดลองจริง ๆ[75]

ลักษณะการศึกษาความเป็นพิษของเด็นดริเมอร์นอกกาย (*in vitro*) สามารถแบ่งได้เป็นหลายกลุ่ม คือ

- ศึกษาความเป็นพิษต่อเซลล์ (cytotoxicity) ทั้งในระยะสั้นและระยะยาว
- ศึกษาการทำให้เม็ดเลือดแดงแตก (hemolytic activity)
- ศึกษาการกระตุ้นคอมพลีเมนต์ให้ทำลายเซลล์ (complement activation)
- ศึกษาผลกระทบต่อเนื้อเยื่อของลำไส้เล็ก
- ศึกษาการถูกลำเลียงเข้าเซลล์และการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคเมื่อเข้าไปอยู่ในเซลล์แล้ว (endocytic uptake and intracellular fate)[76]

ผลการศึกษาเบื้องต้น พบว่า PAMAM มีพิษต่อเซลล์หลายชนิด ทั้งเซลล์ที่มาจากสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมและเซลล์ที่พัฒนามาจากเซลล์มนุษย์ จากการทดลองเหล่านี้สรุปได้ว่า เด็นดริเมอร์ที่มีประจุไฟฟ้าที่ผิวนอกเป็นบวก มีความเป็นพิษมากกว่าที่มีประจุไฟฟ้าที่ผิวนอกเป็นลบ และเด็นดริเมอร์ที่มีกลุ่มไฮดรอกซิล (OH) อยู่บนพื้นผิวนอก มีความเป็นพิษน้อยกว่าที่มีกลุ่มอะมิโน (NH_2) อยู่บนผิว

ลักษณะการศึกษาความเป็นพิษของเด็นดริเมอร์ในสัตว์ทดลอง สามารถแบ่งได้เป็นหลายแนวทางเช่นกัน อาทิ

- ศึกษาการกระจายตัวของเด็นดริเมอร์ที่เข้าไปอยู่ในร่างกายแล้ว
- ศึกษาความเป็นพิษต่อร่างกายทั่วไป
- ศึกษาการกระตุ้นระบบภูมิต้านโรค
- ศึกษาผลของเด็นดริเมอร์ต่อการปลดปล่อยสารควบคุมการเติบโตหรือฮอร์โมนต่าง ๆ[77]

ตั้งแต่ พ.ศ. 2547 ได้มีการทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมี พร้อมกับทดสอบความเป็นอันตรายของเด็นดริเมอร์ซึ่งเชื่อกันว่าค่อยข้างปลอดภัยจนมีการใช้กันมากในการลำเลียงยารักษาโรค ได้แก่ PAMAM เด็นดริเมอร์ชนิด 3 ชั้น (G3-PAMAM หรือ PAMAM-$(NH_2)_{32}$) และ PAMAM เด็นดริเมอร์ชนิด 4 ชั้น (G4-PAMAM หรือ PAMAM-$(NH_2)_{64}$) เทียบกับสารควบคุม คือ

N-(2-amioethyl)propanamide (CAS No. 925-58-6) หรือ N-(2- Aminoethyl)acetamide (CAS No. 1001-53-2) ปัจจุบันยังอยู่ในระหว่างการศึกษา[78]

3.3. การแบ่งกลุ่มความเป็นอันตรายของวัสดุนาโนโดยสถาบันมาตรฐานแห่งสหราชอาณาจักร (BSI)

จากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2 พอสรุปได้ว่า นักวิทยาศาสตร์ยังขาดข้อมูลและองค์ความรู้อีกมาก เกี่ยวกับความเป็นอันตรายของวัสดุนาโนแต่ละชนิด และกลไกที่ทำให้เกิดความเป็นพิษขึ้น มีข้อสันนิษฐานว่า วัสดุที่รูปร่างเป็นแท่งยาว เช่น ท่อคาร์บอนนาโนมีแนวโน้มที่จะเป็นอันตรายมากกว่าวัสดุที่เป็นก้อนกลม และวัสดุที่ตามปกติแม้จะไม่ได้มีขนาดนาโนก็เป็นอันตรายอยู่แล้ว (เช่น ซิลิกา) หรือในรูปแบบอื่นก็เป็นอันตรายอยู่แล้ว (เช่นเงิน) ก็มีแนวโน้มจะเป็นอันตรายได้มากเมื่อขนาดยิ่งเล็กลงจนถึงขนาดนาโน

เพื่อความสะดวกในการหามาตรการควบคุมในทางอุตสาหกรรมต่อไป เมื่อปี พ.ศ. 2550 สถาบันมาตรฐานแห่งสหราชอาณาจักร (BSI) จึงจัดแบ่งวัสดุนาโนออกเป็น 4 กลุ่มตามแนวโน้มที่จะเป็นอันตรายได้ ดังต่อไปนี้

1. **Fibrous** ได้แก่วัสดุนาโน ที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเป็นเส้น และตามปกติจะไม่ละลายน้ำ

2. **CMAR** ได้แก่วัสดุนาโน ที่สารเดียวกันแต่ขนาดใหญ่กว่านาโน ถูกจัดให้เป็นสารอันตรายในหมวดสารก่อมะเร็ง (carcinogen) สารก่อการกลายพันธุ์ (mutagen) สารก่อภูมิแพ้ (asthmagen) หรือสารที่เป็นพิษต่อการสืบพันธุ์ (reproductive toxin) ซึ่งย่อรวมกันว่า CMAR

3. **Insoluble** ได้แก่วัสดุนาโน ที่ละลายน้ำไม่ดี หรือละลายน้ำไม่ได้ และไม่ได้อยู่ในวัสดุสองกลุ่มแรก

4. **Soluble** ได้แก่วัสดุนาโน ที่ละลายน้ำได้ และไม่ได้อยู่ในกลุ่มที่สอง (CMAR)

การแบ่งวัสดุนาโนออกเป็นสี่กลุ่มนี้ สถาบันมาตรฐานแห่งสหราชอาณาจักรได้นำไปใช้ในการออกแบบมาตรการควบคุม ซึ่งขึ้นอยู่กับกลุ่มของวัสดุนาโน และลักษณะกิจกรรมที่ทำในโรงงานอุตสาหกรรม ดังจะได้นำเสนอต่อไป

4. การสัมผัสกับวัสดุนาโน

การสัมผัส[79] เป็นปัจจัยสำคัญร่วมกับระดับความเป็นอันตรายของสาร ในการประเมินความเสี่ยง เพื่อจัดทำมาตรการความปลอดภัย

4.1. ช่องทางของการสัมผัส

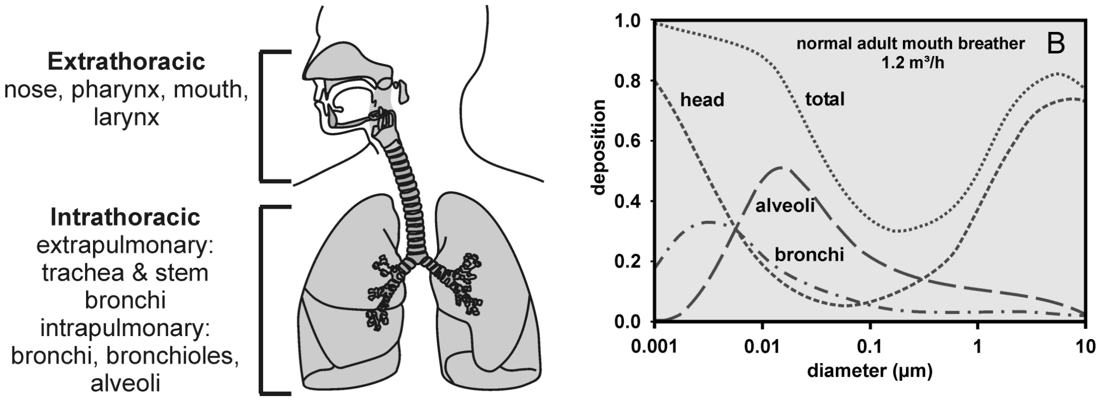
ช่องทางของการสัมผัสวัสดุนาโน แบ่งได้เป็น 3 ทาง คือ ทางการหายใจ ทางปาก และทางผิวหนัง (รวมถึงนัยน์ตาและเยื่อเมือกต่าง ๆ)

4.1.1. การสัมผัสวัสดุนาโนโดยทางการหายใจ

ผู้ปฏิบัติงานกับวัสดุนาโนซึ่งอยู่ในสภาพผง หรือในสภาพที่อาจจะมีฝุ่นเล็ดลอดออกมาจากวัสดุได้ จำเป็นต้องสวมอุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจประเภททำให้อากาศสะอาด เนื่องจากมีโอกาสที่จะหายใจเอาวัสดุนาโนเข้าไป

แบบจำลองของระบบหายใจของร่างกาย แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 (ซ้าย) อากาศถูกสูดผ่านจมูกและโพรงจมูก หรือผ่านปาก ผ่านคอหอย ลงไปตามหลอดลมใหญ่ (trachea) ซึ่งแยกเป็น 2 แขนงไปที่ปอดแต่ละข้าง จากนั้นก็แยกเป็นหลอดลมขนาดเล็ก (bronchi) ลงไปเรื่อย ๆ จนถึงถุงลมเล็ก ๆ ในปอด (alveoli) ซึ่งทำหน้าที่แลกเปลี่ยนก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์

สำหรับฝุ่นที่หายใจเข้าไปพร้อมกับอากาศนั้น ถ้าฝุ่นมีขนาดใหญ่มาก (เส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่า 1 ไมโครเมตร) หรือเล็กมาก (เส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 5 นาโนเมตร) ส่วนใหญ่จะติดอยู่บริเวณโพรงจมูกและหลอดลม ไม่ลงไปถึงถุงลมในปอด เนื่องจากฝุ่นที่มีขนาดใหญ่มาก จะไม่สามารถไหลไปตามอากาศที่เลี้ยวลดในโพรงจมูกและหลอดลม จึงติดอยู่บริเวณโพรงจมูก รวมตัวกับน้ำมูกและเมือกในจมูก และกำจัดออกมาเป็นขี้มูกในที่สุด แต่ถ้าฝุ่นมีขนาดเล็กมาก ก็จะสามารถไหลไปตามอากาศที่เลี้ยวลดในโพรงจมูกและหลอดลม จนไปถึงปอดแล้วไหลย้อนกลับออกมาถึงจมูกได้โดยไม่ตกหล่นหรือติดกับเมือกที่เคลือบอยู่ด้านในของหลอดลมและถุงลมในปอด เมื่อสุดช่วงหายใจออก อนุภาคเหล่านี้จึงออกมาติดอยู่ที่โพรงจมูกเนื่องจากอากาศหยุดไหล ดังแสดงในแผนภูมิรูปที่ 4.1 (ขวา)



รูปที่ 4.1: การตกค้างของอนุภาคนาโนในทางเดินหายใจของมนุษย์

ที่มา: Geiser, M. and W. G. Keryling (2010) Deposition and biokinetics of inhales nanoparticles. *Particle and Fibre Toxicology* **7**:2

แผนภูมิในรูปที่ 4.1 (ขวา) แสดงการสะสมของอนุภาค (deposition) บนแกนตั้ง และขนาดของอนุภาคบนแกนนอน จะเห็นได้ว่าตามแบบจำลองนี้ ฝุ่นขนาดนาโน (เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10-100 นาโนเมตร หรือตรงกับขนาด 0.01-0.1 µm บนแกนนอนของกราฟ) จะไปตกค้างอยู่ที่ถุงลมเล็ก ๆ ในปอด (alveoli) ส่วนฝุ่นนาโนที่มีขนาดเล็กกว่า (เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1-10 นาโนเมตร หรือตรงกับขนาด 0.001-0.01 µm บนแกนนอนของกราฟ) จะไปตกค้างอยู่ที่หลอดลมเล็ก ๆ (bronchi) และฝุ่นขนาดใหญ่กว่านาโน (ตรงกับขนาด 0.1-10 µm บนแกนนอนของกราฟ) จะตกค้างอยู่ที่โพรงจมูกภายในศีรษะ (head)

ฝุ่นขนาดต่าง ๆ ที่ตกค้างบนผนังด้านในของหลอดลมและถุงลมในปอด ไม่ว่าจะมีขนาดใด จะสัมผัสกับสารลดแรงตึงผิว (surfactant) ที่เคลือบอยู่ด้านในของหลอดลมและถุงลม ซึ่งปกติมีหน้าที่ทำให้ปอดขยายตัวได้ง่าย และเมื่อหายใจออกจนสุดแล้วปอดไม่ยุบตัวจนแฟบ แต่ในกรณีนี้สารลดแรงตึงผิวทำให้ฝุ่นเริ่มเปียกน้ำ และจมลงในชั้นเมือก (periciliary layer and mucus) โดยจะอยู่ในชั้นนี้ได้เป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง

ในชั้นเมือกนี้ มีเม็ดเลือดขาวชนิดแมโครเฟจ (macrophage) คอยจับและทำลายสิ่งแปลกปลอม ฝุ่นส่วนหนึ่งที่จมอยู่ในชั้นเมือกจะถูกแมโครเฟจจับไว้ และนำกลับขึ้นมาอยู่บนผิวด้านในของหลอดลมแล้วใช้เส้นขนของเซลล์เยื่อบุผิวค่อย ๆ โบก ไล่ฝุ่นกลับขึ้นไปยังกล่องเสียง แต่ฝุ่นบางส่วนก็

สามารถหลุดเข้าไปในเซลล์ปอดได้ ซึ่งเมื่อเข้าไปได้แล้ว ก็จะแทรกตัวเข้าไปในระบบน้ำเหลือง และเข้าไปในระบบไหลเวียนโลหิตในที่สุด

4.1.2. การสัมผัสวัสดุนาโนโดยทางผิวหนัง

การสัมผัสวัสดุนาโนโดยทางผิวหนัง เกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ ส่วนใหญ่เกิดจากการสัมผัสในระหว่างการปฏิบัติงานในกระบวนการผลิต วัสดุนาโนที่แขวนลอยอยู่ในของเหลว เช่น อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนที่แขวนลอยในของเหลว อาจหกรดผิวหนังในขณะชั่งวัสดุ ในขณะลำเลียงโดยไม่ได้ปิดฝาให้สนิท หรือในขณะขนถ่ายจากภาชนะหนึ่งไปยังอีกภาชนะหนึ่ง เช่น เมื่อยกถังใส่วัสดุนาโนในรูปของเหลวขึ้นเหนือศีรษะเพื่อเติมลงไปในถังผสมแล้วเกิดอุบัติเหตุหรือถังลื่นหลุดมือ เป็นต้น

อีกรูปแบบหนึ่งของการสัมผัสวัสดุนาโนทางผิวหนัง คือการกระเซ็นของของเหลวที่ประกอบด้วยอนุภาคนาโน เช่นในขณะเปิดฝาถัง หรือในขณะชั่งหรือตวงวัสดุ เป็นต้น

การสัมผัสทางผิวหนังอีกรูปแบบหนึ่ง เกิดมาจากการใช้ถุงมือยางอย่างไม่รอบคอบหรือไม่มีความรู้ ทำให้เกิดการสัมผัสกับของเหลวที่เปื้อนอยู่บนถุงมือในขณะที่ถอดถุงมือออก

การสัมผัสสามรูปแบบที่ยกตัวอย่างมาข้างต้น เป็นการสัมผัสกับวัสดุนาโนในลักษณะแขวนลอยอยู่ในของเหลว แต่การสัมผัสทางผิวหนังเกิดขึ้นได้ แม้วัสดุนาโนจะมีลักษณะเป็นอนุภาคหรือเป็นฝุ่น จากการฟุ้งกระจายและตกบนผิวหนัง หรือหยิบจับสิ่งที่ปนเปื้อนฝุ่นนาโน หรือใช้มือกอบหรือโกยอนุภาคนาโน เช่น ในขณะทำความสะอาดเตาปฏิกรณ์ เป็นต้น

การใช้อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลอย่างไม่ถูกวิธีหรือไม่ระมัดระวัง เช่น การสวมถุงมือในขณะปฏิบัติงานกับวัสดุนาโน หากไปจับต้องสิ่งของหรือสัมผัสผิวหนัง ก็จะทำให้สัมผัสวัสดุนาโนทางผิวหนังได้ เป็นต้น ผู้ปฏิบัติงานพึงตระหนักว่า ควรสวมถุงมือเมื่ออยู่ในระหว่างการปฏิบัติงานเท่านั้น

การสวมถุงมือ ควรปฏิบัติตามคำแนะนำของผู้ผลิตอย่างเคร่งครัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการยึดหรือการประสานรอยต่อระหว่างถุงมือกับแขนของเสื้อคลุมแขนยาว เพื่อไม่ให้วัสดุนาโนที่แขวนลอยในของเหลวสามารถกระเซ็นไปติดบนท้องแขนได้

4.1.3. การสัมผัสวัสดุนาโนโดยทางปาก

การสัมผัสวัสดุนาโนโดยทางปาก สามารถเกิดขึ้นได้ หากผู้ปฏิบัติงานใช้มือที่เปื้อนวัสดุนาโนไปหยิบจับอาหารเข้าปาก

วิธีป้องกันการสัมผัสโดยช่องทางนี้ คือการมีสุขลักษณะที่ดีในโรงงาน เช่น ล้างมือให้สะอาดทุกครั้งหลังจากออกจากบริเวณทำงานกับวัสดุนาโน และการติดป้ายเตือนในโรงงาน

4.2. โอกาสการสัมผัสกับวัสดุนาโน

โอกาสในการสัมผัสกับวัสดุนาโน ในขั้นตอนการปฏิบัติงาน ของโรงงานอุตสาหกรรม ขึ้นกับรูปแบบของวัสดุนาโน ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

วัสดุนาโนที่เป็นฝุ่น มีโอกาสในการสัมผัสได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางการหายใจ แต่ฝุ่นนาโนก็สามารถปลิวไปตกลงบนผิวหนัง ทำให้เกิดการสัมผัสทางผิวหนังได้

วัสดุนาโนที่อยู่ในรูปแขวนลอยอยู่ในของเหลว เช่น อนุภาคไทเทเนียมนาโนแขวนลอยในน้ำ มีโอกาสฟุ้งกระจายได้ยาก ยกเว้นกระเซ็นเป็นฝอย เป็นต้น

วัสดุนาโนที่ฝังอยู่ในโครงข่ายพอลิเมอร์ และ**วัสดุนาโนที่ฝังอยู่ในวัสดุอื่น** ซึ่งทำให้วัสดุนาโนหลุดออกมายากมาก ยกเว้นในกรณีวัสดุนาโนที่อยู่ตรงผิวหน้าของวัสดุที่ห่อหุ้มนั้น เช่น ท่อคาร์บอนนาโนที่ฝังอยู่ในไม้เทนนิส หรือลิโปโซมที่ฝังอยู่ในเนื้อเจลของเครื่องสำอาง และในกรณีสินค้าหมดอายุใช้งาน ก็จะกลายสภาพเป็นขยะนาโน เป็นต้น

4.3. การสัมผัสกับวัสดุนาโน ตามกิจกรรมในโรงงานอุตสาหกรรม

เพื่อให้แนวปฏิบัติเบื้องต้นด้านความปลอดภัยนาโน สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับอุตสาหกรรมที่หลากหลาย ในที่นี้จึงได้แบ่งกิจกรรมในโรงงานอุตสาหกรรมออกเป็น 13 กิจกรรม[80] ดังนี้

1. การเปิดภาชนะบรรจุ (material unpacking)
2. การสังเคราะห์ (synthesis) วัสดุนาโน
3. การชั่ง ตวง วัด (measurement) วัสดุนาโน
4. การทำให้วัสดุนาโนกระจายตัว (dispersing)
5. การผสม (mixing) วัสดุนาโน
6. การฉีดพ่น (spraying) วัสดุนาโน
7. การทำงานด้วยเครื่องจักร (machining) ที่ใช้ในการขึ้นรูป ตัดแต่ง เลื่อย เจาะ ไส กลึง คว้าน ฯลฯ
8. การบรรจุหีบห่อ (packaging) วัสดุนาโน
9. การทำความสะอาดเครื่องมือเครื่องจักร (machine and equipment cleaning) ที่ใช้กับวัสดุนาโน
10. การทำความสะอาดบริเวณทำงาน (workspace cleaning)
11. การทำความสะอาดวัสดุนาโนที่ฟุ้ง หก ตกหล่น (spill cleaning)
12. การจัดการของเสีย (waste management)
13. การเลิกใช้เครื่องมือเครื่องจักร (equipment decommissioning)

การสัมผัสกับวัสดุนาโนโดยแบ่งตาม 13 กิจกรรม มีรายละเอียดดังนี้

4.3.1. การสัมผัสในระหว่างการเปิดภาชนะบรรจุ

โรงงานที่มีการใช้วัสดุนาโนเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิต ผู้ปฏิบัติงานในขั้นตอนที่มีการใช้วัสดุนาโน อาจสัมผัสกับวัสดุนาโน ในขณะเปิดภาชนะบรรจุ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีฉลากเตือนให้ทราบ เช่น “วัตถุดิบนี้เป็นวัสดุนาโน ต้องระมัดระวังและปฏิบัติตามข้อมูลความปลอดภัย” เป็นต้น พร้อมทั้งจัดเตรียมข้อมูลความปลอดภัยให้ผู้ปฏิบัติงานได้รับทราบและปฏิบัติตามอย่างเคร่งครัด ในกรณีโรงงานมิได้สังเคราะห์วัสดุนาโนเพื่อใช้เอง สามารถขอข้อมูลดังกล่าวได้จากผู้ผลิต

<table>
<tr><th>กรรมวิธีสังเคราะห์</th><th>ลักษณะการก่อตัวของอนุภาค</th><th>ต้นกำเนิดของการสัมผัส
และกิจกรมของผู้ปฏิบัติงานในโรงงาน</th><th>ช่องทางหลักของการสัมผัส</th></tr>
<tr><td rowspan="4">Gas Phase</td><td rowspan="4">ในอากาศ</td><td>การรั่วจากเตาปฏิกรณ์ โดยเฉพาะเมื่อความดันภายในสูงกว่าภายนอก</td><td>การหายใจ</td></tr>
<tr><td>การเก็บวัตถุนาโนที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งติดอยู่ในไส้กรอง</td><td>การหายใจ/ผิวหนัง</td></tr>
<tr><td>การแปรรูป และ/หรือ นำผงวัสดุไปบรรจุหีบห่อ</td><td>การหายใจ/ผิวหนัง</td></tr>
<tr><td>การทำความสะอาดหรือการบำรุงรักษาเตาปฏิกรณ์ รวมทั้งการเปลี่ยนไส้กรอง</td><td>การหายใจ/ผิวหนัง (เปลี่ยนไส้กรอง)</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Vapor Deposition</td><td rowspan="3">บนชิ้นวัสดุ (substrate)</td><td>การเก็บวัตถุนาโนที่สังเคราะห์ได้ / วัสดุหกเลอะบริเวณทำงาน</td><td>การหายใจ</td></tr>
<tr><td>การแปรรูป และ/หรือ นำผงวัสดุไปบรรจุหีบห่อ</td><td>การหายใจ/ผิวหนัง</td></tr>
<tr><td>การทำความสะอาด หรือการบำรุงรักษาเตาปฏิกรณ์ รวมทั้งการเปลี่ยนไส้กรอง</td><td>การหายใจ/ผิวหนัง (เปลี่ยนไส้กรอง)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Colloidal</td><td rowspan="2">แขวนลอยในของเหลว</td><td>ถ้ามีการเตรียมผงจากวัสดุนาโนที่แขวนลอยในของเหลว เช่น ด้วยการพ่นอบแห้ง (spray dry) การสัมผัสอาจเกิดขึ้นในขั้นตอนของการพ่นและอบแห้ง และในขั้นตอนต่อ ๆ ไป ที่ทำกับผงนาโน ไปจนถึงการนำผงวัสดุนาโนไปบรรจุหีบห่อ</td><td>การหายใจ/ผิวหนัง</td></tr>
<tr><td>การทำความสะอาด หรือการบำรุงรักษาอุปกรณ์</td><td>ผิวหนัง</td></tr>
<tr><td rowspan="2">การบดละเอียดอย่างยิ่ง</td><td rowspan="2">แขวนลอยในของเหลว</td><td>ถ้ามีการเตรียมฝุ่นผงจากวัสดุนาโนที่แขวนลอยในของเหลว เช่น ด้วยการพ่นอบแห้ง (spray dry) การสัมผัสอาจเกิดขึ้นในขั้นตอนของการพ่นและอบแห้ง และในขั้นตอนต่อ ๆ ไป ที่ทำกับผงนาโน ไปจนถึงการนำผงวัสดุนาโนไปบรรจุหีบห่อ</td><td>ผิวหนัง</td></tr>
<tr><td>การทำความสะอาด หรือการบำรุงรักษาอุปกรณ์</td><td>ผิวหนัง</td></tr>
</table>

ตารางที่ 4.1: ช่องทางการสัมผัสวัสดุนาโนจากกรรมวิธีสังเคราะห์

อนึ่ง ในทุกกรรมวิธีสังเคราะห์ ผู้ปฏิบัติงานมีโอกาสสัมผัสกับวัสดุนาโนทางตาด้วย โดยการกระเด็นของของเหลวหรือฝุ่นนาโนเข้าตา

ที่มา: Amoabediny et al. 2008. Guidelines for Safe Handling, Use and Disposal of Nanoparticles. *J. Phys. Conference Series* **170** (2009): 0103

4.3.2. การสัมผัสในระหว่างการสังเคราะห์วัสดุนาโน

เราสามารถแบ่งกรรมวิธีสังเคราะห์วัสดุนาโน เป็น 4 แบบ ดังนี้

1. การสังเคราะห์ในสถานะก๊าซ (gas phase synthesis)

การสังเคราะห์ประเภทนี้ อาจใช้วิธี flame pyrolysis, high temperature evaporation หรือ plasma synthesis เป็นต้น ซึ่งล้วนแล้วแต่ต้องทำในเตาปฏิกรณ์ (reactor) ซึ่งเป็นภาชนะปิดมิดชิด จึงมีโอกาสสัมผัสน้อย ยกเว้นหากเตาปฏิกิริยารั่วหรือระเบิด ซึ่งไม่น่าจะเกิดขึ้นได้บ่อยนัก ขั้นตอนที่น่าจะเกิดการสัมผัสขึ้นได้มากกว่า คือในขณะเก็บวัสดุนาโน (product recovery) ออกจากเตาปฏิกรณ์ เป็นต้นว่า ถ้าเก็บวัสดุนาโนด้วยการดูดหรือเป่าอากาศผ่านถุงกรอง (bag filter) ที่ชำรุด วัสดุนาโนก็อาจจะรั่วออกมาจากระบบปิดออกมาสู่อากาศภายนอกได้ หากมีการหมุนเวียนอากาศ (recirculate) ภายในโรงงาน โดยไม่ได้มีการกรองวัสดุนาโนดังกล่าวออก ผู้ปฏิบัติงานก็จะได้สัมผัสกับวัสดุนาโนอย่างต่อเนื่อง

อีกกิจกรรมหนึ่งที่ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของวัสดุนาโนอย่างมาก คือการเปิดเตาปฏิกรณ์เพื่อการบำรุงรักษาหรือซ่อมแซม (maintenance/repair) รวมทั้งการเลิกใช้งาน (decommission) โดยไม่มีวิธีการล้างเอาวัสดุนาโนที่ติดอยู่ภายในออกเสียก่อน ในกรณีนี้วัสดุนาโนอาจฟุ้งกระจายไปทั่วทั้งโรงงาน ทำให้เป็นปัญหาสุขภาพและปัญหาการทำความสะอาดตามมาด้วย ดังนั้นจะเห็นได้ว่า เส้นทางหลักของการสัมผัส (exposure) คือทางการหายใจและทางผิวหนัง

2. การสังเคราะห์ในสภาวะไอระเหย (vapor phase synthesis)

การสังเคราะห์ประเภทนี้ เป็นการให้ไอระเหย (vapor) ของวัสดุควบแน่นเป็นวัสดุนาโน ซึ่งเกาะ (deposit) อยู่บนพื้นผิวของชิ้นวัสดุรองรับ (substrate) ภายในห้องหรือภาชนะปิด (chamber) ซึ่งอาจจะเรียกว่าเป็นเตาปฏิกรณ์ด้วยก็ได้ จากนั้นจึงใช้วิธีทางกายภาพ ปาด โกย และ/หรือดูด เอาวัสดุนาโนออกมาจากชิ้นวัสดุรองรับนั้น ได้เป็นวัสดุในลักษณะผง

ในขณะรวมรวมวัสดุนาโนจากการสังเคราะห์ อาจมีการรั่วไหลของวัสดุนาโน ซึ่งส่วนใหญ่น่าจะเป็นการฟุ้งกระจายของฝุ่นนาโน ทำให้ผู้ปฏิบัติงานสัมผัสกับวัสดุนาโน ยกเว้นในกรณีที่ใช้เครื่องจักรอุปกรณ์แทนผู้ปฏิบัติงาน หรือใช้ของเหลวชะล้างชิ้นวัสดุรองรับแทนที่จะปาด โกย หรือดูด ในกรณีหลังนี้จะได้วัสดุนาโนที่อยู่ในรูปแขวนลอยในของเหลว นอกจากนั้นในขณะทำการบำรุงรักษาเตาปฏิกรณ์ วัสดุนาโนก็อาจรั่วไหลออกมาได้

เช่นเดียวกับการสังเคราะห์ในสถานะก๊าซ การสัมผัสเกิดขึ้นได้ เมื่อผู้ปฏิบัติงานสัมผัสพื้นผิวที่มีวัสดุนาโนเกาะอยู่ หรือขณะทำความสะอาดเตาปฏิกรณ์ และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง และอาจสัมผัสทางปากโดยการใช้มือที่ปนเปื้อนหยิบจับอาหารรับประทาน

3. การสังเคราะห์ในสภาวะคอลลอยด์ (colloidal phase synthesis) หรือ การสังเคราะห์ในสถานะของเหลว (liquid phase synthesis)

เป็นการสังเคราะห์ในรูปแขวนลอยในของเหลว โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในตัวทำละลาย ส่งผลให้เกิดการแขวนลอยของอนุภาค ในรูปแบบที่อนุภาคเองก็มีปฏิสัมพันธ์กับตัวทำละลาย เช่น โดยใช้ประจุไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาค สร้างปฏิสัมพันธ์กับโมเลกุลของน้ำซึ่งเป็นตัวทำละลาย เป็นต้น

โอกาสสัมผัสวัสดุนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ในสถานะของเหลว มีน้อยกว่าจากการสังเคราะห์ในสถานะก๊าซ หรือในสภาพที่เป็นไอ เนื่องจากของเหลวต้องสัมผัสกับผิวหนัง หรือเข้าไปทางปาก อย่างไรก็ตาม หากเกิดการหกหรือกระฉอกของของเหลวนั้นลงไปที่พื้น หรือลงไปบนเสื้อผ้าของผู้ปฏิบัติงาน แล้วทิ้งไว้จนแห้ง วัสดุนาโนที่แขวนลอยอยู่ในของเหลวอาจกลายสภาพเป็นฝุ่น ซึ่งอาจจะมีขนาดนาโน หรือเกาะกันแบบกลุ่มมวล (agglomerate) จนมีขนาดใหญ่กว่าขนาดนาโนก็ได้

ในกรณีที่ต้องการแยกวัสดุนาโนออกมาจากของเหลวโดยใช้การพ่นฝอยอบแห้ง (spray dry) ก็มีความเป็นไปได้ที่ผู้ปฏิบัติงานอาจหายใจเอาละอองของของเหลวที่พ่น ออกมา หรือหายใจเอาฝุ่นของวัสดุที่เป็นผลจากการพ่นฝอยอบแห้ง ซึ่งอาจมีขนาดนาโนหรือใหญ่กว่าก็ได้

4. การสังเคราะห์ด้วยการบดละเอียดอย่างยิ่ง

การสังเคราะห์ประเภทนี้ ใช้วิธีทางกายภาพ ในการบดสารให้มีอนุภาคเล็กลงจนถึงระดับนาโนโดยใช้วิธีการต่าง ๆ เช่น grinding milling และ mechanical alloying (MA) เป็นต้น

การบดสารให้มีขนาดนาโนอาจทำในสภาวะแห้งหรือเปียกก็ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง หากวัสดุที่ต้องการบด สามารถติดไฟและ/หรือ ระเบิดได้ง่าย ก็มักใช้การบดแบบเปียก

ในกรณีบดแห้ง การสัมผัสมีลักษณะทำนองเดียวกับที่กล่าวแล้วในการสังเคราะห์ในสถานะก๊าซและสังเคราะห์ในสภาวะไอระเหย ส่วนในกรณีบดเปียก ผลที่ได้เป็นอนุภาคนาโนที่อยู่ในรูปแขวนลอยในของเหลว การสัมผัสจึงมีลักษณะเดียวกับที่กล่าวข้างต้นแล้วในการสังเคราะห์ในสภาวะของเหลว

สำหรับกิจกรรมการสังเคราะห์วัสดุนาโนนี้ จะมีเฉพาะกรณีที่วัสดุนาโนเป็นผง กับที่แขวนลอยในของเหลวเพียงสองกรณีเท่านั้น ปัจจุบันถือว่ายังไม่มีการสังเคราะห์ในรูปแบบคอมโพสิต (วัสดุนาโนแทรกอยู่ในวัสดุอื่น ไม่ว่าวัสดุอื่นนั้นจะเป็นโครงข่ายพอลิเมอร์หรือไม่)

กรรมวิธีสังเคราะห์ทุกแบบ จะใช้เตาปฏิกรณ์ (reactor) ในการสังเคราะห์วัสดุนาโน ด้วยหลักการ colloidal phase หรือ liquid phase synthesis หรือภาชนะสำหรับบดสารเคมีอย่างละเอียด มีศักยภาพในการสร้างวัสดุนาโนที่มีความเข้มข้นสูง พึงระลึกไว้เสมอว่า การรั่วไหลของวัสดุนาโนออกนอกเตาปฏิกรณ์สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในขณะเดินเครื่อง และในขณะซ่อมบำรุง

4.3.3. การสัมผัสในระหว่างการชั่ง ตวง วัด วัสดุนาโน

ในโรงงานอุตสาหกรรม จำเป็นต้องมีการชั่ง ตวง วัด วัสดุนาโน เพื่อให้ได้ปริมาณที่กำหนดไว้ตามสูตรสำหรับนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ และเพื่อทำการควบคุมคุณภาพ ไม่ว่าจะเป็นคุณภาพของวัตถุดิบ หรือคุณภาพของสินค้า

ในการควบคุมคุณภาพ (QC) การชั่ง ตวง วัด มักจะออกมาในรูปการชั่ง (ฝุ่น) และการตวง (ของเหลว) ส่วนในการเข้าสูตรการผลิต การชั่ง ตวง วัด มักจะออกมาในรูปของการชั่งน้ำหนัก เพราะทำได้ง่าย ใช้อุปกรณ์ราคาไม่แพงมาก และผู้ปฏิบัติงานไม่จำเป็นต้องมีความรู้มาก

ในกรณีที่โรงงานใช้วัสดุนาโนเป็นวัตถุดิบ การชั่ง ตวง วัด จะเป็นกิจกรรมแรกหลังจากเปิดภาชนะบรรจุวัสดุนาโน เพื่อควบคุมคุณภาพของวัตถุดิบ (raw material quality control)

เนื่องจากผู้ปฏิบัติงานชั่ง ตวง วัด ต้องปฏิบัติงานกับวัตถุดิบหลายรูปแบบที่เข้ามาในโรงงาน รวมทั้งวัสดุนาโน ซึ่งอาจมีได้หลายรูปแบบด้วย ดังนั้นผู้ปฏิบัติงานต้องสวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลให้ถูกต้องครบถ้วน และเหมาะสมในขณะปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนาโน

4.3.4. การสัมผัสในระหว่างการทำให้วัสดุนาโนกระจายตัว

ในกระบวนการผลิตที่ใช้วัสดุนาโน อาจมีบางขั้นตอนที่จะต้องทำให้วัสดุนาโนกระจายตัวออกจากกันเพื่อให้ตกเคลือบบนชิ้นงาน ไม่ว่าวัสดุนาโนนั้นจะอยู่ในรูปผง หรืออยู่ในรูปแขวนลอยในของเหลว ตัวอย่างเช่น

- การผลิตอุปกรณ์คอมพิวเตอร์บางชนิด มีการ**โปรย**หรือ**โรย**วัสดุนาโนในรูปฝุ่น ลงไปบนชิ้นวัสดุกึ่งตัวนำ เพื่อให้วัสดุนาโนลงไปเกาะอยู่บนผิวหน้าของชิ้นวัสดุนั้น
- การขึ้นรูปชุดตรวจโรคบางประเภท มีการ**หยด**วัสดุนาโนที่อยู่ในรูปแขวนลอยอยู่ในของเหลวลงบนชิ้นวัสดุ เพื่อให้กระจายตัวเคลือบติดอยู่บนชิ้นวัสดุนั้น

จากตัวอย่างขั้นตอนทั้งสองนี้ มีความเป็นไปได้ที่ฝุ่นนาโนจะฟุ้งกระจายไปในอากาศ รอบ ๆ ชิ้นวัสดุกึ่งตัวนำ และมีความเป็นไปได้ที่ของเหลวที่หยดลงไปบนชิ้นวัสดุจะกระเซ็นเป็นฝอยออกมารอบ ๆ ชิ้นวัสดุ จึงมีความจำเป็นในการควบคุม ไม่ให้ผู้ปฏิบัติงานสัมผัสกับวัสดุนาโนดังกล่าว

4.3.5. การสัมผัสในระหว่างการผสมวัสดุนาโน

การผสม หรือการทำให้วัสดุนาโน กระจายตัวเข้ากันอย่างทั่วถึงกับวัตถุดิบอื่น ๆ ที่ใช้ในการผลิต เป็นขั้นตอนสำคัญในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนาโน จนอาจกล่าวได้ว่า แทบจะไม่มีอุตสาหกรรมนาโนใดในประเทศไทย ที่ไม่มีขั้นตอนการผสม ตัวอย่างเช่น ผงซักฟอกที่ผ่านการสเปรย์ด้วยเงินนาโนเข้มข้นที่แขวนลอยในน้ำ จะถูกผสมให้เข้ากันก่อนนำไปบรรจุกล่อง หรืออนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนถูกผสมกับส่วนผสมอื่น ๆ ในถังผสม ในกระบวนการผลิตครีมกันแดดนาโน เป็นต้น

ตามปกติวัตถุดิบซึ่งเป็นวัสดุนาโนที่มีความเข้มข้นสูง จะถูกผสมกับส่วนผสมอื่นๆ ตามสูตรการผลิต ทำให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีความเข้มข้นของวัสดุนาโนลดน้อยลง ดังนั้น การเติมวัตถุดิบในเครื่องผสม จะต้องได้รับการเอาใจใส่เป็นพิเศษ

ในกรณีการผสมวัสดุนาโนที่เป็นผง หากไม่มีการควบคุมที่มีประสิทธิภาพแล้ว อาจจะเกิดการกระจายหรือกระเด็นของฝุ่นนาโนไปได้รอบเครื่องผสม ตัวอย่างเช่น การผสมผงคาร์บอนแบล็คเข้ากับสารจำพวกไขไฮโดรคาร์บอนจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี (wax) ในเครื่องผสมไฟฟ้าชนิดเปิดฝา เป็นต้น

โรงงานที่ใช้ถังผสมแบบเปิดฝาด้านบน มีความเสี่ยงต่อการหกรั่วไหลในขณะเติมวัตถุดิบที่เป็นวัสดุนาโนลงในถังผสม เนื่องจากต้องยกภาชนะบรรจุขึ้นสูงเพื่อเทลงในถังผสม

4.3.6. การสัมผัสในระหว่างการฉีดพ่นวัสดุนาโน

ตัวอย่างของการฉีดพ่นวัสดุนาโน ได้แก่ การพ่นอนุภาคเงินนาโนที่แขวนลอยในของเหลวที่ความเข้มข้นสูงเคลือบลงบนเสื้อผ้า เพื่อให้ได้ผ้าที่มีสมบัติฆ่าเชื้อโรคได้ วิธีนี้เป็นที่นิยมทำกันโดยผู้บริโภคที่ซื้อน้ำยาสเปรย์เงินนาโนมาพ่นเสื้อผ้าเอง แต่ไม่เป็นที่นิยมในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากอนุภาคเงินนาโนจะติดกับเนื้อผ้าไม่แน่น ซักไม่กี่ครั้งก็หลุดหมด อีกตัวอย่างหนึ่งได้แก่การพ่นอนุภาคเงินนาโนที่แขวนลอยในของเหลวที่ความเข้มข้นสูงลงไปบนผงซักฟอกที่อบแห้งแล้ว เพื่อผลิตผงซักฟอกผสมเงินนาโน ในกรณีนี้มีการผสมทันทีหลังจากการฉีดพ่น

การฉีดพ่นวัสดุนาโน ไม่ว่าจะเป็นในรูปผง หรือในรูปแขวนลอยในของเหลว เป็นกิจกรรมที่สามารถทำให้เกิดฝุ่นหรือละอองที่มีวัสดุนาโนในระดับความเข้มข้นสูง ควรจะต้องทำในตู้ดูดควัน หรือในถังปิดที่ทำหน้าที่เป็นถังผสมไปด้วย ไม่ควรจะทำในที่เปิดและต้องสวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลที่เหมาะสมขณะปฏิบัติงาน

4.3.7. การสัมผัสในระหว่างการทำงานด้วยเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูป ตัดแต่ง เลื่อย เจาะ ไส กลึง คว้าน ฯลฯ

การสัมผัสกับวัสดุนาโน อาจเกิดได้ในขณะที่ขึ้นรูป ตัดแต่ง เลื่อย เจาะ ไส กลึง หรือคว้านชิ้นงานที่มีองค์ประกอบของวัสดุนาโนด้วยเครื่องจักร ตัวอย่างของกิจกรรมขึ้นรูปตัดแต่ง (machining) ฯลฯ ได้แก่

การเจาะรูที่แร็คเก็ตเทนนิส ซึ่งหล่อในเรซินมาจากม้วนผ้าที่ทอจากเส้นใยนาโนคาร์บอน ซึ่งเป็นวัสดุผสมนาโน (nanocomposite)

เครื่องมือที่ใช้ เป็นเครื่องจักรกลปกติ เช่น เจาะด้วยสว่าน ไสด้วยกบไฟฟ้า กลึงด้วยเครื่องกลึง ตัดด้วยเลื่อยไฟฟ้า ฯลฯ โดยมีลักษณะเฉพาะ อยู่ที่การใช้ความเร็วของการหมุน (ดอกสว่าน ฯลฯ) ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับการทำงานโลหะ ทำให้ได้เศษวัสดุคอมโพสิตออกมาเป็นชิ้นเล็ก ๆ และมีความเป็นไปได้สูงที่วัสดุนาโนซึ่งตามปกติถูกฝังอยู่ในวัสดุคอมโพสิตนั้น หลุดออกมาเป็นวัสดุนาโนที่สามารถฟุ้งกระจายได้

อนึ่ง การขึ้นรูปตัดแต่งชิ้นงานโดยในขณะที่มีการเจาะ ไส กลึง ด้วยความเร็วสูง มีการปล่อย ฉีด หรือพ่นวัสดุนาโนในรูปแบบผง ลงไปบนชิ้นงาน ทำให้เกิดฝุ่นนาโนฟุ้งกระจาย และในกรณีที่มีการฉีดพ่นวัสดุนาโนที่แขวนลอยอยู่ในของเหลว ลงไปบนชิ้นงานที่กำลังถูกเจาะ ไส กลึง ด้วยความเร็วสูง ก็จะทำให้เกิดละอองนาโน และ/หรือ ฝุ่นนาโนกระจายไปในอากาศรอบ ๆ เครื่องจักร

4.3.8. การสัมผัสระหว่างการบรรจุหีบห่อวัสดุนาโน

การบรรจุหีบห่อ เป็นกิจกรรมที่อาจเป็นแหล่งของการสัมผัสกับวัสดุนาโน ที่มีความเข้มข้นสูง ในกรณีที่เป็นวัสดุนาโนที่อันตรายมาก หรือไม่ทราบอันตราย จึงมีความจำเป็นต้องใช้มาตรการควบคุมที่เข้มงวด

ในกรณีการบรรจุวัสดุนาโนในลักษณะผงลงหีบห่อ อาจมีการรั่วไหลของฝุ่นออกมาจากเครื่องบรรจุได้หลายที่ ขึ้นอยู่กับวิธีการบรรจุที่จำเป็นต้องปรับปรุงตั้งแต่การออกแบบ เช่น การบรรจุฝุ่นนาโนลงถุงด้วยแรงลมเป่า แต่ลมต้องมีทางออก ถ้าออกแบบไม่ดี ลมขาออกอาจพาวัสดุนาโนติดมาได้บ้าง และขึ้นอยู่กับการดูแลรักษาวัสดุอุปกรณ์ เช่น รอยรั่วในตำแหน่งข้อต่อสำหรับป้อนวัสดุลงหีบห่อ ทำให้วัสดุนาโนรั่วออกมาจากรอยรั่วนั้น

ในกรณีที่เครื่องบรรจุหีบห่อ อยู่ติดกับจุดที่นำสินค้าขึ้นรถบรรทุก การรั่วของวัสดุนาโน จะทำให้เกิดการปนเปื้อนรถบรรทุก ตั้งแต่ที่ยางรถยนต์ไปจนตลอดคันรถ ทำให้การปนเปื้อนขยายวงออกไปนอกโรงงาน กลายเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมได้

4.3.9. การสัมผัสระหว่างการทำความสะอาดเครื่องมือเครื่องจักรที่ใช้กับวัสดุนาโน

ในที่นี้ การทำความสะอาดเครื่องมือเครื่องจักร หมายถึงการที่ผู้ปฏิบัติงานทำความสะอาดเครื่องมือเครื่องจักร ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับวัสดุนาโน ให้สะอาดเรียบร้อย ซึ่งอาจจะส่งผลให้เดินเครื่องได้ไม่ติดขัด ได้ผลผลิตที่มีสมบัติสม่ำเสมอ และอาจช่วยยืดอายุการทำงานของเครื่องมือเครื่องจักรนั้น หลักการของการทำความสะอาดก็คือ ไม่สร้างฝุ่นนาโนเพิ่มขึ้น หรือไม่ทำให้ฝุ่นนาโนที่ติดอยู่ในเครื่องหรือบนเครื่องกระจายออกไปรอบเครื่องมือเครื่องจักรนั้น

4.3.10. การสัมผัสระหว่างการทำความสะอาดบริเวณทำงาน

การทำความสะอาดบริเวณทำงาน มีลักษณะคล้ายกับการทำความสะอาดภายนอกเครื่องมือเครื่องจักร ซึ่งอาจจะมีฝุ่นนาโนเกาะติดอยู่ หรือมีคราบของเหลวนาโนซึ่งอาจแห้งแล้วกลายเป็นฝุ่นขนาดนาโนหรือใหญ่กว่าได้ ในกรณีที่ทำงานกับวัสดุผสมนาโน ฝุ่นในบริเวณทำงานก็อาจมีวัสดุนาโนเป็นองค์ประกอบได้

การทำความสะอาดบริเวณทำงาน เป็นการทำความสะอาดที่ทำเป็นกิจวัตรประจำวันหลังเลิกงาน หรือทำทุกครั้งก่อนออกจากกะ (shift) เป็นต้น ดังนั้นจึงมีฝุ่นทั้งที่มีขนาดนาโนและใหญ่กว่านาโนเกาะหรือตกหล่นอยู่ในบริเวณทำงานไม่มากนัก

4.3.11. การสัมผัสระหว่างการทำความสะอาดวัสดุที่ฟุ้ง หก ตกหล่น

การทำความสะอาดบริเวณทำงานนาน ๆ ครั้ง จนมีฝุ่นและสิ่งสกปรกทับถมกันมาก หรือเมื่อทำการซ่อมบำรุงเตาปฏิกรณ์โดยขณะเปิดเตา มีฝุ่นที่น่าจะเป็นวัสดุนาโนกระจายออกมาเกลื่อนบริเวณทำงาน กรณีเช่นนี้เรียกว่าเป็นการทำความสะอาดวัสดุที่ฟุ้ง หก ตกหล่น

การฟุ้ง หก ตกหล่น (spill) ของวัสดุนาโน มีความแตกต่างกันได้มากตามประเภทอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตาม ผู้ประกอบกิจการโรงงานจะต้องมีวิธีป้องกันไม่ให้เกิดขึ้น เนื่องจากวัสดุนาโนมีราคาแพงเมื่อเทียบกับวัสดุที่คล้ายคลึงกันแต่ไม่ได้มีขนาดนาโน

4.3.12. การสัมผัสระหว่างการจัดการของเสีย

การจัดการของเสียในที่นี้ หมายถึงการนำของเสียที่มีวัสดุนาโนปะปนอยู่ จากถังขยะ หรือที่เป็นผลจากการการทำความสะอาดวัสดุที่ฟุ้ง หก ตกหล่น ไปยังสถานที่บำบัดของเสีย หรือไปส่งให้ผู้ให้บริการกำจัดของเสีย หรือใส่ภาชนะที่ปลอดภัย เก็บในสถานที่ปลอดภัย เพื่อรอการส่งต่อไปยังโรงงานกำจัดของเสีย

แนวทางการคุ้มครองความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน มีความคล้ายคลึงกับการทำความสะอาดเครื่องจักร ทำความสะอาดบริเวณทำงาน และทำความสะอาดวัสดุที่ฟุ้ง หก ตกหล่น โดยต้องระวังฝุ่นนาโนที่อาจฟุ้งกระจาย ทั้งของเสียที่เป็นฝุ่น ของเสียที่เป็นของเหลว และของเสียที่ประกอบด้วยวัสดุนาโนที่ฝังไว้ในวัสดุอื่นไม่ว่าจะเป็นพอลิเมอร์หรือไม่ก็ตาม เพราะฝุ่นนาโนอาจสัมผัสกับร่างกายของผู้ปฏิบัติงานในโรงงานได้ ทั้งทางการหายใจและทางผิวหนัง ทุกกรณีจึงต้องพยายามลดฝุ่นด้วยเครื่องดูดฝุ่น และปิดฝาหรือเก็บถังขยะที่เต็มแล้วไว้ในห้องดูดอากาศ ไม่ให้ฝุ่นฟุ้งออกมานอกห้องได้ ในกรณีของเหลวและกรณีฝังวัสดุนาโนไว้ในวัสดุอื่น ก็ต้องป้องกันการสัมผัสกับผิวหนังด้วยการใช้ถุงมือ

อนึ่ง ในการจัดการของเสีย ต้องพิจารณาทั้งประเด็นความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานในโรงงานอุตสาหกรรม และประเด็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมไปพร้อมกัน

4.3.13. การสัมผัสในระหว่างการเลิกใช้เครื่องมือเครื่องจักร

เครื่องมือเครื่องจักรอาจถูกเลิกใช้งาน เช่น กรณีเลิกกิจการ ถูกซื้อกิจการแล้วปิดโรงงาน หรือจำเป็นต้องเปลี่ยนเครื่องมือเครื่องจักรใหม่ให้ทันสมัย ฯลฯ

โดยปกติบริษัท หรือองค์กร หรือหน่วยงานแต่ละหน่วย จะมีเอกสารความปลอดภัยที่ต้องปฏิบัติในการเลิกใช้เครื่องมือเครื่องจักร ซึ่งในรายละเอียดจะมีความแตกต่างกันตามประเภท/ชนิดของเครื่องจักรนั้น ๆ แต่อย่างไรก็ตาม การเตรียมการเลิกใช้เครื่องมือเครื่องจักร จะต้องพิจารณาในประเด็นสำคัญดังนี้

1. จะนำเครื่องจักรที่เลิกใช้หรือรื้อจากสายการผลิตไปเก็บไว้ที่ไหน และจะดำเนินการอย่างไรต่อไป เช่น ขายเป็นเศษเหล็ก หรือขายให้โรงงานอื่น ใครเป็นผู้รับผิดชอบการเก็บนี้ เป็นต้น

2. จะทำอย่างไรกับอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง เช่น หากมีท่อก๊าซแรงดันสูง (high pressure gas cylinder) ที่ต้องถอดออกจากเครื่องจักร จะเอาท่อไปเก็บที่ไหน หรือส่งคืนบริษัทก๊าซ (กรณีท่อเช่า) หรือจะทำอย่างไรกับท่อก๊าซเชื้อเพลิงที่ต่อเข้าเครื่องจักร เป็นต้น

3. จะทำความสะอาดสารเคมีอันตรายและวัสดุอันตรายต่าง ๆ รวมทั้งวัสดุชีวภาพที่ปนเปื้อนเครื่องมือเครื่องจักร (ถ้ามี) อย่างไร ใครเป็นผู้รับผิดชอบ และจะทราบได้อย่างไรว่าทำความสะอาดเสร็จเรียบร้อยแล้ว

4. ถ้าเป็นการถอดเปลี่ยนเอาเครื่องมือเครื่องจักรรุ่นใหม่กว่ามาทดแทน ต้องประสานงานกับฝ่ายติดตั้งเครื่องจักรใหม่ ว่าจะต่อเชื่อมเข้าไปในสายการผลิตอย่างไร และจะสามารถเริ่มเดินเครื่องทดสอบได้เมื่อใด ฯลฯ

ก่อนเลิกใช้เครื่องมือเครื่องจักร ควรนำเอกสารประจำเครื่องมาศึกษาอย่างละเอียด ว่าวัสดุนาโนที่ใช้เป็นวัสดุอะไร และมีความเป็นอันตรายอย่างไร (ดูจากเอกสารข้อมูลความปลอดภัยของวัสดุนาโน จากบริษัทผู้ผลิต) เพื่อกำหนดแนวทางการทำความสะอาดเครื่องมือเครื่องจักรที่กำลังจะเลิกใช้ เนื่องจากโรงงานส่วนใหญ่มีขั้นตอนการเลิกใช้เครื่องมือเครื่องจักรอยู่แล้ว ที่เรียกว่า safety sign-off process หรือ equipment decommissioning checklist

5. หลักบริหารความเสี่ยงจากวัสดุนาโน

ปัจจัยที่มีผลต่อความเสี่ยง ขึ้นอยู่กับความเป็นอันตราย (hazard) กับโอกาส (chance หรือ likelihood หรือ probability) ที่ความเป็นอันตรายนั้นจะเกิด

- **ความเป็นอันตราย** หมายถึงความเสียหายหรือความเจ็บป่วยที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับวัสดุนาโนเข้าสู่ร่างกาย โดยการหายใจ การซึมผ่านผิวหนัง หรือเข้าทางปาก นอกจากนี้ ความเป็นอันตรายยังขึ้นอยู่กับสมบัติตามธรรมชาติ และความเข้มข้น (concentration หรือ dose) ของวัสดุนาโนด้วย

- **โอกาสที่ความเป็นอันตรายจะเกิด** หมายถึง โอกาสการสัมผัส (exposure) กับวัสดุนาโน

การประเมินความเสี่ยงมีหลายวิธี ซึ่งใช้หลักการวัดความเป็นอันตรายและโอกาสที่ความเป็นอันตรายจะเกิด โดยประเมินออกมาเป็นตัวเลขแล้วคำนวณระดับความเสี่ยงซึ่งเป็นผลคูณของความเป็นอันตรายกับโอกาสที่ความเป็นอันตรายจะเกิด การทราบถึงระดับความเสี่ยงเมื่อสัมผัสกับวัสดุนาโน จะช่วยในการเปรียบเทียบระดับความเสี่ยง และยังช่วยให้สามารถกำหนดแนวทางการลดความเสี่ยงซึ่งกระทำได้โดยวิธีลดระดับความเป็นอันตรายและโอกาสสัมผัสกับวัสดุนาโน

ในกรณีที่ไม่อาจประเมินระดับความเสี่ยงหรือมีความไม่แน่นอนเกี่ยวกับความเป็นอันตรายของวัสดุนาโน หรือทำการประเมินได้ระดับประมาณการ ก็มีความจำเป็นต้องใช้หลักการระวังไว้ก่อน โดยการลดโอกาสการสัมผัส ใช้การควบคุมอย่างเข้มงวด หากยังมีข้อมูลเกี่ยวกับความเป็นอันตรายบ้าง ก็อาจใช้แถบควบคุม (control banding) ซึ่งสะดวกต่อการใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม

5.1. กรอบการบริหารความเสี่ยงวัสดุนาโน

สถาบันมาตรฐานแห่งสหราชอาณาจักร (BSI) ได้กำหนดกรอบบริหารความเสี่ยงวัสดุนาโน โดยอ้างอิงกฎหมาย The Control of Substances Hazardous to Health Regulations (COSHH) 2002 ว่ามีองค์ประกอบดังต่อไปนี้

1. การชี้บ่งอันตราย และประเมินความเสี่ยง
2. แนวทางการป้องกันการสัมผัสวัสดุนาโน
3. การป้องกัน หรือควบคุมการสัมผัส
4. มาตรการเพื่อควบคุมการสัมผัสอย่างต่อเนื่อง
5. การเฝ้าติดตามการสัมผัส
6. การเฝ้าระวังทางอาชีวอนามัยอย่างเหมาะสม
7. แผนและวิธีปฏิบัติเพื่อรองรับอุบัติเหตุ อุบัติการณ์ และเหตุฉุกเฉิน
8. การฝึกอบรม และให้คำแนะนำแก่ผู้ปฏิบัติงาน

ปัญหาหลักเกี่ยวกับการบริหารความเสี่ยงของนาโนเทคโนโลยีและวัสดุนาโน ก็คือการขาดข้อมูลและองค์ความรู้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกี่ยวกับความเป็นอันตรายของวัสดุนาโนแต่ละชนิด และการเปลี่ยนแปลง (fate) หลังจากที่วัสดุนาโนถูกปลดปล่อยออกมาจากแหล่งผลิตสู่สิ่งแวดล้อม ทั้งก่อนและหลังจากที่มนุษย์รับเข้าสู่ร่างกาย สำหรับกรณีโรงงานอุตสาหกรรมนั้น เป็นการรับวัสดุนาโนเข้าไปโดยตรง เนื่องจากผู้ปฏิบัติงานมีความใกล้ชิดกับแหล่งของวัสดุนาโน ที่มีความเข้มข้นสูงกว่าที่ผู้บริโภคจะได้รับ การบริหารความเสี่ยงจากวัสดุนาโนในประเทศไทย สามารถใช้กรอบการบริหารความเสี่ยงดังกล่าวข้างต้นมาประยุกต์ใช้ได้ โดยมีรายละเอียดในการดำเนินการดังนี้

5.1.1. การชี้บ่งอันตรายและประเมินความเสี่ยง

ในการชี้บ่งอันตรายและประเมินความเสี่ยง โรงงานอุตสาหกรรมมีความจำเป็นต้องรวบรวมข้อมูล โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้[81]

- ชื่อของวัสดุนาโน ชื่อการค้า และชื่อทางวิทยาศาสตร์
- เอกสารข้อมูลความปลอดภัยสารเคมี (MSDS หรือ SDS) ของวัสดุนาโน ปัจจุบันเอกสารข้อมูลความปลอดภัยสารเคมีมักได้จากผู้ขาย หรือจากข้อมูลที่เผยแพร่ในเว็บไซต์ ข้อมูลดังกล่าว รวมถึงความเป็นสารก่อมะเร็ง ความเป็นพิษ การกระตุ้นให้เกิดอาการแพ้ การกัดกร่อน การระคายเคือง และความเป็นพิษต่อระบบสืบพันธุ์

- ลักษณะทางกายภาพหรือลักษณะที่ปรากฏของวัสดุนาโน เช่นถ้ามีลักษณะเรียวยาวหรือเป็นเส้น จะมีความเป็นอันตรายมากกว่าชนิดที่เป็นอนุภาคกลม เนื่องจากสามารถทิ่มแทงทะลุเซลล์ของสิ่งมีชีวิตได้ง่าย วัสดุนาโนที่เป็นผง มีความเป็นอันตรายมากกว่าสภาพแขวนลอยในของเหลว เป็นต้น
- องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุนาโน
- สมบัติของการละลายน้ำ
- ความเป็นอันตรายหรือความเป็นพิษ (toxicity)
- ปริมาณวัสดุนาโนในรูปวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์
- ขนาดและการกระจายของขนาด (size distribution) ของวัสดุนาโน
- องค์ประกอบที่ช่วยยึดผงนาโนไม่ให้ฟุ้งกระจาย
- ขั้นตอนการปฏิบัติงาน ที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนาโน
- บุคคลที่มีโอกาสสัมผัสวัสดุนาโน เช่น ผู้ปฏิบัติงานในสายการผลิต ผู้ปฏิบัติงานในบริเวณใกล้เคียง ผู้จัดการโรงงาน ผู้เยี่ยมชมโรงงาน เป็นต้น
- ตำแหน่งของการปนเปื้อน เช่น เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง ในกรณีที่เป็นฝุ่น หากมีการฟุ้งกระจายอาจเกิดการปนเปื้อนได้ทุกพื้นที่ของการปฏิบัติงาน เป็นต้น
- โอกาสในการสัมผัส เช่น การใช้อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลทำให้ลดโอกาสในการสัมผัส เป็นต้น
- ระดับการสัมผัส เช่น ปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ฟุ้งกระจายในอากาศ ซึ่งต้องดำเนินการตรวจวัด เป็นต้น
- ความถี่และระยะเวลาสัมผัส เช่น ตลอดช่วงการทำงาน หรือเป็นระยะเวลาสั้นๆ แต่หลายครั้ง เป็นต้น

ข้อมูลที่ใช้ในการบ่งชี้อันตรายและประเมินความเสี่ยงดังกล่าวข้างต้น สามารถสืบค้นได้ทั้งจากในประเทศและจากเอกสารมาตรฐานความปลอดภัยของหน่วยงานต่างประเทศ เช่น NIOSH ACGIH NEDO และ OECD เป็นต้น

ในกรณีไม่สามารถหาข้อมูลโดยเฉพาะข้อมูลสมบัติทางกายภาพได้ อาจจำเป็นต้องส่งวัสดุนาโนไปตรวจวิเคราะห์ ยังห้องปฏิบัติการทดสอบที่มีขีดความสามารถ เช่น จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล มหาวิทยาลัยขอนแก่น ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุศาสตร์ และกรมวิทยาศาสตร์บริการ เป็นต้น

ในระหว่างการจัดทำแนวปฏิบัติเบื้องต้นนี้ ยังไม่มีวิธีประเมินความเสี่ยงของวัสดุนาโนซึ่งเป็นที่ยอมรับในระดับสากล มีแต่ผลของความพยายามจากประเทศที่พัฒนาแล้วบางประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกาและญี่ปุ่น ที่ได้มีการประเมินความเป็นอันตรายและความเสี่ยงของวัสดุนาโนเพียงสองชนิด ได้แก่ อนุภาคคาร์บอนนาโน และอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโน และผลของความร่วมมือระหว่างบริษัทดูปองท์ (duPont) กับองค์การเอกชน Environmental Defense ในการพัฒนากรอบการประเมินความเสี่ยงของวัสดุนาโน ซึ่งมีตัวอย่าง 2 ชนิด คือ อนุภาคคาร์บอนนาโน และอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโน ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

อนึ่ง คณะทำงาน Working Party on Manufactured Nanomaterials (OECD-WPMN) ได้ตั้งคณะย่อยที่ดูแลเกี่ยวกับเรื่องการประเมินความเสี่ยงจากวัสดุนาโน ในเวทีระหว่างประเทศคาดว่าจะมีวิธีการประเมินความเสี่ยงจากวัสดุนาโนซึ่งเป็นสากลและเป็นที่ยอมรับได้ ประมาณปี พ.ศ. 2557

5.1.2. แนวทางการป้องกันการสัมผัสวัสดุนาโน

การขาดองค์ความรู้เกี่ยวกับความเป็นอันตรายของวัสดุนาโน ทำให้การประเมินความเสี่ยงไม่สามารถทำได้ในเชิงปริมาณ ยกเว้นกรณีท่อคาร์บอนนาโน แต่สิ่งที่ทำได้ คือการนำหลักการป้องกันไว้ก่อนมาประยุกต์ใช้โดยมีแนวทางที่ต้องควบคุมการสัมผัสวัสดุนาโนให้น้อยที่สุดเท่าที่ทำได้

สถาบันมาตรฐานแห่งสหราชอาณาจักร ได้ให้หลักการเบื้องต้นของการควบคุมการสัมผัสวัสดุนาโนไว้ 6 ข้อ โดยเรียงตามลำดับความสำคัญดังนี้

5.1.2.1. การเลิกใช้ (elimination)

การเลิกใช้วัสดุนาโน เป็นการยุติปัญหาความเป็นอันตรายอย่างถาวร อย่างไรก็ดี การเลิกใช้วัสดุนาโนทำให้ขาดสมบัติที่เป็นประโยชน์บางประการในผลิตภัณฑ์ที่ยังมีความจำเป็น จึงต้องหาวัสดุอื่นมาทดแทน

5.1.2.2. การทดแทน (substitution)

การทดแทนเป็นการใช้สารอื่นที่มีสมบัติทัดเทียมหรือใกล้เคียงกับวัสดุนาโน แต่มีความเสี่ยงน้อยกว่า เช่น เปลี่ยนวัตถุดิบอนุภาคซิลิกานาโน เป็นเส้นใยเซลลูโลส หรือการเติมหมู่ไฮดรอกซิล (OH) เข้าไปที่ผิวของฟูลเลอรีน หรือการเคลือบวัสดุนาโนด้วยพอลิเมิร์ที่ไม่เป็นพิษต่อเซลล์ หรือการเปลี่ยนรูปแบบของวัสดุนาโน จากผงที่ฟุ้งกระจายได้ เป็นแบบแขวนลอยในของเหลว เช่น จากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนที่เป็นผง ไปเป็นแบบแขวนลอยในน้ำ หรือเป็นแบบที่ฝังอยู่ในวัสดุอื่น เช่น จากผงท่อคาร์บอนนาโน เป็นแบบที่ฝังตัวอยู่ในเนื้อผ้า เป็นต้น

5.1.2.3. การปฏิบัติงานในระบบปิด (enclosed system)

การทำงานในระบบปิด เป็นการปฏิบัติงานในตู้หรือห้องปิด เพื่อกั้นแยกวัสดุนาโนไม่ให้สัมผัสกับผู้ปฏิบัติงานโดยตรง

5.1.2.4. การควบคุมทางวิศวกรรม (engineering control)

การควบคุมทางวิศวกรรม เป็นการปฏิบัติงานภายใต้ระบบดูดอากาศ เช่น การดูดระบายอากาศ (extract ventilation) ตู้ดูดควัน (fume hood หรือ fume cabinet) และท่อดูดฝุ่น (dust extractor) เพื่อให้มีการกรองโดยใช้ไส้กรองชนิด HEPA

5.1.2.5. การควบคุมวิธีปฏิบัติการ (procedural control)

การควบคุมวิธีปฏิบัติการ เป็นมาตรการเสริมการควบคุมทางวิศวกรรม ตัวอย่างเช่น การลดจำนวนผู้ปฏิบัติงาน และลดเวลาที่ผู้ปฏิบัติงานแต่ละคนต้องทำงาน เพื่อลดการสัมผัสกับวัสดุนาโน จำกัดบริเวณผู้ที่ไม่เกี่ยวข้องและไม่ได้รับอนุญาต ประกอบกับผู้ปฏิบัติงานต้องได้รับการแจ้งเตือนถึงอันตราย มาตรการป้องกัน และผลกระทบต่อสุขภาพ รวมทั้งวิธีปฏิบัติงานกับวัสดุนาโน นอกจากนั้นควรมีการเฝ้าระวังระดับวัสดุนาโน และมีการเฝ้าระวังทางอาชีวอนามัยเป็นประจำด้วย

อนึ่ง ข้อมูลบางอย่าง เช่น ชื่อของวัสดุนาโน และค่ามาตรฐานสูงสุด อาจนำไปเขียนต่อท้ายหรือประกอบกับเครื่องหมายหรือป้ายเตือนอันตราย (safety sign หรือ hazard sign) ที่ติดตั้งไว้ในบริเวณที่มีการใช้วัสดุนาโน หรือที่ผู้ปฏิบัติงานมีโอกาสสัมผัสวัสดุนาโนด้วย ก็จะเป็นการให้ข้อมูลในระดับปฏิบัติการ ซึ่งดีกว่าการเตือนเพียงว่า **“ให้ระวังวัสดุนาโน”** เท่านั้น เครื่องหมายเตือนอันตรายนาโนที่ได้รับรางวัลการประกวดและมีการเผยแพร่บนเครือข่ายอินเทอร์เน็ต แสดงดังรูปที่ 5.1

รูปที่ 5.1: เครื่องหมายเตือนอันตรายนาโนที่ได้รับรางวัลการประกวด และมีการเผยแพร่ในเครือข่ายอินเทอร์เน็ต

เครื่องหมายทั้งสามได้รับรางวัลชนะเลิศ จากงาน World Social Forum ประจำปี พ.ศ. 2550 ที่กรุงไนโรบี ประเทศเคนยา เป็นผลงานของนักออกแบบจากประเทศสก็อตแลนด์ กรีซ และอังกฤษ ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันยังไม่มีหน่วยงานระหว่างประเทศหรือของรัฐบาลประกาศใช้เครื่องหมายดังกล่าวอย่างเป็นทางการ

ที่มา: http://www.bookofjoe.com/2007/01/beware_of_nanot.html

5.1.2.6. การใช้อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล (Personal Protective Equipment)

อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล (PPE) สำหรับนาโนเทคโนโลยีและวัสดุนาโน ได้แก่ อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ และอุปกรณ์ปกป้องการสัมผัสทางผิวหนัง โดยมีรายละเอียดดังนี้

- **อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ**

อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ แบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆ 2 ประเภท ได้แก่ อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจประเภททำให้อากาศสะอาด (air purifying respirator) กับอุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจประเภทจัดส่งอากาศสำหรับการหายใจ (air supplying respirator)

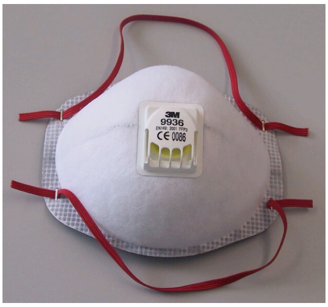
อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจประเภททำให้อากาศสะอาด แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ แบบที่ผู้สวมใส่ต้องออกแรงสูดหายใจเข้าเอง เช่น อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจชนิดครอบจมูก แสดงดังรูปที่ 5.2 กับแบบที่มีพัดลมช่วยดูดอากาศผ่านไส้กรอง (Powered Air Purifying Respirator หรือ PAPR) ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ซึ่งมักคาดพัดลมไว้ที่เอวหรือสะพายหลัง แล้วต่อท่ออากาศที่กรองแล้วมายังหน้ากาก แต่บางรุ่นก็ติดพัดลมไว้ที่หน้ากาก แสดงดังรูปที่ 5.4

อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจประเภททำให้อากาศสะอาดแบบที่ผู้สวมใส่ต้องออกแรงสูดหายใจเข้าเอง สามารถแบ่งออกได้ 2 ส่วน คือ ส่วนครอบจมูกและปาก กับตัวกรอง (filter) ซึ่งมักเป็นแผ่นซ้อนกันอยู่ในตัว เรียกว่าตัวกรองแบบตลับ (cartridge) เพื่อให้ถอดเปลี่ยนได้ โดยอาจเป็นชนิดตลับเดี่ยว (ทรงจมูกหมู) หรือชนิดสองตลับ หรืออยู่ในกล่องพัดลมสำหรับแบบติดพัดลมไว้ที่หน้ากาก

หลักการทำงานของตัวกรอง (single-fiber filtration theory) มีดังนี้ คือ อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 300 นาโนเมตร จะถูกกรองไว้ที่ตัวกรองโดยกระบวนการกระทบ (impaction) การดักเก็บ (interception) และการตกตะกอนตามแรงโน้มถ่วง (gravitational settling) ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กกว่า 200 นาโนเมตร จะถูกกรองไว้ด้วยกระบวนการแพร่ (diffusion) การดูดของประจุไฟฟ้าต่างขั้วกัน (electrostatic attraction) และผลจากแรงโพลาไรเซชั่น (polarization force effect) อย่างไรก็ตาม อนุภาคที่มีขนาดอยู่ระหว่างประมาณ 200-300 นาโนเมตร จะเป็นช่วงขนาดที่ไม่มีกระบวนการดักฝุ่นใด ๆ สามารถทำงานได้ดี เรียกว่า ขนาดอนุภาคที่แทรกซึมได้ดีที่สุด (most-penetrating particle size หรือ MPPS) ส่วนกลไกการดักจับอนุภาคนาโนที่มีขนาดเล็กมาก คือเล็กกว่า 20 นาโนเมตร ก็ยังไม่มีคำอธิบายที่แน่ชัด

ในการเลือกอุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจประเภททำให้อากาศสะอาดด้วยการกรองอนุภาค (particulate filter respirator) สิ่งที่ต้องพิจารณาคือค่า Assigned Protection Factor (APF) ซึ่งหมายถึงค่าที่แสดงถึงระดับการป้องกันของอุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ ที่ทำงานปกติ ค่า APF นี้คิดรวมปัจจัยหลายประการ ทั้งค่าการรั่วเข้า (Total Inward Leakage) ที่เกิดจากอนุภาคทะลุผ่านไส้กรอง กับการรั่วตามขอบ อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจที่ไม่แนบสนิทกับใบหน้า หรือเป็นค่าสมรรถภาพการกรองโดยยอมให้รั่วได้ โดยทั่วไปอุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจแบบครอบครึ่งใบหน้า (half-mask) และอุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจแบบครอบเฉพาะจมูก มีค่า APF ประมาณ 10 ส่วนอุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจชนิดครอบเต็มใบหน้า (full-facepiece) มีค่า APF ประมาณ 1,000

โดยสรุป คำแนะนำสำหรับการใช้อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมนาโนในประเทศไทย คือ ใช้หน้ากาก N95 หรือ P100 หรือ P3/FFP3 จะเป็นชนิดปิดจมูกหรือครอบทั้งใบหน้า ทั้งนี้การเลือกแบบใดขึ้นอยู่กับความร้ายแรงของสถานการณ์ ที่สำคัญคือต้องตรวจการรั่วด้านข้างของหน้ากาก และต้องมีระบบการเปลี่ยนหน้ากากหรือไส้กรอง เมื่อจวนจะถึงจุดอิ่มตัวในการดูดซับวัสดุนาโน หรือมีตารางการเปลี่ยนไส้กรองเป็นประจำ ตามลักษณะงานหรือตามลักษณะการสัมผัสกับวัสดุนาโน



รูปที่ 5.2: อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจชนิดครอบจมูก

(Filtering Facepiece Respirator หรือ FFR)

ที่มา: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/48/Atemluftfilter_Einwegmaske.jpg

รูปที่ 5.3: อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจชนิด PAPR

รูปซ้าย ชนิดป้อนลมเข้าด้านหน้า APR=1000 **ที่มา**: http://www.directindustry.com/prod/scott-health-safety/powered-air-purifying-respirators-papr-32838-633886.html **รูปกลาง**: ชนิดป้อนลมเข้าด้านหลัง ให้ความสะดวกในการมองเห็น เพราะไม่มีสิ่งกีดขวางสายตา **ที่มา**: http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=66666UuZjcFSLXTtNxfaoXT6EV76EbHSHVs6EVs6E666666-- **รูปขวา**: PAPR ต่อกับผ้าคลุมปิดครึ่งตัว **ที่มา**: http://www.applesafety.com/respiratory_papr/north/north_pa121_primair_plus_hood_assembly.html

รูปที่ 5.4: อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจชนิด PAPR ที่ติดพัดลมไว้ที่หน้ากาก

ที่มา: http://media.msanet.com/na/usa/apr/PoweredAirPurifyingRespiratorsPAPRs/OptimAir_Mask-Mounted_PAPR/optimairapp_lo.jpg

- **อุปกรณ์ปกป้องการสัมผัสทางผิวหนัง**

อุปกรณ์ปกป้องการสัมผัสทางผิวหนัง ประกอบด้วย ถุงมือ (gloves) แว่นครอบตา (goggles) กระบังหน้า (visor หรือ face shield) ชุดป้องกันสารพิษ (hazmat coveralls หรือ suit) และถุงหุ้มรองเท้า (shoe covers) โดยใช้วัสดุสังเคราะห์เช่น Tyvek แทนผ้า เพื่อป้องกันวัสดุนาโนทั้งที่เป็นฝุ่นและที่แขวนลอยในของเหลว

รายละเอียดของอุปกรณ์ปกป้องการสัมผัสทางผิวหนังมีดังนี้

ถุงมือ

ในการปฏิบัติงานกับวัสดุนาโนต้องสวมถุงมือยางสังเคราะห์ชนิดไนไตรล์ (nitrile gloves) ที่มีขนาดเหมาะสมกับขนาดของมือ หากต้องการป้องกันการกระเซ็นของวัสดุนาโนที่แขวนลอยในของเหลว ควรใช้ถุงมือชนิดรัดข้อมือ และถ้ามีการใช้วัสดุนาโนกับสารเคมีอันตราย ควรเลือกใช้ถุงมือที่ทนต่อสารเคมีอันตรายนั้นด้วย โดยถ้าเป็นการทำงานในห้องสะอาด (clean room) ก็จำเป็นต้องเลือกใช้ถุงมือที่ออกแบบมาสำหรับทำงานในห้องสะอาดโดยเฉพาะ (nitrile clean room gloves) นอกจากนี้ ชุดป้องกันสารเคมีอันตรายบางรุ่น จะมีถุงมือติดมาพร้อมกับชุดด้วย โดยเชื่อมเป็นเนื้อเดียวกัน

แว่นครอบตา และกระบังหน้า

อย่างน้อยต้องใช้แว่นครอบตาสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม แต่ถ้าทำงานกับวัสดุนาโนที่มีอันตราย หรือมีความเข้มข้นมาก ควรใช้อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจชนิดมีพัดลมช่วยดูดอากาศผ่านไส้กรอง พร้อมมีกระบังหน้าที่เป็นแผ่นพลาสติกใสเป็นส่วนประกอบด้วย

ชุดป้องกันสารพิษ

การปฏิบัติงานกับวัสดุนาโนที่เป็นฝุ่นหรือที่แขวนลอยในของเหลว ต้องสวมใส่ชุดป้องกันสารพิษชนิดคลุมทั้งตัว รวมทั้งคลุมศีรษะ (hood) ก่อนสวมอุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ ดังรูปที่ 5.5 ชุดป้องกันสารพิษควรมีแขนและขายาวจนถึงถุงมือและข้อเท้า โดยมีการรัดแขนเสื้อและขากางเกง ชุดดังกล่าวอาจผลิตจากวัสดุได้หลายชนิดซึ่งมีความทนทานต่อสารเคมีชนิดต่าง ๆ ได้แตกต่างกัน

นายจ้างต้องจัดให้มีการทำความสะอาดชุดที่ใส่ปฏิบัติงานเป็นประจำอย่างสม่ำเสมอตามลักษณะการใช้งาน และให้เก็บไว้ในตู้ที่แยกต่างหากจากเสื้อผ้าส่วนตัวที่สวมใส่ออกนอกโรงงาน

รูปที่ 5.5: ชุดป้องกันสารพิษ ถุงมือ และถุงเท้ารองเท้า

ชุดอุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล (PPE) ที่มักพบได้เป็นปกติในโรงงานอุตสาหกรรมนาโน

ที่มา: http://www.leadmask.com/1414-configurable-option.html เข้าถึงเมื่อ 5 เมษายน พ.ศ. 2555

รองเท้า

ต้องสวมรองเท้าสำหรับทำงานกับวัสดุนาโนโดยเฉพาะ หรืออาจสวมถุงหุ้มรองเท้า (shoe covers) ชนิดถอดทิ้งได้ และต้องเปลี่ยนถุงหุ้มรองเท้าทุกครั้งที่ออกจากห้องที่ทำงานกับวัสดุนาโน ถ้าพื้นโรงงานลื่น ก็ให้เปลี่ยนพื้นรองเท้าเป็นชนิดฉาบยางกันลื่น (non-slip sole) ส่วนต่อระหว่าง ขากางเกงกับรองเท้าต้องมียางยืดหรือแถบรัดเช่นเดียวกับที่ข้อมือ เพื่อป้องกันไม่ให้วัสดุนาโนรั่วเข้าตรงรอยต่อได้ หรือไม่เช่นนั้นก็ใช้ชุดป้องกันสารพิษชนิดคลุมถึงปลายเท้าแล้วจึงสวมรองเท้าและถุงหุ้มรองเท้าอีกชั้นหนึ่ง

5.1.3. การป้องกัน หรือควบคุมการสัมผัส

จากการศึกษาข้อมูลจากต่างประเทศและการสำรวจโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้วัสดุนาโนในประเทศไทย สามารถแบ่งกิจกรรมในโรงงานที่ผู้ปฏิบัติงานอาจสัมผัสวัสดุนาโนได้ดังนี้

1. การเปิดภาชนะบรรจุ
2. การสังเคราะห์วัสดุนาโน
3. การชั่ง ตวง วัด วัสดุนาโน
4. การทำให้วัสดุนาโนกระจายตัว
5. การผสมวัสดุนาโน
6. การฉีดพ่นวัสดุนาโน
7. การทำงานด้วยเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูป ตัดแต่ง เลื่อย เจาะ ไส กลึง คว้าน ฯลฯ
8. การบรรจุหีบห่อวัสดุนาโน
9. การทำความสะอาดเครื่องมือเครื่องจักรที่ใช้กับวัสดุนาโน
10. การทำความสะอาดบริเวณทำงาน
11. การทำความสะอาดวัสดุนาโนที่ฟุ้ง หก ตกหล่น
12. การจัดการของเสีย
13. การเลิกใช้เครื่องมือเครื่องจักร

การปฏิบัติงานในโรงงานอุตสาหกรรมนาโน ตามกิจกรรมต่างๆ ที่ได้กล่าวข้างต้น สามารถสรุปเป็นหลักการทั่วไปในการลดโอกาสการสัมผัส โดยการควบคุมและป้องกันอันตรายจากวัสดุนาโนทั้งในภาวะปกติและภาวะฉุกเฉิน เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน ดังนี้

- ถ้าไม่ทราบระดับอันตรายของอนุภาคนาโน ให้พิจารณาหาแนวทางที่เหมาะสมในการใช้มาตรการควบคุมทางวิศวกรรมอย่างเข้มงวด หรือการควบคุมวิธีปฏิบัติการเพื่อลดโอกาสการสัมผัส สำหรับการใช้อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลจะเป็นมาตรการสุดท้าย
- ในกระบวนการผลิต ควรเลือกใช้วัตถุดิบนาโนชนิดที่อยู่ในรูปแขวนลอยในของเหลว ซึ่งไม่สามารถฟุ้งกระจาย จึงมีความปลอดภัยมากกว่าแบบฝุ่น

- การฉีดพ่นวัสดุนาโน ทั้งที่อยู่ในรูปฝุ่น หรือในรูปแขวนลอยในของเหลว จะก่อให้เกิดฝุ่นหรือละอองนาโนได้ จึงควรทำในระบบปิดเท่านั้น
- มีมาตรการในการปฏิบัติงานอย่างมีวินัยและถูกสุขลักษณะ เช่น ห้ามดื่มน้ำหรือรับประทานอาหารในบริเวณที่อาจมีวัสดุนาโนฟุ้งกระจาย ล้างมือทุกครั้งหลังการปฏิบัติงาน เป็นต้น
- หลังเสร็จสิ้นการปฏิบัติงาน ให้สวมถุงมือ และใช้วัสดุเปียกหมาดเช็ดทำความสะอาดบริเวณที่ปฏิบัติงาน เครื่องมือเครื่องจักร ตู้ดูดควัน และปลายท่อดูดอากาศ แล้วทิ้งถุงมือกับวัสดุที่ใช้ทำความสะอาดลงในถังปิดที่เตรียมไว้ เพื่อส่งไปกำจัดต่อไป
- ในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุ ต้องสามารถหยุดเครื่องจักร เช่น เครื่องผสม เครื่องบรรจุ เป็นต้น ได้ทันที
- ผู้ปฏิบัติงานในโรงงานควรได้รับการฝึกซ้อมรองรับเหตุฉุกเฉิน ในกรณีเกิดเพลิงไหม้ หรือการรั่วไหลของวัสดุนาโนอย่างน้อยปีละหนึ่งครั้ง

รายละเอียดการป้องกันและการควบคุมการสัมผัสตามกิจกรรมในโรงงานมีดังนี้

5.1.3.1. การเปิดภาชนะบรรจุ

การควบคุมทั่วไป

- ผู้ปฏิบัติงานต้องสวมถุงมือ
- เปิดภาชนะบรรจุในตู้ดูดควัน[82] ที่มีขนาดเหมาะสมกับภาชนะ หรือใช้ลมดูดเฉพาะที่
- ถ้าไม่สามารถหาตู้ดูดควันหรือลมดูดเฉพาะที่ได้ ผู้ปฏิบัติงานต้องสวมอุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล เช่น เสื้อคลุม อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ และแว่นครอบตา เป็นต้น

การควบคุมวัสดุนาโนในรูปฝุ่น

- มีมาตรการลดโอกาสการสัมผัส มีการระบายอากาศออกจากบริเวณที่ปฏิบัติงานโดยใช้ตู้ดูดควัน หรือท่อดูดลมผ่านเข้าสู่ตัวกรอง และไม่นำอากาศที่ผ่านการกรองแล้วหมุนเวียนกลับเข้ามาใช้ใหม่
- ในทางทฤษฎี โรงงานอุตสาหกรรมควรทำการประเมินการสัมผัส (exposure assessment) โดยทำการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคนาโนต่อปริมาตรอากาศ ในรูปจำนวนอนุภาคหรือน้ำหนักอนุภาคต่อลูกบาศก์เมตร

การควบคุมวัสดุนาโนที่อยู่ในรูปแขวนลอยในของเหลว

- วัสดุนาโนที่อยู่ในรูปแขวนลอยในของเหลว จะไม่ฟุ้งกระจายเป็นฝุ่น นอกจากได้รับการสั่นหรือตีหรือพ่น หรือหกกระแทกอย่างแรง ดังนั้นจึงควรเปิดภาชนะในตู้ดูดควัน หรือใช้ลมดูดเฉพาะที่
- การสัมผัสกับวัสดุนาโน มักเกิดจากการกระฉอก หรือหก หรือกระเด็นเปื้อนผู้ปฏิบัติงาน ขณะที่ถ่ายเทหรือตักของเหลวออกจากภาชนะ จึงควรใช้อุปกรณ์เพื่อดูดของเหลว
- ภาชนะบรรจุวัสดุนาโนที่อยู่ในรูปแขวนลอยในของเหลว มักเป็นถังพลาสติก (plastic drum) หรือโลหะขนาดบรรจุตั้งแต่ 18-25 กิโลกรัม ในการเปิดฝาทุกครั้ง ควรกระทำด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากอาจมีความดันภายในถัง

การควบคุมวัสดุนาโนที่ฝังอยู่ในวัสดุอื่น

- วัสดุนาโนที่ฝังอยู่ในวัสดุอื่นส่วนใหญ่มักพบในโครงข่ายพอลิเมอร์ ซึ่งไม่ก่อให้เกิดปัญหาด้านความปลอดภัยมาก เนื่องจากโครงข่ายพอลิเมอร์ช่วยกักเก็บวัสดุนาโนไม่ให้กระจายตัว แต่ในบางกรณีอาจเกิดการเสียดสีระหว่างชิ้นวัสดุ ทำให้วัสดุนาโนส่วนที่อยู่บนผิวหน้าของชิ้นวัสดุหลุดออกมาเป็นฝุ่น ผู้ปฏิบัติงานจึงต้องมีความรู้ในการควบคุมและมีมาตรการป้องกันการสัมผัสทางการหายใจ เช่น เปิดภาชนะบรรจุในตู้ดูดควัน หรือใช้ลมดูดเฉพาะที่ ผู้ปฏิบัติงานต้องสวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลอย่างเหมาะสม เช่น ถุงมือ อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ และแว่นครอบตา เป็นต้น

5.1.3.2. การสังเคราะห์วัสดุนาโน

การควบคุมทั่วไป

- การสังเคราะห์วัสดุนาโน ต้องมีการควบคุมทางวิศวกรรมอย่างเพียงพอ เพื่อป้องกันไม่ให้ผู้ปฏิบัติงานสัมผัสกับวัสดุนาโน ในระหว่างการผลิต และระหว่างการซ่อมบำรุง
- เตาปฏิกรณ์ (reactor หรือ chamber) สำหรับสังเคราะห์วัสดุนาโน เช่น เตาเผาเชื้อเพลิงซึ่งมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เป็นแหล่งของวัสดุนาโนในความเข้มข้นสูงและปริมาณมาก จึงต้องมีการควบคุมตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบ โดยไม่ให้มีการรั่วไหลฟุ้งกระจายของวัสดุนาโนออกจากเตา และให้สามารถทำความสะอาดภายในเตาปฏิกรณ์ได้โดยไม่ต้องเปิดเตา
- การออกแบบ การก่อสร้างเตาปฏิกรณ์ และระบบกรองอากาศ ต้องเป็นไปตามมาตรฐานสากล
- การเดินเครื่องและซ่อมบำรุง ต้องปฏิบัติตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตเครื่องอย่างเคร่งครัด

การควบคุมวัสดุนาโนในรูปฝุ่น

- มีระบบระบายอากาศที่กรองด้วยไส้กรองชนิด HEPA ก่อนปล่อยอากาศออกภายนอก
- ระบบสังเคราะห์วัสดุนาโน ต้องมีการควบคุมทางวิศวกรรมที่พอเพียง เพื่อป้องกันไม่ให้ผู้ปฏิบัติงานสัมผัสกับวัสดุนาโนในระหว่างการผลิตและการซ่อมบำรุง เตาปฏิกรณ์ควรตั้งแยกอยู่ในตู้ดูดควัน โดยต่อท่อดูดลมไปยังระบบกรองอากาศที่ใช้ไส้กรองชนิด HEPA
- ผู้ปฏิบัติงานที่ทำงานกับเตาปฏิกรณ์ ต้องสวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล เช่น อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ เสื้อคลุม ถุงมือ แว่นครอบตา เป็นต้น
- ในบริเวณติดตั้งเตาปฏิกรณ์ ควรมีเครื่องมือวัดปริมาณความเข้มข้นของวัสดุนาโนที่กระจายอยู่ในอากาศ โดยเครื่องมือนี้ควรสามารถแสดงค่าขณะตรวจวัดเปรียบเทียบกับค่าในการวัดครั้งก่อนได้
- ในบริเวณปฏิบัติงาน ต้องมีระบบป้องกันการระเบิดของฝุ่น โดยลดการสะสมประจุไฟฟ้าสถิต

การควบคุมวัสดุนาโนที่อยู่ในรูปแขวนลอยในของเหลว

- ผู้ปฏิบัติงานที่มีหน้าที่เก็บรวบรวมวัสดุนาโนออกจากเตาปฏิกรณ์ ต้องสวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล เช่น ถุงมือ เสื้อคลุม อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ แว่นครอบตา เป็นต้น

5.1.3.3. การชั่ง ตวง วัด วัสดุนาโน

การควบคุมวัสดุนาโนในรูปฝุ่น

- ควรปฏิบัติงานชั่ง ตวง วัด วัสดุนาโนในตู้ดูดควัน
- ในกรณีที่ต้องยื่นมือเข้าไปทำงานในตู้ดูดควัน ให้ผู้ปฏิบัติงานสวมถุงมือยางสังเคราะห์ชนิดไนไตรล์
- ในกรณีที่เข้าไปปฏิบัติงานในตู้ดูดควัน ให้ผู้ปฏิบัติงานสวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลอย่างรัดกุม เช่น เสื้อคลุมที่มีแขนและขายาวจนถึงถุงมือและข้อเท้า โดยมีแถบยางรัดแขนเสื้อและขากางเกง อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ แว่นครอบตา เป็นต้น ถ้าไม่มีตู้ดูดควัน ต้องสวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลให้รัดกุมที่สุด เพื่อลดการสัมผัสทางการหายใจ ผิวหนัง และนัยน์ตา

การควบคุมวัสดุนาโนที่อยู่ในรูปแขวนลอยในของเหลว

- การชั่ง ตวง วัด วัสดุนาโน อาจเกิดการกระฉอก หรือหก หรือกระเด็นเปื้อนผู้ปฏิบัติงานได้ จึงควรใช้อุปกรณ์เพื่อดูดของเหลว
- ในกรณีวัตถุดิบที่เป็นวัสดุนาโนบรรจุอยู่ในถัง (drum) มักพบวัสดุนาโนกระเด็นติดตามข้อมือและลำตัวของผู้ปฏิบัติงานในระหว่างการปฏิบัติงาน ดังนั้นจึงควรวางถังในระดับที่ทำงานได้สะดวก และ

ผู้ปฏิบัติงานต้องสวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลอย่างรัดกุม เช่น เสื้อคลุมที่มีแขนและขายาวจนถึงถุงมือและข้อเท้า โดยมีระบบรัดแขนเสื้อและขากางเกง อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ แว่นครอบตา เป็นต้น

5.1.3.4. การทำให้วัสดุนาโนกระจายตัว

การควบคุมทั่วไป

- ต้องมีระบบกำจัดฝุ่นหรือละอองนาโนที่กระจายออกมานอกบริเวณปฏิบัติงาน เช่น ใช้ท่อลมดูด หรือตู้ดูดควัน โดยต่อท่อดูดลมไปยังระบบกรองอากาศที่ใช้ไส้กรองชนิด HEPA
- ในกรณีที่ต้องยื่นมือเข้าไปทำงานในตู้ดูดควัน ให้ผู้ปฏิบัติงานสวมถุงมือยางสังเคราะห์ชนิดไนไตรล์
- ในกรณีที่เข้าไปปฏิบัติงานในตู้ดูดควัน ผู้ปฏิบัติงานต้องสวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลอย่างรัดกุม เช่น เสื้อคลุมที่มีแขนและขายาวจนถึงถุงมือและข้อเท้า โดยมีแถบยางรัดแขนเสื้อและขากางเกง อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ แว่นครอบตา เป็นต้น ถ้าไม่มีตู้ดูดควัน ต้องสวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลให้รัดกุมที่สุด เพื่อลดการสัมผัสทางการหายใจ ผิวหนังและนัยน์ตา

การควบคุมวัสดุนาโนในรูปฝุ่น

- มีมาตรการลดโอกาสการสัมผัส มีการระบายอากาศออกจากบริเวณที่ปฏิบัติงานโดยใช้ตู้ดูดควัน หรือท่อดูดลม ผ่านเข้าสู่ระบบกรองอากาศที่ใช้ไส้กรองชนิด HEPA และไม่นำอากาศที่ผ่านการกรองแล้วหมุนเวียนกลับเข้ามาใช้ใหม่
- โรงงานอุตสาหกรรมต้องทำการประเมินการสัมผัส (exposure assessment) โดยทำการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคนาโนต่อหน่วยปริมาตร ในรูปจำนวนอนุภาคหรือน้ำหนักอนุภาคต่อลูกบาศก์เมตร

การควบคุมวัสดุนาโนที่อยู่ในรูปแขวนลอยในของเหลว

- ความสามารถในการกระเซ็นขึ้นอยู่กับความหนืดของของเหลว ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของของเหลว และความเข้มข้นของวัสดุนาโนที่แขวนลอยอยู่ในของเหลว หากต้องทำงานกับของเหลวที่กระเซ็นง่าย ต้องใช้ความระมัดระวังในการปฏิบัติงานมากขึ้น

5.1.3.5. การผสมวัสดุนาโน

การควบคุมทั่วไป

- ในการลำเลียงวัสดุนาโนเข้าสู่เครื่องผสม ต้องใช้อุปกรณ์เพื่อดูดวัสดุนาโนเข้าไปในถังผสมแทนการยกภาชนะขึ้นเท ทั้งวัสดุนาโนที่เป็นฝุ่น และอยู่ในรูปแขวนลอยในของเหลว

การควบคุมวัสดุนาโนในรูปฝุ่น

- ต้องผสมวัสดุนาโนในระบบปิด
- ใช้ตู้ดูดควัน ครอบบริเวณที่ทำการผสม ในลักษณะที่ไม่ทำให้ฝุ่นนาโนฟุ้งกระจาย
- ในกรณีที่ต้องยื่นมือเข้าไปทำงานในตู้ดูดควัน ให้ผู้ปฏิบัติงานสวมถุงมือยางสังเคราะห์ชนิดไนไตรล์
- ในกรณีที่เข้าไปปฏิบัติงานในตู้ดูดควัน ผู้ปฏิบัติงานต้องสวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลอย่างรัดกุม เช่น เสื้อคลุมที่มีแขนและขายาวจนถึงถุงมือและข้อเท้า โดยมีแถบยางรัดแขนเสื้อและขากางเกง อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ แว่นครอบตา เป็นต้น ถ้าไม่มีตู้ดูดควัน ต้องสวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลให้รัดกุมที่สุด เพื่อลดการสัมผัสทางการหายใจ ผิวหนัง และนัยน์ตา

การควบคุมวัสดุนาโนที่อยู่ในรูปแขวนลอยในของเหลว

- การผสมด้วยการกวนอย่างเร็ว อาจทำให้ของเหลวกระเซ็น ซึ่งเมื่อแห้งมีโอกาสเกิดเป็นฝุ่นนาโนได้ จึงต้องใช้การควบคุมเช่นเดียวกับการควบคุมวัสดุนาโนที่เป็นฝุ่น

5.1.3.6. การฉีดพ่นวัสดุนาโน

การควบคุมทั่วไป

- ควรฉีดพ่นวัสดุนาโนในระบบปิด
- ใช้ตู้ดูดควัน ครอบบริเวณที่ปฏิบัติงาน ในลักษณะที่ไม่ทำให้ฝุ่นนาโนฟุ้งกระจาย
- ในกรณีที่ต้องยื่นมือเข้าไปทำงานในตู้ดูดควัน ผู้ปฏิบัติงานต้องสวมถุงมือยางสังเคราะห์ชนิดไนไตรล์
- ในกรณีที่เข้าไปปฏิบัติงานในตู้ดูดควัน ผู้ปฏิบัติงานต้องสวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลอย่างรัดกุม เช่น เสื้อคลุมที่มีแขนและขายาวจนถึงถุงมือและข้อเท้า โดยมีแถบยางรัดแขนเสื้อและขากางเกง อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ แว่นครอบตา เป็นต้น
- อาจต้องใช้มาตรการควบคุมอื่น ๆ เสริม ตามสมบัติของวัสดุนาโนที่เกี่ยวข้อง

รูปที่ 5.6: การฉีดพ่นวัสดุนาโนในตู้ดูดควัน

รูปซ้าย การฉีดอนุภาคนาโนของ copper indium gallium selenide (CIGS) ลงไปบนแผ่นวัสดุ เพื่อสร้างเซลล์ไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ **ที่มา**: http://buildaroo.com/news/article/spray-on-solar-cells-printed-like-newspaper/ เข้าถึงเมื่อ 5 เมษายน พ.ศ. 2555 **รูปขวา**: ขนาดของตู้ดูดควันในระดับโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในขั้นตอนการฉีดพ่น ซึ่งอาจมีขนาดใหญ่กว่าตู้ดูดควันที่ใช้ในห้องปฏิบัติการได้มาก **ที่มา**: http://www.robovent.com/finishingsolutions/industrial-spray-booths.html

5.1.3.7. การทำงานด้วยเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูป ตัดแต่ง เลื่อย เจาะ ไส กลึง คว้าน ฯลฯ

การควบคุมทั่วไป

- ต้องปฏิบัติงานด้วยเครื่องจักรในระบบปิด
- ใช้ตู้ดูดควัน ครอบบริเวณที่ปฏิบัติงานด้วยเครื่องจักร ในลักษณะที่ไม่ทำให้ฝุ่นนาโนฟุ้งกระจาย
- ในกรณีที่ต้องยื่นมือเข้าไปทำงานในตู้ดูดควัน ผู้ปฏิบัติงานต้องสวมถุงมือยางสังเคราะห์ชนิดไนไตรล์
- ในกรณีที่เข้าไปปฏิบัติงานในตู้ดูดควัน ผู้ปฏิบัติงานต้องสวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลอย่างรัดกุม เช่น เสื้อคลุมที่มีแขนและขายาวจนถึงถุงมือและข้อเท้า โดยมีระบบรัดแขนเสื้อและขากางเกง อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ แว่นครอบตา เป็นต้น ถ้าไม่มีตู้ดูดควัน ต้องสวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลให้รัดกุมที่สุด เพื่อลดการสัมผัสทางการหายใจ ผิวหนังและนัยน์ตา
- อาจต้องใช้มาตรการควบคุมอื่น ๆ เสริม ตามสมบัติของวัสดุนาโนที่เกี่ยวข้อง

การควบคุมวัสดุนาโนในรูปฝุ่น

- ในกรณีที่การทำงานด้วยเครื่องจักร ซึ่งมีการโปรย ฉีด หรือพ่น วัสดุนาโนในรูปผงลงบนชิ้นงานขณะกำลังถูกเจาะ ไส กลึง ฯลฯ ควรพิจารณาการปฏิบัติงานที่ความเร็วพอเหมาะเพื่อลดการฟุ้งกระจายของวัสดุนาโน

การควบคุมวัสดุนาโนที่อยู่ในรูปแขวนลอยในของเหลว

- ในกรณีที่ขั้นตอนการผลิตกำหนดให้มีการฉีดพ่นวัสดุนาโนในรูปแขวนลอยในของเหลว ลงไปบนชิ้นงานที่กำลังถูกเจาะ ไส กลึง ฯลฯ ควรพิจารณาการปฏิบัติงานที่ความเร็วพอเหมาะเพื่อลดการสร้างละอองนาโน

5.1.3.8. การบรรจุหีบห่อวัสดุนาโน

การควบคุมทั่วไป

- ควรติดฉลากบนภาชนะ โดยฉลากควรพิมพ์ด้วยตัวอักษรสีดำบนพื้นสีเหลือง ซึ่งเป็นคำแนะนำของคณะทำงานวิชาการระหว่างประเทศในการจัดทำคู่มือ Good Nano Guide ฉลากต้องระบุชื่อสารเคมีหรือองค์ประกอบ ปริมาณความเข้มข้น แหล่งผลิตหรือแหล่งบรรจุ คำแนะนำที่ควรปฏิบัติเมื่อมีการรั่วไหล คำเตือนถึงอันตรายของวัสดุที่อยู่ภายใน พร้อมกับมาตรการควบคุมที่จำเป็นเมื่อเปิดภาชนะ โดยต้องติดฉลากทั้งที่ภาชนะและที่กล่องบรรจุ ตัวอย่างฉลากติดที่กล่องบรรจุวัสดุนาโน แสดงดังรูปที่ 5.7
- อาจต้องใช้มาตรการควบคุมอื่น ๆ เสริม ตามสมบัติของวัสดุนาโนที่เกี่ยวข้อง

การควบคุมวัสดุนาโนในรูปฝุ่น

- การบรรจุวัสดุนาโนต้องทำในตู้ดูดควัน โดยต่อท่อดูดลมไปยังระบบกรองอากาศที่ใช้ไส้กรองชนิด HEPA และไม่นำอากาศที่ผ่านการกรองแล้วหมุนเวียนกลับเข้ามาใช้ใหม่
- ถ้าไม่มีตู้ดูดควัน ต้องสวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลให้รัดกุม เพื่อลดการสัมผัสทางการหายใจ ผิวหนัง และนัยน์ตา

การควบคุมวัสดุนาโนที่อยู่ในรูปแขวนลอยในของเหลว

- ใช้ตู้ดูดควันครอบเครื่องบรรจุแต่ละเครื่อง โดยต่อท่อดูดลมไปยังระบบกรองอากาศที่ใช้ไส้กรองชนิด HEPA และไม่นำอากาศที่ผ่านการกรองแล้วหมุนเวียนกลับเข้ามาใช้ใหม่
- ในกรณีที่ต้องยื่นมือเข้าไปทำงานในตู้ดูดควัน ผู้ปฏิบัติงานต้องสวมถุงมือยางสังเคราะห์ชนิดไนไตรล์

ระวัง! วัสดุนาโน

สินค้าในกล่องนี้ มีส่วนผสมของวัสดุนาโน

วัสดุนาโนอาจเป็นอันตรายเมื่อเข้าสู่ร่างกายทางจมูก ปาก หรือสำผัสกับผิวหนัง

มาตรการป้องกัน

1. เปิดภาชนะในตู้ดูดควัน โดยสวมถุงมือลาเท็กซ์หรือไนไตรล์ อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจชนิด FFP3 และแว่นครอบตา
2. อย่าสูดดม กลืนกิน หรือให้วัสดุนาโนในกล่องนี้สัมผัสกับผิวหนัง
3. หากภาชนะบรรจุชำรุดเสียหาย ให้แจ้งผู้ผลิตทันที ที่หมายเลขโทรศัพท์ (XXX) YYY-ZZZZ.

Caution:- Nanomaterials

This package contains manufactured nanomaterials

Nanomaterials are potentially hazardous to inhale, ingest or touch.

Safety Precautions

1. Open package in Fume-Hood while wearing disposable latex or nitrile gloves, FFP3 half face mask and goggles for eye protection.
2. Do not inhale, ingest or touch (with the bare skin) the material inside of this package.
3. In case of damage to the inner package, contact the originating organization immediately at (XXX) YYY-ZZZZ.

รูปที่ 5.7: ตัวอย่างฉลากติดที่กล่องบรรจุวัสดุนาโน

ที่มา: ดัดแปลงจาก Good Nano Guide

- ในกรณีที่เข้าไปปฏิบัติงานในตู้ดูดควัน ผู้ปฏิบัติงานต้องสวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลอย่างรัดกุม เช่น เสื้อคลุมที่มีแขนและขายาวจนถึงถุงมือและข้อเท้า โดยมีแถบยางรัดแขนเสื้อและขากางเกง อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ แว่นครอบตา เป็นต้น

การควบคุมในกรณีวัสดุนาโนที่ฝังอยู่ในวัสดุอื่น

- โอกาสที่วัสดุนาโนที่ฝังอยู่ในวัสดุอื่นจะเล็ดลอดออกมาสัมผัสกับผู้ปฏิบัติงานมีน้อย แต่อย่างน้อยผู้ปฏิบัติงานควรสวมถุงมือยางสังเคราะห์ชนิดไนไตรล์
- ถ้าสงสัยว่ามีฝุ่นนาโนปะปนมากับชิ้นวัสดุ ผู้ปฏิบัติงานต้องสวมอุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลอย่างอื่นด้วยตามความเหมาะสม อาทิ เสื้อคลุมที่มีแขนและขายาวจนถึงถุงมือและข้อเท้า โดยมีระบบรัดแขนเสื้อและขากางเกง อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ และแว่นครอบตา เป็นต้น เพื่อป้องกันการสูดดมวัสดุนาโนเข้าปอด และการสัมผัสกับนัยน์ตา

5.1.3.9. การทำความสะอาดเครื่องมือเครื่องจักรที่ใช้กับวัสดุนาโน

การควบคุมทั่วไป

- ต้องทำความสะอาดเครื่องมือเครื่องจักร ปลายท่อดูดอากาศ และด้านในของตู้ดูดควันด้วยวัสดุเปียกหมาด แล้วทิ้งถุงมือกับวัสดุที่ใช้ทำความสะอาดลงในถังปิดที่เตรียมไว้ เพื่อส่งไปกำจัดต่อไป
- อาจต้องใช้มาตรการควบคุมอื่น ๆ เสริม ตามสมบัติของวัสดุนาโนที่เกี่ยวข้อง

การควบคุมวัสดุนาโนในรูปฝุ่น

- ห้ามใช้ลมเป่า เพราะจะทำให้ฝุ่นฟุ้งกระจาย ทำให้มีผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจของผู้ปฏิบัติงาน นอกจากนั้นยังเพิ่มความเสี่ยงต่อการระเบิดของฝุ่นวัสดุนาโนด้วย
- ถ้าสามารถปฏิบัติได้ ควรจัดให้มีตู้ดูดควันชนิดเคลื่อนที่ได้ครอบบริเวณที่ทำความสะอาด โดยต่อท่อดูดลมไปยังระบบกรองอากาศที่ใช้ไส้กรองชนิด HEPA และไม่นำอากาศที่ผ่านการกรองแล้วหมุนเวียนกลับเข้ามาใช้ใหม่
- ผู้ปฏิบัติงานต้องสวมถุงมือยางสังเคราะห์ชนิดไนไตรล์
- ในกรณีที่เข้าไปปฏิบัติงานในตู้ดูดควัน ผู้ปฏิบัติงานต้องสวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลอย่างรัดกุม เช่น เสื้อคลุมที่มีแขนและขายาวจนถึงถุงมือและข้อเท้า โดยมีแถบยางรัดแขนเสื้อและขากางเกง อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ แว่นครอบตา เป็นต้น
- ถ้าไม่มีตู้ดูดควัน ต้องสวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลให้รัดกุม เพื่อลดการสัมผัสทางการหายใจ ผิวหนัง และนัยน์ตา

- ในกรณีที่ต้องเปิดเข้าไปทำความสะอาดภายในเครื่องมือเครื่องจักร ที่มีวัสดุนาโนเกาะติดอยู่ในปริมาณมาก ต้องใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษเพราะหากไม่มีการเตรียมการที่ดี วัสดุนาโนอาจกระจายออกมาทั่วพื้นที่ปฏิบัติงาน ในการออกแบบผังโรงงานควรแยกเครื่องมือเครื่องจักรที่มีการใช้วัสดุนาโนในปริมาณมาก เช่นเตาปฏิกรณ์แต่ละเครื่องไว้ในห้องเดี่ยวที่สามารถดูดอากาศไปกรองวัสดุนาโนออกได้โดยใช้ไส้กรองชนิด HEPA และออกแบบให้สามารถเป่าลมเข้าไปไล่ฝุ่นหรือฉีดน้ำหรือของเหลวไปล้างฝุ่นนาโนภายในเครื่องออกมาดักเก็บไว้ ก่อนที่ผู้ปฏิบัติงานจะเปิดเข้าไปทำความสะอาดภายในตัวเครื่อง

- ในกรณีที่เครื่องมือเครื่องจักรมีระบบทำความสะอาดตัวเอง เช่นเตาปฏิกรณ์ที่มีระบบแขนกลสำหรับขูดผลิตภัณฑ์ ที่สามารถขูดวัสดุนาโนที่ติดอยู่กับผิวด้านในของเตาปฏิกรณ์ออกอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการทำความสะอาดเครื่องจักรประเภทนี้ ยังต้องใช้ความระมัดระวังไม่แตกต่างจากเครื่องจักรที่ไม่มีระบบแขนกล นอกจากนั้นต้องระมัดระวังไม่ให้ฝุ่นนาโนฟุ้งกระจายออกมาภายนอกเครื่องด้วย

การควบคุมวัสดุนาโนที่อยู่ในรูปแขวนลอยในของเหลว

- ถ้าสามารถปฏิบัติได้ ต้องใช้ตู้ดูดควันชนิดเคลื่อนที่ได้ครอบบริเวณที่ทำความสะอาด โดยต่อท่อดูดลมไปยังระบบกรองอากาศที่ใช้ไส้กรองชนิด HEPA และไม่นำอากาศที่ผ่านการกรองแล้วหมุนเวียนกลับเข้ามาใช้ใหม่
- ทำความสะอาดเครื่องมือเครื่องจักรด้วยวัสดุเปียกหมาด เพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายของวัสดุนาโน ถ้าไม่มีตู้ดูดควัน ผู้ปฏิบัติงานต้องสวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลที่เหมาะสม เช่น เสื้อคลุม อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ แว่นครอบตา เป็นต้น

การควบคุมในกรณีวัสดุนาโนฝังอยู่ในวัสดุอื่น

- ถ้าสามารถปฏิบัติได้ ต้องใช้ตู้ดูดควันชนิดเคลื่อนที่ได้ครอบบริเวณที่ทำความสะอาด โดยต่อท่อดูดลมไปยังระบบกรองอากาศที่ใช้ไส้กรองชนิด HEPA และไม่นำอากาศที่ผ่านการกรองแล้วหมุนเวียนกลับเข้ามาใช้ใหม่
- วัสดุนาโน อยู่ปะปนกับฝุ่นที่ติดอยู่กับเครื่องมือเครื่องจักร ดังนั้น ต้องรีบเช็ดด้วยวัสดุเปียกหมาดอย่าให้ฝุ่นฟุ้ง
- ถ้าไม่มีตู้ดูดควัน ผู้ปฏิบัติงานต้องสวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลที่เหมาะสม เช่น เสื้อคลุม อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ แว่นครอบตา เป็นต้น

- ถ้าวัสดุผสมนาโน (nanocomposite) สัมผัสกับอุณหภูมิสูงขณะอยู่ในเครื่องมือเครื่องจักร ต้องใช้มาตรการคุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลที่เข้มงวดขึ้น ทั้งอุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ ถุงมือ และแว่นครอบตา

5.1.3.10. การทำความสะอาดบริเวณทำงาน

การควบคุมทั่วไป

- ต้องสวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลที่เหมาะสม อย่างน้อยถุงมือ แว่นครอบตา และอุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ
- ทำความสะอาดบริเวณทำงานด้วยกระดาษเปียกหมาด แล้วทิ้งกระดาษและถุงมือที่ใช้แล้วลงในถังปิดที่เตรียมไว้

การควบคุมวัสดุนาโนในรูปฝุ่น

- ห้ามใช้ลมเป่า ให้ใช้ท่อลมดูดป้องกันการฟุ้งกระจายของฝุ่นนาโน

การควบคุมวัสดุนาโนที่อยู่ในรูปแขวนลอยในของเหลว

- วัสดุนาโนแขวนลอยในของเหลวที่เปื้อนบริเวณทำงาน เมื่อแห้งอาจเป็นฝุ่นฟุ้งกระจายอยู่ในอากาศ จึงต้องมีการป้องกันการสูดดม ด้วยการใช้ท่อดูดลมดูดฝุ่นในบริเวณทำงานตลอดเวลา
- ในการทำความสะอาดบริเวณทำงาน นอกจากป้องกันไม่ให้ฝุ่นฟุ้งกระจายและลดโอกาสการหายใจอากาศที่ปนเปื้อนฝุ่นนาโน ยังต้องลดโอกาสการสัมผัสกับผิวหนัง ด้วยการสวมใส่ถุงมือและอุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลที่เหมาะสมด้วย

การควบคุมในกรณีวัสดุนาโนฝังอยู่ในวัสดุอื่น

- เมื่อมีการตัด เจาะ ไส คว้าน ตัวชิ้นงาน วัสดุนาโนมีโอกาสหลุดออกมาเป็นฝุ่น ปนกับเศษวัสดุที่เป็นชิ้นหรือเป็นผงขนาดใหญ่กว่า จึงต้องมีการป้องกันการสูดดมฝุ่นเหล่านี้ ด้วยการใช้ท่อดูดลมในบริเวณทำงาน
- ต้องสวมใส่ถุงมือและอุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลที่เหมาะสมในขณะทำความสะอาด

5.1.3.11. การทำความสะอาดวัสดุนาโนที่ฟุ้ง หก ตกหล่น

การควบคุมทั่วไป

- ถ้ามีการฟุ้ง หก ตก หล่น ไม่มาก ให้ทำความสะอาดบริเวณที่ฟุ้งนั้นด้วยกระดาษเปียกหมาด แล้วทิ้งกระดาษและถุงมือที่ใช้แล้วลงในถังปิดที่เตรียมไว้

การควบคุมวัสดุนาโนในรูปฝุ่น

- ควรปรับมาตรการที่ใช้ ให้เหมาะสมกับขนาดความเป็นอันตรายของวัสดุนาโน
- จัดให้มีเครื่องดูดฝุ่นที่มีแผ่นกรอง HEPA แยกไว้ดูดฝุ่นนาโนโดยเฉพาะ เพื่อป้องกันการเกิดฝุ่นระเบิดในโรงงาน
- ต้องสวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลที่เหมาะสม อย่างน้อยถุงมือ แว่นครอบตา และอุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ

การควบคุมวัสดุนาโนที่อยู่ในรูปแขวนลอยในของเหลว

- ต้องสวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลที่เหมาะสม อย่างน้อยถุงมือ แว่นครอบตา และอุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ
- ควบคุมไม่ให้ฝุ่นนาโนที่ติดไปกับรองเท้าหรือยางรถยนต์แพร่ออกไปนอกโรงงาน ด้วยการทำความสะอาดรองเท้าและยางรถยนต์โดยการใช้ท่อดูดลมและการใช้น้ำฉีดล้าง
- ใช้มาตรการป้องกันอันตรายจากการระเหยของตัวทำละลายที่อาจเป็นส่วนประกอบของวัสดุนาโนที่เป็นวัตถุดิบ เพราะเป็นภัยต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน และผสมกับอากาศแล้วมีโอกาสระเบิดได้

การควบคุมในกรณีวัสดุนาโนฝังอยู่ในวัสดุอื่น

- ต้องสวมถุงมือ เพื่อป้องกันการสัมผัสกับวัสดุนาโนที่อาจจะติดอยู่บนผิวของชิ้นงาน
- ถ้ามีชิ้นงานที่มีฝุ่นนาโน ให้ใช้การควบคุมวัสดุนาโนในรูปฝุ่น หากมีของเหลวหกอยู่ด้วย ให้ใช้การควบคุมวัสดุนาโนที่แขวนลอยในของเหลว ดังได้กล่าวมาแล้ว

5.1.3.12. การจัดการของเสีย

การควบคุมทั่วไป

- ถ้ามีของเสียปริมาณน้อยในบริเวณทำงาน ควรทำความสะอาดด้วยกระดาษเปียกหมาด แล้วทิ้งกระดาษที่ใช้แล้วลงในถังปิดที่เตรียมไว้ เพื่อไม่ให้ฝุ่นฟุ้ง แล้วรวบรวมเพื่อส่งกำจัดต่อไป
- กรณีที่มีของเสียปริมาณมาก ให้ติดต่อบริษัทรับกำจัดของเสีย โดยแจ้งชนิด ลักษณะ ปริมาณ และความเข้มข้นของวัสดุนาโนนั้นด้วย

การควบคุมวัสดุนาโนในรูปฝุ่น

- เมื่อของเสียอยู่ในภาชนะรองรับของเสียแบบปิด ต้องป้องกันไม่ให้วัสดุนาโนหลุดออกมานอกภาชนะหรือถ้าหลุดออกมา ต้องไม่ให้สัมผัสกับผู้ปฏิบัติงาน เช่นใช้การดูดและระบายอากาศที่เหมาะสมรอบภาชนะรองรับของเสียแบบปิด เป็นต้น
- ต้องสวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลที่เหมาะสม เช่น อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ แว่นครอบตา และถุงมือ เป็นต้น

การควบคุมวัสดุนาโนที่อยู่ในรูปแขวนลอยในของเหลว

- อย่าเขย่าของเหลวโดยไม่จำเป็น เพราะหากเกิดหกรั่วไหลอาจทำให้วัสดุนาโนหลุดกระจายออกมาเป็นละอองในอากาศได้ ถ้าต้องการเขย่าของเหลว ควรปิดภาชนะบรรจุให้แน่นตามความเหมาะสม
- เมื่อของเสียรั่วไหลออกมานอกภาชนะรองรับ ต้องรีบทำความสะอาดทันที ถ้าของเสียแห้งต้องทำความสะอาดด้วยกระดาษเปียกหมาด เพื่อป้องกันการสัมผัสกับผู้ปฏิบัติงาน
- ใช้การดูดและระบายอากาศที่เหมาะสมรอบภาชนะรองรับของเสียแบบปิด เพื่อกำจัดฝุ่นที่อาจฟุ้งในขณะที่เปิดฝาภาชนะออกแล้วของเหลวกระฉอก หรือเมื่อของเหลวรั่วแล้วแห้งเป็นฝุ่น
- สวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลที่เหมาะสม เช่น อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ แว่นครอบตา และถุงมือ เป็นต้น

การควบคุมกรณีวัสดุนาโนฝังอยู่ในวัสดุอื่น

- ต้องป้องกันไม่ให้วัสดุนาโนหลุดออกมานอกภาชนะรองรับ โดยใช้การดูดและระบายอากาศที่เหมาะสมรอบภาชนะรองรับของเสียแบบปิด

- สวมใส่ถุงมือ และเสริมด้วยอุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลที่เหมาะสม เช่น อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ และแว่นครอบตา เป็นต้น

5.1.3.13. การเลิกใช้เครื่องมือเครื่องจักร

การควบคุมทั่วไป

- เมื่อเลิกใช้เครื่องมือเครื่องจักร หรือมีการรื้อถอนและขนย้ายเครื่องมือเครื่องจักรออกนอกโรงงาน ทำให้วัสดุนาโนที่เป็นฝุ่นมีโอกาสกระจายออกมาได้ง่าย จึงต้องมีการเตรียมความพร้อมโดยกำหนดแผนการปฏิบัติงาน ดำเนินการตามขั้นตอน และฝึกซ้อมตามความเหมาะสม เพื่อป้องกันวัสดุนาโนฟุ้งกระจายในขณะรื้อถอน
- เตรียมเครื่องมือเครื่องใช้ให้พร้อมสำหรับการทำความสะอาดเครื่องมือเครื่องจักร เมื่อมีการเลิกใช้ รื้อถอน และขนย้ายเครื่องมือเครื่องจักร ผู้ปฏิบัติงานต้องสวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล โดยเฉพาะถุงมือ อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ และแว่นครอบตา หรือถ้ามีวัสดุนาโน หกกระจายเลอะพื้น ควรมีถุงหุ้มรองเท้าหรือชุดคลุมทั้งตัว และสวมรองเท้าซึ่งต่อเชื่อมกับขากางเกงด้วยแถบยาง

การควบคุมวัสดุนาโนในรูปฝุ่น

- จัดให้มีระบบระบายอากาศเท่าที่ทำได้ เพื่อดูดวัสดุนาโนที่เป็นฝุ่น ไปกรองด้วยระบบกรองอากาศที่ใช้ไส้กรองชนิด HEPA และไม่นำอากาศที่ผ่านการกรองแล้วหมุนเวียนกลับเข้ามาใช้ใหม่ ในบางกรณีวัสดุนาโนที่กรองได้ อาจนำกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตได้
- หากฝุ่นนาโนที่ตกค้างอยู่ในเครื่องมือเครื่องจักรที่ต้องการรื้อถอน เช่น ในเตาปฏิกรณ์ เป็นต้น เพื่อเป็นการป้องกันการฟุ้งกระจายของวัสดุนาโน ให้ทำความสะอาดก่อนการรื้อถอน โดยการล้าง เป่า หรือดูดวัสดุนาโนออกก่อนการเปิดท่อหรือฝาของเครื่องมือเครื่องจักรเพื่อทำความสะอาดตามขั้นตอนของการรื้อถอน
- ควรทำความสะอาดเครื่องมือเครื่องจักรและอุปกรณ์ทุกครั้งก่อนการรื้อถอน หากไม่สามารถทำได้ ให้ปิดผนึกแล้วติดป้ายแสดงชนิดของวัสดุนาโน และข้อควรระวังให้เห็นได้ชัดเจน

- นอกจากนั้นหากมีสารพิษชนิดอื่นที่เกี่ยวข้อง ต้องเลือกใช้อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลให้เหมาะสมกับสารพิษนั้น ตัวอย่างเช่น ถ้ามีก๊าซพิษ ต้องใช้อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจชนิด self-contained breathing apparatus (SCBA) เป็นต้น

การควบคุมวัสดุนาโนที่อยู่ในรูปแขวนลอยในของเหลว

- ในกรณีที่มีการกระเด็นของวัสดุนาโนแขวนลอยในของเหลวในขณะรื้อถอน หรือตัวทำละลายระเหยแห้ง ทำให้วัสดุนาโนฟุ้งกระจายในลักษณะของฝุ่น จึงต้องมีมาตรการป้องกันอันตรายจากวัสดุนาโนในสภาวะแขวนลอยในของเหลวและฝุ่นด้วย
- พยายามให้วัสดุนาโนในรูปแขวนลอยในของเหลวเหลืออยู่ภายในเครื่องจักรน้อยที่สุด ก่อนจะถอดชิ้นส่วนต่าง ๆ ออก
- ล้าง หรือเช็ดด้วยกระดาษเปียกหมาด เพื่อกำจัดวัสดุนาโนที่ยังเหลืออยู่ในเครื่องมือเครื่องจักรหรืออุปกรณ์
- จัดให้มีระบบระบายอากาศเท่าที่ทำได้ เพื่อดูดวัสดุนาโนที่เป็นฝุ่น ไปกรองด้วยระบบกรองอากาศที่ใช้ไส้กรองชนิด HEPA และไม่นำอากาศที่ผ่านการกรองแล้วหมุนเวียนกลับเข้ามาใช้ใหม่

การควบคุมกรณีวัสดุนาโนฝังอยู่ในวัสดุอื่น

- ต้องระวังเมื่อเลิกใช้เครื่องจักรที่ใช้ในการ ตัด เจาะ ไส คว้าน วัสดุนาโนที่ฝังอยู่ในชิ้นงานที่ทำจากโครงข่ายของวัสดุอื่น โดยเฉพาะการทำความสะอาดตามซอกต่าง ๆ ของเครื่องจักร ซึ่งอาจมีฝุ่นนาโนจับอยู่ โดยจัดให้มีระบบระบายอากาศเท่าที่ทำได้ เพื่อดูดวัสดุนาโนที่เป็นฝุ่น ไปกรองด้วยระบบกรองอากาศที่ใช้ไส้กรองชนิด HEPA และไม่นำอากาศที่ผ่านการกรองแล้วหมุนเวียนกลับเข้ามาใช้ใหม่

โดยสรุป การควบคุมที่กล่าวถึงในหัวข้อนี้ ครอบคลุมทั้ง 13 กิจกรรมในโรงงานอุตสาหกรรมนาโน โดยที่วัสดุนาโนอาจอยู่ในรูปฝุ่น รูปแขวนลอยในของเหลว หรือฝังอยู่ในวัสดุอื่น ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.1

ลำดับ	กิจกรรมในโรงงานอุตสาหกรรม	ฝุ่น	แขวนลอยในของเหลว	ฝังอยู่ในวัสดุอื่น
1	การเปิดภาชนะบรรจุ	√	√	√
2	การสังเคราะห์	√	√	
3	การชั่ง ตวง วัด	√	√	
4	การทำให้วัสดุนาโนกระจายตัว	√	√	
5	การผสม	√	√	
6	การฉีดพ่น	√	√	
7	การทำงานด้วยเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูป ตัดแต่ง เลื่อย เจาะ ไส กลึง คว้าน ฯลฯ	√	√	√
8	การบรรจุหีบห่อ	√	√	√
9	การทำความสะอาดเครื่องมือเครื่องจักร	√	√	√
10	การทำความสะอาดบริเวณทำงาน	√	√	√
11	การทำความสะอาดวัสดุนาโนที่ฟุ้ง หก ตกหล่น	√	√	√
12	การจัดการของเสีย	√	√	√
13	การเลิกใช้เครื่องมือเครื่องจักร	√	√	√

ตารางที่ 5.1: สรุปการควบคุมการสัมผัสวัสดุนาโนตามกิจกรรมต่าง ๆ

เครื่องหมาย √ แสดงว่าได้กล่าวถึงการควบคุมการสัมผัสไว้ในหัวข้อนี้แล้ว อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ กิจกรรมการสังเคราะห์ การชั่ง ตวง วัด การกระจายตัว การผสม และการฉีดพ่น วัสดุนาโนที่ฝังอยู่ในวัสดุอื่น ไม่มีตัวอย่างให้เห็นในโรงงานอุตสาหกรรมไม่ว่าในประเทศไทยหรือในต่างประเทศ จึงไม่ได้กล่าวถึงการควบคุมไว้ในตารางนี้

5.1.4. มาตรการเพื่อควบคุมการสัมผัสอย่างต่อเนื่อง

การควบคุมการสัมผัสจะมีประโยชน์ต่อเมื่อมีการนำไปปฏิบัติโดยไม่มีข้อยกเว้น ซึ่งสามารถกระทำได้โดย

- อบรมผู้ปฏิบัติงาน ให้ตระหนักถึงความจำเป็นและความสำคัญตลอดจนเหตุผลที่ต้องใช้การควบคุมการสัมผัส
- ให้การควบคุมการสัมผัสเป็นส่วนหนึ่งของขั้นตอนการปฏิบัติงานในโรงงานอุตสาหกรรม ที่ผู้ปฏิบัติงานต้องยึดถือและปฏิบัติตาม
- มีการตรวจสอบและปรับปรุงเป็นระยะ เพื่อให้การควบคุมนั้นทันสมัย เป็นปัจจุบัน และมีประสิทธิภาพ

5.1.5. การเฝ้าติดตามการสัมผัส

เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าการเฝ้าติดตามการสัมผัสวัสดุนาโนใช้ได้ผล โรงงานอุตสาหกรรมจำเป็นต้องมีการเฝ้าติดตามการสัมผัส (exposure monitoring) ให้ปริมาณของวัสดุนาโนในอากาศ และพื้นที่ทำงาน โดยต้องควบคุมไม่ให้เกินค่ามาตรฐาน โดยอาจใช้เทคโนโลยีตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของวัสดุนาโน ซึ่งนำเสนอไว้ในภาคผนวกที่ 11

นอกจากข้อมูลปริมาณความเข้มข้นของวัสดุนาโนที่ตรวจวัดแล้ว สถาบันมาตรฐานแห่งสหราชอาณาจักร (BSI) ได้แนะนำไว้เมื่อปี พ.ศ. 2550 ให้เก็บข้อมูลดังต่อไปนี้

- ลักษณะงานที่ผู้ปฏิบัติงานอาจสัมผัสกับวัสดุนาโน เช่น การผลิต การทำความสะอาด การบำรุงรักษา การขนส่งและเก็บรักษา เป็นต้น
- ผู้ที่อาจสัมผัสกับวัสดุนาโนในขณะที่ทำงาน รวมทั้งผู้ปฏิบัติงาน และบุคลากรที่เกี่ยวข้อง เช่น ผู้จัดการโรงงาน ผู้มาเยี่ยมเยียนหรือติดต่อกับโรงงาน ผู้รับเหมา เป็นต้น
- ช่องทางการสัมผัส เช่น ทางการหายใจ ทางปาก ทางผิวหนัง เป็นต้น
- โอกาสที่อาจเกิดการสัมผัส โดยพิจารณาจากการปฏิบัติงานประจำ ประกอบกับการปลดปล่อยวัสดุนาโนและการซ่อมบำรุงในกรณีอุบัติเหตุ
- ความถี่ของการสัมผัส เช่น ต่อเนื่องตลอดการปฏิบัติงาน หรือเป็นครั้งคราว เป็นต้น
- ปริมาณความเข้มข้นและระยะเวลาของการสัมผัสกับวัสดุนาโน
- สถานที่พบวัสดุนาโน เช่น ในอากาศ บนพื้นผิวที่ปฏิบัติงาน หรือในตำแหน่งอื่น เป็นต้น

- การใช้เทคนิคในการควบคุมการสัมผัส เช่น การกั้นแยกบุคลากรออกจากแหล่งกำเนิดวัสดุนาโน โดยใช้ระบบระบายอากาศ การฝึกอบรม และการใช้อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล เป็นต้น

ข้อมูลต่าง ๆ ที่เก็บไว้ได้ จะมีประโยชน์ในการ

- ระบุแหล่งกำเนิดวัสดุนาโน
- ประเมินประสิทธิผลของมาตรการควบคุม
- เป็นเครื่องชี้ถึงสถานะ ตามมาตรฐาน
- ชี้บ่งจุดบกพร่องของมาตรการควบคุม

ในขณะที่จัดทำแนวปฏิบัติเบื้องต้นนี้ โรงงานอุตสาหกรรมมักไม่ได้เฝ้าติดตามการสัมผัส เนื่องจากอุปกรณ์และเครื่องมือในการเฝ้าติดตามมีราคาสูง อีกทั้งต้องใช้บุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญควบคุมเครื่อง ประกอบกับมีวัสดุนาโนเพียง 2-3 ชนิดเท่านั้นในต่างประเทศที่มีการประกาศค่ามาตรฐาน อย่างไรก็ตามคาดว่าภายในปี พ.ศ. 2557 ประเทศสหรัฐอเมริกา สหภาพยุโรป และญี่ปุ่น ก็จะเริ่มประกาศค่ามาตรฐานของวัสดุนาโนชนิดต่าง ๆ ในอากาศ เพิ่มขึ้น และภายในปี พ.ศ. 2560 องค์การระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐาน (ISO) ก็จะเริ่มประกาศค่ามาตรฐานระหว่างประเทศต่อไป ซึ่งในเวลานั้นอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของวัสดุนาโน น่าจะมีราคาเหมาะสมต่อการเฝ้าติดตามการสัมผัสวัสดุนาโนในโรงงานอุตสาหกรรมในทางปฏิบัติได้

5.1.6. การเฝ้าระวังทางอาชีวอนามัยอย่างเหมาะสม

การเฝ้าระวังทางอาชีวอนามัย (occupational health surveillance) เป็นการเฝ้าระวังทางสุขภาพ (health surveillance) ที่เน้นการปฏิบัติงานของคนงานในโรงงานอุตสาหกรรม โดยเป็นการเชื่อมโยงความเป็นอันตรายและโอกาสการสัมผัส เข้ากับการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพและสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน ขณะเดียวกันสามารถใช้ประเมินประสิทธิผลของวิธีการควบคุมต่าง ๆ ได้

การเฝ้าระวังทางอาชีวอนามัย เป็นกระบวนการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นอันตรายกับสภาวะทางสุขภาพ โดยการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลอย่างเป็นระบบ เพื่อเตือนล่วงหน้าต่อ

ผู้ปฏิบัติงาน และเพื่อกำหนดและปรับปรุงนโยบายและมาตรฐานของหน่วยงานกำกับดูแลด้านความปลอดภัย

องค์ประกอบของการเฝ้าระวังทางอาชีวอนามัยมี 2 ส่วน ได้แก่

การเฝ้าระวังอันตราย (Hazard surveillance) คือการกำหนดสิ่งที่เป็นอันตรายที่ต้องติดตามและดำเนินการเฝ้าระวังปริมาณความเข้มข้นวัสดุนาโนและวิธีการสัมผัสกับผู้ปฏิบัติงาน

การเฝ้าระวังทางการแพทย์ (Medical surveillance) คือการติดตามเฝ้าระวังระยะยาว (long-term surveillance) ที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของผู้ปฏิบัติงาน ทั้งทางชีวภาพและทางสุขภาพ รวมทั้งการคัดกรอง (Medical screening) เพื่อหาอาการแรกเริ่ม (early sign) ของโรคหรืออาการผิดปกติที่อาจเกิดจากการสัมผัสกับสิ่งที่เป็นอันตราย

โดยสรุป การเฝ้าระวังทางการแพทย์มีขั้นตอนหลัก ดังนี้[83]

- การจัดแบ่งกลุ่มผู้ปฏิบัติงานในโรงงาน
- การตรวจเบื้องต้นและซักประวัติทางการแพทย์ ที่เกี่ยวข้องกับการปฏิบัติงาน
- การตรวจร่างกายเป็นระยะอย่างต่อเนื่อง รวมทั้งการตรวจคัดกรองที่จำเป็น
- การตรวจร่างกายอย่างละเอียดแบบต่อเนื่อง ทั้งนี้ขึ้นกับผลการตรวจร่างกายเบื้องต้นและการตรวจคัดกรอง
- การเฝ้าตรวจสอบและติดตามอย่างละเอียดทางการแพทย์หลังจากการสัมผัสกับวัสดุนาโน
- การวิเคราะห์และประเมินผลข้อมูลที่ได้จากการตรวจร่างกายอย่างต่อเนื่อง
- การฝึกหัดให้ผู้ปฏิบัติงานทราบลักษณะอาการที่เกิดขึ้น เนื่องจากการสัมผัสกับวัสดุนาโนในที่ทำงาน
- การจัดทำรายงานผลการตรวจเป็นลายลักษณ์อักษร
- การตอบสนองของนายจ้างต่อการชี้บ่งอันตรายและประเมินความเสี่ยงด้านสุขภาพ

การเฝ้าระวังทางอาชีวอนามัย จะดำเนินการก่อนการปฏิบัติตามแนวปฏิบัติเบื้องต้นด้านความปลอดภัยนาโน หรือจะดำเนินการควบคู่ในเวลาเดียวกันได้

ในต่างประเทศ โรงงานอุตสาหกรรมได้ดำเนินการเฝ้าระวังทางอาชีวอนามัย โดยการขึ้นทะเบียนผู้ที่ทำงานหรือเคยทำงานเกี่ยวข้องทั้งทางตรงและทางอ้อม พร้อมขึ้นทะเบียนโอกาสการ

สัมผัสกับวัสดุนาโน แต่ในประเทศไทย กฎหมายและระเบียบปฏิบัติยังมิได้กำหนดให้วัสดุนาโนเป็นปัจจัยเสี่ยงที่ต้องมีการตรวจสุขภาพของลูกจ้างเป็นประจำ

อนึ่ง กิจกรรมการเฝ้าระวังทางอาชีวอนามัย โดยการเก็บหลักฐานข้อมูลทางชีวภาพและสุขภาพอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน ไม่ว่าจะย้าย ลาออก หรือเปลี่ยนอาชีพ จะเป็นประโยชน์ทั้งนายจ้างและลูกจ้าง เนื่องจากใช้เป็นหลักฐานที่พิสูจน์ยืนยันได้ทางกฎหมาย

5.1.7. แผนและวิธีปฏิบัติเพื่อรองรับอุบัติเหตุ อุบัติการณ์และเหตุฉุกเฉิน

โรงงานอุตสาหกรรมมีความจำเป็นต้องจัดทำแผนและวิธีปฏิบัติ เพื่อรองรับอุบัติเหตุ อุบัติการณ์ และเหตุฉุกเฉิน ครอบคลุมมาตรการควบคุมการรั่วไหลของวัสดุนาโนในปริมาณมากไปจนถึงเพลิงไหม้และการระเบิดของฝุ่นนาโนในโรงงาน

การป้องกันเพลิงไหม้และการระเบิด เป็นมาตรการในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีและใช้วัสดุนาโน เช่นเดียวกับอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งถึงแม้เม็ดแป้งจะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดนาโนมาก ก็เกิดการระเบิดได้ เป็นต้น[84]

5.1.7.1. องค์ประกอบและหลักการป้องกันเพลิงไหม้และการระเบิดของฝุ่นนาโน

เราสามารถลดความเสี่ยงที่จะเกิดไฟไหม้และระเบิดจากวัสดุนาโนที่ฟุ้งกระจายในอากาศได้ โดยพิจารณาจากธรรมชาติของการติดไฟและระเบิด และป้องกันไม่ให้มีปัจจัยครบถ้วน อันได้แก่ ฝุ่นที่ฟุ้งกระจายในอากาศ การจุดปะทุ ธรรมชาติของวัสดุไวไฟ และข้อควรระวังพิเศษสำหรับวัสดุนาโน

วัสดุนาโนสามารถลุกติดไฟได้ ถ้าเป็นฝุ่นที่มีขนาดเล็กพอ ซึ่งตามหลักการต้องมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 420 ไมโครเมตร และหากฟุ้งกระจายในอากาศด้วยความเข้มข้นที่เหมาะสม หรือในปริมาณเท่ากับหรือมากกว่าความเข้มข้นต่ำสุดของการระเบิดได้ (minimum explosible concentration มีหน่วยเป็นมวลต่อปริมาตร) เมื่อเกิดความร้อนหรือประกายไฟ ก็สามารถลุกติดไฟและระเบิดได้

ทฤษฎีการระเบิดของฝุ่น มาจากทฤษฎีพื้นฐานของการเกิดไฟ ที่เรียกว่า ทฤษฎีสามเหลี่ยมของไฟ ซึ่งประกอบด้วย เชื้อเพลิง(ฝุ่น) แหล่งกำเนิดความร้อน และออกซิเจน แต่เพิ่มการฟุ้งกระจายของฝุ่น และขอบเขตของหมอกฝุ่น ดังนั้นองค์ประกอบของการระเบิดฝุ่นจึงมี 5 องค์ประกอบ เรียกว่า 5 เหลี่ยมของการระเบิดของฝุ่น (The Dust Explosion Pentagon)

การลดความเสี่ยงของการเกิดเพลิงไหม้และการระเบิดของฝุ่นนาโน พิจารณาได้จากธรรมชาติของการติดไฟและการระเบิดดังกล่าว โดยป้องกันไม่ให้ปัจจัยทั้งห้าครบถ้วน เช่น การลดการฟุ้งกระจายของฝุ่น ควบคุมปริมาณเชื้อเพลิง (ฝุ่น) ปริมาณออกซิเจน เป็นต้น

ในกรณีที่วัสดุนาโนแขวนลอยอยู่ในของเหลวที่ติดไฟหรือระเบิดได้ ก็ต้องมีมาตรการป้องกันการเกิดเพลิงไหม้และการระเบิดเช่นเดียวกับมาตรการสำหรับของเหลวที่ติดไฟหรือระเบิดได้นั้น

5.1.7.2. แนวทางการป้องกันเพลิงไหม้และการระเบิดของฝุ่นนาโน

การป้องกันอันดับแรก คือ การลดการสะสมในบริเวณอันตราย ไม่ให้ฝุ่นนาโนซึ่งเบามากฟุ้งกระจายในอากาศ โดยทั่วไปความเข้มข้นของฝุ่นที่ฟุ้งกระจายอยู่ในอากาศ จะอยู่ในช่วงที่ลุกไหม้หรือระเบิดได้ (ช่วงประมาณ 50-100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ถึง 2-3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ความรุนแรงของการระเบิดจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของฝุ่น จนถึงค่าความเข้มข้นที่เหมาะสม (optimum concentration) ที่ให้ค่าความรุนแรงของการระเบิดสูงสุด

การป้องกันอันดับที่สอง คือการป้องกันที่แหล่งกำเนิดของความร้อนและประกายไฟ เช่น การป้องกันไม่ให้ฝุ่นนาโนสัมผัสกับพื้นผิววัสดุที่ร้อน การป้องกันการถ่ายประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วจนเป็นประกายไฟ รวมถึงการป้องกันการสะสมประจุไฟฟ้าที่เกิดจากการเสียดสีระหว่างฝุ่นกับโลหะและระหว่างฝุ่นกับอากาศของเครื่องจักรและอุปกรณ์ในระหว่างกระบวนการผลิตด้วยการต่อฝาก (bonding) ส่วนที่เป็นโลหะเข้าด้วยกันและต้องมีการต่อลงดิน (grounding) สำหรับโรงงานที่อาจเกิดเพลิงไหม้และการระเบิดจากฝุ่นได้ นอกจากนั้น ผู้ปฏิบัติงานควรสวมรองเท้าที่ไม่ก่อให้เกิดการสะสมประจุไฟฟ้าสถิต และควรใช้อุปกรณ์เพื่อถ่ายประจุไฟฟ้ากับดินก่อนปฏิบัติงานในจุดที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดเพลิงไหม้และการระเบิด

แนวทางป้องกันอันดับที่สาม คือการควบคุมปริมาณออกซิเจน ซึ่งปกติปริมาณออกซิเจนในอากาศโดยทั่วไปมีประมาณร้อยละ 21 การควบคุมปริมาณออกซิเจนในอากาศจะทำได้ยากแต่หาก

อยู่ภายในภาชนะปิด เช่น ท่อ ถังเก็บ และไซโล ก็อาจควบคุมปริมาณออกซิเจนไม่ให้เกิดเพลิงไหม้และการระเบิดได้

แนวทางป้องกันอันดับที่สี่ เป็นการควบคุมขอบเขตของหมอกฝุ่น ซึ่งอาจอยู่ในเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ในกระบวนการผลิต หรือการเกิดหมอกฝุ่นปกคลุมในห้องหรือพื้นที่เปิดโล่งได้ ซึ่งมีบางส่วนมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องระบายอากาศไปกรองด้วยไส้กรองชนิด HEPA

อนึ่ง โรงงานอุตสาหกรรมต้องมีแผนเตรียมความพร้อม ทั้งในด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ระงับเหตุฉุกเฉินที่เหมาะสม เพียงพอ และได้รับการตรวจสอบให้พร้อมใช้งานตลอดเวลา รวมถึงการปฏิบัติการระงับเหตุฉุกเฉินในกรณีที่เกิดการรั่วไหลของวัสดุนาโนเป็นปริมาณมาก หรือมีการฟุ้งกระจายอย่างรวดเร็ว ซึ่งมักเป็นผลสืบเนื่องมาจากการระเบิดในสายการผลิตวัสดุนาโน เช่น การระเบิดในโรงงานผลิตคาร์บอนแบล็ค ที่เคยเกิดขึ้นมาแล้วในประเทศไทย

5.1.7.3. แผนและวิธีปฏิบัติที่ต้องจัดเตรียม

ถ้าหากการป้องกันไม่ได้ผล จนเกิดอุบัติเหตุ อุบัติการณ์ หรือเหตุฉุกเฉินขึ้น เช่น เพลิงไหม้ ฝุ่นนาโนระเบิด ภาชนะผสมระเบิดปล่อยฝุ่นนาโนออกไปนอกโรงงาน ฯลฯ โรงงานอุตสาหกรรมจำเป็นต้องมีแผนและวิธีปฏิบัติดังต่อไปนี้เป็นอย่างน้อย เพื่อรองรับเหตุดังกล่าว โดยที่ในแต่ละแผนประกอบด้วยขั้นตอนย่อยเป็นแผนย่อย ที่สามารถนำมาใช้ได้ทันทีสำหรับอุบัติเหตุ อุบัติการณ์ หรือเหตุฉุกเฉินอย่างหนึ่ง ๆ

- **แผนระงับเหตุ** แสดงขั้นตอนที่จำเป็นเพื่อระงับเหตุที่อาจก่ออันตรายที่ได้ชี้บ่งไว้ เพื่อลดความรุนแรงและความเสียหาย ทั้งต่อโรงงาน ต่อผู้ปฏิบัติงาน และต่อสิ่งแวดล้อมรอบโรงงาน

- **แผนปฐมพยาบาล** เป็นแผนการพยาบาลขั้นต้นที่สามารถทำได้ในโรงงาน เพื่อลดความบาดเจ็บของผู้ปฏิบัติงานและผู้เกี่ยวข้อง

- **แผนอพยพ** ในกรณีที่วัสดุนาโนหกรั่วไหลเป็นปริมาณมาก หรือการระงับเหตุตามแผนไม่เป็นผล อาจต้องมีการอพยพบุคลากร สิ่งของเครื่องมือเครื่องใช้ ตลอดจนสารเคมีอื่น ๆ ไม่ให้ก่ออันตรายซ้ำเติม

5.1.8. การฝึกอบรม และให้คำแนะนำแก่ผู้ปฏิบัติงาน

สถาบันมาตรฐานแห่งสหราชอาณาจักร (BSI) แนะนำเรื่องการฝึกอบรมและให้คำแนะนำแก่ผู้ปฏิบัติงาน ให้มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการประเมินและการบริหารความเสี่ยง รวมทั้งมาตรการความปลอดภัยต่าง ๆ เพื่อให้สามารถปฏิบัติงานกับวัสดุนาโนได้อย่างปลอดภัย โดยผู้ปฏิบัติงานควรทราบข้อมูลดังนี้[85]

- ชื่อของวัสดุนาโน โอกาสสัมผัส และความเสี่ยงต่อสุขภาพที่เกิดจากการสัมผัส
- ค่ามาตรฐานสูงสุดของการสัมผัสวัสดุนาโน (Workplace Exposure Limit หรือ WEL) หรือค่ามาตรฐานที่ใช้ในโรงงาน[86] หากมีการกำหนดไว้
- ข้อมูลหรือเอกสารข้อมูลความปลอดภัย (SDS) ที่เกี่ยวกับวัสดุนาโน
- ผลการศึกษาที่สำคัญของการประเมินความเสี่ยง (ถ้ามี)
- ข้อควรปฏิบัติเพื่อความปลอดภัย
- ผลการเฝ้าระวังปริมาณความเข้มข้นของวัสดุนาโนในโรงงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่เกินค่ามาตรฐาน
- ผลสรุปจากการเฝ้าระวังสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน

5.2. หลักการบริหารความเสี่ยงของวัสดุนาโนโดยใช้แถบควบคุม (control banding)

แถบควบคุม (control banding) เป็นวิธีการประเมินและบริหารความเสี่ยงเชิงคุณภาพและกึ่งปริมาณ มีจุดเด่นคือผู้ปฏิบัติงานสามารถทำความเข้าใจและใช้งานง่าย เหมาะสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็ก ที่มักจะมีประสบการณ์ด้านความปลอดภัยน้อย

การใช้แถบควบคุมเป็นวิธีการหนึ่ง ที่ช่วยกำหนดวิธีทำงานอย่างปลอดภัยกับสารเคมีที่ยังมีข้อมูลด้านพิษวิทยาอย่างจำกัด การใช้แถบควบคุมในการประเมินความเสี่ยงของวัสดุนาโนมาจากการสังเกตพบว่า มาตรการควบคุมความปลอดภัยในโรงงานอุตสาหกรรมมีไม่มาก เช่น ทำงานในตู้ดูดควัน สวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล ฯลฯ เป็นต้น ในขณะที่ผู้ปฏิบัติงานอาจต้องทำงานกับวัสดุนาโนที่มีสมบัติทางกายภาพและเคมีหลากหลาย และมีโอกาสในการสัมผัสวัสดุนาโน

แตกต่างกัน เช่น ระยะเวลาทำงาน และความยากง่ายในการสัมผัสวัสดุนาโน เป็นต้น ในที่นี้ มาตรการควบคุมความปลอดภัย จะถูกกำหนดให้ตรงกับแถบควบคุม (control band) โดยพิจารณา จากสมบัติของวัสดุนาโน และกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนาโน

ปัจจัยที่ใช้ในการแบ่งวัสดุนาโนด้วยแถบควบคุม พิจารณาได้หลายประการ ดังนี้

- สมบัติและความเป็นพิษของวัสดุนาโน
- โอกาสการสัมผัส
- ลักษณะขั้นตอนการทำงานกับวัสดุนาโน
- ระยะเวลาการสัมผัสกับวัสดุนาโน
- ปริมาณวัสดุนาโนที่เกี่ยวข้อง

แถบควบคุมวัสดุนาโนสำหรับใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ดังแสดงในตารางที่ 5.2 ได้พัฒนา มาจากตารางมาตรการควบคุมของสถาบันมาตรฐานแห่งสหราชอาณาจักร (BSI) โดยแปลงกิจกรรมให้ เป็นกิจกรรมย่อยจากคู่มือ Good Nano Guide มีวิธีอ่านค่าจากตารางโดยเลือกกิจกรรมในโรงงาน อุตสาหกรรม และเลือกกลุ่มของวัสดุนาโน โดยพิจารณาจาก 3 ปัจจัย คือ การละลายน้ำ ความเป็น แท่งหรือเป็นเส้น และความน่าจะเป็นพิษ จากนั้นให้อ่านตัวเลขทางขวาสุด ว่าวัสดุนั้นอยู่ในแถบที่ เท่าใด ทั้งนี้ โดยมีความหมายของค่าตัวเลขตามตารางที่ 5.3

กิจกรรม	กลุ่มของวัสดุนาโน ที่ผลิตขึ้น	แถบ
การพ่นเป็นละออง หรือการจงใจทำให้กระจายตัวในอากาศ การสังเคราะห์ การกระจายตัวในอากาศ การพ่นละออง ฝอยหรือพ่นสเปรย์	ไม่ละลายน้ำ เป็นแท่งหรือเส้น (fibrous) และน่าจะเป็นพิษอยู่แล้ว (CMAR)	4
	ละลายน้ำได้	3
การกระทำกับผงหรือวัสดุแห้ง การเปิดภาชนะบรรจุ การชั่งตวงวัด การผสม การบรรจุลงในภาชนะ การตักหรือโกย การขึ้นรูป ตัดแต่ง เลื่อย เจาะ ไส กลึง คว้าน ด้วยเครื่องจักร	ไม่ละลายน้ำ เป็นแท่งหรือเส้น (fibrous) และน่าจะเป็นพิษอยู่แล้ว (CMAR)	4
	ละลายน้ำได้	3
การกระทำกับของเหลวที่ไม่ก่อให้เกิดละออง การเปิดภาชนะบรรจุ การชั่งตวงวัด การผสม การกระจายตัวในของเหลว การบรรจุลงในภาชนะ การขนย้าย	ไม่ละลายน้ำ เป็นแท่งหรือเส้น (fibrous) และน่าจะเป็นพิษอยู่แล้ว (CMAR)	3
	ละลายน้ำได้	2
การดูแลทำความสะอาด การทำความสะอาดบริเวณทำงาน การทำความสะอาดเครื่องมือเครื่องจักร การทำความสะอาดวัสดุนาโนที่ฟุ้งหกตกหล่น การเลิกใช้เครื่องจักร การจัดการของเสีย	ไม่ละลายน้ำ เป็นแท่งหรือเส้น (fibrous) และน่าจะเป็นพิษอยู่แล้ว (CMAR)	2
	ละลายน้ำได้	1

ตารางที่ 5.2: แถบควบคุมวัสดุนาโน สำหรับใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม

หมายเหตุ: ผู้ใช้ตารางนี้ต้องตระหนักอยู่เสมอว่า องค์ความรู้เกี่ยวกับความปลอดภัยนาโนในระดับโลก ยังขาดแคลนมาก จึงควรใช้ตารางนี้เพื่อการศึกษาและทำความเข้าใจมาตรการต่าง ๆ เท่านั้น หากต้องการนำมาใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมจริง จำเป็นต้องตรวจสอบเสียก่อน ว่ามาตรการควบคุมต่าง ๆ ในตาราง ได้มีการเปลี่ยนแปลงองค์ความรู้ หรือมาตรฐานไปบ้างแล้วหรือไม่

แถบ	คำอธิบาย
4	ควรทำในที่ปิดหรือแยกออกจากผู้ปฏิบัติงาน
3	ควรใช้การระบายอากาศ เช่นใช้ท่อดูดลมหรือตู้ดูดควัน แต่หากทำได้ ควรทำในที่ปิดหรือแยกออกจากผู้ปฏิบัติงาน
2	การระบายอากาศเช่นใช้ท่อดูดลมหรือตู้ดูดควันอาจจะเพียงพอ ถ้าวัสดุนาโนมีเพียงเล็กน้อย (หนักเป็นมิลลิกรัม) อาจใช้การแยกดำเนินการ หรือใช้อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ
1	ควรกระทำในระบบปิดเท่าที่จะทำได้ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ การใช้อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจและปกป้องการสัมผัสควรจะใช้ได้ผล การทำความสะอาดจะต้องไม่ทำให้วัสดุนาโนฟุ้งกระจาย

ตารางที่ 5.3: แผนภูมิขยายเฉพาะส่วนที่เป็นแถบควบคุม (control bands)

ตัวอย่างวิธีการนำตารางแถบควบคุมไปใช้งาน

ตัวอย่างที่ 1:

ขั้นตอนการผสมท่อคาร์บอนนาโนซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งเข้ากับวัสดุอื่น ตรงกับกิจกรรมแถวที่สอง บรรทัดบน ในตารางที่ 5.2 (การผสม/เป็นแท่ง) ซึ่งอ่านจากคอลัมน์ขวาสุดว่าตรงกับแถบควบคุมที่ 4 จากนั้นอ่านมาตรการควบคุมของแถบควบคุมที่ 4 จากตารางที่ 5.3 ได้ว่า “ควรทำในที่ปิดหรือแยกออกจากผู้ปฏิบัติงาน”

ตัวอย่างที่ 2:

ขั้นตอนการเปิดภาชนะบรรจุอนุภาคไทเทเนียมนาโนที่เคลือบผิวให้มีสมบัติละลายน้ำได้ ในตารางที่ 5.2 ตรงกับกิจกรรมแถวที่สาม บรรทัดล่าง (การเปิดภาชนะบรรจุ/ละลายน้ำ) ซึ่งอ่านจากคอลัมน์ขวาสุดว่าแถบควบคุมที่ 2 จากนั้นอ่านมาตรการควบคุมของแถบควบคุมที่ 2 จากตารางที่ 5.3 ได้ว่า “การระบายอากาศ เช่น ใช้ท่อดูดลมหรือตู้ดูดควัน อาจจะเพียงพอ ถ้าวัสดุนาโนมีเพียงเล็กน้อย (หนักเป็นมิลลิกรัม) อาจใช้การแยกดำเนินการ หรือใช้อุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ”

6. การกำกับดูแลโดยภาครัฐ และหน่วยงานของภาครัฐและเอกชน[87]

เนื่องจากนาโนเทคโนโลยีเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง ดังนั้น จึงจำเป็นจะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยในการนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้ภายใต้การกำกับดูแลของภาครัฐ ซึ่งจะต้องมีบทบาทในการริเริ่มดำเนินการด้านความปลอดภัยนาโน ด้วยเหตุผลดังนี้

- การดำเนินการด้านความปลอดภัยเป็นการลงทุนที่เห็นผลในระยะยาว ผู้ประกอบกิจการโรงงานส่วนใหญ่มักจะไม่ได้จัดสรรงบประมาณโดยเฉพาะสำหรับดำเนินการด้านความปลอดภัย นอกจากเจ้าของหรือผู้ถือหุ้นจะมีความตระหนักและให้ความสำคัญด้านความปลอดภัยอย่างจริงจัง

- การดำเนินการด้านความปลอดภัยนาโน จำเป็นจะต้องมีองค์ความรู้เฉพาะด้านที่ทันสมัยและค่อนข้างซับซ้อน ซึ่งภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อมยังไม่มีความรู้ดังกล่าว

- การดำเนินการด้านความปลอดภัยนาโน บางกรณีเป็นความร่วมมือระหว่างประเทศ ที่ต้องมีหน่วยงานภาครัฐเป็นหน่วยงานหลักในการดำเนินการ (focal point)

- การดำเนินการด้านความปลอดภัยนาโนจำเป็นจะต้องมีกฎระเบียบ มาตรการความปลอดภัย เพื่อบังคับใช้ในการกำกับดูแลให้เกิดความปลอดภัย ซึ่งเป็นอำนาจหน้าที่ของภาครัฐ

เนื้อหาส่วนใหญ่ของบทนี้ เป็นบทบาทของภาครัฐในประเทศไทย เกี่ยวกับความปลอดภัยนาโน ตั้งแต่แนวนโยบายมหภาค ยุทธศาสตร์ความปลอดภัยและจริยธรรมนาโน ตลอดจนกฎหมายและหน่วยงานในภาครัฐและเอกชน ที่จะเป็นเครื่องมือในการขับเคลื่อนยุทธศาสตร์ความปลอดภัยดังกล่าว

6.1. แนวโน้มการกำกับดูแลด้านความปลอดภัยนาโนในต่างประเทศ

เป็นที่น่าสังเกตว่า หน่วยงานที่กำกับดูแลด้านความปลอดภัยนาโนในแต่ละประเทศ จะเป็นหน่วยงานที่มีภารกิจกำกับดูแลด้านความปลอดภัยที่มีอยู่เดิมในสามสาขา อันได้แก่ หน่วยงานคุ้มครองสุขภาพอนามัยของผู้บริโภค (เทียบได้กับกระทรวงสาธารณสุข สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา และสำนักงานคณะกรรมการคุ้มครองผู้บริโภค) หน่วยงานคุ้มครองความปลอดภัยและสุขภาพอนามัยของผู้ปฏิบัติงาน (เทียบได้กับกระทรวงอุตสาหกรรม กระทรวงแรงงาน และกระทรวงสาธาณสุข) และหน่วยงานคุ้มครองสิ่งแวดล้อม (เทียบได้กับกรมควบคุมมลพิษ)

อย่างไรก็ตาม หน่วยงานกึ่งวิชาการที่มีภารกิจในการกำหนดมาตรฐานระดับประเทศ มักจะเป็นคนละหน่วยงานกับหน่วยงานที่มีอำนาจในการบังคับใช้กฎหมาย ตัวอย่างเช่นในสหรัฐอเมริกา มีรัฐบัญญัติ Occupational Safety and Health Act of 1970 ก่อตั้งองค์กร Occupational Safety and Health Administration (OSHA) เป็นหน่วยงานในกระทรวงแรงงาน (Department of Labor) มีหน้าที่บังคับใช้กฎหมาย ในขณะเดียวกันรัฐบัญญัติเดียวกันนั้นก็ก่อตั้งองค์กร National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) เป็นหน่วยงานวิชาการ สังกัด Center for Disease Control and Prevention (CDC) กระทรวงสาธารณสุข (Department of Health and Human Services) มีหน้าที่สร้างองค์ความรู้ด้านความปลอดภัยแรงงาน และถ่ายทอดองค์ความรู้ให้เกิดเป็นรูปธรรมเพื่อให้เกิดความปลอดภัยและสุขภาพที่ดีของผู้ใช้แรงงาน

ในทวีปยุโรป มีกลไกความร่วมมือในภูมิภาค คือสหภาพยุโรป ที่สามารถตั้งข้อกำหนด (Directive) ให้ประเทศสมาชิกต้องออกกฎหมายหรือเปลี่ยนแปลงแก้ไขกฎหมายภายในตามข้อกำหนดนั้น ซึ่งเป็นการปรับระบบกฎหมายในประเทศสมาชิกให้เป็นไปในแนวทางเดียวกัน โดยได้รับการสนับสนุนทางวิชาการจากองค์การเพื่อความร่วมมือทางเศรษฐกิจและการพัฒนา (Organization for Economic Co-operation and Development หรือ OECD) อย่างไรก็ตาม ASEAN และ Asia Nano Forum ไม่มีกลไกดังกล่าว ประเทศไทยจึงได้เข้าร่วมในองค์กรระดับโลก เช่น OECD-WPMN โดยตรง

6.2. แนวนโยบายมหภาคของประเทศไทย ที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยนาโน

เอกสารนโยบาย	วิสัยทัศน์ที่สกัดได้จากเอกสารนโยบาย
รัฐธรรมนูญแห่งราชอาณาจักรไทย พ.ศ. 2550	ประชาชนมีสุขภาพพลานามัยสมบูรณ์ มีสิ่งแวดล้อมที่สะอาด ทุกภาคส่วนของสังคมทำงานโดยใช้หลักคุณธรรม จริยธรรม และธรรมาภิบาล ภาคเอกชนแข่งขันกันประกอบกิจการอย่างเสรีและเป็นธรรม ประชาชนเป็นผู้บริโภคที่ฉลาดและไม่เสียเปรียบภาคธุรกิจ ในขณะที่มีส่วนร่วมในการตัดสินใจที่สำคัญของประเทศ
นโยบายความมั่นคงของประเทศ	การป้องกันประเทศ การเตรียมพร้อมแห่งชาติ และการจัดการปัญหาภัยคุกคามข้ามชาติ ถูกจัดไว้ในลำดับหลัง ๆ ของนโยบายความมั่นคงแห่งชาติระยะ 5 ปี
วาระแห่งชาติ	การเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศ (สินค้านาโนเทคโนโลยีไม่ถูกกีดกัน) การพัฒนาที่ยั่งยืน (มีมาตรการทำให้นาโนไม่เป็นภัยต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม)
แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 10	สังคมที่มีความสุขอย่างยั่งยืน บนรากฐานการพัฒนาของความสมดุลในมิติเศรษฐกิจ สังคม ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
นโยบายของรัฐบาลในอดีต (1)	<u>นโยบายสาธารณสุข</u>: ลดปัจจัยเสี่ยง..ต่อสุขภาพ... สร้างขีดความสามารถในการเฝ้าระวัง <u>นโยบายแรงงาน</u>: ผู้ใช้แรงงานมีความปลอดภัย มีสภาพการจ้างงานดี <u>นโยบายสิ่งแวดล้อม</u>: ประชาชนมีสุขภาพดี ไม่เจ็บป่วยเรื้อรัง <u>นโยบายต่างประเทศ</u>: มีบทบาทร่วมกับประชาคมโลกกำหนดบรรทัดฐานระหว่างประเทศ <u>นโยบายความมั่นคง</u> เสริมสร้างและพัฒนาศักยภาพการป้องกันประเทศ
นโยบายของรัฐบาลในอดีต (2)	<u>นโยบายสาธารณสุข</u>: ลดปัจจัยเสี่ยงที่มีผลต่อสุขภาพและภาวะทุพโภชนาการที่นำไปสู่การเจ็บป่วยเรื้อรัง ... รวมทั้งการเฝ้าระวังโรคอุบัติใหม่ <u>นโยบายแรงงาน</u>: ให้ความสำคัญด้านความปลอดภัยในการทำงานและสวัสดิการแรงงาน <u>นโยบายที่ดิน ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม</u>: เพิ่มประสิทธิภาพ... การประเมินผลกระทบทางสุขภาพ ... การจัดการระบบกำจัดขยะ ของเสียอันตราย ...สร้างกฎเกณฑ์ที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดสมดุลย์ระหว่างการพัฒนาอุตสาหกรรมและการรักษาสิ่งแวดล้อม <u>นโยบายการต่างประเทศและเศรษฐกิจระหว่างประเทศ</u>: กระชับความร่วมมือและความเป็นหุ้นส่วนทางยุทธศาสตร์กับประเทศ... ที่มีบทบาทสำคัญของโลก <u>นโยบายความมั่นคง</u> พัฒนาและเสริมสร้างศักยภาพของกองทัพและระบบป้องกันประเทศ ... พัฒนาระบบการเตรียมพร้อมแห่งชาติ
แผนจัดการสารเคมีแห่งชาติ ฉบับที่ 3	ประชาชนมีสุขภาพดี จากการจัดการสารเคมีที่เป็นระบบ
แผนกลยุทธนาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ	สุขภาพและสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย ได้มาตรฐานโลก

ตารางที่ 6.1: วิสัยทัศน์ของประเทศไทยที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยนาโน

แนวนโยบายมหภาคของประเทศไทยในภาพรวมที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยนาโน ในรัฐธรรมนูญแห่งราชอาณาจักรไทย แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ วาระแห่งชาติ นโยบายของรัฐบาลในอดีต ตลอดจนแผนกลยุทธนาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ และแผนยุทธศาสตร์การจัดการสารเคมีแห่งชาติ สรุปวิสัยทัศน์ที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยนาโน โดยทางตรงหรือทางอ้อมได้ ดังแสดงในตารางที่ 6.1

6.2.1. นโยบายแรงงานของรัฐบาล

จากตารางที่ 6.1 นโยบายแรงงานของรัฐบาลในอดีตที่ผ่านมา ได้กล่าวถึงความปลอดภัยในการทำงานของผู้ใช้แรงงาน ซึ่งรวมถึงความปลอดภัยในการทำงานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนาโนด้วย

6.2.2. แผนยุทธศาสตร์การจัดการสารเคมีแห่งชาติ

ด้วยความตระหนักถึงความสำคัญของการจัดการสารเคมี ซึ่งจะช่วยบรรเทาปัญหากากของเสียอันตราย สารตกค้างในผลิตภัณฑ์และในสิ่งแวดล้อม และการเกิดอุบัติภัยสารเคมี ทำให้เวทีการประชุมในระดับโลกหลายเวที ได้นำการจัดการสารเคมีมาเป็นวาระเพื่อหาข้อเสนอที่ยั่งยืนและเป็นรูปธรรม เวทีเหล่านี้ได้แก่ การประชุมสุดยอดว่าด้วยการพัฒนาที่ยั่งยืน (World Summit on Sustainable Development หรือ WSSD) เป้าหมายการพัฒนาแห่งสหัสวรรษ (Millennium Development Goals หรือ MDGs) เวทีความร่วมมือระหว่างรัฐบาลว่าด้วยความปลอดภัยด้านสารเคมี (Intergovernmental Forum on Chemical Safety หรือ IFCS) และยุทธศาสตร์การดำเนินงานระหว่างประเทศว่าด้วยการจัดการสารเคมี (Strategic Approach to International Chemical Management หรือ SAICM) สำหรับประเทศไทยนั้น กระทรวงสาธารณสุขได้เข้าเป็นสมาชิกโครงการระหว่างประเทศว่าด้วยความปลอดภัยด้านสารเคมี (International Programme on Chemical Safety หรือ IPCS) ตั้งแต่ปี 2528 และเป็นศูนย์ประสานงานแห่งชาติของเวทีความร่วมมือระหว่างรัฐบาลว่าด้วยความปลอดภัยด้านสารเคมี (IFCS) ตั้งแต่ปี 2537[88]

ประเทศไทยมีแผนแม่บทและแผนยุทธศาสตร์ที่เกี่ยวกับความปลอดภัยด้านสารเคมีมาแล้ว 4 ฉบับ ได้แก่

1. **แผนแม่บทพัฒนาความปลอดภัยด้านสารเคมีแห่งชาติ ฉบับที่ 1 (พ.ศ. 2540-2544)** มุ่งเน้นการประสานงานเพื่อความปลอดภัยด้านสารเคมีในระดับชาติ[89]

2. **แผนแม่บทพัฒนาความปลอดภัยด้านสารเคมีแห่งชาติ ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2545-2549)** มุ่งเน้นการจัดการสารเคมีที่เป็นระบบ เพื่อให้ประชาชนมีสุขภาพดี[90]

3. **แผนยุทธศาสตร์การจัดการสารเคมีแห่งชาติ ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2550-2554)**[91] มีทิศทางและแนวทางการดำเนินงานที่จะนำประเทศสู่สังคมปลอดภัยจากอันตรายด้านสารเคมี สู่การพัฒนาประเทศที่ยั่งยืนและแข่งขันได้ในระดับสากล โดยประกอบด้วย 3 ยุทธศาสตร์ คือ

   - พัฒนาระบบบริหารจัดการสารเคมี
   - ลดความเสี่ยงอันตรายจากสารเคมี ด้วยการพัฒนาและส่งเสริมเกษตรกรรมที่ปลอดภัยต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม และพัฒนาและส่งเสริมความปลอดภัยสารเคมีทางอุตสาหกรรมที่เหมาะสม
   - ส่งเสริมความปลอดภัยและบทบาทประชาชนในการจัดการสารเคมี

4. **แผนยุทธศาสตร์การจัดการสารเคมีแห่งชาติ ฉบับที่ 4 (พ.ศ. 2555-2564)** กำหนดเป้าประสงค์ไว้ว่า “ภายในปี 2564 สังคมและสิ่งแวดล้อมปลอดภัยบนพื้นฐานของการจัดการสารเคมีที่มีประสิทธิภาพ มีส่วนร่วมจากทุกภาคส่วน และสอดคล้องกับการพัฒนาประเทศ” [92] โดยประกอบด้วย 3 ยุทธศาสตร์ คือ

   - พัฒนาฐานข้อมูล กลไก และเครื่องมือในการจัดการสารเคมีอย่างเป็นระบบ ครบวงจร
   - พัฒนาศักยภาพและบทบาทในการบริหารจัดการสารเคมีของทุกภาคส่วน
   - ลดความเสี่ยงอันตรายจากสารเคมี[93]

จุดเด่นของแผนยุทธศาสตร์ฯ ฉบับที่ 4 ได้แก่ “กลวิธีที่กำหนดขึ้นเพื่อแก้ปัญหาช่องว่างและประเด็นท้าทายที่เกิดขึ้นจากการดำเนินงานที่ผ่านมา ตลอดจนการกำหนดกลวิธีในเชิงรุก ซึ่งได้แก่การศึกษาแนวทางการจัดตั้งองค์กรกลางในการจัดการสารเคมีระดับชาติ การเน้นการควบคุมสารเคมีด้วยเครื่องมือด้านกฎหมายจากต้นน้ำถึงปลายน้ำ การใช้เครื่องมือด้านการประเมินที่รวมถึงการประเมินผลกระทบด้านสุขภาพ (HIA) ร่วมในการจัดการสารเคมี มีการลดความเสี่ยงในภาคสาธารณสุขและผู้บริโภคและภาคการขนส่ง นอกเหนือจากภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม การ

พัฒนางานด้านระบาดวิทยาสารเคมี การเสริมสร้างความเข้มแข็งและบทบาทขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในการจัดการสารเคมี การลดความเสี่ยงอันตรายจากสารเคมีเชิงพื้นที่อย่างบูรณาการ และการส่งเสริมความร่วมมือของภาคประชาชน ภาคเอกชน และ กลุ่มวิชาชีพและเครือข่ายทางสังคมต่าง ๆ”[94]

6.2.3. แผนกลยุทธ์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ

จากความสำคัญของนาโนเทคโนโลยีในปัจจุบันและอนาคตอันใกล้ ซึ่งมีการคาดคะเนไว้ว่าในปี 2556 น่าจะอยู่ที่ระดับร้อยละ 1 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ หรือประมาณ 120,000 ล้านบาท[95] (ในขณะที่คาดว่าในสิบปีข้างหน้าผลิตภัณฑ์นาโนเทคโนโลยีจะมีมูลค่ารวมมากกว่า 40 ล้านล้านบาท) คณะรัฐมนตรีได้มีมติเมื่อวันที่ 13 สิงหาคม 2546 เห็นชอบให้จัดตั้งศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC) ขึ้นภายใต้สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (NSTDA)

ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC) ได้จัดทำแผนกลยุทธ์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (พ.ศ. 2547- 2556) ขึ้น โดยมีเป้าหมายว่า

- ประเทศไทยจะผลิตผลิตภัณฑ์ที่ใช้นาโนเทคโนโลยี คิดเป็นร้อยละ 1 ของผลิตภัณฑ์ มวลรวมในประเทศ (มูลค่าประมาณ 120,000 ล้านบาท)
- ประเทศไทยจะสามารถยกระดับสุขภาพและสิ่งแวดล้อมของคนไทย ให้อยู่ในระดับมาตรฐานโลก โดยการพัฒนาวัสดุ อุปกรณ์ และระบบที่เกี่ยวข้องกับการแพทย์และ สุขภาพด้วยนาโนเทคโนโลยี
- ประเทศไทยจะอยู่ในระดับแนวหน้าการศึกษาและวิจัยด้านนาโนเทคโนโลยี ของภูมิภาค อาเซียน

เพื่อให้บรรลุเป้าหมายนี้ จำเป็นต้องใช้กลยุทธ์นาโนเทคโนโลยี 5 ประการ พร้อมกับมาตรการที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

- กลยุทธ์ที่ 1: ผลักดันนาโนเทคโนโลยีเข้าหนุนการพัฒนาคลัสเตอร์เป้าหมาย
  - สร้างกลไกเชื่อมโยงอุตสาหกรรมต้นน้ำ กลางน้ำ และปลายน้ำ
  - ส่งเสริมอุตสาหกรรมนาโนเทคโนโลยีแบบก้าวกระโดด โดยการดึงดูดการลงทุน จากต่างประเทศ
  - สร้างสภาพแวดล้อมที่เอื้ออำนวยต่อการสร้างธุรกิจใหม่

- กลยุทธ์ที่ 2: พัฒนากำลังคนด้านนาโนเทคโนโลยี
    - เร่งสร้างบุคลากร ตัวคูณ
    - ส่งเสริมการเรียนการสอนด้านนาโนเทคโนโลยี
    - ส่งเสริมความร่วมมือกับต่างประเทศในการพัฒนาบุคลากร
    - ยกระดับความรู้ของบุคลากรเชิงปฏิบัติ ทั้งในภาครัฐและอุตสาหกรรม
- กลยุทธ์ที่ 3: ลงทุนวิจัยและพัฒนาด้านนาโนเทคโนโลยี
    - ประกาศความตั้งใจ นโยบาย และวงเงินลงทุนวิจัยและพัฒนาด้านนาโนเทคโนโลยี รวมทั้งสนับสนุนการจดสิทธิบัตรและการตีพิมพ์วารสารวิชาการ ทั้งในและต่าง ประเทศ
    - ใช้ตลาดภาครัฐผลักดันให้เกิดการวิจัยและพัฒนา
- กลยุทธ์ที่ 4: พัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านนาโนเทคโนโลยี
    - พัฒนาขีดความสามารถการบริการห้องปฏิบัติการและศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์
    - พัฒนาศูนย์แห่งความเป็นเลิศทางนาโนเทคโนโลยีในสาขาเฉพาะ
    - สร้างกลไกขยายผลการวิจัยและพัฒนาด้านนาโนเทคโนโลยี ไปสู่การใช้ประโยชน์ เชิงพาณิชย์
- กลยุทธ์ที่ 5: สร้างความตระหนักในความสำคัญของนาโนเทคโนโลยีอย่างกว้างขวาง
    - ส่งเสริมการสื่อสารและให้การศึกษาแก่สังคมหลายทาง
    - ให้ความรู้และสร้างกลไกดูแลความปลอดภัยและจริยธรรมของนาโนเทคโนโลยี

สืบเนื่องจากมาตรการสุดท้ายในกลยุทธ์ที่ 5 จึงมีการตั้งคณะอนุกรรมการ เพื่อดูแลเกี่ยวกับความปลอดภัยและจริยธรรมของนาโนเทคโนโลยีขึ้นโดยเฉพาะ เรียกว่า “คณะอนุกรรมการด้านความปลอดภัยและการบริหารความเสี่ยงด้านนาโนเทคโนโลยี”

6.3. ยุทธศาสตร์ความปลอดภัยนาโนของประเทศไทย

6.3.1. ภาพรวมด้านความปลอดภัยนาโนของประเทศไทย

จากแนวนโยบายดังกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่า นโยบายมหภาคของประเทศไทย ไม่ว่าจะเป็นรัฐธรรมนูญ วาระแห่งชาติ แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฯลฯ ต่างเน้นวิสัยทัศน์ของการพัฒนาประเทศ ไปสู่สังคมที่มีความสุขอย่างยั่งยืน มีความสามารถแข่งขันได้ในตลาดโลก ในขณะที่

ประชาชนมีสุขภาพพลานามัยที่สมบูรณ์ มีสิ่งแวดล้อมที่สะอาด สังคมมีคุณธรรม ประชาชนมีส่วนร่วมในการตัดสินใจของประเทศ วิสัยทัศน์ดังกล่าวจะเกิดเป็นจริงขึ้นได้ ก็ด้วยความสมดุลย์ของการพัฒนาระหว่างด้านเศรษฐกิจ สังคม ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

ในปัจจุบัน ประเทศไทยมีทั้งระบบกฎหมายและหน่วยงานบังคับใช้กฎหมายอยู่แล้ว ทั้งในด้านการจัดการวัตถุอันตราย การจัดการสิ่งแวดล้อม การคุ้มครองแรงงาน และการคุ้มครองผู้บริโภค อย่างไรก็ตามเช่นเดียวกับในต่างประเทศ กฎหมายและระบบกลไกของรัฐ ควรได้รับการศึกษาเชิงนโยบายอย่างละเอียด หลังจากมีความชัดเจนเกี่ยวกับกลไกที่วัสดุนาโนสร้างความเสียหายแก่เซลล์และเนื้อเยื่อ และมีแบบจำลองการประเมินความเสี่ยงของวัสดุนาโน การศึกษาดังกล่าวควรชี้ชัดลงไปว่า จะต้องมีการออกกฎหมายใหม่ หรือแก้ไขกฎหมายระดับพระราชบัญญัติที่มีอยู่แล้ว หรือแก้เฉพาะรายละเอียดในกฎหมายฉบับใดบ้าง

ดังนั้น จะเห็นได้ว่าตั้งแต่ปี 2548 เป็นต้นมา ประเทศไทยได้ติดตามความเคลื่อนไหวในเวทีความร่วมมือระดับโลกทุกเวที เพื่อรับทราบข้อมูลด้านความปลอดภัยและจริยธรรมนาโน ในขณะที่เริ่มสร้างความพร้อมในการทดสอบความปลอดภัยของวัสดุนาโน จนสามารถเริ่มโครงการทดสอบต่าง ๆ ได้ในปี 2553 ที่ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.3.2. แผนยุทธศาสตร์ด้านความปลอดภัยนาโนเทคโนโลยี

แผนยุทธศาสตร์ด้านความปลอดภัยและจริยธรรมนาโนเทคโนโลยี (พ.ศ. 2555-2559) มีวิสัยทัศน์ว่า “นาโนปลอดภัย พัฒนาไทย ก้าวไกลอย่างยั่งยืน” และมีเป้าประสงค์ “เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อสุขภาพ สิ่งแวดล้อม และความมั่นคงของประเทศด้วยกระบวนการวิจัยและพัฒนา ผลิต จำหน่าย และใช้นาโนเทคโนโลยีและผลิตภัณฑ์นาโนเทคโนโลยีอย่างมีจริยธรรม เหมาะสม ยั่งยืน และมีส่วนร่วม”

แผนยุทธศาสตร์นี้ประกอบด้วยตัวยุทธศาสตร์ 3 ด้านด้วยกัน ได้แก่

ยุทธศาสตร์ที่ 1: สร้างและบริหารจัดการองค์ความรู้ด้านความปลอดภัยและจริยธรรมนาโนเทคโนโลยีและผลิตภัณฑ์นาโน

ยุทธศาสตร์ที่ 2: พัฒนาและเสริมสร้างความเข้มแข็งของมาตรการและกลไกการกำกับดูแลและบังคับใช้

ยุทธศาสตร์ที่ 3: สร้างความเข้มแข็งและส่งเสริมการมีส่วนร่วมของประชาชน

เพื่อให้การดำเนินงานตามยุทธศาสตร์ประสบความสำเร็จตามตัวชี้วัดที่กำหนดไว้ แผนยุทธศาสตร์ฉบับนี้ได้ตั้งกรอบการดำเนินงานไว้ 5 ด้าน (เรียกว่า "5 e") ได้แก่

- ด้านการบังคับใช้กฎหมาย (enforcement)
- ด้านเศรษฐศาสตร์และการเงินการคลัง (economic and finance)
- ด้านการพัฒนาการใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสม (engineering)
- ด้านการศึกษา การจัดการความรู้และกระบวนการเรียนรู้ (education and knowledge management)
- ด้านการเสริมสร้างการมีส่วนร่วมและการพัฒนาศักยภาพของประชาชน (empowerment)

6.4. กฎหมายและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยนาโน[96]

การดำเนินงานตามแผนยุทธศาสตร์ด้านความปลอดภัยและจริยธรรมนาโนเทคโนโลยีจะลุล่วงไปได้ ก็ต้องอาศัยโครงสร้างพื้นฐานทั้งด้านกฎหมายและหน่วยงานที่มีอยู่แล้วในปัจจุบัน ซึ่งประเทศไทยนับว่ามีอยู่บ้างในระดับหนึ่ง แต่จำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงให้สอดคล้องกับนาโนเทคโนโลยีและวัสดุนาโน ภาพรวมของกฎหมายและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยนาโน ทั้งในด้านการคุ้มครองผู้บริโภค การคุ้มครองสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน และการรักษาคุณภาพของสิ่งแวดล้อม สรุปโดยแยกตามกิจกรรมได้ดังตารางที่ 6.2

กิจกรรม	กฎหมายที่เกี่ยวข้อง (ระดับพระราชบัญญัติ)	หน่วยงานกำกับดูแล (ระดับกรม)
การผลิต นำเข้า ส่งออก ซึ่งวัสดุนาโน	พรบ. วัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 พรบ. ควบคุมยุทธภัณฑ์ พ.ศ. 2530 พรบ. อาหาร พ.ศ. 2522 พรบ. ยา พ.ศ. 2510 พรบ. เครื่องสำอาง พ.ศ. 2535 พรบ. เครื่องมือแพทย์ พ.ศ. 2551	กรมศุลกากร ร่วมกับหน่วยงานควบคุมตาม พรบ. วัตถุอันตราย กรมโรงงานอุตสาหกรรม สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา สถาบันการแพทย์ฉุกเฉินแห่งชาติ กรมวิชาการเกษตร กรมประมง กรมปศุสัตว์ กรมธุรกิจพลังงาน กรมยุทธภัณฑ์ (กระทรวงกลาโหม)
การขนส่ง	พรบ. วัตถุอันตราย พ.ศ. 2535	หน่วยงานตาม พรบ. วัตถุอันตราย กรมการขนส่งทางบก การท่าเรือแห่งประเทศไทย กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย
การผลิตผลิตภัณฑ์นาโน	พรบ. วัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 พรบ. โรงงาน พ.ศ. 2535 พรบ. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2511 พรบ. มาตรฐานสินค้าเกษตร พ.ศ. 2551 พรบ. อาหาร พ.ศ. 2522 พรบ. ยา พ.ศ. 2510 พรบ. เครื่องสำอาง พ.ศ. 2535 พรบ. เครื่องมือแพทย์ พ.ศ. 2551 พรบ. คุ้มครองแรงงาน พ.ศ. 2541	หน่วยงานตาม พรบ. วัตถุอันตราย สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน
การจำหน่าย โฆษณา แสดงฉลาก	พรบ. อาหาร พ.ศ. 2522 พรบ. ยา พ.ศ. 2510 พรบ. เครื่องสำอาง พ.ศ. 2535 พรบ. เครื่องมือแพทย์ พ.ศ. 2551 พรบ. คุ้มครองผู้บริโภค พ.ศ. 2522 พรบ. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2511	สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม สำนักงานคณะกรรมการคุ้มครองผู้บริโภค

กิจกรรม	กฎหมายที่เกี่ยวข้อง (ระดับพระราชบัญญัติ)	หน่วยงานกำกับดูแล (ระดับกรม)
การบริโภค หรือใช้ผลิตภัณฑ์	พรบ. คุ้มครองผู้บริโภค พ.ศ. 2522 พรบ. ความรับผิดต่อความเสียหายที่เกิดขึ้นจากสินค้าที่ไม่ปลอดภัย 2551 พรบ. ควบคุมยุทธภัณฑ์ พ.ศ. 2530	สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา สำนักงานคณะกรรมการคุ้มครองผู้บริโภค
การจัดการของเสีย	พรบ. วัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 (กรณีของเสียจากโรงงาน) พรบ. สาธารณสุข พ.ศ. 2535 (ฉบับ 2 พ.ศ. 2550)	กรมโรงงานอุตสาหกรรม (กรณีของเสียจากโรงงาน) ศูนย์บริหารกฎหมายสาธารณสุข กรมอนามัย องค์การปกครองส่วนท้องถิ่น

ตารางที่ 6.2: กฎหมายและหน่วยงานของประเทศไทยที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยนาโน

ที่มา: ปรับปรุงจาก สุจิตรา วาสนาดำรงดี. 2553. Nano Safety ชุดความรู้ด้านเทคนิคและวิชาการเรื่องความปลอดภัยของวัสดุและผลิตภัณฑ์นาโน สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา กระทรวงสาธารณสุข หน้า 48-49.

6.4.1. กฎหมายที่เกี่ยวกับความปลอดภัยนาโนสำหรับภาคอุตสาหกรรม

ในประเทศไทยมีกฎหมายระดับพระราชบัญญัติที่เกี่ยวข้องอยู่ทั้งหมดกว่า 10 ฉบับ และกฎหมายภายใต้พระราชบัญญัติดังกล่าวอีกหลายฉบับ แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะกฎหมายสำคัญ 5 ฉบับ ได้แก่ พระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 พระราชบัญญัติคุ้มครองผู้บริโภค พ.ศ. 2522 พระราชบัญญัติคุ้มครองแรงงาน พ.ศ. 2541 และพระราชบัญญัติความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน พ.ศ. 2554

6.4.1.1. พระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 แก้ไข พ.ศ. 2544 และ พ.ศ. 2551

การนำพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 แก้ไข พ.ศ. 2541 และ พ.ศ. 2551 (Hazardous Substance Act of 1992 as amended in 2001 and 2008) ไปประยุกต์ใช้ในการกำกับดูแลวัสดุนาโน จำเป็นต้องกำหนดให้วัสดุนาโนเป็นวัตถุอันตรายชนิดหนึ่งชนิดใดตามที่กฎหมายกำหนด ตั้งแต่ชนิดที่ 1 (อันตรายน้อย ไม่ต้องจดทะเบียนในการผลิต เก็บรักษา ส่งออก และนำเข้า)

ชนิดที่ 2 (อันตรายมากขึ้น จำเป็นต้องมีการเฝ้าระวังและควบคุม) ชนิดที่ 3 (ต้องมีใบอนุญาตผลิต เก็บรักษา ส่งออก หรือนำเข้า) และชนิดที่ 4 (ห้ามผลิต เก็บรักษา นำเข้าหรือส่งออก เนื่องจากมีความเสี่ยงสูงต่อสุขภาพของมนุษย์) ในปัจจุบันยังไม่มีวัสดุนาโนชนิดใด จัดเป็นเป็นวัตถุอันตรายตามพระราชบัญญัตินี้

6.4.1.2. พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535

ถึงแม้ว่าพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 (Enhancement and Conservation of National Environmental Quality Act of 1992) จะมีความครอบคลุมพอที่จะใช้บังคับแก่วัสดุทุกชนิดที่ก่อมลภาวะก็ตาม องค์ความรู้เกี่ยวกับการปล่อย (emission) การสัมผัส (exposure) และการเปลี่ยนแปลงตลอดวงจรชีวิต ของวัสดุนาโน ในสิ่งแวดล้อม ในเนื้อเยื่อของมนุษย์และสัตว์ จะช่วยทำให้เกิดความชัดเจนในการประยุกต์ใช้กฎหมายฉบับนี้กับวัสดุนาโนได้

6.4.1.3. พระราชบัญญัติคุ้มครองผู้บริโภค พ.ศ. 2522 แก้ไข พ.ศ. 2541

พระราชบัญญัติคุ้มครองผู้บริโภค พ.ศ. 2522 แก้ไข พ.ศ. 2541 (Consumer Protection Act of 1979 as amended in 1998) มีมาตรการคุ้มครองผู้บริโภคในด้านการโฆษณา (มาตรา 22-29) การคุ้มครองผู้บริโภคในด้านฉลาก (มาตรา 30-35) การคุ้มครองผู้บริโภคในด้านสัญญา (มาตรา 35ทวิ-35นว) และการคุ้มครองผู้บริโภคโดยประการอื่น เช่น การสั่งให้ทดสอบหรือพิสูจน์สินค้า (มาตรา 36) การเข้าดำเนินคดีเกี่ยวกับการละเมิดสิทธิของผู้บริโภค (มาตรา 39) และการรับรองสมาคมที่มีวัตถุประสงค์ในการคุ้มครองผู้บริโภคหรือต่อต้านการแข่งขันอันไม่เป็นธรรม เพื่อให้มีสิทธิฟ้องศาลในคดีคุ้มครองผู้บริโภค (มาตรา 40)

พระราชบัญญัติคุ้มครองผู้บริโภค มีความเกี่ยวข้องกับความปลอดภัยนาโน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องการโฆษณา ฉลาก และการฟ้องละเมิดสิทธิของผู้บริโภค

6.4.1.4. พระราชบัญญัติความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน พ.ศ. 2554

พระราชบัญญัติความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน พศ. 2554 (Occupational Safety, Health and Environment Act of 2011) อยู่ภายใต้การกำกับดูแลของกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน กระทรวงแรงงาน โดยได้ประกาศในราชกิจจานุเบกษาเมื่อ 17 มกราคม 2554 และมีผลบังคับใช้ตั้งแต่ 16 กรกฎาคม 2554 เป็นต้นมา ซึ่งนอกจากจะบังคับใช้กับสถานประกอบกิจการต่าง ๆ พระราชบัญญัตินี้ ยังได้กำหนดให้ราชการส่วนกลาง ราชการส่วนภูมิภาค ราชการส่วนท้องถิ่น และกิจการอื่นตามที่กำหนดนั้นต้องจัดให้มีมาตรฐานในการบริหารและการจัดการด้านความปลอดภัยฯ ไม่ต่ำกว่ามาตรฐานตามพระราชบัญญัตินี้

สาระสำคัญของพระราชบัญญัตินี้ คือให้นายจ้างมีหน้าที่จัดและดูแลสถานประกอบกิจการและลูกจ้างให้มีสภาพการทำงานและสภาพแวดล้อมในการทำงานที่ปลอดภัยและถูกสุขลักษณะ ลูกจ้างมีหน้าที่ให้ความร่วมมือกับนายจ้างในการดำเนินการต่าง ๆ ตามที่กำหนด เพื่อให้เกิดความปลอดภัยแก่ลูกจ้างและสถานประกอบกิจการ โดยมีการกำหนดในเรื่องต่าง ๆ ได้แก่

- การบริหาร การจัดการ และการดำเนินการด้านความปลอดภัยฯ ประกอบด้วยข้อกำหนดและหลักเกณฑ์เกี่ยวกับการตรวจวัด ตรวจสอบ ทดสอบ รับรอง ประเมินความเสี่ยง รวมทั้งจัดฝึกอบรม/ให้คำปรึกษาเพื่อส่งเสริมความปลอดภัย และหน่วยบริการ
- การจัดตั้งคณะกรรมการความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน ซึ่งมีปลัดกระทรวงแรงงานเป็นประธาน เพื่อมีหน้าที่เสนอความเห็นต่อรัฐมนตรีว่าการกระทรวงแรงงานเกี่ยวกับนโยบาย แผนงาน หรือมาตรการความปลอดภัย อาชีวอนามัย และการพัฒนาสภาพแวดล้อมในการทำงานของลูกจ้าง ในขณะที่รัฐมนตรีว่าการกระทรวงแรงงานมีอำนาจออกกฎกระทรวงกำหนดมาตรฐานให้นายจ้างดำเนินการในการบริหารและการจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมการทำงาน
- การควบคุม กำกับ ดูแล โดยการประเมินอันตราย การศึกษาผลกระทบของสภาพแวดล้อมในการทำงานที่มีผลต่อลูกจ้าง การจัดทำแผนการดำเนินงานด้านความปลอดภัย

- การตั้งตำแหน่ง “พนักงานตรวจความปลอดภัย” เป็นเจ้าหน้าที่ของรัฐ มีอำนาจหน้าที่เข้าทำการตรวจโรงงานในเชิงเทคนิคเฉพาะด้านความปลอดภัย
- การจัดตั้งกองทุนความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน เพื่อเป็นทุนใช้จ่ายในการดำเนินงานด้านความปลอดภัยฯ ตาม พรบ. รวมทั้งการให้กู้ยืมเพื่อแก้ไขสภาพความไม่ปลอดภัย หรือเพื่อป้องกันการเกิดอุบัติเหตุและโรคเนื่องจากการทำงาน
- การจัดตั้งสถาบันส่งเสริมความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน ขึ้นเป็นหน่วยงานอิสระภายใต้การกำกับของกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน โดยมีอำนาจหน้าที่ตามที่ พรบ. กำหนด
- บทกำหนดโทษสำหรับนายจ้าง ผู้ให้บริการด้านความปลอดภัยฯ และบุคคลที่เกี่ยวข้อง กรณีฝ่าฝืนไม่ปฏิบัติตามข้อกำหนด โดยมีการพิจารณาและมีความเข้มงวดและสอดคล้องกับสภาวการณ์ปัจจุบัน

6.4.1.5. พระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535

พระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 (Factory Act of 1992) มีบทบาทในการควบคุมความปลอดภัยในการใช้นาโนเทคโนโลยี และวัสดุนาโน ในโรงงานอุตสาหกรรมผ่านทางระบบการอนุญาตและการกำหนดหลักเกณฑ์ให้โรงงานต้องปฏิบัติ

พระราชบัญญัติโรงงานวางหลักเกณฑ์ให้ออกกฎกระทรวงกำหนดมาตรฐานและวิธีการควบคุมการปล่อยของเสีย มลพิษ หรือสิ่งใด ๆที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการประกอบกิจการโรงงาน และการอื่นใดเพื่อคุ้มครองความปลอดภัยในการดำเนินงานเพื่อป้องกันหรือระงับหรือบรรเทาอันตราย หรือความเสียหายที่อาจเกิดจากการประกอบกิจการโรงงานได้

ในด้านการพิจารณาอนุญาตจะพิจารณาความเหมาะสมของทำเลที่ตั้ง อาคาร เครื่องจักร ตลอดจนมาตรการในการป้องกันผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม และความปลอดภัยก่อนจึงจะออกใบอนุญาต ทั้งนี้ โดยกำหนดเป็นเงื่อนไขที่ผู้ประกอบกิจการโรงงานจะต้องปฏิบัติ

ในปัจจุบัน มาตรการทางกฎหมายที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ด้านความปลอดภัยนาโน น่าจะเป็นการขึ้นทะเบียนผู้ผลิตวัสดุนาโนตามพระราชบัญญัติโรงงานสำหรับกรณีที่ผลิตในประเทศ แต่หากเป็นการนำเข้า กระทรวงอุตสาหกรรมควรประสานงานกับกรมศุลกากร เพื่อออกพิกัดแยกวัสดุ

นาโนออกต่างหากจากสารเคมีปกติ การใช้มาตรการขึ้นทะเบียนนำเข้าวัสดุนาโน น่าจะเป็นมาตรการในเชิงรุกที่ใช้ได้ผลกว่าการอาศัยอำนาจตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย เนื่องจากการที่จะประกาศว่าวัตถุใดเป็นวัตถุอันตราย ตามกฎหมายจะต้องมีหลักฐานทางวิทยาศาสตร์สนับสนุนอย่างชัดเจน

6.4.2. หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยนาโน

หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยนาโนของประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เกี่ยวข้องกับผู้ปฏิบัติงาน ทั้งในภาครัฐ ภาคเอกชน มหาวิทยาลัย และภาคประชาชน พอสรุปได้ดังต่อไปนี้

6.4.2.1. หน่วยงานภาครัฐ

- **กรมโรงงานอุตสาหกรรม (Department of Industrial Works หรือ DIW)**, กระทรวงอุตสาหกรรม

หน่วยงานภายในที่เริ่มมีบทบาทสำคัญเกี่ยวกับวัสดุนาโน ได้แก่

- **สำนักควบคุมวัตถุอันตราย (Hazardous Substance Control Bureau)** กำกับดูแลวัตถุอันตรายตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535
- **สำนักบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม (Industrial Waste Management Bureau)** กำกับดูแลการจัดการกากอุตสาหกรรมตามกฎหมายภายใต้พระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ได้แก่ กฎกระทรวง 3 ฉบับ ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม 19 ฉบับ ประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม 6 ฉบับ และระเบียบกรมโรงงานอุตสาหกรรม 2 ฉบับ
- **สำนักเทคโนโลยีน้ำและการจัดการมลพิษโรงงาน (Bureau of Water Technology and Industrial Pollution Management)** ทำหน้าที่กำกับดูแลมลพิษทางน้ำจากโรงงานตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535
- **สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย (Safety Technology Bureau)** เป็นหน่วยงานทางวิชาการเกี่ยวกับเทคโนโลยีความปลอดภัยทุกด้านในโรงงานอุตสาหกรรม

- **กรมควบคุมโรค (Department of Disease Control)**, กระทรวงสาธารณสุข
  - **สำนักระบาดวิทยา (Bureau of Epidemiology)** เป็นศูนย์กลางของระบบเฝ้าระวังปัญหาต่าง ๆ ด้านสาธารณสุขในประเทศไทย มีหน้าที่จัดทำข้อมูลด้านการสอบสวนโรคและอัตราการเจ็บป่วย
  - **สำนักโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม (Bureau of Occupational and Environmental Disease)** มีลักษณะเป็นศูนย์ความเป็นเลิศด้านการวิจัยอาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อม การส่งเสริมสุขภาพ ตลอดจนการป้องกันและควบคุมโรค โดยอาศัยทรัพยากรต่าง ๆ อาทิ ห้องปฏิบัติการพิษวิทยา พร้อมเครื่องมือสุขศาสตร์อุตสาหกรรมที่ใช้ตรวจสิ่งแวดล้อมในที่ทำงาน ศูนย์ฝึกอบรมอาชีวอนามัยและผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม ประกอบกับเครือข่ายที่กว้างขวางของกระทรวงสาธารณสุข

- **กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ (Department of Medical Sciences)**, กระทรวงสาธารณสุข ให้บริการทดสอบด้านพิษวิทยาและจุลชีววิทยา

- **สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (อย. หรือ Thai Food and Drug Administration)**, กระทรวงสาธารณสุข มีบทบาทและหน้าที่ในการคุ้มครองผู้บริโภคด้านความปลอดภัย คุณภาพ มาตรฐานและความสมประโยชน์จากการใช้ผลิตภัณฑ์วัตถุอันตรายที่ใช้ในบ้านเรือนและทางสาธารณสุข โดยมีหน่วยงานหลักคือ **กลุ่มควบคุมวัตถุอันตราย** ภายใต้ **สำนักควบคุมเครื่องสำอางและวัตถุอันตราย** อนึ่ง กลุ่มควบคุมวัสดุอันตรายได้มีส่วนร่วมในการระดมความคิด เพื่อจัดเตรียมท่าทีของประเทศไทย ในเวทีความร่วมมือระหว่างรัฐบาลว่าด้วยความปลอดภัยด้านสารเคมี ครั้งที่ 6 ซึ่งมีวาระนาโนเทคโนโลยีและวัสดุนาโน เป็นประเด็นใหม่ของการประชุมด้วย

- **กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน (Department of Labour Protection and Welfare)**, กระทรวงแรงงาน ทำหน้าที่บังคับใช้พระราชบัญญัติคุ้มครองแรงงาน พ.ศ. 2541 และพระราชบัญญัติความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน พ.ศ. 2554 ที่กล่าวถึงแล้ว หน่วยงานภายในที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ **สำนักความปลอดภัยแรงงาน (Occupational Safety and Health Bureau)** ซึ่งมีหน้าที่กำหนดยุทธศาสตร์การดำเนินงาน พัฒนามาตรฐาน และกำกับดูแลในส่วนของกฎหมายเกี่ยวกับความปลอดภัยในการทำงาน อันได้แก่ พระราชบัญญัติความ

ปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน พ.ศ. 2554 รวมทั้งกฎหมายลูก เช่น กฎกระทรวงและระเบียบกรม ซึ่งปัจจุบันมีผลบังคับใช้แล้วเกือบ 20 ฉบับ และอยู่ระหว่างการพัฒนายกร่างขึ้นอีกหลายเรื่อง

- **สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ. หรือ Thai Industrial Standards Institute, TISI)**, กระทรวงอุตสาหกรรม มีส่วนร่วมในการพัฒนามาตรฐานระหว่างประเทศขององค์การระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐาน (ISO) โดยได้ส่งผู้แทน ร่วมกับผู้แทนของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่นศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ ไปร่วมในการประชุมคณะกรรมการด้านเทคนิคคณะที่ 229 ขององค์การระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐาน (ISO Technical Committee 229 หรือ ISO/TC 229) ตั้งแต่ครั้งแรกจนถึงปัจจุบัน

- **สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว. หรือ The Thailand Research Fund หรือ TRF)** มีหน่วยงานภายในที่เกี่ยวข้องกับนาโนเทคโนโลยี ได้แก่ฝ่ายสวัสดิภาพสาธารณะ (ฝ่าย 3) ครอบคลุมการวิจัยเกี่ยวกับประเด็นนโยบายสาธารณะรวมทั้งความปลอดภัยสาธารณและสุขภาพ กับฝ่ายเกษตร (ฝ่าย 2) และฝ่ายอุตสาหกรรม (ฝ่าย 5) ซึ่งมีภารกิจในการสนับสนุนการวิจัยเพื่อภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมตามลำดับ นอกจากนั้น สกว. ยังให้ทุนวิจัยเชิงวิชาการ (Program on Academic Research) เพื่อสร้างผลงานตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ และทุนวิจัยเพื่อท้องถิ่น (Area-based Research) เพื่อสร้างความเข้มแข็งของท้องถิ่นด้วย

- **ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC)** สังกัดสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติซึ่งเป็นหน่วยงานของรัฐ ในกำกับของกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มีพันธกิจในการ “สรรสร้าง ผลักดัน ส่งเสริมการวิจัยและพัฒนา การประยุกต์ไมโคร/นาโนเทคโนโลยี สนับสนุนภาคการผลิต อันจะนำไปสู่การยกระดับผลิตภัณฑ์นวัตกรรมที่เป็นฐานสำคัญของประเทศไทย และเพิ่มศักยภาพการแข่งขันในตลาดโลก รวมทั้งป้องกันรักษาสิ่งแวดล้อม” ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติได้เตรียมความพร้อมสำหรับการสร้างมาตรฐานความปลอดภัยและจริยธรรมนาโน โดย
  - มอบหมายให้จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดำเนินโครงการศึกษาสถานภาพและการจัดทำแนวทางการดำเนินการเกี่ยวกับความปลอดภัยและจริยธรรมด้านนาโนเทคโนโลยี ภาค 1: สถานภาพ

แนวโน้ม และองค์ความรู้ล่าสุดของต่างประเทศ เพื่อเป็นฐานความรู้สำหรับรองรับกิจกรรมต่าง ๆ ต่อไป

- ส่งผู้แทนจากศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ ไปร่วมประชุมในเวทีระดับโลกเกี่ยวกับความปลอดภัยนาโนทุกเวที และในการประชุมระหว่างประเทศครั้งสำคัญ ๆ เพื่อติดตามแนวโน้มของการพัฒนามาตรฐานสากล
- ก่อตั้งห้องปฏิบัติการความปลอดภัยนาโนขึ้นในศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ เพื่อทดสอบความปลอดภัยของวัสดุนาโนที่ใช้กันในอุตสาหกรรมไทย
- ร่วมก่อตั้งสมาคมนาโนเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย และร่วมมือกับสมาคมดังกล่าว พัฒนาระบบการรับรองวัสดุนาโน
- มอบหมายให้จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จัดตั้งศูนย์จัดการข้อมูลข่าวสารและองค์ความรู้ด้านความปลอดภัยนาโนเทคโนโลยี

6.4.2.2. หน่วยงานภาคเอกชน

- **สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย (Federation of Thai Industries, FTI)** ตลอดหลายปีที่ผ่านมา สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย ได้มีส่วนร่วมเป็นประจำในเวทีระดับประเทศเกี่ยวกับความปลอดภัยของสารเคมีซึ่งจัดโดยหน่วยงานของภาครัฐ ไม่ว่าจะเป็นสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา หรือกรมควบคุมมลพิษ และมีบทบาทในคณะผู้แทนไทยในการประชุมระหว่างประเทศ เกี่ยวกับความปลอดภัยนาโนหลายครั้ง
- **หอการค้าไทย (Thai Chamber of Commerce, TCC)** และ **สภาหอการค้าแห่งประเทศไทย (Board of Trade of Thailand)** หอการค้า ทั้งที่เป็นหอการค้าไทย หอการค้าต่างประเทศ และหอการค้าจังหวัด หรือรวมกันในนามของสภาหอการค้า สามารถมีบทบาทเกี่ยวกับความปลอดภัยและจริยธรรมนาโนได้ในหลายลักษณะ อาทิ เผยแพร่และให้คำแนะนำเกี่ยวกับแนวปฏิบัติเพื่อความปลอดภัยและจริยธรรมนาโนไปในหมู่สมาชิก และรวบรวมสถิติการขายสินค้านาโนจากสมาชิก เพื่อประโยชน์ในการประเมินสถานภาพและวิจัยนโยบาย เป็นต้น

6.4.2.3. สถาบันการศึกษา (มหาวิทยาลัย)

ในมหาวิทยาลัยมีการวิจัยมากมายหลายโครงการที่เกี่ยวข้องกับนาโนเทคโนโลยีและ/หรือวัสดุนาโนทั้งที่อยู่ภายใต้ชื่อ “นาโน” และที่อยู่ในชื่อหรือวิชาอื่น ๆ ที่ไม่มีคำว่า “นาโน” อยู่ด้วยเลย อาทิ วัสดุ

ศาสตร์ ชีวเคมี เทคโนโลยีอาหาร เภสัชวิทยา อย่างไรก็ตามจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นผู้นำในการตั้งศูนย์ความเป็นเลิศด้านนาโนเทคโนโลยีขึ้น โดยมีกิจกรรมเกี่ยวข้องกับความปลอดภัยและจริยธรรมนาโน ทั้งในระดับปฏิบัติ และในระดับนโยบาย

- **จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Chulalongkorn University)** ตั้งแต่ปี 2550 เป็นต้นมา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเปิดสอนวิชาที่เกี่ยวข้องกับนาโนเทคโนโลยีหลายวิชาและหลักสูตรนาโนเทคโนโลยีสองหลักสูตร มีการวิจัยเกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยีและวัสดุนาโนในคณะวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ และในหน่วยงานอื่น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในหลักสูตรวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ (Polymer Sciences) สังกัดวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมีในปี 2550 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้ก่อตั้งศูนย์นวัตกรรมนาโนเทคโนโลยี (Center of Innovative Nanotechnology หรือ CIN) ขึ้นเพื่อผลักดันการวิจัยและพัฒนาในสาขานาโนเทคโนโลยี ในระดับนโยบาย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้รับทุนจากศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติในปี 2550 เพื่อสนับสนุนการศึกษาสถานภาพในระดับโลกของความปลอดภัยและจริยธรรมนาโน ในปี 2553 ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ ได้สนับสนุนให้จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยก่อตั้ง “ศูนย์จัดการข้อมูลข่าวสารและองค์ความรู้ความปลอดภัยนาโนเทคโนโลยี” เพื่อรองรับการออกกฎหมาย ระเบียบ ข้อบังคับ ฯลฯ ในกรณีที่จำเป็นเพื่อลดความเสี่ยงจากนาโนเทคโนโลยี และวัสดุนาโน

6.4.2.4. องค์กรของรัฐที่สนับสนุนการมีส่วนร่วมของภาคประชาชน

- **สำนักงานคณะกรรมการสุขภาพแห่งชาติ (สช. หรือ National Health Commission หรือ NHC)** ได้รับการก่อตั้งขึ้นตามพระราชบัญญัติสุขภาพแห่งชาติ พ.ศ. 2550 เพื่อทำหน้าที่เป็นเลขานุการของคณะกรรมการสุขภาพแห่งชาติ สช. มีพันธกิจสำคัญคือการสนับสนุนกระบวนการพัฒนานโยบายสาธารณะเพื่อสุขภาพอย่างมีส่วนร่วม โดยใช้ยุทธศาสตร์ "สามเหลี่ยมเขยื้อนภูเขา" ซึ่งใช้คติการทำงาน "สานพลัง สร้างสุขภาวะ" ในการขับเคลื่อนสังคม[97] ตั้งแต่ปี 2551 เป็นต้นมา คณะกรรมการสุขภาพแห่งชาติ ได้แสดงความสนใจในประเด็นความปลอดภัยนาโน โดยได้ส่งผู้แทนไปเข้าประชุมเกี่ยวกับความปลอดภัยและจริธรรมนาโนที่จัดโดยหน่วยงานอื่น ๆ เป็นประจำ

โดยสรุป ประเทศไทยมีกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยสารเคมี ทั้งต่อมนุษย์ (ผู้ปฏิบัติงาน และผู้บริโภค) และต่อสิ่งแวดล้อม โดยมีกฎหมายที่อยู่ในระหว่างการร่าง และมีหลักการใหม่ ๆ จากต่างประเทศ (เช่นหลัก extended liability) ให้มีการศึกษาผลกระทบในบริบทของ

ประเทศไทย ก่อนพิจารณานำมาใช้ อย่างไรก็ตาม จำเป็นต้องมีการศึกษาถึงกฎหมายที่ต้องแก้ไขเพื่อให้เหมาะสมต่อการนำมาใช้กับนาโนเทคโนโลยีและวัสดุนาโน ความสำเร็จในการสร้างระบบความปลอดภัยนาโน จะอยู่ที่การสร้างเครือข่ายระหว่างหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

หมายเหตุ

[1] จากตัวเลขของ Lux Research (http://www.luxresearchinc.com/pdf/TNR4_TOC.pdf) ในปี 2548 (ค.ศ. 2005) สินค้านาโนมีมูลค่ารวมมากกว่า 3 หมื่นล้านเหรียญสหรัฐ คาดว่าจะเพิ่มเป็น 2.6 ล้านล้านเหรียญสหรัฐในปี 2557 หรือประมาณร้อยละ 15 ของผลผลิตทั้งหมด นอกจากนั้นมีการคาดคะแนว่า ในอุตสาหกรรมนาโนอิเล็กทรอนิคส์ (สารกึ่งตัวนำนาโน ตัวเก็บประจุนาโน หน่วยเก็บความจำนาโน และตัวหยั่งรู้นาโน) น่าจะมีมูลค่าถึง 450 พันล้านเหรียญสหรัฐในปี 2558 ส่วนในอุตสาหกรรมวัสดุนาโน (อนุภาคนาโนชนิดต่าง ๆ และการเคลือบผิวนาโน) ก็น่าจะมีมูลค่าถึง 450 พันล้านเหรียญสหรัฐตั้งแต่ในปี 2553 (Hullmann A. 2007. Measuring and assessing the development of nanotechnology. *Scientometric* **70**(3):739-758. อ้างถึงใน Nanotechnology and Manufactured Nanomaterials: Opportunities and Challenges. IFCS Forum VI Thought Starter Paper. IFCS/FSC/WG Nano/04 rev 5 (29 February 2008)

[2] Holman, M. W. 2006. The Nanotech Report, 4th ed. Lux Research. ดูสรุปได้จาก http://www.luxresearchinc.com/pdf/TNR4_TOC.pdf เข้าถึงเมื่อ 28 พฤษภาคม 2553

[3] ร่างแผนกลยุทธนาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (พ.ศ. 2547-2556) จัดทำโดยศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ หน้า 22

[4] ร่างแผนกลยุทธนาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (พ.ศ. 2547-2556) อ้างแล้ว หน้า 9

[5] กฎกระทรวงแบ่งส่วนราชการกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2551 (ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 125 ตอนที่ 18 ก วันที่ 23 มกราคม 2551)

[6] **nanoscale**: size range from approximately 1 nm to 100 nm. Note 1: Properties that are not extrapolations from a larger size will typically, but not exclusively, be exhibited in this size range. For such properties the size limits are considered approximate. Note 2: The lower limit in this definition (approximately 1 nm) is introduced to avoid single and small groups of atoms from being designated as nano-objects or elements of nanostructures, which might be implied by the absence of a lower limit. ที่มา: ISO/TS 80004-1:2010(E) definition 2.1 (พัฒนามาจาก ISO/TS 27687:2008, definition 2.1) อย่างไรก็ตาม นิยามต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยี ตามระเบียบของสหภาพยุโรปว่าด้วยสารเคมี (REACH) อาจจะแตกต่างจากนิยามของ ISO บ้าง เนื่องจากต้องการความชัดเจน เพื่อให้ระเบียบดังกล่าว สามารถนำไปบังคับใช้เป็นกฎหมายได้ ดูรายละเอียดใน JRC. 2010. JRC Reference Report: Considerations on a Definition of Nanomaterial for Regulatory Purposes. European Commission Joint Research Centre [EUR 24403 EN, ISBN 978-92-79-16014-1] http://ec.europa.eu/dgs/jrc/downloads/jrc_reference_report_201007_nanomaterials.pdf และร่างเอกสาร Commission Recommendation of XXX on the definition of nanomaterial http://ec.europa.eu/environment/chemicals/nanotech/pdf/commission_recommendation.pdf (สืบค้นเมื่อ 23 ธันวาคม 2554)

[7] **nanostructure**: composition of inter-related constituent parts, in which one or more of those parts is a nanoscale region. Note: A region is defined by a boundary representing a discontinuity in properties. ที่มา ISO/TS 80004-1:2010(E). ในขณะที่นิยามดั้งเดิมของสถาบันมาตรฐานแห่งสหราชอาณาจักร (BSI) ก็คือ **nanostructured**: possessing a structure comprising contiguous elements with one or more dimension in the nanoscale but excluding any primary atomic or molecular structure. Note 1: An example of a primary atomic or molecular structure is the arrangement of atoms in a crystalline solid. Note 2: The use of the term contiguous implies that a sphere of approximately 100 nm diameter, inscribed in a nanostructured material will intersect more than one element of the structure. ที่มา: BSI 2007. Terminology for Nanoscale Measurement and Instrumentation. Publicly Available Specification PAS 133:2007. ICS 01.040.17; 17.040.99, definition 2.5.

8 **nanoscience**: study, discovery and understanding of matter in the nanoscale, where size and structure-dependent properties and phenomena, as distinct from those associated with individual atoms or molecules or with bulk materials, can emerge. **nanotechnology**: application of scientific knowledge to manipulate and control matter in the nanoscale in order to make use of size- and structure-dependent properties and phenomena, as distinct from those associate with individual atoms or molecules or with bulk materials. ที่มา: ISO/TS 80001-1:2010(E) definitions 2.2 and 2.3.

9 ตัวอย่างของคำเหล่านี้ ได้แก่ nanotool, nanomotor, nanogear, nanopump, nanoprism, nanopowder, nanodot, และ nanochip ที่มา: http://xnet.rrc.mb.ca/davidb/nanotools.htm

10 **nanomaterial**: material with any external dimension in the nanoscale or having internal structure or surface structure in the nanoscale. Note 1: This generic term is inclusive of nano-object and nanostructured material. Note 2: See also engineered nanomaterial, manufactured nanomaterial and incidental nanomaterial. ที่มา: ISO/TS 27687:2008(E), definition 2.4

11 **incidental nanomaterial**: nanomaterial generated as an unintentional by-product of a process. Note 1: The process includes manufacturing, bio-technological or other processes. Note 2: See ISO/TS 27628:2007, definition 2.21 for definition of "ultrafine particle".

12 **manufactured nanomaterial**: nanomaterial intentionally produced for commercial purposes to have specific properties or specific composition มีอีกคำหนึ่งที่ความหมายกว้างกว่า คือ **engineered nanomaterial**: nanomaterial designed for a specific purpose or function. ที่มา: ISO/TS 80004-1:2010(E) definitions 2.9 and 2.8

13 จากรูปที่ 2 ของหัวข้อ 4.2 Nanomaterial ในเอกสาร ISO/TR 12802 *Nanotechnologies - Model taxonomic framework for use in developing vocabularies - Core concept.* First edition, 15 November 2010.

14 **nanoaerosol**: aerosol comprised of, or consisting of, nanoparticles and nanostructured particles ที่มา: ISO/TR 27628:2007 (Workplace atmospheres -- Ultrafine, nanoparticle and nano-structured aerosols -- Inhalation exposure characterization and assessment, ISO/TC 146/SC 2) 2.11; CDB-00185480-001 60.60

15 **nano-object**: material with one, two or three external dimensions in the nanoscale. ที่มา: ISO/TS 27687:2008(E), definition 2.2

16 **nanoparticle**: nano-object with all three external dimensions in the nanoscale. Note: If the length of the longest to the shortest axes of the nano-object differ significantly (typically more than three times), the terms nanorod or nanoplate are intended to be used instead of the term nanoparticle. ที่มา: ISO/TS 27687:2008(E), definition 4.1 อย่างไรก็ตาม หากไม่ทราบองค์ประกอบของอนุภาค ทราบจากเครื่องมือวัดเพียงว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง เล็กกว่า 100 nm ก็อาจจะเรียกว่าเป็น **ultrafine particle** ซึ่ง ISO 14644-6:2006 definition 2.137 ได้ให้นิยามไว้ว่า particle with an equivalent diameter less than 100 nm.

17 **nanoplate**: nano-object with one external dimension in the nanoscale and the two other external dimensions significantly larger. Note1: The smallest external dimension is the thickness of the nanoplate. Note 2: The two significantly larger dimensions are considered to differ from the nanoscale dimension by more than three times. Note 3: The larger external dimensions are not necessarily in the nanoscale. ที่มา: ISO/TS 27687:2008(E), definition 4.2

18 ISO/TR 12802 *Nanotechnologies - Model taxonomic framework for use in developing vocabularies - Core concept.* First edition, 15 November 2010.

[19] **nanoplate** with one of its two larger dimensions in the **nanoscale** and the other significantly larger ที่มา: ISO/TS 80004-3 อนึ่ง คำนี้น่าจะตรงกับคำว่า nanobelt ที่ไม่อยู่ในชุดคำศัพท์ของ ISO

[20] **nanofibre**: nano-object with two similar external dimensions in the nanoscale and the third dimension significantly larger. Note 1: A nanofibre can be flexible or rigid. Note 2: The two similar external dimensions are considered to differ in size by less than three times and the significantly larger external dimension is considered to differ form the other two by more than three times. Note 3: The largest external dimension is not necessarily in the nanoscale. ที่มา: ISO/TS 27687:2008(E), definition 4.3

[21] **nanorod**: solid nanofibre. ที่มา: ISO/TS 27687:2008(E), definition 4.5

[22] **nanotube**: hollow nanofibre. ที่มา: ISO/TS 27687:2008(E), definition 4.4

[23] **nanowire**: electrically conducting or semi-conducting nanofibre ที่มา: ISO/TS 27687:2008(E), definition 4.6

[24] ISO/TR 12802 *Nanotechnologies - Model taxonomic framework for use in developing vocabularies - Core concept.* First edition, 15 November 2010.

[25] **quantum dot**: crystalline nanoparticle that exhibits size-dependent properties due to quantum confinement effects on the electronic states. ที่มา: ISO/TS 27687:2008(E), definition 4.7

[26] คำศัพท์อื่นที่ไม่ได้อยู่ในชุดคำศัพท์ของ ISO ได้แก่คำว่า nanoflower เป็นต้น

[27] ISO/TR 12802 *Nanotechnologies - Model taxonomic framework for use in developing vocabularies - Core concept.* First edition, 15 November 2010.

[28] cone-shaped **nanofibre** or **nanoparticle** ที่มา: ISO/TS 80004-3

[29] **aggregate**: particle comprising strongly bonded or fused particles where the resulting external surface area may be significantly smaller than the sum of calculated surface area of the individual components. Note 1: The forces holding an aggregate together are strong forces, for example covalent bonds, or those resulting from sintering or complex physical entanglement. Note 2: Aggregates are also termed secondary particles and the original source particles are termed primary particles. ที่มา: ISO/TS 27687:2008(E), definition 3.3 อนึ่ง คำว่า aggregate ราชบัณฑิตยสถานบัญญัติศัพท์ว่า "กลุ่มก้อน" หรือ "รวมกลุ่ม"

[30] **agglomerate**: collection of weakly bound particles or aggregates or mixture of the two where the resulting external surface area is similar to the sum of the surface areas of the individual components. Note 1: The forces holding an agglomerate together are weak forces, for example van der Waals forces, or simple physical entanglement. Note 2: Agglomerates are also termed secondary particles and the original source particles are termed primary particles. ที่มา: ISO/TS 27687:2008(E), definition 3.2 อนึ่ง ราชบัณฑิตยสถานบัญญัติศัพท์ agglomeration ว่า "การรวมมวล" และบัญญัติศัพท์ agglutination ว่า "การเกาะกลุ่ม"

[31] IARC. 2010. *Carbon Black, Titanium Dioxide, and Talc. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Volume 93.* International Agency for Research on Cancer, World Health Organization. p. 47.

[32] ที่มาของปริมาณการผลิต: Auchter JF (2005). *Chemical Economics Handbook: Carbon Black*, Menlo Park, CA, SRI Consulting.

[33] light scattering หมายถึงปรากฏการณ์ที่แสงกระจัดกระจายไปโดยรอบ เมื่อแสงไปกระทบกับโมเลกุลของสาร

[34] ตัวอย่างเช่นเทคโนโลยีจาก NSTI เมื่อ ค.ศ. 2008 http://www.nsti.org/news/item.html?id=238 เข้าถึงเมื่อวันที่ 5 เมษายน 2555

35 http://www.nanotech-now.com/news.cgi?story_id=13424 เข้าถึงเมื่อ 29 พฤษภาคม 2554

36 http://www.understandingnano.com/batteries.html สืบค้นเมื่อวันที่ 1 กรกฎาคม 2554

37 http://pesn.com/2006/02/09/9600232_MIT_Battery/ สืบค้นเมื่อวันที่ 9 กรกฎาคม 2554

38 จากเอกสาร Nanotechnology for Sustainable Development of Tires (28 February 2011) เอกสารประกอบการประชุม Steering Group 9 ในการประชุม OECD WPMN8 ณ กรุงปารีส ประเทศฝรั่งเศส มีนาคม 2554

39 ดูตัวอย่างได้ที่ http://compact-nanobrake.com/compact-nano.html

40 Brinson, B., J. B. Lassiter, C. S. Levin, R. Bardhan, N. Mirin and N. J. Halas. 2008. Nanoshells made easy: Improving Au layer growth on nanoparticle surfaces. *Langmuir* **24**:14166-14171.

41 Lengerich, B. V., L. C. Haynes, H. Levine, M. S. Otterburn, P. Mathewson, and J. Finley. 1989. *Extrusion Baking of Cookies Having Liposome Encapsulated Ingredients.* US Patent 4999208. Filed 7 June 1989. Issued 12 March 1991. Assignee = Nabisco Brands, Inc. Lengerich, B. H. V. 1997. *Embedding and Encapsulation of Controlled Release Particles.* US Patent 6,190,591 Issued 20 February 2001. Assignee = General Mills, Inc.

42 http://nanoall.blogspot.com/2011/03/nanotechnology-and-wine.html

43 Tankhiwale, R. and S. K. Baipai. 2010. Nanosilver Loaded Chitosan Film and Filter Paper for Food Packaging: Silver Nanoparticles Loaded Polymeric Substrate with Biocidal Actions. LAP LAMBERT Academic Publishing. ISBN: 978-3844380927.

44 ข้อมูลจากการสัมภาษณ์ ดร. สุพิณ แสงสุข แห่งสถาบันโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อวันที่ 26 มิถุนายน 2554

45 เช่นเส้นใย Mipan Magic Silver Nano http://www.mipan.com/eng/customer_support/pdf/magicsilvernano.pdf เข้าถึงเมื่อ 21 สิงหาคม 2554

46 Park, H. S. 2006. *Wig Comprising Cap With Nano Silver.* US Patent Application Publication US 2006/0260627 Assigned to Pt. Dongan Kreasi.

47 ดูคำโฆษณา gliding effect ได้จาก http://www.holmenkol.com/en/technology/nano-cfc-technology.html สืบค้นเมื่อ 16 มิถุนายน 2554 และดู US Patent Application 2008/0088099 ประดิษฐ์โดย Florian Felix และประกาศโฆษณาคำขอรับสิทธิบัตร เมื่อ 17 เมษายน 2551

48 http://www.solestrom.com/shop/index.php?main_page=index&cPath=1 สืบค้นเมื่อ 16 มิถุนายน 2554

49 http://www.speedo.com/en/technologies_2/technology/lzrracer_2/index.html สืบค้นเมื่อ 16 มิถุนายน 2554

50 ดังตัวอย่างจากรายงานเรื่อง Occupational Exposure to Carbon Nanotubes and Nanofibers ของ NIOSH ว่า “Long- term inhalation studies are needed to determine whether CNT and CNF can cause cancer in laboratory animals at doses equivalent to potential workplace exposures. In addition, the potential for migration of CNT through the lungs to the mesothelium after inhalation requires further investigation.” NIOSH, Department of Health and Social Services, Current Intelligence Bulletin, 2010 Draft, p. 39

51 สารตระกูลฟูลเลอรีน (fullerene) แบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้สองกลุ่ม ได้แก่บัคกีบอลล์ (buckyball) ซึ่งเป็นทรงกลมหรือเกือบกลม กับ CNT ซึ่งเป็นแท่งยาว ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะกลุ่ม backyball ซึ่งมีหลายชนิด แต่การศึกษาส่วนมากทำกับ buckyball ชนิดแรกที่ถูกค้นพบ เรียกว่า Buckminsterfullerene (C_{60}) ส่วน CNT จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

52 Zhao, X., A. Striolo, and P.T. Cummings. 2005. C_{60} binds to and deforms nucleotides. *Biophysical Journal* **89**(6): 3856-3862.

53 Oberdörster, E. 2004. Manufactured nanomaterials (fullerene, C60) induce oxidative stress in the brain of juvenile largemouth bass. *Environ. Health Perspect.* **112**(10):1058-1062.

54 เอกสารฉบับเต็ม NIOSH Current Intelligence Bulletin: Occupational Exposure to Carbon Nanotubes and Nanofibers อยู่ที่ http://www.cdc.gov/niosh/docket/review/docket161A/pdfs/carbonNanotubeCIB_PublicReviewOfDraft.pdf โดยมีเรื่องย่ออยู่ที่ http://www.cdc.gov/niosh/docket/review/docket161A/ และโปรดดูวิจารณ์ได้ที่ http://www.nanolawreport .com/2010/12/articles/carbon-nanotubes/niosh-recommends-exposure-limit-of-7-igm-3-for-carbon-nanotubes/ #axzz1VebmNYAq

55 Schulte, P.A., V. Murashov, R. Zumwalde, E.D. Kuempel, and C.L. Geraci. 2011. Occupational exposure limits for nanomaterials: State of the art. *J. Nanopart Res*. **12**:1971-1987.

56 NEDO. 2009. *Risk Assessment of Manufactured Nanomaterials - Carbon Nanotubes (CNTs) - Interim Report issued on October 16, 2009. Executive Summary.* NEDO project “Research and Development of Nanoparticle Characterization Methods” (P06041) รายงานฉบับนี้แสดงวิธีคำนวณตัวเลขต่าง ๆ อย่างละเอียด

57 Chang, A.L.S., V. Khosravi, and B. Egbert. 2006. A case of argyria development after colloidal silver ingestion. Journal of Cutaneous Pathology 33(12):809-811. Wadhera, A., and M. Fung. 2005. Systematic argyria associated with indigestion of colloidal silver. Dermatology Online Journal. 2005.

58 Nowack, B., H.F. Krug, and M. Height. 2011. 120 years of nanosilver history: Implications for policy makers. *Environmental Science and Technology* **45**:1177-1183.

59 รายงานการทดลองความเป็นพิษของอนุภาคทองนาโนในเซลล์และในหนูทดลองที่นำเสนอในหัวข้อนี้ ได้รับการสรุปไว้ในบทความ Alkilany, A. M. and C. J. Murphy. 2010. Toxicity and cellular uptake of gold nanoparticles: what we have learned so far? *J. Nanopart. Res.* **12**:2313-2333.

60 Panyala, N.R. E.M. Peña-Méndez, and J. Havel. 2009. Gold and nano-gold in medicine: Overview, toxicity and perspectives. Journal of Applied Biomedicine 7:75-91.

61 สรุปไว้ในบทความ Alkilany, A. M. and C. J. Murphy. 2010. Toxicity and cellular uptake of gold nanoparticles: what we have learned so far? *J. Nanopart. Res.* **12**:2313-2333. ดังกล่าวแล้ว

62 ผลการทดลองทั้งในเซลล์และในสัตว์ทดลองที่กล่าวถึงในหัวข้อนี้ มาจากการทบทวนผลการทดลองในเซลล์ประมาณ 40 การทดลอง และในสัตว์ทดลองประมาณ 15 การทดลอง โดยทีมนักวิชาการจากมหาวิทยาลัย Leuven ประเทศเบลเยี่ยม Napierska, D., L.CJ. Thomassen, D. Lison, J.A. Martens, and P.H. Hoet. 2010. The nanosilica hazard: Another variable entity. *Particle and Fibre Toxicology* **7**:39.

63 Wang, J., G. Zhou, C. Chen, H. Yu, T. Wang, Y. Ma, G. Jia, Y. Gao, B. Li, J. Sun, Y. Li, F. Jiao, Y. Zhao, and Z. Chai. 2007. Acute toxicity and biodistribution of different sized titanium dioxide particles in mice after oral administration. *Toxicology Letters* **168**(2):176-185.

64 Trouiller, B., R. Reliene, A. Westbrook, P. Solaimani, and R.H. Schiestl. 2009. Titanium dioxide nanoparticles induce DNA damage and genetic instability *in vivo* in mice. Cancer Research 69(22):8784-8789.

[65] ตัวอย่างเช่น Jin, C., B. Zhu, X. Wang, and Q. Li. 2008. Cytotoxicity of titanium dioxide nanoparticles in mouse fibroblast cells. *Chem. Res. Toxicol.* 21:1871-1877. Li, S., R. Zhu, H. Zhu, M. Zue, X. Sun, S. Yao, and Sh. Wang. 2008. Nanotoxicity of TiO2 nanoparticles to erythrocytes in vitro. *Food and Chemical Toxicology* **46**:3626-3631. และ Singh, S., T. Shi, R. Duffin, C. Albrecht, D. van Berlo, D. Höhr, B. Fubini, G. Martra, I. Fenoglio, P.J.A. Borm, and R.P.F. Schins. 2007. Endocytosis, oxidative stress and IL-8 expression in human lung epithelial cells upon treatment with fine and ultrafine TiO_2: Role of the specific surface area and of surface methylation of the particles. *Toxicology and Applied Pharmacology* **222**:141-151.

[66] ตัวอย่างเช่น Hussain, S., L.CJ. Thomassen, I. Ferecatu, M-C. Borot, K. Andreau, J.A. Martens, J. Fleury, A. Baeza-Squiban, F. Marano, and S. Bloand. 2010. Carbon black and titanium dioxide nanoparticles elicit distinct apoptotic pathways in bronchial epithelial cells. *Particle and Fibre Technology* **7**:10.

[67] ตัวอย่างเช่น Yeo, M. and H. Kim. 2010. Gene expression in zebrafish embryos following exposure to TiO_2 nanoparticles. *Mol. Cell. Toxicol.* 6:97-104. และ Xu, A., Y. Chai, T. Nohmi, and T.K. Hei. 2009. Genotoxic response to titanium dioxide nanoparticles and fullerene in gpt delta transgenic MEF cells.

[68] Ferin, J., G. Oberdörster, and D.P. Penney. 1992. Pulmonary retention of ultrafine and fine particles in rats. *Am. J. Respir. Cell Mol. Biol.* **6**:535-542. Renwick, L.C., D. Brown, A. Clouter, and K. Donaldson. 2004. Increased inflamation and altered macrophage chemotactic responses caused by two ultrafine particle types. Occup. Environ. Med. **61**:442–447.

[69] Wang, J., C. Chen, Y. Liu, F. Jiao, W. Li, F. Lao, Y. Li, B. Li, C. Ge, G. Zhou, Y. Gao, Y. Zhao, and Z. Chai. 2008a. Potential neurological lesion after nasal instillation of TiO2 nanoparticles in the anatase and rutile crystal phases. *Toxicology Letters* **183**(1-3):72-80. และ Wang, J., Y. Liu, F. Jiao, F. Lao, W. Li, Y. Gu, Y. Li, C. Ge, G. Zhou, B. Li, Y. Zhao, Z. Chai, and C. Chen. 2008. Time-dependent translocation and potential impairment on central nervous system by intranasally instilled TiO2 nanoparticles. *Toxicology* **254**:82-90.

[70] Sharma, V.K. 2009. Aggregation and toxicity of titanium dioxide nanoparticles in aquatic environment- A Review. Journal of Environmental Science and Health Part A 44:1485-1495

[71] De Berardis, B., G. Civitelli, M. Condello, P. Lista, R. Pozzi, G. Arancia, and S. Meschini. 2010. Exposure to ZnO nanoparticles induces oxidative stress and cytotoxicity in human colon carcinoma cells. *Toxicology and Applied Pharmacology* **246**:116-127.

[72] Sharma, V., R.K. Shukla, N. Saxena, D. Parma, M. Das, and A. Dhawan. 2009. DNA damaging potential of zinc oxide nanoparticles in human epidermal cells. *Toxicology Letters* **185**:211-218.

[73] Dufour, E.K., T. Kumaravel, G.J. Nohynek, D. Kirkland, and H. Toutain. 2006. Clastogenicity, photo-clastogenicity or pseudo-photo-clastogenicity: Genotoxic effects of zinc oxide in the dark, in pre-irradiated or simultaneously irradiated Chinese hamster ovary cells. *Mutation Research* **607**:215-224.

[74] Chen, H., M.F. Neerman, A.R. Parrish, and E.E. Simanek. 2004. Cytotoxicity, hemolysis, and acute *in vivo* toxicity of dendrimers based on melamine, candidate vehicles for drug delievery. *J. Am. Chem. Soc.* **126**:10044-10048.

[75] Duncan, R. and L. Izzo. 2005. Dendrimer biocompatability and toxicity. *Advanced Drug Delivery Reviews* **57**:2215-2237.

[76] Ibid.

[77] Ibid.

[78] OECD-WPMN. 2009. Draft Dossier Development Plan: Dendrimers. 26 February 2009. ENV/CHEM/NANO(2009)4/ADD10

[79] การสัมผัส ซึ่งเป็นศัพท์ทางวิชาการในสาขาอาชีวอนามัย มีความหมายเช่นเดียวกับการรับสัมผัส ซึ่งเป็นศัพท์ทางวิชาการในสาขาพิษวิทยา ทั้งคู่ตรงกับคำศัพท์ภาษาอังกฤษว่า exposure

[80] แบ่ง ตาม Expert Matrix ของ Good Nano Guide http://www.goodnanoguide.org

[81] BSI. 2008. *Nanotechnologies - Part 2: Guide to Safe Handling and Disposal of Manufactured Nanomaterials.* Document 6699-2:2007.

[82] ตู้ดูดควัน หรือตู้ควัน (fume hood หรือ hood) เป็นตู้หรือห้องที่อากาศภายในตู้ถูกดูดออกไปผ่านไส้กรองชนิด HEPA ก่อนปล่อยออกไปนอกโรงงาน ตู้ดูดควันระดับอุตสาหกรรมที่กล่าวถึงในที่นี้ อาจมีขนาดใหญ่และสูงได้หลายเมตร ขึ้นกับขนาดของภาชนะหรือกิจกรรมที่ออกแบบให้ทำในตู้ รวมถึงตู้ที่สามารถยื่นมือเข้าไปทำงานภายในตู้ได้ จนถึงตู้ดูดควันที่มักเห็นโดยทั่วไปในห้องปฏิบัติการ ตู้ดูดควันที่ใช้งานได้จริงต้องมีช่องเปิดที่หน้าตู้ที่มีขนาดเล็กเพื่อให้แรงลมดูดมากพอตามกำหนด

[83] NIOSH. 2009. Current Intelligence Bulletin 60: Interim Guidance for Medical Screening and Hazard Surveillance for Workers Potentially Exposed to Engineered Nanoparticles. National Institute for Occupational Safety and Health, Center for Disease Control and Prevention, Department of Health and Human Services. DHHS (NIOSH) Publication No. 2009–116, p. 3. และ Trout, D. B. 2011. General Principles of Medical Surveillance: Implication for Workers Potentially Exposed to Nanomaterials. *Journal of Occupational and Environmental Medicine* **53**(6-Supplement):S22-S24.

[84] สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม 2553. *คู่มือการจัดการความปลอดภัยโรงงานที่มีฝุ่นระเบิดได้*

[85] BSI. 2008. *Nanotechnologies - Part 2: Guide to Safe Handling and Disposal of Manufactured Nanomaterials.* Document 6699-2:2007.

[86] ตัวอย่างค่ามาตรฐานที่พบได้บ่อยในเอกสารข้อมูลความปลอดภัยสารเคมีทั่วไปได้แก่ **Occupational Exposure Limit (OEL)** เป็นค่ามาตรฐานการสัมผัสสารเคมีชนิดหนึ่ง ๆ จากการทำงาน ที่เชื่อว่าจะไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพในผู้ปฏิบัติงานส่วนใหญ่, **Permissible Exposure Limit (PEL)** เป็นค่ามาตรฐานบังคับ (ค่าระดับการสัมผัสที่อนุญาตให้มีได้) ซึ่งกำหนดโดย Occupational Safety and Health Administration (OSHA) ของประเทศสหรัฐอเมริกา, **Recommended Exposure Limit (REL)** เป็นค่ามาตรฐานแนะนำ ที่กำหนดโดย National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) ของประเทศสหรัฐอเมริกา, และ **Threshold Limit Value (TLV)** เป็นค่ามาตรฐานแนะนำ ที่กำหนดโดย American Conference of the Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) ของประเทศสหรัฐอเมริกา อย่างไรก็ตาม วัสดุนาโนแทบทุกชนิดยังไม่ได้รับการกำหนดค่ามาตรฐานแบบใดแบบหนึ่งไว้อย่างเป็นทางการ แต่ NIOSH ก็ได้ให้ความสำคัญเกี่ยวกับความปลอดภัยนาโน และได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่องนี้อย่างจริงจังในเวลาหลายปีที่ผ่านมา โดยขณะนี้อยู่ระหว่างเตรียมการประกาศใช้ค่ามาตรฐานแนะนำ (REL) สำหรับท่อคาร์บอนนาโน และคาดว่าจะมีการพัฒนาค่ามาตรฐานสำหรับวัสดุนาโนอื่น ๆ เพิ่มเติมด้วย

[87] เนื้อหาส่วนใหญ่ของบทนี้ ดัดแปลงจาก เลอสรร ธนสุกาญจน์ 2553. *นาโนเทคโนโลยี: ความปลอดภัยและจริยธรรม.* ศูนย์นวัตกรรมนาโนเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. และ NANOTEC. 2010. ร่างแผนยุทธศาสตร์ความปลอดภัยและจริยธรรมนาโนเทคโนโลยี ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (V 0.3)

[88] แผนยุทธศาสตร์การจัดการสารเคมีแห่งชาติ ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2550-2554) หน้า 1

[89] แผนแม่บทพัฒนาความปลอดภัยด้านสารเคมีแห่งชาติ ฉบับที่ 1 (พ.ศ. 2540-2544) มีสามแผนงานหลัก คือ แผนงานพัฒนาองค์ความรู้และทรัพยากรมนุษย์ แผนงานพัฒนาโครงการและระบบบริหาร และแผนงานพัฒนาระบบบริการ โดยใช้ 8 มาตรการสำคัญ ได้แก่ (1) กฎหมายและการบังคับใช้ (2) การพัฒนาสมรรถนะบุคลากรด้านความปลอดภัยสารเคมี (3) การจัดการอุบัติภัยสารเคมี (4) การพัฒนาเทคโนโลยี (5) การให้การศึกษาและเผยแพร่ความรู้ (6) การพัฒนาความร่วมมือระหว่างหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ (7) การเฝ้าระวังด้านสาธารณสุขและสิ่งแวดล้อมจากอันตรายสารเคมี (8) การส่งเสริมและจูงใจด้านการเงินและการลงทุน จุดแข็งของแผนแม่บทฯ ฉบับที่ 1 คือ การมีส่วนร่วมจากทุกหน่วยงาน และการใช้วิชาการในการกำหนดนโยบายและแผน สิ่งที่ควรเสริมสร้างความเข้มแข็ง คือต้องกำหนดเป้าหมายที่ชัดเจนให้เข้าถึงประชาชน กระบวนการ และโครงสร้างองค์กรบริหารจัดการแผน ที่มา: แผนยุทธศาสตร์การจัดการสารเคมีแห่งชาติ ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2550-2554) หน้า 2-3

[90] แผนแม่บทพัฒนาความปลอดภัยด้านสารเคมีแห่งชาติ ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2545-2549) ประกอบด้วย 5 ยุทธศาสตร์ คือ (1) การพัฒนาเครือข่ายศูนย์ข้อมูลสารเคมีแห่งชาติ (2) การพัฒนาระบบการจัดการและป้องกันอุบัติภัยสารเคมี (3) การส่งเสริมศักยภาพการจัดการของเสียสารเคมี (4) การพัฒนาเครือข่ายศูนย์พิษวิทยาแห่งชาติ (5) การศึกษาวิจัยและพัฒนา จุดแข็งของแผนแม่บทพัฒนาความปลอดภัยด้านสารเคมีแห่งชาติ ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2545-2549) คือ มีเจ้าภาพรับผิดชอบแต่ละยุทธศาสตร์และมีเครือข่ายประสานงานที่กว้างขวางและเข้มแข็ง สิ่งที่ควรเสริมความเข้มแข็ง คือการพัฒนาองค์ความรู้และทรัพยากรมนุษย์ ที่จำเป็นต้องทำต่อเนื่องเพื่อให้การจัดการสารเคมีเป็นระบบ ทั้งภาครัฐ ภาคเอกชน และภาคประชาชน โดยเฉพาะชุมชนท้องถิ่น ให้มีองค์ความรู้ในการจัดการสารเคมี ที่มา: แผนยุทธศาสตร์การจัดการสารเคมีแห่งชาติ ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2550-2554) หน้า 3

[91] แผนยุทธศาสตร์การจัดการสารเคมีแห่งชาติ ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2550-2554) พัฒนาขึ้นจากบูรณาการแผนแม่บทพัฒนาความปลอดภัยด้านสารเคมีแห่งชาติ และยุทธศาสตร์การดำเนินงานระหว่างประเทศว่าด้วยการจัดการสารเคมี (Strategic Approach to the International Chemicals Management หรือ SAICM) ให้มีนโยบายเดียว (single policy) ในการบริหารจัดการสารเคมีของประเทศ เพื่อป้องกันอันตรายและผลกระทบที่จะเกิดขึ้นจากการใช้สารเคมีต่อสุขภาพอนามัยและสิ่งแวดล้อมของประชาชน แผนยุทธศาสตร์ฯ ฉบับที่ 3 พัฒนาขึ้นอย่างเป็นระบบและมีทิศทางที่ต่อเนื่องและตอบสนองต่อบทเรียนจากแผนแม่บทพัฒนาความปลอดภัยด้านสารเคมีแห่งชาติ ฉบับที่ 1 (พ.ศ. 2540-2544) และแผนแม่บทพัฒนาความปลอดภัยด้านสารเคมีแห่งชาติ ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2545-2549) ตอบสนองต่อนโยบายของรัฐบาลที่มุ่งเน้นประโยชน์สุขของประชาชนและความยั่งยืนบนพื้นฐานของการพัฒนาประเทศตามหลักการ "ปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง" สอดคล้องและสนับสนุนเป้าหมายของแผนพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 10 (พ.ศ. 2550-2554) คือ "สังคมที่มีความสุขอย่างยั่งยืน" และ**สอดรับกับยุทธศาสตร์การดำเนินงานระหว่างประเทศว่าด้วยการจัดการสารเคมี (SAICM)** ทั้ง 3 ระดับ คือ High-level Declaration, Overarching Policy Strategy และ Global Plan of Action: GPA เพื่อนำไปสู่การบรรลุเป้าหมายการพัฒนาแห่งสหัสวรรษ (Millennium Development Goals: MDGs) คือ "ลดการผลิตและใช้สารเคมีในทางที่จะนำไปสู่การลดผลกระทบอันไม่พึงประสงค์ต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมภายในปี พ.ศ. 2563" แผนยุทธศาสตร์การจัดการสารเคมีแห่งชาติ ฉบับที่ 3 มีกระบวนการทำงานแบบมีส่วนร่วมของทุกภาคส่วน (multi participatory approach) ลดความซ้ำซ้อนและเสริมเติมเต็มการทำงานให้ครอบคลุมทุกประเด็นปัญหาที่สำคัญของประเทศ รวมทั้งสร้างเสริมศักยภาพของชุมชน และเครือข่ายภาคประชาชนให้เกิดการจัดการสารเคมีของประเทศแบบครบวงจร (life cycle of chemicals) พัฒนาขึ้นตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2546 - ตุลาคม พ.ศ. 2549 รวม 2 ปี 11 เดือน ตั้งแต่การทบทวนสถานการณ์การจัดการสารเคมีของประเทศในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา การประเมินผลแผนแม่บทฯ ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2545-2549) การประชุมระดมสมอง การประชุมสัมมนาระดับชาติ การประชุมนานาชาติ การกลั่นกรองจากคณะอนุกรรมการประสานนโยบายและแผนการดำเนินงานว่าด้วยความปลอดภัยของสารเคมี และการพิจารณาให้ความเห็นจากคณะกรรมการแห่งชาติว่าด้วยการพัฒนายุทธศาสตร์การจัดการสารเคมี (ปัจจุบันได้เปลี่ยนเป็นชื่อคณะกรรมการแห่งชาติว่าด้วยการพัฒนายุทธศาสตร์การจัดการสารเคมี ตามมติคณะรัฐมนตรีเมื่อวันที่ 4 กันยายน พ.ศ. 2549 แผนยุทธศาสตร์การจัดการสารเคมีแห่งชาติ ฉบับที่ 3 แสดงให้เห็นถึงทิศทางและแนวทางการดำเนินงานในช่วงระยะเวลา 5 ปี ข้างหน้า ที่จะนำประเทศสู่ "สังคมปลอดภัยจากอันตรายด้านสารเคมี สู่การพัฒนาประเทศที่ยั่งยืนและแข่งขันได้ในระดับสากล ที่มา: บทสรุปสำหรับผู้บริหาร แผนยุทธศาสตร์การจัดการสารเคมีแห่งชาติ ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2550-2554)

[92] แผนยุทธศาสตร์การจัดการสารเคมีแห่งชาติ ฉบับที่ 4 (พ.ศ. 2555-2564) หน้า จ.

[93] **ยุทธศาสตร์ที่ 1** คือ พัฒนาฐานข้อมูล กลไกและเครื่องมือในการจัดการสารเคมีอย่างเป็นระบบ ครบวงจร กำหนดกลวิธีเพื่อดำเนินการตามยุทธศาสตร์ไว้ 3 กลวิธี คือ (1) พัฒนาระบบฐานข้อมูลกลาง โดยพัฒนาฐานข้อมูลสารเคมี และเชื่อมโยงฐานข้อมูลสารเคมีให้เป็นระบบฐานข้อมูลกลาง (2) พัฒนา กลไกและเครื่องมือ ในการจัดการสารเคมีอย่างเป็นระบบครบวงจรตั้งแต่ต้นน้ำถึงปลายน้ำ โดยเน้น ในเรื่องเครื่องมือด้านกฎหมาย เครื่องมือด้านเศรษฐศาสตร์ และเครื่องมือด้านการประเมินและ (3) สร้างกลไกเพื่อขับเคลื่อนการจัดการสารเคมีอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งรวมถึงประเมินผลความสำเร็จของ แผนเป็นระยะ ๆ และศึกษาแนวทางการจัดตั้งองค์กรกลางในการจัดการสารเคมีระดับชาติ **ยุทธศาสตร์ที่ 2** คือ พัฒนาศักยภาพและบทบาทในการบริหารจัดการสารเคมีของทุกภาคส่วน กำหนดกลวิธีเพื่อดำเนินการตามยุทธศาสตร์ไว้ 3 กลวิธีคือ (1) พัฒนาองค์ความรู้และการพัฒนาศักยภาพบุคลากรที่เกี่ยวข้องกับการจัดการสารเคมี ซึ่งได้แก่ พัฒนาและสื่อสารองค์ความรู้ พัฒนาศักยภาพบุคลากรที่เกี่ยวข้องกับการจัดการสารเคมี และพัฒนาศักยภาพของห้องปฏิบัติการด้านสารเคมี (2) พัฒนาศักยภาพการตอบสนองและการเตรียมความพร้อมต่อพันธกรณีและข้อตกลงระหว่างประเทศ และ (3) ส่งเสริมบทบาทและการมีส่วนร่วมของทุกภาคส่วนในการจัดการสารเคมี รวมถึงส่งเสริมการมีส่วนร่วมของภาคประชาชน เสริมสร้างความเข้มแข็งและบทบาทขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ส่งเสริมความร่วมมือของภาคเอกชน และส่งเสริมบทบาทการมีส่วนร่วมของกลุ่มวิชาชีพและเครือข่ายทางสังคมต่าง ๆ **ยุทธศาสตร์ที่ 3** คือ ลดความเสี่ยงอันตรายจากสารเคมี กำหนดกลวิธีเพื่อดำเนินการตามยุทธศาสตร์ไว้ 3 กลวิธี คือ (1) ป้องกันอันตรายจากสารเคมี ซึ่งได้แก่ ลดความเสี่ยงอันตรายจากสารเคมีด้านการเกษตร ด้านอุตสาหกรรม ด้านสาธารณสุขและผู้บริโภคและด้านการขนส่งสารเคมี (2) เฝ้าระวังและติดตามตรวจสอบผลกระทบจากสารเคมี ที่รวมถึง เฝ้าระวังและติดตามตรวจสอบระดับมลพิษอันเนื่องมาจากสารเคมี และพัฒนางานด้านระบาดวิทยาสารเคมี และ (3) รับมือสถานการณ์ฉุกเฉินและการรักษาเยียวยาและฟื้นฟู โดยพัฒนาระบบการจัดการเหตุฉุกเฉิน จัดทำแผนปฏิบัติการฉุกเฉินสารเคมี และฝึกซ้อมแผนในแต่ละระดับและเสริมสร้างประสิทธิภาพการรักษาเยียวยาและฟื้นฟู **ที่มา**: แผนยุทธศาสตร์การจัดการสารเคมีแห่งชาติ ฉบับที่ 4 (พ.ศ. 2555-2564) หน้า จ-ช.

[94] แผนยุทธศาสตร์การจัดการสารเคมีแห่งชาติ ฉบับที่ 4 (พ.ศ. 2555-2564) หน้า ช.

[95] ร่างแผนกลยุทธนาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (พ.ศ. 2547-2556) หน้า 22

[96] แปลและแก้ไขปรับปรุงจาก Tanasugarn, L. and N. Tanpipat. 2008. NanoSafety in Thailand. paper presented by the first author at the Sixth Session of the Intergovernmental Forum on Chemical Safety (IFCS Forum VI) on 16 September 2008 in Dakar, Senegal. http://lerson.org/pub/nano/

[97] http://www.nationalhealth.or.th/index.php?option=com_content&view=article&id=31&Itemid=53 เข้าถึงเมื่อวันที่ 2 มิถุนายน 2553

บรรณานุกรม

วิชัย พฤกษ์ธาราธิกูล และคณะ 2553. *คู่มือการจัดการความปลอดภัย โรงงานที่มีฝุ่นระเบิดได้.* สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.

Agence nationale de sécurité sanitare, 2010. "Development of a specific Control Banding Tool for Nanomaterials" (December 2010)

Ahamed, M., M.S. AlSalhi, and M.K.J. Siddiqui. 2010. Silver nanoparticle application and human health. *Clinica Chimica Acta* **411**:1841-1848.

Alkilany, A. M. and C. J. Murphy. 2010. Toxicity and cellular uptake of gold nanoparticles: what we have learned so far? *J. Nanopart. Res.* **12**:2313-2333.

BSI. 1986. *BS 1651: 1986 Specification for industrial gloves.* British Standards Institute.

BSI. 1987. *BS 2092:1987 Specification for eye protection for industrial and non industrial use.* (Suitable for laboratory use). To be replaced by BS EN 166,167 and 168. British Standards Institute.

BSI. 1988. *BS 7028:1988 Guide for the selection, use and maintenance of eye protection for industrial and other uses.* British Standard Institute.

BSI. 2007. *Nanotechnologies - Part 2: Guide to safe handling and disposal of manufactured nanomaterials.* PD 6699-2:2007. British Standards Institute.

BSI. 2003a. *BS EN 374-1:2003. Protective gloves against chemicals and micro-organisms. Terminology and performance requirements.* British Standards Institute.

BSI. 2003b. *BS EN 374-2:2003. Protective gloves against chemicals and micro-organisms. Determination of resistance to penetration.* British Standards Institute.

BSI. 2003c. *BS EN 374-3:2003. Protective gloves against chemicals and micro-organisms. Determination of resistance to permeation by chemicals.* British Standards Institute.

BSI. 2003d. BS EN 388:2003 Protective gloves against mechanical risks. British Standards Institute.

BSI. 2009. BS EN 420:2003+A1:2009 Protective gloves. General requirements and test methods. British Standards Institute.

Castranova, V. 2011. Overview of current toxicological knowledge of engineered nanoparticles. *Journal of Occupational and Environmental Medicine* **53**(6):S14-S17.

Chong, M.N., B. Jin, C.W.K. Chow, and C. Saint. 2010. Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review. *Water Research* **44**:2997-3027. doi:10.1016/j.watres.2010.02.039

Cone, J.E. and M. Farfel. 2011. World Trade Center Health Registry - A model for a nanomaterials exposure registry. *Journal of Occupational and Environmental Medicine* **53**(6):S48-S51.

Dastjerdi, R. and M. Montazer. 2010. A review on the application of inorganic nano-structured materials in the modification of textiles: Focus on anti-microbial properties. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* **79**:5-18.

David, R.M., M.N. Nasterlack, S. Engel, and P.R. Conner. Developing a registry of workers involved in nanotechnology: BASF Experiences. *Journal of Occupational and Environmental Medicine* **53**(6):S32-S34.

Eisen, E.A., S. Costello, J. Chevrier, and S. Picciotto. 2011. Epidemiologic challenges for studies of occupational exposure to engineered nanoparticles: A commentary. *Journal of Occupational and Environmental Medicine* **53**(6):S57-S61.

Ema M., N. Kobayashi, M. Naya, S. Hanai, and J. Nakanishi. 2010. Reproductive and developmental toxicity studies of manufactured nanomaterials. *Reproductive Toxicology* **30**:343-352.

Fischman, M., E. Storey, R.J. McGunney, and M. Kosnett. 2011. National Institute for Occupational Safety and Health Nanomaterials and Worker Health Conference - Medical surveillance session summary report. *Journal of Occupational and Environmental Medicine* **53**(6):S35-S37.

Gause, C.B., R.M. Layman, and A.C. Small. 2011. A small business approach to nanomaterial environment, health, and safety. *Journal of Occupational and Environmental Medicine* **53**(6):S28-S31.

Holman, M. W. et al. 2006. *The Nanotech Report, 4th ed.* Lux Research, Inc.

Hullmann A. 2007. Measuring and assessing the development of nanotechnology. *Scientometric* **70**(3):739-758.

IARC. 2006. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans VOLUME 93 Carbon Black, Titanium Dioxide, and Talc.* World Health Organization International Agency for Research on Cancer.

ISO. 2008. Nanotechnologies—Health and safety practices in occupational settings relevant to nanotechnologies. ISO/ Technical Review 12885

IWGN. 1999. *Nanotechnology Research Directions: IWGN Workshop Report: Vision for Nanotechnology R&D in the Next Decade.* National Science and Technology Council Committee on Technology. Interagency Working Group on Nanoscience, Engineering and Technology (IWGN). September 1999.

Johnston, H.J., G.R. Hutchison, F.M. Christensen, S. Peters, S. Hankin, and V. Stone. 2009. Identification of the mechanisms that drive the toxicity of TiO2 particulates: the contribution of physicochemical characteristics. Particle and Fibre Toxicology **6**:33. doi:10.1186/1743-8977-6-33

Johnston, H.J., G. Hutchison, F.M. Christensen, S. Peters, S. Hankin, and V. Stone. 2010. A review of the in vivo and in vitro toxicity of silver and gold particulates: Particle attributes and biological mechanisms responsible for the observed toxicity. *Critical Reviews in Toxicology* **40**(4):328-346. DOI: 10.3109/10408440903453074

Marambio-Jones, C. and E. M. V. Hoek. 2010. A review of the antibacterial effects of silver nanomaterials and potential implications for human health and the environment. *J. Nanopart. Res.* **12**:1531-1551. DOI 10.1007/s11051-010-9900-y

Marchant, G.E. and A. Crane. 2011. The benefits and challenges of a voluntary occupational exposure database. *Journal of Occupational and Environmental Medicine* **53**(6):S52-S56.

Morones, J.R., J.L. Elechiguerra, A. Camacho, K. Holt, J.B. Kouri, J.T. Ramírez and M.J. Yacaman. 2005. The bacteriocidal effect of silver nanoparticles. *Nanotechnology* **16**:2346-2353.

Napierska, D., L. C. Thomassen, D. Lison, J. A. Martens, and P. H. Hoet. 2010. The nanosilica hazard: another variable entity. *Particle and Fibre Toxicology* **7**:39. http://www.particleandfibretoxicology.com/content/7/1/39

Nasterlack, M. 2011. Role of medical surveillance in risk management. *Journal of Occupational and Environmental Medicine* **53**(6):S18-S21.

NEDO. 2009. *Risk Assessment of Manufactured Nanomaterials - Carbon Nanotubes (CNTs) -NEDO Project "Research and Development of Nanoparticle Characterization Methods"* (P06041) Interim Report issued on October 16, 2009.

NIOSH (1995) Respiratory protective devices; final rule and notices. Fed Regist 60(110):30335–30404. http://frwebgate.access.gpo.gov/cgi-bin/getpage.cgi?dbname=1995_register&position=all&page=30335

NIOSH (2004) NIOSH respirator selection logic. DHHS (NI- OSH) Publication No. 2005-100. Cincinnati, OH. http://www.cdc.gov/niosh/docs/2005-100/

NIOSH (2005a) Procedure No. RCT-APR-STP-0057, 0058, 0059, Revision 1.1. In: DHHS, Centers for Disease Con- trol and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, National Personal Protective Tech- nology Laboratory, Pittsburgh. http://www.cdc.gov/niosh/npptl/stps/pdfs/RCT-APR-0057%2058%2059.pdf

NIOSH (2005b) Procedure No. RCT-APR-STP-0051, 0052, 0053, 0054, 0055, 0056, Revision 1.1. In: DHHS, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, National Personal Protective Technology Laboratory, Pittsburgh. http://www.cdc.gov/niosh/npptl/stps/pdfs/RCT-APR-0051%2052%2053%2054%2055%2056.pdf

NIOSH (2005c) NIOSH CURRENT INTELLIGENCE BULLETIN: evaluation of health hazard and recommendations for occupational exposure to titanium dioxide. http://www.cdc.gov/niosh/review/public/tio2/pdfs/tio2draft.pdf

NIOSH (2006) Approaches to safe nanotechnology. An information exchange with NIOSH. http://www.cdc.gov/niosh/topics/nanotech/safenano/

Nowack, B., H. F. Krug, and M. Height. 2011. 120 years of nanosilver history: Implications for policy makers. *Environmental Science and Technology* **45**:1177-1183. dx.doi.org/10.1021/es103316q

Paik, S.Y., D.M. Zalk and P. Swuste. 2008. "Application of a Pilot Control Banding Tool for Risk Level Assessment and Control of Nanoparticle Exposures," The Annals of Occupational Hygiene (16 May 2008).

Panyala, N. R., E. M. Peña-Méndez, and J. Havel. 2009. Gold and nano-gold in medicine: overview, toxicology and perspectives. *J. Appl. Biomed.* **7**:75-91.

Quadros, M. and L. C. Marr. 2010. Environmental and human health risks of aerosolized silver nanoparticles. *Journal of the Air & Waste Management Association* **60**:770-781.

Roco, M.C., C.A. Mirkin, and M.C. Hersam. eds. 2010. *Nanotechnology Research Directions for Societal Needs in 2020: Retrospective and Outlook.* Chapter 4: Nanotechnology Environmental, Health, and Safety Issues; Chapter 5:

Nanotechnology for Sustainability: Environment, Water, Food, Minerals, and Climate; Chapter 6: Nanotechnology for Sustainability: Energy Conversion, Storage, and Conservation.

Roisman, R., B. Materna, S. Beckman, E. Katz, D. Shusterman, and R. Harrison. 2011. The role of state public health agencies in national efforts to track workplace hazards and the relevance of state experiences to nanomaterial worker surveillance. *Journal of Occupational and Environmental Medicine* **53**(6):S38-S41.

Sharma, V.K. 2009. Aggregation and toxicity of titanium dioxide nanoparticles in aquatic environment - A Review. Journal of Environmental Science and Health Part A **44**:1485-1495. DOI: 10.1080/10934520903263231

Siegel, R.W., E. Hu, and M.C. Roco. eds. 1999. *Nanostructure Science and Technology: A Worldwide Study.* Panel on Nanostructure Science and Technology, World Technology (WTEC) Division, International Technology Research Institute (ITRI), Loyola College, sponsored by the National Science Foundation (NSF), etc.

Schulte, P.A., D.J. Mundt, M. Nasterlack, K.B. Mulloy, and K.A. Mundt. 2011. Exposure registries: Overview and utility for nanomaterial workers. *Journal of Occupational and Environmental Medicine* **53**(6):S42-S47.

Schulte, P.A., V. Murashov, R. Zumwalde, E.D. Kuempel, and C.L. Geraci. 2011. Occupational exposure limits for nanomaterials: State of the art. *J. Nanopart Res*. **12**:1971-1987.

Schulte, P.A. and D.B. Trout. 2011. Nanomaterial and worker health. *Journal of Occupational and Environmental Medicine* **53**(6):S3-S7.

Shaffer, R.E. and S. Rengasamy (2009) Respiratory protection against airborne nanoparticles: A review. *J. Nanopart. Res.* (Special Issue: Environmental and Human Exposure of Nanomaterials) **11**:1661-1672. DOI 10.1007/s11051-009-9649-3.

Sng, J., D.K.S. Quee, L.E. Yu, and S. Gunaratnam. 2011. Current surveillance plan for persons handling nanomaterials in the National University of Singapore. *Journal of Occupational and Environmental Medicine* **53**(6):S25-S27.

Stoffenmanager 4.0. *The Stoffenmanager is a "tool for prioritizing worker health risks to dangerous substances"; "quantitative inhalation exposure tool";* "REACH Tier one quantitiative inhalation exposure tool." https://www.stoffenmanager.nl/default.aspx

Trout, D.B. 2011. General principles of medical surveillance. *Journal of Occupational and Environmental Medicine* **53**(6):S22-S24.

U.S. EPA 2005. *Reassessment of one Exemption from the Requirement of a Tolerance for Carbon Black*. November 21, 2005. http://www.epa.gov/opprd001/inerts/carbonblack.pdf เข้าถึงเมื่อวันที่ 11 ตุลาคม 2554.

US-EPA. 2010. Nanomaterial Case Studies: Nanoscale Titanium Dioxide in Water Treatment and in Topical Sunscreen. US Environmental Protection Agency. EPA/600/R-09/057F.

Wijnhoven, S.W.P., W.J.G.M. Peijnenburg, C.A. Herberts, W.I. Hagens, A.G. Oomen, E.H.W. Heugens, B. Roszek, J. Bisschops, I. Gosens, D.V.D. Meent, S. Dekkers, W.H. DeJong, M. Van Zijverden, A.J.A.M. Sips, and R.E. Geertsma. Nano-silver - a review of available data and knowledge gaps in human and environmental risk assessment. Nanotoxicology 3(2):109-138. DOI: 10.1080/17435390902725914

Workplace Health and Safety Queensland, Australia. undated. Nanomaterial Control Banding Tool Worksheet. https://www.deir.qld.gov.au/workplace/resources/pdfs/nanotechnology-control-banding-tool.pdf

ภาคผนวก

ภาคผนวก 1

ศัพท์บัญญัติและนิยามศัพท์นาโน โดยองค์การระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐาน (ISO)

ตารางคำศัพท์ต่อไปนี้ จัดทำขึ้นโดยเรียงลำดับตามตัวอักษร เพื่อความสะดวกแก่ผู้ที่ต้องการค้นหาศัพท์

ในปี พ.ศ. 2550 องค์การระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐาน (ISO) ได้เริ่มจัดทำศัพท์บัญญัติและนิยามศัพท์หลัก ๆ เฉพาะส่วนที่เรียกว่า core terms ขึ้นมาก่อน ตามข้อเรียกร้องของประมาณ 30 ประเทศใน OECD-WPMN ซึ่งเริ่มประชุมครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2549 แต่ไม่สามารถทำงานต่อได้ตามแผนงานที่วางไว้ เนื่องจากคำศัพท์และคำนิยามยังไม่อยู่ตัว จนเมื่อองค์การระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐานได้จัดทำศัพท์บัญญัติและนิยามศัพท์ฉบับร่างขึ้น งานของ OECD-WPMN จึงดำเนินต่อไปได้

จากนั้น องค์การระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐานได้จัดทำศัพท์บัญญัติและนิยามศัพท์นาโนให้ขยายวงออกไป ดังจะเห็นได้จากตารางต่อไปนี้

คำศัพท์	ความหมาย	อ้างอิง
carbon nanofibre, CNF	**nanofibre** composed of carbon	ISO/TS 80004-3
carbon nanohorn	short and irregular shaped **carbon nanotube** with a **nanocone** apex *NOTE:* Usually hundreds of carbon **nanohorns** constitute an aggregate **nanoparticle**.	ISO/TS 80004-3
carbon nano-onion	**nano-onion** composed of carbon	ISO/TS 80004-3
carbon nanopeapod	linear array of **fullerenes** enclosed in a **carbon nanotube** *NOTE:* This is an example of a composite **nanofibre**.	ISO/TS 80004-3
carbon nanoribbon	**nanoribbon** composed of carbon *NOTE:* Carbon nanoribbons are often in the form of multiple layers of **graphene**. In the case of a single **graphene** layer, the term **graphene ribbon** is used.	ISO/TS 80004-3
carbon nanotube, CNT	**nanotube** composed of carbon *NOTE:* Carbon nanotubes usually consist of curved **graphene** layers, including **single-wall carbon nanotubes** and **multiwall carbon nanotubes**.	ISO/TS 80004-3
chiral vector of SWCNT	vector notation used to describe the helical structure of a **single-wall carbon nanotube**	ISO/TS 80004-3
cup-stack carbon nanotube, cup-stacked carbon nanotube	**carbon nanotube** composed of stacked truncated **graphene nanocones** *NOTE:* This is completely different from **single-wall** or **multiwall carbon nanotubes** in structure. The open top and bottom edges of truncated **graphene nanocones** appear on the inner and outer surfaces of the **nanotube**, respectively.	ISO/TS 80004-3
double-wall carbon nanotube, DWCNT, double-walled carbon nanotube	**multiwall carbon nanotube** composed of only two nested, concentric **single-wall carbon nanotubes** *NOTE:* Although this is a type of **multiwall carbon nanotube**, its properties are rather closer to **single-wall carbon nanotubes**.	ISO/TS 80004-3
endohedral fullerene	**fullerene** with an additional atom or atoms enclosed within the **fullerene** shell	ISO/TS 80004-3

คำศัพท์	ความหมาย	อ้างอิง
engineered nanomaterial	**nanomaterial** designed for a specific purpose or function	ISO/TS 80004-1
fullerene	molecule composed solely of an even number of carbon atoms, which form a closed cage-like fused-ring polycyclic system with 12 five-membered rings and the rest six-membered rings *NOTE 1:* Adapted from the definition in the ILIPAC Compendium of Chemical Terminology *NOTE 2:* A well-known example is C_{60}, which has a spherical shape with an external dimension of about 1 nm.	ISO/TS 80004-3
fullerene derivative	compound that has been formed from **fullerene** by substitution of carbon or covalent attachment of a moiety	ISO/TS 80004-3
graphene	single layer of carbon atoms with each atom bound to three neighbours in a honeycomb structure *NOTE:* It is an important building block of many carbon **nano-objects**.	ISO/TS 80004-3
graphite	allotropic form of the element carbon, consisting of **graphene** layers stacked parallel to each other in a three dimensional, crystalline, long-range order *NOTE 1:* Adapted from the definition in the ILIPAC Compendium of Chemical Terminology. *NOTE 2:* There are two allotropic forms with different stacking arrangements: hexagonal and rhombohedral.	ISO/TS 80004-3
graphitic nanofibre	**carbon nanofibre** composed of **graphene** multilayer structures *NOTE:* Graphene layers can be any orientation with respect to the fibre axis without long-range order.	ISO/TS 80004-3
incidental nanomaterial	**nanomaterial** generated as an unintentional by-product of a process *NOTE 1:* The process includes manufacturing, bio-technological or other processes. *NOTE 2:* See ISO/TS 27628:2007, definition 2.21, for definition of "ultrafine particle".	ISO/TS 80004-1
manufactured nanomaterial	**nanomaterial** intentionally produced for commercial purposes to have specific properties or specific composition	ISO/TS 80004-1
metallofullerene	**endohedral fullerene** with an enclosed metal ion or ions	ISO/TS 80004-3

คำศัพท์	ความหมาย	อ้างอิง
multiwall carbon nanotube, MWCNT, multi-walled carbon nanotube	**carbon nanotube** composed of nested, concentric or near-concentric **graphene** sheets with interlayer distances similar to those of **graphite** *NOTE:* The structure is normally considered to be many **single-wall carbon nanotubes** nesting each other, and would be cylindrical for small diameters but tends to have a polygonal cross-section as the diameter increases.	ISO/TS 80004-3
nanocone	cone-shaped **nanofibre** or **nanoparticle**	ISO/TS 80004-3
nanofibre	**nano-object** with two similar external dimensions in the **nanoscale** and the third dimension significantly larger *NOTE l:* A **nanofibre** can be flexible or rigid. *NOTE 2:* The two similar external dimensions are considered to differ in size by less than three times and the significantly larger external dimension is considered to differ from the other two by more than three times. *NOTE 3:* The largest external dimension is not necessarily in the **nanoscale**.	ISO/TS 80004-3 [ISO/TS 27687:2008, definition 4.3]
nanomanufacturin g	intentional synthesis, generation or control of **nanomaterials**, or fabrication steps in the **nanoscale**, for commercial purposes	ISO/TS 80004-1
nanomanufacturin g process	ensemble of activities to intentionally synthesize, generate or control **nanomaterials**, or fabrication steps in the **nanoscale**, for commercial purposes	ISO/TS 80004-1
nanomaterial	material with any external dimension in the **nanoscale** or having internal structure or surface structure in the nanoscale *NOTE 1:* This generic term is inclusive of **nano-object** and **nanostructured material**. NOTE 2: See also engineered **nanomaterial**, **manufactured nanomaterial** and **incidental nanomaterial**	ISO/TS 80004-1
nano-object	material with one, two or three external dimensions in the **nanoscale** *NOTE:* Generic term for all discrete nanoscale objects.	ISO/TS 80004-1 ISO/TS 80004-3 [ISO/TS 27687:2008, definition 2.2]
nano-onion	spherical **nanoparticle** with concentric multiple shell structure	ISO/TS 80004-3

คำศัพท์	ความหมาย	อ้างอิง
nanoparticle	**nano-object** with all three external dimensions in the **nanoscale** *NOTE:* If the lengths of the longest to the shortest axes of the **nano-object** differ significantly (typically by more than three times), the terms **nanofibre** or **nanoplate** are intended to be used instead of the term **nanoparticle**.	ISO/TS 80004-3 [ISO/TS 27687:2008, definition 4.1]
nanoplate	**nano-object** with one external dimension in the **nanoscale** and the two other external dimensions significantly larger *NOTE 1:* The smallest external dimension is the thickness of the **nanoplate**. *NOTE 2:* The two significantly larger dimensions are considered to differ from the **nanoscale** dimension by more than three times. *NOTE 3:* The larger external dimensions are not necessarily in the **nanoscale**.	ISO/TS 80004-3 [ISO/TS 27687:2008, definition 4.2]
nanoribbon	**nanoplate** with one of its two larger dimensions in the **nanoscale** and the other significantly larger	ISO/TS 80004-3
nanorod	solid **nanofibre**	ISO/TS 80004-3 [ISO/TS 27687:2008, definition 4.5]
nanoscale	size range from approximately 1 nm to 100 nm *NOTE 1:* Properties that are not extrapolations from a larger size will typically, but not exclusively, be exhibited in this size range. For such properties the size limits are considered approximate. *NOTE 2:* The lower limit in this definition (approximately 1 nm) is introduced to avoid single and small groups of atoms from being designated as nano-objects or elements of nanostructures, which might be implied by the absence of a lower limit.	ISO/TS 80004-1 ISO/TS 80004-3 [ISO/TS 27687:2008, definition 2.1]
nanoscale phenomenon	effect attributable to **nano-object** or **nanoscale** regions	ISO/TS 80004-1
nanoscale property	characteristic of a **nano-object** or **nanoscale** region	ISO/TS 80004-1

คำศัพท์	ความหมาย	อ้างอิง
nanoscience	study, discovery and understanding of matter in the **nanoscale**, where size- and structure-dependent properties and phenomena, as distinct from those associated with individual atoms or molecules or with bulk materials, can emerge	ISO/TS 80004-1
nanostructure	composition of inter-related constituent parts, in which one or more of those parts is a **nanoscale** region *NOTE:* A region is defined by a boundary representing a discontinuity in properties.	ISO/TS 80004-1
nanostructured material	material having internal **nanostructure** or surface nanostructure *NOTE:* This definition does not exclude the possibility for a **nano-object** to have internal structure or surface structure. If external dimension(s) are in the nanoscale, the term nano-object is recommended.	ISO/TS 80004-1
nanotechnology	application of scientific knowledge to manipulate and control matter in the **nanoscale** in order to make use of size- and structure-dependent properties and phenomena, as distinct from those associated with individual atoms or molecules or with bulk materials *NOTE:* Manipulation and control includes material synthesis.	ISO/TS 80004-1
nanotube	hollow **nanofibre**	ISO/TS 80004-3 [ISO/TS 27687:2008, definition 4.4]
single-wail carbon nanotube, SWCNT, single-walled carbon nanotube	**carbon nanotube** consisting of a single cylindrical **graphene** layer *NOTE:* The structure can be visualized as a **graphene** sheet rolled into a cylindrical honeycomb structure.	ISO/TS 80004-3

ที่มา

1. เอกสาร ISO/TS 8004-1 Definitions
2. เอกสาร ISO/TS 8004-3 Definitions

ภาคผนวก 2

ตัวอย่างอุตสาหกรรมนาโน

ตารางต่อไปนี้ เป็นผลจากการสรุปการใช้วัสดุนาโน ในอุตสาหกรรมต่างๆ (ของทุกประเทศ ไม่เฉพาะในประเทศไทย) โดยแยกเป็นรายผลิตภัณฑ์ ในแต่ละผลิตภัณฑ์ได้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุนาโนที่ใช้ ประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้ พิษหรืออันตรายของวัสดุนาโนที่ใช้ในขั้นตอนการผลิต หรือประเด็นด้านความปลอดภัยที่เกี่ยวข้อง

อุตสาหกรรม	ผลิตภัณฑ์	นาโนเทคโนโลยี/วัสดุนาโน ประโยชน์	พิษ/อันตราย/การสัมผัส หรือประเด็นด้านความปลอดภัย
วงจรรวม	ชิปสารกึ่งตัวนำ	ทองนาโน (nano gold) อุปกรณ์ความหนาแน่นสูงขึ้น สมรรถนะสูงขึ้น สร้างตัวนำไฟฟ้าโดยใช้อุณหภูมิต่ำ ด้วยการเผาซินเทอร์ (sintering) ด้วยโลหะนาโน โดยเฉพาะอย่างยิ่งอนุภาคทองนาโน	โลหะนาโนชนิดต่างๆ มีความเป็นอันตรายต่างกัน โดยทองนาโน มีความเป็นอันตรายน้อยกว่าเงินนาโน ผู้ปฏิบัติงานอาจสัมผัสวัสดุนาโนที่ใช้ในกรรมวิธี ทำให้เกิดการระคายเคือง หรือเป็นพิษได้
หน่วยเก็บความจำของคอมพิวเตอร์	nanoRAM (NRAM)	หน่วยเก็บความจำชนิด NRAM มีท่อคาร์บอนนาโน อยู่ภายใน ทำให้เก็บข้อมูลได้ด้วยความหนาแน่นสูงมาก	ผู้ปฏิบัติงานมีโอกาสสัมผัสท่อคาร์บอนนาโน ซึ่งเป็นวัตถุดิบของกรรมวิธีการผลิต NRAM โดย ท่อคาร์บอนนาโนซึ่งมีลักษณะเป็นแท่ง มีแนวโน้มที่จะเป็นอันตรายมากกว่าอนุภาคนาโนปกติ
อิเล็กทรอนิคส์ทางแสง	จอแสดงผลแบบแบนบางและพับงอได้	Organic Light Emitting Diode (OLED) และเทคโนโลยีอนุพันธ์ ต้นทุนการผลิตถูก ใช้พลังงานน้อย ภาพเคลื่อนไหวได้เร็ว ดูได้ด้วยมุมกว้างมาก	ความเป็นนาโนมาจากความบางของชั้นวัสดุที่สร้างขึ้นในกระบวนการผลิต จึงไม่มีโอกาสเกิดการสัมผัสนอกจากอุปกรณ์หรือเครื่องจักรจะรั่ว อาจมีอันตรายจากสารเคมีที่ใช้ ซึ่งไม่ได้มีที่มาจากขนาดนาโน

อุตสาหกรรม	ผลิตภัณฑ์	นาโนเทคโนโลยี/วัสดุนาโน ประโยชน์	พิษ/อันตราย/การสัมผัส หรือประเด็นด้านความปลอดภัย
พลังงาน	เซลล์แสงอาทิตย์	นาโนเทคโนโลยีช่วยให้ดูดแสงได้ในช่วงคลื่นที่กว้างขึ้น นาโนมอเตอร์ (nanomotor) เปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานกล	นาโนเทคโนโลยีอาจใช้เฉพาะในขั้นตอนการสังเคราะห์ ผู้ปฏิบัติงานอาจสัมผัสวัสดุนาโนที่ใช้ในกรรมวิธี ทำให้เกิดการระคายเคือง หรือเป็นพิษได้
	เซลล์เชื้อเพลิง	ทองคำขาวนาโน ใช้ผลิตคะตะลิสต์ที่ใช้เปลี่ยนไฮโดรเจนหรือเชื้อเพลิงอื่นเช่นเมทานอลให้เป็นไฮโดรเจนไอออน นาโนเทคโนโลยีช่วยสร้างเยื่อเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น	ในขั้นตอนการผลิตแคตะลิสต์ มีความเป็นไปได้ที่ผู้ปฏิบัติงานจะสัมผัสกับ nano platinum ทำให้เกิดความระคายเคืองหรือเป็นพิษได้
	แบตเตอรี่	ใช้วัสดุนาโนเป็นฉนวนกั้นกลางเซลล์ไฟฟ้าในขณะไม่ใช้งาน ช่วยยืดอายุการเก็บรักษาแบตเตอรี่	การใช้วัสดุนาโนที่เป็นพอลิเมอร์ มีอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานค่อนข้างน้อย
	ตัวเก็บประจุ	มีความพยายามนำวัสดุนาโนชนิด vertically-aligned carbon nanotube ซึ่งมีพื้นที่ผิวมากและสม่ำเสมอ ไปพัฒนาตัวเก็บประจุให้มีความจุมากขึ้น และปล่อยประจุไฟฟ้าได้กำลังสูงขึ้น เรียกว่า Ultracapacitor ซึ่งเหมาะสำหรับรถไฟฟ้าที่กำลังเร่งเครื่องหรือกำลังขับขึ้นพื้นเอียง	มีความเสี่ยงจากการสัมผัสท่อคาร์บอนนาโนทั้งทางปอดและทางผิวหนัง
	ตัวถังและโครงรถยนต์	ท่อคาร์บอนนาโนเสริมความแข็งแรงของโครงและตัวถังรถยนต์	ผู้ปฏิบัติงานมีโอกาสสัมผัสท่อคาร์บอนนาโน ซึ่งเป็นวัตถุดิบ ถ้าไม่ได้ฝังท่อคาร์บอนนาโนไว้ในวัสดุอื่นไว้ก่อน ทำให้เกิดการระคายเคืองและเป็นพิษ
	ห้องเครื่องยนต์และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง	วัสดุนาโน เช่น วัสดุผสมของท่อคาร์บอนนาโนและเซรามิก ใช้เป็นส่วนประกอบของห้องเครื่องยนต์และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้เบาและแข็งแรงกว่าใช้โลหะ	ผู้ปฏิบัติงานมีโอกาสสัมผัสวัสดุนาโนที่ใช้ในกรรมวิธี ทำให้เกิดการระคายเคือง หรือเป็นพิษได้

อุตสาหกรรม	ผลิตภัณฑ์	นาโนเทคโนโลยี/วัสดุนาโน ประโยชน์	พิษ/อันตราย/การสัมผัส หรือประเด็นด้านความปลอดภัย
ยานยนต์	สารเคลือบผิวและเทคโนโลยีการเคลือบกระจก	การเคลือบกระจกด้วยวัสดุนาโนช่วยลดการสะท้อนแสงของผิวกระจก ทำให้เห็นภาพได้ชัดขึ้น ผลิตภัณฑ์เคลือบนาโนเพื่อกันน้ำจับกระจก สารเคลือบกระจกใส เพื่อให้มีความใสอยู่เสมอ เพราะฝุ่นละอองนาโนถูกย่อยเป็นชิ้นเล็ก ๆ โดยการทำงานของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโน ที่ถูกกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตในแสงแดด	การเคลือบกระจกด้วยวัสดุนาโนเพื่อลดการสะท้อนแสง ปกติทำในห้องปิดสนิท (chamber) ผู้ปฏิบัติงานไม่มีโอกาสสัมผัสสารที่มีพิษมากในขณะที่ฟุ้งเป็นไออยู่ในห้อง ผลิตภัณฑ์เคลือบกระจกให้มีคุณสมบัติทำความสะอาดตัวเองได้ ใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนเป็นวัตถุดิบ โอกาสในการสัมผัสขึ้นอยู่กับว่าใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนในรูปผงฝุ่นหรือในรูปแขวนลอยในของเหลว
	ยางรถยนต์	ในปี พ.ศ. 2453 (ค.ศ. 1910) เริ่มมีการผสมคาร์บอนแบล็ค ซึ่งบางส่วนมีขนาดนาโน เข้าไปในยางรถยนต์เพื่อไม่ให้ยางสึกเร็ว โดยมีผลพลอยได้ในการทำให้ยางรถยนต์เกาะถนนได้ดีขึ้นบ้าง ในช่วงปี พ.ศ. 2533-2542 มีการผสมซิลิกาอสัณฐาน ซึ่งมีขนาดนาโน เข้าไปในส่วนผสมของยางรถยนต์เพื่อให้เกาะถนนดีขึ้น อันส่งผลให้ประหยัดเชื้อเพลิงได้ถึงระหว่างร้อยละ 2 ถึง 3 และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ปีละ 6 ล้านตัน	ในระยะเฉียบพลัน คาร์บอนแบล็คค่อนข้างมีอันตรายน้อยกว่าวัสดุนาโนชนิดอื่น ทำให้อาจมีการปล่อยให้ฟุ้งกระจายในโรงงานได้มาก อันตรายระยะยาว คือการทำลายเซลล์ปอดถ้ารับเข้าไปมากเกินกว่าที่ปอดจะกำจัดออกได้ และอาจจะเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ ซิลิกาอสัณฐานมีความเป็นพิษมากกว่าคาร์บอนแบล็ค ในบางกรณีอาจผ่านเข้าไปในเซลล์ปอด ไปรบกวนการทำงานตามปกติของเซลล์ และอาจผ่านเข้าไปถึงในนิวเคลียสของเซลล์ได้อีกด้วย
	เบรครถยนต์	นาโนเทคโนโลยีช่วยพัฒนาวัสดุมาทดแทนแร่ใยหินในเบรครถยนต์ เนื่องจากแร่ใยหินเป็นภัยต่อสุขภาพ โดยก่อให้เกิดมะเร็งของเยื่อหุ้มปอด (mesothelioma)	เส้นใยคาร์บอนนาโน (CNF) ที่ใช้แทนแร่ใยหินเป็นวัสดุนาโนที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเส้นยาว ซึ่งสถาบันมาตรฐานแห่งสหราชอาณาจักร จัดให้อยู่ในกลุ่มที่เป็นอันตรายมากที่สุดในหมู่วัสดุนาโน โรงงานต้องมีมาตรการป้องกันการสัมผัส โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางปอด

อุตสาหกรรม	ผลิตภัณฑ์	นาโนเทคโนโลยี/วัสดุนาโน ประโยชน์	พิษ/อันตราย/การสัมผัส หรือประเด็นด้านความปลอดภัย
ผลิตตัวเร่ง (catalyst)	ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับใช้ใน catalytic converter	อนุภาคนาโน มีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อมวลสูง จึงช่วยให้สารเร่งปฏิกิริยามีความไวต่อปฏิกิริยาทางเคมีมากขึ้นด้วย	ขั้นตอนการขึ้นรูปตัวเร่งนั้น ก็ใช้กรรมวิธีคล้ายคลึงกับอีกหลายอุตสาหกรรม ซึ่งต้องมีการรับวัตถุดิบ ซึ่งอาจมีทั้งที่เป็นผงและที่เป็นของเหลว ตรวจสอบคุณภาพ ชั่งน้ำหนัก อาจมีการบดวัตถุดิบ ผสมวัตถุดิบเข้าด้วยกันตามสูตร
ผลิตไส้กรอง	ไส้กรอง	สร้างไส้กรองจากพอลิเมอร์หลายชนิดรวมทั้งไคโตซาน ผสมด้วยสารเคมีให้เกิดรูขนาดนาโน หรือผลิตไส้กรองจากวัสดุที่มีรูพรุนขนาดนาโนตามธรรมชาติ เช่น zeolite หรือ aluminosilicate	วัสดุนาโนที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมนี้ ไม่สามารถฟุ้งกระจายหรือซึมเข้าสู่ผิวหนังได้ จึงแทบไม่ต้องห่วงเรื่องความปลอดภัยนาโน ยกเว้นการตัดวัสดุธรรมชาติอาจทำให้เกิดฝุ่นนาโนขึ้นในขั้นตอนการผลิต
ชุดตรวจโรค	Detector	เริ่มมีตัวอย่างชุดตรวจโรคแบบ Lab-on-a-chip ที่ใช้ CNT เป็น detector	ปัจจุบันการสร้างอิเล็กโทรดด้วยท่อคาร์บอนนาโนใช้วิธี Chemical Vapor Deposition (CVD) ลงบนตัวชิ้นงาน โดยทำในห้องปิดทึบเนื่องจากส่วนมากต้องทำภายใต้ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ในขณะที่สังเคราะห์ท่อคาร์บอนนาโนจึงไม่น่าจะมีการสัมผัสวัสดุนาโนได้ แต่เมื่อสังเคราะห์เสร็จแล้ว ต้องมีการนำชิ้นงานออกจากห้องปิดทึบ และล้างทำความสะอาดเครื่องมือ ซึ่งอาจมีการสัมผัสกับท่อคาร์บอนนาโน ทั้งในรูปที่ปลิวได้ และในรูปที่แขวนลอยในของเหลว
ยาและเวชภัณฑ์	แคปซูลนาโน (nanocapsule)	แคปซูลนาโนเช่น ลิโปโซม และ lipid complex ต่าง ๆ ช่วยให้ยาหรือสารออกฤทธิ์ (active ingredient) ซึมเข้าสู่ชั้นผิวหนังได้ดีกว่าการทาลงบนผิวหนัง 5-10 เท่า	โดยตัวของแคปซูลนาโนเองถือว่าไม่มีพิษ ความเป็นอันตรายขึ้นอยู่กับสารออกฤทธิ์ที่อยู่ในแคปซูลนาโนนั้น ถ้าในระหว่างขั้นตอนการผลิตมีแคปซูลนาโนเข้มข้นหกรดผู้ปฏิบัติงาน
	ยาฆ่าเชื้อโรค	มีการใช้บรรจุภัณฑ์ที่เคลือบเงินนาโนในการฆ่าเชื้อโรคให้แก่ผลิตภัณฑ์ยาที่บรรจุอยู่ในภาชนะนั้น	ผู้ปฏิบัติงานมีโอกาสสัมผัสอนุภาคเงินนาโน ทั้งทางปอดและทางผิวหนัง

อุตสาหกรรม	ผลิตภัณฑ์	นาโนเทคโนโลยี/วัสดุนาโน ประโยชน์	พิษ/อันตราย/การสัมผัส หรือประเด็นด้านความปลอดภัย
	ผ้ากอซสำหรับทำแผล	มีการทดลองใช้ผ้าก๊อซเคลือบอนุภาคเงินนาโนสำหรับฆ่าเชื้อโรค จึงทำให้แผลหายสนิทโดยไม่เกิดการติดเชื้อ	ไม่มีอันตรายต่อผู้ใช้ แต่ผู้ปฏิบัติงานในโรงงานอาจได้สัมผัสอนุภาคเงินนาโนทั้งทางปอดและทางผิวหนัง ขึ้นอยู่กับว่าเคลือบเองหรือไม่ และใช้วิธีเคลือบอย่างไร
เครื่องสำอาง	โลชั่นทากันแดด	อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนในโลชั่นทาผิวกันแดด สามารถสกัดกั้นแสงเหนือม่วงได้ในขณะที่ไม่มีสีขาวขุ่นเหมือนกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มีขนาดใหญ่กว่า จึงนิยมใช้สารกันแดดเชิงกายภาพ (physical sunscreen) ชนิดนี้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์กันแดด	ถ้าใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์นาโน แบบเป็นฝุ่น ผู้ปฏิบัติงานมีโอกาสสูดดมได้ ต้องมีการควบคุม และสวมหน้ากากกันฝุ่น ถ้าใช้วัตถุดิบเป็นอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์แบบแขวนลอยในของเหลว จะช่วยลดโอกาสการสัมผัส แต่ผู้ปฏิบัติงานก็ต้องระวังในการใช้อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล
	ครีมหรือเจลเวชสำอาง	แคปซูลนาโน ให้ความชุ่มชื้น หรือช่วยปลดปล่อยตัวยาอย่างช้า ๆ เข้าไปในผิวหนัง เช่นเดียวกับที่กล่าวแล้วในกรณีอุตสาหกรรมยา	แคปซูลนาโนเปล่า (ไม่ผสมตัวยาออกฤทธิ์) ไม่ควรจะมีอันตราย แต่ถ้าบรรจุสารเคมีแล้ว ผู้ปฏิบัติงานต้องระวังการกระเซ็นและการกระฉอก เนื่องจากมีความเข้มข้นสูงและซึมเข้าในผิวหนังได้ดี นอกจากนั้นส่วนใหญ่ไม่มีองค์ความรู้เกี่ยวกับอันตรายของสารที่ใช้เป็นตัวยา ในขณะที่มีความเข้มข้นสูง
การแพทย์	การหยั่งรู้เซลล์ที่ผิดปกติ และในการทำลายเซลล์เหล่านั้น	อนุภาค nanoshell ไส้ในเป็น silica หุ้มด้วยเปลือกทอง ถูกใช้ในการทำลายเซลล์มะเร็ง โดยอาศัยสมบัติของ nanoshell ที่ดูดแสงในช่วงคลื่น near infrared ทำให้สะสมความร้อนเพิ่มอุณหภูมิจนร้อนจัดฆ่าเซลล์มะเร็งได้	เมื่อหุ้มทองแล้ว มีความเป็นพิษน้อยจนใช้ฉีดเข้าไปในผู้ป่วยได้ แต่ถ้ายังไม่ได้หุ้มทอง อนุภาคซิลิกานาโน อาจมีความระคายเคืองค่อนข้างมาก และอาจมีความเป็นพิษด้วย ผู้ปฏิบัติงานในโรงงานหรือห้องปฏิบัติการต้องระวังไม่ให้ของเหลวหกถูกผิวหนัง
	อาหารที่มีกลิ่นหอมทนนาน	กักเก็บกลิ่นรสไว้ใน nanocapsule	ผลิตภัณฑ์ไม่เป็นอันตราย แต่อาจต้องระวังสาร flavoring ที่มีความเข้มข้นสูง อาจมีอันตรายหรือระคายเคืองได้

อุตสาหกรรม	ผลิตภัณฑ์	นาโนเทคโนโลยี/วัสดุนาโน ประโยชน์	พิษ/อันตราย/การสัมผัส หรือประเด็นด้านความปลอดภัย
อาหาร และบรรจุภัณฑ์	บรรจุภัณฑ์ยืดอายุอาหาร	ภาชนะทำจากวัสดุนาโน ที่มีรูพรุนสำหรับควบคุมการแพร่ของก๊าซออกซิเจน ทำให้อาหารเช่นเนื้อสัตว์ดูสดอยู่นาน	ตัวนาโนฟิล์มที่เป็นผลิตภัณฑ์ไม่น่ามีอันตราย แต่ต้องระวังวัตถุดิบ ซึ่งอาจไม่ใช่วัสดุนาโน แต่ก็มีความเป็นอันตรายได้
	บรรจุภัณฑ์ฆ่าเชื้อโรค	ภาชนะบรรจุอาหาร ภายในเคลือบอนุภาคเงินนาโน เพื่อฆ่าจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสีย	ผู้ปฏิบัติงานต้องใช้ความระมัดระวัง และปฏิบัติตามหลักความปลอดภัย เมื่อทำงานกับวัตถุดิบที่เป็นเงินนาโน หรือชิ้นงานที่เคลือบแล้ว
เครื่องใช้ในบ้าน	เครื่องใช้ที่ฆ่าเชื้อโรคได้บนพื้นผิว	เคลือบหรือผสมด้วยอนุภาคเงินนาโนที่มีคุณสมบัติฆ่าเชื้อโรค	โรงงานอุตสาหกรรมจำเป็นต้องมีมาตรการเพื่อลดการสัมผัสกับวุสดุนาโนโดยผู้ปฏิบัติงาน รายละเอียดของมาตรการอยู่ที่วิธีเคลือบอนุภาคเงินนาโน แต่ขั้นตอนหลักคือการผสมอนุภาคเงินนาโนเข้ากับเนื้อของภาชนะก่อนนำไปให้ความร้อนหรือขึ้นรูป การลดโอกาสสัมผัสทำได้ตั้งแต่การรับวัตถุดิบ การควบคุมคุณภาพ ไปจนถึงการชั่ง และการนำเข้าเครื่องผสม
สิ่งทอ และเครื่องนุ่งห่ม	เสื้อนาโนฆ่าเชื้อโรคไม่เหม็นแม้ไม่ได้ซัก	ผสมหรือเคลือบด้วยอนุภาคเงินนาโนซึ่งฆ่าเชื้อโรคที่ทำให้เกิดกลิ่นเหม็น	โรงงานอุตสาหกรรมจำเป็นต้องมีมาตรการเพื่อลดการสัมผัสกับวุสดุนาโนโดยผู้ปฏิบัติงาน รายละเอียดของมาตรการอยู่ที่วิธีเคลือบอนุภาคเงินนาโน การลดโอกาสสัมผัสทำได้ตั้งแต่การรับวัตถุดิบ การควบคุมคุณภาพ ไปจนถึงการชั่ง และการนำเข้าถังเคลือบ
	เสื้อเสริมความแข็งแรง ระบายความร้อน หรือเป็นฉนวนไฟฟ้า	เส้นใยธรรมชาติหรือสังเคราะห์ เสริมความเข็งแรงด้วยท่อคาร์บอนนาโน	ท่อคาร์บอนนาโนอาจฟุ้งกระจายในระหว่างการผลิต ซึ่งอาจเน้นการกระจายตัวของเส้นใยเพื่อให้ได้ความหนาแน่นทั่วทั้งผืนผ้า จำเป็นต้องใช้มาตรการควบคุมเช่นทำในห้องปิด มีระบบกรองและระบายอากาศ ประกอบกับใช้อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล
	ไข (wax) สำหรับเคลือบใต้ไม้สกี	ไขนาโนช่วยลดแรงเสียดทาน ทำให้สกีไถลไปได้ไกลขึ้น	ถ้าใช้วัตถุดิบเป็นวัสดุนาโน ต้องกระวังการสัมผัสโดยเฉพาะการหายใจฝุ่นนาโน ถ้าสังเคราะห์วัสดุนาโนขึ้นในระหว่างขั้นตอนการผลิต ก็ระวังการสัมผัสวัสดุนาโนเข้มข้น

อุตสาหกรรม	ผลิตภัณฑ์	นาโนเทคโนโลยี/วัสดุนาโน ประโยชน์	พิษ/อันตราย/การสัมผัส หรือประเด็นด้านความปลอดภัย
เครื่องกีฬา	ไม้เทนนิส	ไม้เทนนิสเสริมท่อคาร์บอนนาโน ให้ความแข็งแรง	ไม่ควรใช้กรรมวิธีที่ต้องการท่อคาร์บอนนาโน เป็นวัตถุดิบ แต่ควรใช้วัตถุดิบเป็นผ้าท่อคาร์บอนนาโน ซึ่งเป็นท่อคาร์บอนนาโนที่ถูกฝังไว้ในพอลิเมอร์ แล้วขึ้นรูปเป็นแผ่นบาง จะทำให้ลดโอกาสการฟุ้งกระจาย ทำให้ไม่ต้องใช้มาตรการควบคุมมาก
	ลูกเทนนิส	ลูกเทนนิสที่เคลือบภายในแกนด้วย clay polymer nanocomposite มีอายุยืนกว่าลูกเทนนิสปกติเท่าตัว	ในกรณีที่วัสดุนาโนอยู่ในรูปผงฝุ่น ผู้ปฏิบัติงานจะมีโอกาสสัมผัสกับวัสดุนาโนได้มากที่สุด จึงมีความจำเป็นต้องหาทางป้องกันหรือลดการฟุ้งกระจาย มีมาตรการป้องกันบริเวณทำงาน และคุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล
	ชุดว่ายน้ำ	ผ้านาโนไม่เปียกน้ำ เนื่องจากถูกปกคลุมด้วยตุ่มเล็ก ๆ ที่มีขนาดนาโน ทำนองเดียวกับผิวของใบบัว ทำให้นักว่ายน้ำมีแรงเสียดทานจากน้ำน้อยลง จึงควรว่ายน้ำได้เร็วขึ้น	อันตรายและวิธีป้องกันขึ้นอยู่กับวิธีขึ้นรูปตุ่มเล็ก ๆ ขนาดนาโนบนผิวของผ้า ถ้าใช้วิธีอิเล็กโตรสเปรย์ ต้องระวังการฟุ้งของหยดนาโนที่พ่นออกไป ปกติต้องทำในตู้ปิดสนิท เสริมด้วยอุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล

ที่มา:

รายงานการศึกษาฉบับกลาง โครงการถ่ายทอดเทคโนโลยีด้านความปลอดภัยแก่สถานประกอบการ: โครงการจัดทำแนวปฏิบัติเบื้องต้นด้านความปลอดภัยนาโนสำหรับภาคอุตสาหกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยจัดทำให้กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม สิงหาคม 2554

ภาคผนวก 3

IFCS Intergovernmental Forum on Chemical Safety
Global Partnerships for Chemical Safety

ถ้อยแถลงดาการ์เรื่องวัสดุนาโนที่ผลิตขึ้น

(Dakar Statement on Manufactured Nanomaterials)

จากการประชุมครั้งที่ 6 (Forum VI) ของเวทีความร่วมมือระหว่างรัฐบาล ว่าด้วยความปลอดภัยด้านสารเคมี (IFCS) เมื่อปี 2008 ที่กรุงดาการ์ ประเทศเซเนกัล

ถ้อยแถลงนี้เป็นเอกสารนโยบายฉบับแรกในระดับโลก ที่แสดงให้เห็นความเป็นห่วงใยของนานาอารยประเทศ ต่อประเด็นความปลอดภัยของวัสดุนาโนที่ผลิตขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในข้อเสนอแนะที่ 7 และ 8 ได้เน้นถึงความจำเป็นที่จะต้องใช้มาตรการลดการสัมผัส ระหว่างผู้ปฏิบัติงานในโรงงานอุตสาหกรรมกับวัสดุนาโน และความจำเป็นในการมีส่วนร่วมของผู้ปฏิบัติงานในโรงงานอุตสาหกรรมในการพัฒนามาตรการทางชีวอนามัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของวัสดุนาโน

อนึ่ง ในปีถัดมา องค์การสหประชาชาติ ภายใต้ยุทธศาสตร์การดำเนินงานระหว่างประเทศว่าด้วยการจัดการสารเคมี (SAICM) ได้ขานรับถ้อยแถลงดาการ์ ด้วยการนำประเด็นความปลอดภัยของนาโนเทคโนโลยีและวัสดุนาโน เข้าในการประชุมระหว่างประเทศว่าด้วยการจัดการสารเคมีครั้งที่สอง (ICCM2) จนได้เป็นข้อมติ ซึ่งได้นำเสนอไว้ในภาคผนวกถัดไป

Preamble

1. The IFCS met in Dakar at the invitation of the Government of Senegal at the sixth session of the Intergovernmental Forum on Chemical Safety from 15-19 September 2008.
2. The potential benefits, new opportunities, challenges, hazards, risks, ethical and social issues of manufactured nanomaterials and nanotechnologies were recognized and the need to raise the awareness of these was also acknowledged.
3. The necessity to address the safety aspect of nanotechnologies has been acknowledged. Nanotechnologies deal with visualizing, characterizing and manufacturing tailored materials, devices and systems in the size of <= 100 nm. For this statement, it was agreed to focus on safety aspects of nanomaterials only.
4. The ongoing work of intergovernmental and international organizations and relevant ongoing national and regional activities of governments and nongovernmental organizations were taken into account. It was agreed that current efforts

to identify potential environmental, health and safety risks of manufactured nanomaterials have not yet been fully conclusive and therefore efforts need to be expanded and supported globally.

5. Although recognising many national and regional activities dealing with manufactured nanomaterials, many countries lack comprehensive policy frameworks, despite rapid development. The lack of an inclusive global policy framework was also noted.
6. The special vulnerability of groups like children, pregnant women and elderly people to manufactured nanomaterials is recognized and therefore the need to take appropriate safety measures to protect their health are emphasized.
7. The need to ensure contributions of manufactured nanomaterials to sustainable development and pollution prevention to achieve the 2020 goal was emphasized. The necessity to adequately embed risk assessment and risk management strategies into work in this area was underlined.
8. The requirement for research and research strategies to support better analysis of the potential risks on human health and the environment were acknowledged.
9. The special needs and capacities of developing countries and countries with economies in transition to cope with manufactured nanomaterials were noted.
10. In order to strive to achieve the minimization of risks of manufactured nanomaterials, the rights of countries to accept or reject manufactured nanomaterials was recognized.

The Forum recommends:

1. Governments and industry apply the precautionary principle as one of the general principles of risk management throughout the life cycle of manufactured nanomaterials.
2. Governments and stakeholders initiate or continue dialogue to consider the potential benefits and risks of manufactured nanomaterials.
3. Governments, intergovernmental and international organizations, universities, private sectors and other stakeholders make information on the use and risks associated with the life cycle of manufactured nanomaterials readily accessible to the general public in order to raise awareness and prepare it for informed decisions.
4. The capacity of civil society be strengthened so that it may effectively take part in decision making related to manufactured nanomaterials.
5. Researchers and academics increase knowledge necessary in evaluating effectively the potential risks of nanomaterials especially for particularly vulnerable groups, e.g. children, pregnant women and elderly people.
6. Governments and industries continue to fill gaps in knowledge of risk assessment including the whole life cycle of manufactured nanomaterials under real world conditions.
7. Industry involves workers and their representatives when developing occupational health and safety programs and measures, including risk assessment, selection of risk prevention measures and the surveillance of risks related to manufactured nanomaterials.
8. Measures be taken to prevent or minimize exposure of workers and releases to environment, particularly for hazardous manufactured nanomaterials or where there is uncertainty around the environmental and human health impact of manufactured nanomaterials.

9. Researchers employing manufactured nanomaterials cooperate with environment and health and safety experts and medical communities on existing and planned research programs.
10. The international community continues to develop, fund, and share effective research strategies on potential risks to human health and the environment.
11. Downstream users through the whole supply chain be informed about health and safety risks and novel characteristics of manufactured nanomaterials via Material Safety Data Sheets (MSDS) or other means.
12. Industry continues or initiates communications and awareness raising within their responsible stewardship programs on environmental and health and safety (occupational) aspects of manufactured nanomaterials including workplace monitoring and instigates further cooperative approaches between industry and other stakeholders.
13. Governments and stakeholders promote and share safety information on manufactured nanomaterials.
14. Countries and organizations establish partnerships, with consideration of financial support, to assist developing countries and countries with economies in transition to build scientific, technical, legal, regulatory policy expertise related to the risks of manufactured nanomaterials.
15. Governments according to their capacity, to cooperate in the preparation of national codes of conduct with inclusion of all stakeholders, and assisted by international organizations and evaluate the feasibility of developing global codes of conduct in a timely manner.
16. Governments exchange relevant information on manufacturing nanomaterials while exploring the need for changes to current legislative frameworks.
17. International Standards Organisation (ISO) expedites its ongoing development of clear definitions of manufactured nanomaterials including but not limited to size characteristics.
18. Producers to provide appropriate information about the content of manufactured nanomaterials in order to inform consumers about potential risks through product labeling and, as appropriate, websites and databases.
19. Governments, intergovernmental, international organizations and nongovernmental organizations, industry and other stakeholders support these recommendations.
20. Intergovernmental organizations and other relevant organizations consider how they may assist governments to implement these recommendations.
21. The second session of the International Conference on Chemicals Management (ICCM2) consider these recommendations for further actions.

ที่มา:

1. เอกสาร IFCS/FORUM-VI/07w 10 October 2008 (Forum VI Final Report)
http://www.google.com/url?sa=t&source=web&cd=8&sqi=2&ved=0CFEQFjAH&url=http%3A%2F%2Fwww.wecf.eu%2Fdownload%2F2008%2F08-09DakarstatementNano.doc&rct=j&q=Dakar%20Statement%20on%20Manufactured%20Nanomaterials&ei=lYCGTtfCAsLtrAfc5r2_DA&usg=AFQjCNFdgxKmTk_juvOEG3Y6cuV_iAXnwQ&cad=rja

2. เลอสรร ธนสุกาญจน์ 2553. *นาโนเทคโนโลยี: ความปลอดภัยและจริยธรรม.* ศูนย์นวัตกรรมนาโนเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

3. NANOTEC. 2010. ร่างแผนยุทธศาสตร์ความปลอดภัยและจริยธรรมนาโนเทคโนโลยี ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (V 0.3)

ภาคผนวก 4

ข้อมติความร่วมมือด้านนาโนเทคโนโลยี และวัสดุนาโนที่ผลิตขึ้น

(Resolution on cooperative actions on nanotechnology and manufactured nanomaterials)

ของการประชุมระหว่างประเทศว่าด้วยการจัดการสารเคมีครั้งที่สอง

(Second International Conference on Chemicals Management, ICCM2)

ภายใต้ยุทธศาสตร์การดำเนินงานระหว่างประเทศว่าด้วยการจัดการสารเคมี

(Strategic Approach to International Chemical Management, SAICM)

องค์การสหประชาชาติ ภายใต้ยุทธศาสตร์การดำเนินงานระหว่างประเทศว่าด้วยการจัดการสารเคมี (SAICM) ได้ขานรับถ้อยแถลงดาการ์ (Dakar Statement on Manufactured Nanomaterials) ที่ได้นำเสนอไว้ในภาคผนวก 3 ด้วยการนำประเด็นความปลอดภัยของนาโนเทคโนโลยีและวัสดุนาโนเข้าในการประชุมระหว่างประเทศว่าด้วยการจัดการสารเคมีครั้งที่สอง (ICCM2) ในฐานะประเด็นเกิดใหม่ที่เป็นความห่วงใยระดับโลก (new and emerging issue of global concern) จนได้เป็นข้อมติดังต่อไปนี้ (15 ข้อแรกเป็นท่อนกล่าวนำ ข้อ 16-43 เป็นสิ่งที่จะดำเนินการต่อไป ส่วนที่ยังติดวงเล็บอยู่เป็นข้อความที่จะนำไปตกลงกันต่อในการประชุมคราวต่อไป หรือ ICCM3 ที่จะจัดขึ้นในปี พ.ศ. 2555)

เนื้อหาที่เกี่ยวกับสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานในโรงงานอุตสาหกรรมนั้น อยู่ในข้อ 8, 22, 23, 27 และ 38 โดยที่นอกจากจะเป็นการสะท้อนหลักการที่ได้มาจากถ้อยแถลงดาการ์แล้ว ยังมีมาตรการที่เป็นรูปธรรมอยู่ในข้อ 38 คือที่ประชุมได้ขอร้องให้องค์การอนามัยโลก (WHO) และองค์การแรงงานระหว่างประเทศ (ILO) ไปช่วยกันพัฒนาเอกสารแนวปฏิบัติ เพื่อลดความเสี่ยงในการทำงานกับนาโนเทคโนโลยีและวัสดุนาโน (guidance document on occupational health risks from nanotechnology and manufactured nanomaterials) ให้ใช้ได้กับประเทศที่พัฒนาแล้ว ประเทศกำลังพัฒนา และประเทศที่อยู่ในระหว่างการเปลี่ยนแปลงสภาพเศรษฐกิจ (countries with economies in transition) ในขณะที่เขียนแนวปฏิบัติเบื้องต้นเล่มนี้อยู่ องค์การอนามัยโลกเพิ่งจะเริ่มการพัฒนาแนวปฏิบัติดังกล่าว โดยมีกำหนดแล้วเสร็จในปี พ.ศ. 2556

1. There are potential benefits and new opportunities associated with the use of nanotechnology and nanomaterials, but also challenges, potential environmental health and safety risks and ethical and social issues. There is a need to raise awareness of these issues.
2. Nanotechnologies deal with visualizing, characterizing and manufacturing tailored materials, devices and systems typically in the size range between 1 and 100 nm.
3. Governments that have not yet done so may wish to consider the relevance of nanotechnology and manufactured nanomaterials to their national situation. This could be done by, for example, integrating nanotechnology considerations into the national profile.
4. Various activities are being undertaken by academic institutions, industry and Governments related to the environmental health and safety of manufactured nanomaterials and to their applications that may benefit the environment. Relevant stakeholders should consider making publicly available as much of this information as possible, including through clearing houses.
5. It is important to take into account the relevant work of intergovernmental and international organizations, in addition to the national and regional activities of Governments and non-governmental organizations. [The Organisation for Economic Cooperation and Development has opened up its two working parties3 to permit active participation by non-member economies and other observers. Non-member countries or other interested observers are encouraged to contact the Organization's secretariat and participate in the relevant working parties' activities].
6. Some Governments are devoting considerable resources to research and development into new applications based on nanotechnology. Those Governments may wish to consider balancing such resources with appropriate sums for research into the environmental health and safety implications.
7. There is a need to ensure that manufactured nanomaterials are produced and used in a way that will contribute to the 2020 World Summit on Sustainable Development goals related to chemicals. It is important for risk assessment and risk management strategies to be incorporated into this effort. Governments may wish to consider funding research into nanotechnology applications that may be useful in taking the actions called for in the Plan of Implementation of the World Summit on Sustainable Development, including in developing countries and countries with economies in transition.
8. While the environmental health and safety implications of manufactured nanomaterials continue to be explored, Governments and industry should consider taking measures to prevent or minimize exposure of workers and consumers, and releases to the environment, particularly for hazardous manufactured nanomaterials or where there is uncertainty as to the environmental and human health impact. Steps to inform downstream users through the entire supply chain via material safety data sheets or other means should be taken where appropriate.
9. [Although many national and regional activities dealing with manufactured nanomaterials are rapidly developing, many countries lack comprehensive policy frameworks. The lack of an inclusive global policy framework has also been noted.]
10. [The special vulnerability of groups such as children, pregnant women and older persons to manufactured nanomaterials is recognized and therefore the need to take appropriate safety measures to protect their health is emphasized.]
11. [Further research and research strategies to support better analysis of the potential risks to human health and the environment are required.]

12. [The needs and capacities of developing countries and countries with economies in transition to cope with manufactured nanomaterials must be better understood.]
13. [With a view to minimizing risks posed by manufactured nanomaterials, the rights of countries to accept or reject manufactured nanomaterials with no discrimination between domestic products and imports is recognized.]
14. [Nanotechnology and manufactured nanomaterials are an important new and emerging issue. The International Conference on Chemicals Management at its second session decides to amend the Global Plan of Action of the Strategic Approach to International Chemicals Management to include the new work area "Nanotechnology and manufactured nanomaterials" and the new specific activities as set out in the appendix to the present resolution.]
15. [Governments and industry should ensure that manufactured nanomaterials are treated in a precautionary manner throughout their life cycle.]

[Next steps:

16. [Products containing nanomaterials are already on the market but standards for nanomaterials are not yet available. Governments should therefore make recommendations on how to handle nanomaterials safely based on existing knowledge.]
17. Governments and stakeholders should begin or continue dialogue to consider the potential benefits and risks of manufactured nanomaterials.
18. Governments, intergovernmental and international organizations, universities, the private sector and other stakeholders should make information on the use and risks associated with the life cycle of manufactured nanomaterials readily available to the general public [with an executive summary intended for non-scientists] to raise awareness and enable informed decisions. [Clearing-house mechanisms employing information and communication technologies substantially facilitate the useful sharing of national and international information in an efficient, simple and well-structured manner. Publicly accessible internet-based web portals providing access to information on nanotechnology research and policymaking may serve to promote informed decision-making and public acceptance of policy outcomes.]
19. [The capacity of civil society should be strengthened so that it may participate effectively in decision-making related to manufactured nanomaterials. [National education systems should be involved in sharing information on the potential benefits and risks of nanomaterials.]]
20. Researchers and academics should undertake further research to evaluate effectively the potential risks of nanomaterials [especially for particularly vulnerable groups, such as children, pregnant women and older persons.]
21. Governments and industry should continue to fill gaps in risk assessments relating to the entire life cycle of manufactured nanomaterials under real-world conditions.
22. [Industry should involve workers and their representatives when developing occupational health and safety programmes and measures, including risk assessment, selection of risk prevention measures and the surveillance of risks related to manufactured nanomaterials.]
23. Measures should be taken to prevent or minimize the exposure of workers and releases to the environment, [where appropriate] [particularly for hazardous manufactured nanomaterials or where there is uncertainty as to the environmental and human health impact of manufactured nanomaterials].
24. [Researchers using manufactured nanomaterials should cooperate with environment and health and safety experts and medical communities in existing and planned research programmes.]

25. [The international community should continue to develop, fund and share effective research strategies on potential risks to human health and the environment.]
26. Governments and organizations should consider how best to inform downstream users of nanomaterials about the health and safety risks and novel characteristics of manufactured nanomaterials, and establish what level of information is appropriate, using, for example, material safety data sheets.
27. [Industry should continue or initiate communications and awareness-raising within stewardship programmes on environmental and health and safety (occupational) aspects of manufactured nanomaterials, including workplace monitoring, and instigate further cooperative approaches between industry and other stakeholders.]
28. Governments and stakeholders should promote ways to share safety information on manufactured nanomaterials, while exploring the need for changes to current legislative frameworks, stewardship programmes and voluntary activities.
29. [Countries and organizations should establish partnerships, with a view to providing financial support, to assist developing countries and countries with economies in transition to build scientific, technical, legal and regulatory policy expertise related to the risks of manufactured nanomaterials.]
30. [Governments, according to their capacity, should cooperate in drawing up national codes of conduct, with the inclusion of all stakeholders and assisted by international organizations, and [encourage them to participate actively in global discussions] [evaluate the feasibility of developing global codes of conduct in a timely manner.]]
31. [Producers should provide appropriate information about the content of manufactured nanomaterials to inform consumers about potential risks through, as appropriate, product labelling and, as appropriate, websites and databases.]
32. Intergovernmental organizations and other relevant organizations should assist Governments to implement these actions.
33. [Governments and industry should seek to promote alternatives to nanomaterials.]
34. [The international community should develop and fund capacity-building for Governments and civil society, including in developing countries and countries with economies in transition.]
35. [Governments should establish a system of nanomaterial registration for specific uses.]
36. [Non-governmental organizations should be encouraged to be involved in aspects related to the sound management of nanomaterials.]
37. Governments, intergovernmental, international and non-governmental organizations, industry and other stakeholders should support these recommendations.
38. [The Conference requests the World Health Organization and the International Labour Organization to develop a guidance document on occupational health risks from nanotechnology and manufactured nanomaterials that is relevant to developed countries, developing countries and countries with economies in transition.]
39. [The Conference creates an intersessional working group to help to fulfil and implement paragraph 14 (g) of the Overarching Policy Strategy of the Strategic Approach to ensure that existing, new and emerging issues of global concern are sufficiently tackled by means of appropriate mechanisms. The working group is tasked with exploring issues relevant to developing countries and countries with economies in transition (including a review of existing information on nanotechnology, and information exchange on products containing nanomaterials, potential health and environmental effects). In addition, the working group develops documents relating to the social and ethical issues surrounding nanotechnology for developing countries and countries with economies in transition, together with legislative guidance on specific legal framework and policies relating to nanomaterials and nanotechnology.]

40. [The working group conducts its business during the intersessional period, primarily through electronic means and teleconferences, meeting in person on the margins of other existing meetings, as appropriate, and ensures that such work is open and transparent in nature.]

41. [The working group considers the following elements where appropriate:

(a) Exchanging information on products containing nanomaterials;

(b) Exchanging information on existing and proposed regulations and legislation;

(c) Exchanging information on the effects of nanomaterials on human health and the environment;

(d) Exchanging information and providing international support to strengthen existing national legislation relating to the protection of human health in relation to nanotechnology and manufactured nanomaterials;

(e) Exchanging information on product labelling;

(f) Building capacity to facilitate laboratory tests for nanomaterials;

(g) Building capacity to manage wastes containing manufactured nanomaterials;

(h) Developing legislative guidance on an extended producer liability scheme;

(i) Developing a thought-starter document on the social and ethical issues surrounding nanotechnology and manufactured nanomaterials for developing countries and countries with economies in transition].

42. [The working group reports on the progress of its work through the Strategic Approach website and to the International Conference on Chemicals Management at its third session].

43. The International Conference on Chemicals Management at its third session should consider the need for possible further action on this issue.]

ที่มา

เอกสาร Revised draft document setting out possible cooperative actions on nanotechnology and manufactured nanomaterials http://www.google.com/url?sa=t&source=web&cd=1&ved=0CBsQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.saicm.org%2Fdocuments%2Ficcm%2FICCM2%2Femerging%2520issues%2FNano%2Fnano_cooperative%2520actions_revised%2520draft090227.doc&ei=AYWGTp2QO8WrrAfv8ITBDA&usg=AFQjCNF6UtughsKVfPQfEE4fyudelc_iLA

ภาคผนวก 5

หลักการพื้นฐานที่ใช้กับความปลอดภัยนาโน

แนวโน้มของนานาอารยประเทศในโลกเกี่ยวกับความปลอดภัยนาโน เริ่มต้นด้วยการยึดถือหลักการพื้นฐานดังต่อไปนี้

หลักการ	รายละเอียด	อ้างอิง
หลักการพัฒนาที่ยั่งยืน (sustainable development)	เป้าหมายตามการประชุมสุดยอด “2020 World Summit on Sustainable Development goals related to chemicals”	ICCM2 ข้อ 7 NGOs Principles for the Oversight of NT & NM
หลักลดความเสี่ยง (risk reduction)	ดำเนินการบริหารความเสี่ยง โดยประเมินความเสี่ยงที่มีอยู่ และใช้มาตรการควบคุมเพื่อลดความเสี่ยงลงจนอยู่ในระดับที่รับได้	SAICM Overarching Policy No. 1
หลักป้องกันไว้ก่อน (precuationary principle)	หลักการป้องกันไว้ก่อน (Precautionary Principle) เป็นหลักการจัดการเชิงรุกที่เน้นการป้องกันผลกระทบล่วงหน้า โดยแม้ยังไม่มีข้อมูลทางวิทยาศาสตร์พร้อมมูล แต่ถ้านโยบายหรือกิจกรรมใดมีความเสี่ยงที่จะก่อความเสียหายต่อสาธารณชนหรือต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว ภาระการพิสูจน์ว่านโยบายหรือกิจกรรมนั้นไม่ก่อความเสียหายจะตกอยู่กับผู้สนับสนุนนโยบายหรือกิจกรรมนั้น	NGOs Principles for the Oversight of NT & NM Dakar Statement ข้อ 1, 18 ICCM2 ข้อ 15 แผนจัดการคุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2550-2554
หลักประชาสังคม (civil society)	ประชาสังคม หมายถึงบทบาทรวมตัวกันของประชาชน ที่มีความเข้มแข็งในการขับเคลื่อนทางการเมืองอย่างเป็นอิสระจากรัฐและทุน ทั้งนี้เพื่อสร้างหลักประกันชีวิตความเป็นอยู่ ความมั่นคงด้านอาหาร ในการงานอาชีพ สิทธิเสรีภาพ ความเสมอภาคเท่าเทียม และความเป็นธรรม การตัดสินใจเกี่ยวกับนโยบายและมาตรการด้านความปลอดภัยนาโนจะต้องให้ภาคประชาชนมีส่วนร่วมในทุกขั้นตอน	Dakar Statement ข้อ 4 ICCM2 ข้อ 19
หลักความโปร่งใส (transparency)	ขั้นตอน เงื่อนไข ข้อมูลต่าง ๆ ในทุกกิจกรรม ต้องเปิดเผยต่อสาธารณชนอย่างตรงไปตรงมา ให้ประชาชนสามารถเข้าถึงได้สะดวก มีระบบตรวจสอบประเมินผลที่มีประสิทธิภาพ	NGOs Principles for the Oversight of NT & NM
หลักธรรมาภิบาล (good governance)	ธรรมาภิบาลประกอบด้วยหลักการสำคัญ 6 ประการ ได้แก่ หลักนิติธรรม หลักคุณธรรม หลักความโปร่งใส หลักการมีส่วนร่วม หลักความรับผิดชอบ และหลักความคุ้มค่า	SAICM Overarching Policy No. 3

หลักการ	รายละเอียด	อ้างอิง
หลักการมีส่วนร่วมของประชาชน (public participation)	เป็นส่วนหนึ่งของหลักประชาสังคมดังกล่าวแล้วข้างต้น การตัดสินใจเกี่ยวกับนโยบายและมาตรการด้านความปลอดภัยนาโนจะต้องให้ภาคประชาชนมีส่วนร่วมในทุกขั้นตอน	NGOs Principles for the Oversight of NT & NM
หลักการพิจารณาผลกระทบในวงกว้าง (inclusion of broader impacts)	พิจารณาผลกระทบทางตรงและทางอ้อม พิจารณาผลกระทบต่อประชาชนกลุ่มต่าง ๆ พิจารณาผลกระทบในระยะสั้น ระยะกลาง ระยะยาว พิจารณาผลกระทบในพื้นที่เช่นในจังหวัดนั้น จังหวัดรอบ ๆ ประเทศ โลก	NGOs Principles for the Oversight of NT & NM
หลักผู้สร้างผลกระทบต้องรับผิด (manufacturer liability)	โรงงานที่ก่อปัญหาสุขภาพและสิ่งแวดล้อมต้องแสดงความรับผิดชอบด้วยการสำรวจและควบคุมตัวเอง ประกอบกับให้ข้อมูลด้านความปลอดภัยแก่ผู้มีส่วนได้เสียอื่น รวมทั้งลูกค้า ผู้ปฏิบัติงานในโรงงาน และประชาชนทั่วไป สิ่งเหล่านี้เป็นสิ่งที่ภาครัฐควรสนับสนุนให้เกิดขึ้นในภาคเอกชน	NGOs Principles for the Oversight of NT & NM Dakar Statement ข้อ 12 ICCM2 ข้อ 27, 28
หลักการบังคับอย่างเข้มงวด (mandatory nano-specific regulations)	พัฒนากฎหมายระเบียบข้อบังคับอย่างเข้มงวด ที่ใช้กับวัสดุนาโนโดยเฉพาะ	NGOs Principles for the Oversight of NT & NM
หลักการความเป็นหุ้นส่วนระหว่างรัฐ-เอกชน (public-private partnership)	Public-Private Partnership เป็นหลักการที่ใช้สร้างการร่วมรับผิดชอบและควรนำมาใช้ควบคู่กับหลักการผู้ก่อมลพิษเป็นผู้จ่าย เพื่อส่งเสริมให้ภาคเอกชนเข้ามาลงทุนและมีบทบาทในการจัดการสิ่งแวดล้อมมากขึ้น	แผนจัดการคุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2550-2554
หลักการให้ผู้ก่อมลพิษเป็นผู้จ่าย (polluters pay principle, PPP)	Polluters Pay Principle (PPP) เป็นหลักการของความรับผิดชอบที่ให้ผู้ก่อมลพิษไม่ผลักภาระในการกำจัดมลพิษที่เกิดจากกิจกรรมของตนไปสู่สังคมและสิ่งแวดล้อม โดยเน้นการบังคับใช้กฎหมายอย่างจริงจัง และผลักดันให้มีการใช้เครื่องมือทางเศรษฐศาสตร์มาช่วยสนับสนุนการจัดการให้มากขึ้น หลักการนี้ก่อตัวขึ้นในประเทศสมาชิก OECD หลายประเทศในช่วงปี พ.ศ. 2513-2522 และประเทศไทยได้รับเอาหลักการนี้มาใช้ในช่วงปี พ.ศ. 2523-2532	แผนจัดการคุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2550-2554

หลักการ	รายละเอียด	อ้างอิง
หลักการให้ผู้ได้รับผลประโยชน์เป็นผู้จ่าย (beneficiaries pay principle)	ในประเทศที่มีคนยากจนเป็นจำนวนมาก การใช้หลักการ PPP เพียงอย่างเดียว อาจทำให้บริษัทผู้ก่อมลพิษ ผลักภาระการกำจัดมลพิษไปสู่ประชาชนส่วนใหญ่ที่ยากจน แต่ประชาชนส่วนน้อยที่ร่ำรวยเป็นผู้ได้รับผลประโยชน์จากสภาวะแวดล้อมที่ดีขึ้น ดังนั้นนักเศรษฐศาสตร์จึงคิดหลักการทางเลือกขึ้น โดยให้ผู้ได้รับผลประโยชน์เป็นผู้จ่ายด้วย	แผนจัดการคุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2550-2554
หลักการ extended product liability	แทนที่จะสนใจเฉพาะกระบวนการผลิต ว่าสร้างมลพิษแค่ไหนเพียงใด แต่ให้สนใจที่ตัวสินค้าด้วย โดยติดตามดูไปตลอดชั่วอายุ (life cycle) จนสินค้ากลายเป็นขยะ ว่าจะไปก่อให้เกิดมลภาวะหรือปัญหาสุขภาพต่อประชาชนหรือไม่	ICCM2 ข้อ 41g
หลักการขึ้นทะเบียนวัสดุนาโน (nanomaterials registration system)	พัฒนาระบบจดทะเบียนวัสดุนาโนตามลักษณะการใช้งาน (system of nanomaterials registration for specific uses)	ICCM2 ข้อ 35
ตระหนักว่าทุกอย่างมีข้อดีและข้อเสีย	ทุกฝ่ายตระหนักว่านาโนเทคโนโลยีมีศักยภาพที่จะก่อประโยชน์มากมาย ในขณะที่มีความเสี่ยงต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม และประเด็นจริยธรรมเช่นกัน	ICCM2 ข้อ 1, 6
รัฐมียุทธศาสตร์การวิจัย	มีความจำเป็นในการตั้งยุทธศาสตร์การวิจัย แล้วลงมือทำวิจัยเพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ประเมินความเสี่ยงของวัสดุนาโน ตลอดชั่วอายุขัยของผลิตภัณฑ์	Dakar Statement ข้อ 5, 6, 10 ICCM2 ข้อ 11, 21, 25
รัฐมีนโยบายและกฎหมายนาโน	อาจต้องมีนโยบายและออกกฎหมายใหม่ และ/หรือ แก้กฎหมายที่มีอยู่ เพื่อลดผลกระทบด้านความปลอดภัยและจริยธรรมนาโน	ICCM2 ข้อ 9, 28, 39
รัฐมีแนวปฏิบัติความปลอดภัยนาโน	รัฐบาลและผู้มีส่วนได้เสียจัดทำประมวลแนวปฏิบัติ (codes of conduct) ทั้งในระดับชาติ และนานาชาติ	Dakar Statement ข้อ 15 ICCM2 ข้อ 30
รัฐให้ความสำคัญต่อสุขภาพอนามัยของผู้ใช้แรงงานและนักวิจัยนาโน	รัฐบาลต้องให้ความสำคัญต่อสุขภาพอนามัยของผู้ใช้แรงงาน และนักวิจัยนาโน	NGOs Principles for the Oversight of NT & NM Dakar Statement ข้อ 7, 8, 9, 12 ICCM2 ข้อ 22, 23, 24, 27, 38

หลักการ	รายละเอียด	อ้างอิง
มีมาตรการพิเศษ	มีมาตรการพิเศษ สำหรับป้องกันกลุ่มเปราะบาง เช่น เด็ก คนชรา และสตรีมีครรภ์	ICCM2 ข้อ 10, 20
การหาวัสดุทดแทน	วัสดุทดแทน ที่มีความเสี่ยงน้อยกว่าวัสดุนาโนบางชนิดที่มีความเสี่ยงสูง ต้องได้รับการพัฒนาและนำไปใช้งาน	ICCM2 ข้อ 33
การแลกเปลี่ยนข้อมูลและความคิด	การแลกเปลี่ยนข้อมูลและความคิดระหว่างรัฐบาลของประเทศต่าง ๆ กับผู้มีส่วนได้เสีย เกี่ยวกับ • ผลิตภัณฑ์ที่มีวัสดุนาโนอยู่ด้วย • มาตรการเกี่ยวกับฉลาก • กฎหมายระเบียบข้อบังคับในปัจจุบันและที่เสนอแนะ • ผลกระทบของวัสดุนาโนต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม	Dakar Statement ข้อ 2, 13, 16 ICCM2 ข้อ 17, 28, 41a, 41b, 41c, 41d, 41e
การเปิดเผยข้อมูลความปลอดภัยต่อสาธารณชน	การเปิดเผยข้อมูลต่อสาธารณชน เพื่อสร้างความตื่นตัว และให้ประชาชนเตรียมตัวตัดสินใจ Public Disclosure เป็นหลักการที่ใช้กระบวนการทางสังคมมาสนับสนุนกระบวนการมีส่วนร่วมโดยให้ประชาชนและเอกชนหรือผู้มีส่วนได้ส่วนเสียเข้ามา มีส่วนร่วมในการดูแล เฝ้าระวังและติดตามตรวจสอบผลกระทบต่อทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เพื่อสร้างแรงกดดันทางสังคมให้แก่ผู้ที่สร้างความเสื่อมโทรมต่อทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม	แผนจัดการคุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2550-2554 Dakar Statement ข้อ 3, 11 ICCM2 ข้อ 4, 18, 26
การเปิดเผยข้อมูลส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์นาโน	การเปิดเผยข้อมูลส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์นาโน เพื่อเตือนผู้บริโภคถึงความเสี่ยง	ICCM2 ข้อ 31
การสร้างขีดความสามารถ	การทำความเข้าใจและช่วยเหลือประชาชนของประเทศที่สามในการสร้างขีดความสามารถ • ด้านเทคนิค เช่นการทดสอบในห้องปฏิบัติการ • ด้านการร่างกฎหมาย รวมทั้งกฎหมาย extended product liability • ด้านการกำกับดูแล รวมทั้งการจัดการขยะของเสีย • การแนะนำผู้ใช้แรงงาน	Dakar Statement ข้อ 14 ICCM2 ข้อ 7, 12, 13, 29, 32, 34, 38, 39, 41f, 41g, 41h
มีมาตรการความปลอดภัยชั่วคราว	มีมาตรการชั่วคราว เพื่อลดการสัมผัสให้เหลือน้อยที่สุด (ผู้ปฏิบัติงานและผู้บริโภค) กับลดการปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมให้เหลือน้อยที่สุด และต้องให้ MSDS แก่หน่วยงานอื่นใน supply chain	ICCM2 ข้อ 8, 16

หลักการ	รายละเอียด	อ้างอิง
หลักความร่วมมือ	ผู้เกี่ยวข้องทุกฝ่าย (รัฐบาล หน่วยงานระหว่างประเทศ NGO ภาคอุตสาหกรรม ภาคประชาชน) ต้องร่วมมือกัน	Dakar Statement ข้อ 17, 19, 20, 21 ICCM2 ข้อ 5, 14, 36, 37, 38
พิจารณาประเด็นจริยธรรมนาโนด้วย	อย่าลืมประเด็นจริยธรรมนาโน ซึ่งต้องเตรียมตัวไว้ล่วงหน้า	ICCM2 ข้อ 39, 41h

ที่มา

1. เลอสรร ธนสุกาญจน์ 2553. *นาโนเทคโนโลยี: ความปลอดภัยและจริยธรรม.* ศูนย์นวัตกรรมนาโนเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

2. NANOTEC. 2010. ร่างแผนยุทธศาสตร์ความปลอดภัยและจริยธรรมนาโนเทคโนโลยี ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (V 0.3)

ภาคผนวก 6

มาตรฐานหรือโครงการของ องค์การระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐาน (ISO) ที่กำลังอยู่ในระหว่างการพัฒนา

นอกเหนือจากบัญญัติศัพท์และนิยามศัพท์นาโนขององค์การระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐาน (ISO) ที่นำเสนอในภาคผนวก 1 แล้ว ISO ยังมีมาตรฐานหรือโครงการอีกเป็นจำนวนมาก ที่ยังอยู่ในขั้นตอนการยกร่าง การแก้ไข การตรวจสอบ ฯลฯ กว่าจะออกมาเป็นมาตรฐานได้ เอกสารเหล่านี้ได้แก่

รหัสเอกสาร	ชื่อเอกสาร
ISO/PRF TS 10797	Nanotechnologies - Characterization of single-wall carbon nanotubes using transmission electron microscopy
ISO/PRF TR 11811	Guidance on methods for nano- and microtribology measurements
ISO/DTS 11931-1	Nanotechnologies - Nano-calcium carbonate -- Part 1: Characteristics and measurement methods
ISO/DTS 11937-1	Nanotechnologies -- Nano-titanium dioxide -- Part 1: Characteristics and measurement methods
ISO/DIS 12025	Nanomaterials - Quantification of nano-object release from powders by generation of aerosols
ISO/DTS 12901-1	Nanotechnologies - Occupational risk management applied to engineered nanomaterials - Part 1: Principles and approaches

รหัสเอกสาร	ชื่อเอกสาร
ISO/NP TS 12901-2	Nanotechnologies - Occupational risk management applied to engineered nanomaterials - Part 2: Use of the control banding approach
ISO/DTR 13014	Nanotechnologies - Guidance on physico-chemical characterization of engineered nanoscale materials for toxicologic assessment
ISO/NP TR 13329	Nanomaterials - Preparation of Material Safety Data Sheet (MSDS)
ISO/PRF TS 13830	Guidance on the labelling of manufactured nano-objects and products containing manufactured nano-objects
ISO/NP TS 14101	Surface characterization of gold nanoparticles for nanomaterial specific toxicity screening: FT-IR method
ISO/AWI TS 16195	Nanotechnologies - Generic requirements for reference materials for development of methods for characteristic testing, performance testing and safety testing of nanoparticle and nanofibre powder
ISO/NP TR 16196	Nanotechnologies - Guidance on sample preparation methods and dosimetry considerations for manufactured nanomaterials
ISO/NP TR 16197	Nanotechnologies - Guidance on sample preparation methods and dosimetry considerations for manufactured nanomaterials
ISO/NP 16550	Nanoparticles - Determination of muramic acid as a biomarker for silver nanoparticles activity
ISO/NP TS 17200	Nanotechnology -- Nanoparticles in powder form -- Characteristics and measurements
ISO/NP TR 17302	Nanotechnologies -- Framework for identifying vocabulary development for nanotechnology applications in human healthcare
IEC/CD TS 62607-2-1	เจาะลึกเกี่ยวกับ Nanomanufacturing - key control characteristics for CNT film applications - Resistivity
IEC/DTS 62622	Artificial gratings used in nanotechnology -- Description and measurement of dimensional quality parameters
ISO/AWI TS 80004-6	Nanotechnologies -- Vocabulary -- Part 6: Nanoscale measurement and instrumentation

รหัสเอกสาร	ชื่อเอกสาร
ISO/NP TS 80004-8	Nanotechnologies -- Vocabulary -- Part 8: Nanomanufacturing processes

ที่มา: รายชื่อเอกสารจากเว็บไซต์ของ ISO ที่ http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_tc_browse.htm?commid=381983&development=on เข้าถึงเมื่อวันที่ 30 มกราคม 2555

ภาคผนวก 7

คณะทำงาน (Steering Group) ต่าง ๆ ของ

Working Party on Manufactured Nanomaterials (WPMN)

องค์การเพื่อความร่วมมือทางเศรษฐกิจและการพัฒนา (OECD)

ตัวย่อปัจจุบัน	ตัวย่อเมื่อแรกตั้ง	ชื่อโครงการ	ความรับผิดชอบ
SG1&2	SG1	Development of an OECD Nanotechnology Research Database	ศึกษาทบทวนว่ามีผู้ใดเคยทำการวิจัยอะไรที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบไว้บ้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในประเด็นที่ว่า จะนำขั้นตอนการทดสอบวัสดุปกติที่ไม่ได้มีขนาดนาโน มาใช้กับวัสดุนาโนได้แค่ไหน
	SG2	Human Health and Environmental Safety (EHS) Research Strategies on Manufactured Nanomaterials	แลกเปลี่ยนข้อมูลและหาความต้องการที่เหมือน ๆ กันในหมู่ประเทศสมาชิก ในการหาโจทย์วิจัยเกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์ของสมบัติที่ควรจะต้องวัด (regulatory endpoint) สำหรับความปลอดภัยของสุขภาพมนุษย์และสิ่งแวดล้อมที่เป็นผลกระทบจากวัสดุนาโน
SG3&4	SG3	Safety Testing of a Representative Set of Nanomaterials	ออกแบบวิธีการทดสอบ และลงมือทดสอบตัวอย่างวัสดุนาโน
	SG4	Manufactured Nanomaterials Test Guidelines	ศึกษาและกำหนดวิธีเตรียมสารตัวอย่าง ก่อนที่จะทำการทดสอบ

ตัวย่อปัจจุบัน	ตัวย่อเมื่อแรกตั้ง	ชื่อโครงการ	ความรับผิดชอบ
SG5	SG5	Co-operation on Voluntary Schemes/ Prevention	ศึกษาความเป็นไปได้ในการ harmonize วิธีการและเนื้อหาของวิธีการประเมินความเสี่ยงของวัสดุนาโน โดยภาคเอกชนจะเป็นผู้เตรียมข้อมูลให้หน่วยงานของรัฐ แทนที่จะให้หน่วยงานกำกับดูแลจากภาครัฐเข้าไปประเมินเองทั้งหมด
SG6	SG6	Co-operation on Risk Assessment and Exposure Measurement	การสร้างความร่วมมือระหว่างประเทศสมาชิก ในการศึกษาการประเมินความเสี่ยงของวัสดุนาโน ซึ่งในขณะนั้น หลายประเทศมีวิธีประเมินความเสี่ยงไม่เหมือนกัน และต่างก็มีความภูมิใจในวิธีของตนด้วย
SG7	SG7	The Role of Alternative Methods in Nano Toxicology	หาวิธีใหม่ ๆ ที่ยังไม่มีผู้จดสิทธิบัตรไว้ มาใช้ในการทดสอบ โดยต้องแสดงให้เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่า วิธีใหม่ที่ค้นคิดขึ้นนั้น ได้ผลเทียบเท่ากับวิธีที่มีผู้จดสิทธิบัตรไว้แต่เดิม
SG8	SG8	Exposure Measurement and Mitigation	ศึกษารายละเอียดทางเทคนิคในการวัดการสัมผัส (exposure measurement) และศึกษามาตรการที่ใช้ในการป้องกันแก้ไขหรือลดผลกระทบของการสัมผัส (exposure mitigation)
SG9	SG9	Potential Environmental Benefits of Nanotechnology	ติดตามประโยชน์ของนาโนเทคโนโลยีในการรักษาสภาวะแวดล้อม

ที่มา

Hansen, B. 2011. *OECD Contribution to Regulatory Development at EU Level and in Particular REACH.* CEFIC Nano and Reach 2011.

Medley, T. L. 2009. *OECD Working Party on Manufactured Nanomaterials (WPMN)*. DTSC/California Nano-Industry Network Symposium, November 16, 2009, Sacramento, California.

OECD-WPMN. 2007. Report from the Secretariat - Recent Developments on Nanotechnologies/Nanomaterials at the OECD. 2nd Meeting of the Working Party on Manufactured Nanomaterials, Berlin, Germany, 25-27 April 2007. ENV/CHEM/NANO(2007)1 (3 April 2007)

OECD. 2010. *OECD Work on the Safety of Manufactured Nanomaterials.* Powerpoint Slides.

OECD. 2011. Nanosafety at the OECD: The First Five Years 2006-2010. OECD. January 2011.

ภาคผนวก 8

ตัวแทนวัสดุนาโนที่ผลิตขึ้น (Representative Manufactured Nanomaterials) และตัวแปรที่วัดได้ (endpoints) ที่ OECD-WPMN ใช้ในการทดสอบสมบัติความเป็นอันตรายของวัสดุนาโนที่ผลิตขึ้น

การทำงานของ OECD Working Party on Manufactured Nanomaterials (OECD-WPMN) ซึ่งเป็นความพยายามร่วมกันของประมาณ 30 ประเทศที่ส่วนใหญ่เป็นประเทศที่พัฒนาแล้วนั้น เดิมออกแบบไว้เป็นสองระยะ ระยะแรก (2549-2554) เป็นการสำรวจและเรียนรู้ (exploratory phase) เพื่อสร้างองค์ความรู้ที่จำเป็นต่อการดำเนินงานในระยะที่สอง (2555 เป็นต้นไป) ซึ่งจะเน้นที่การกำหนดวิธีประเมินความเสี่ยง (risk assessment) ของวัสดุนาโนที่ผลิตขึ้น[1] อย่างไรก็ตาม ในการประชุม WPMN9 เมื่อปลายปี 2554 ได้กำหนดให้ระยะที่สองซึ่งจะเริ่มกลางปี 2555 เป็นการทำความเข้าใจข้อมูลที่เก็บไว้จากการดำเนินงานระยะแรก ส่วนการกำหนดวิธีประเมินความเสี่ยงนั้นจะเริ่มทำได้หลังจากที่มีความเข้าใจข้อมูลที่เก็บไว้เป็นอย่างดีแล้ว

การทำงานในระยะแรก มีหัวใจอยู่ที่การออกแบบวิธีการทดสอบ และลงมือทดสอบตัวอย่างวัสดุนาโนที่ผลิตขึ้น (representative manufactured nanomaterials)[2] ในโครงการที่เรียกว่า Safety Testing of a Representative Set of Nanomaterials ซึ่งบริหารงานโดยคณะกรรมการ Steering

---

1 ENV/JM/MONO(2009)20/REV ลงวันที่ 2 มิถุนายน 2010 หน้า 17-18

2 บัญชีวัสดุนาโนดังกล่าว เดิมประกอบด้วย carbon black และ polystyrene ด้วย (ENV/JM/MONO(2009)20/REV ลงวันที่ 2 มิถุนายน 2010 หน้า 50) แต่หาประเทศที่รับเป็นเจ้าภาพ (sponsor) ไม่ได้ จึงอาจจะไม่มีผลการทดลองในส่วนนี้ ส่วน gold nanoparticles นั้น ประเทศอัฟริกาใต้ได้เสนอขึ้นในปี 2010 โดยรับเป็นเจ้าภาพหลัก (lead sponsor) เอง

Group 3 (SG3) โดยมีการเลือกวัสดุนาโนที่ผลิตขึ้นเป็นตัวอย่างประมาณสิบสี่ชนิดที่จะทำการทดสอบและให้ประเทศต่าง ๆ เสนอตัวเข้ามาเป็นเจ้าภาพ[3] ในการทดสอบวัสดุนาโนที่ผลิตขึ้นแต่ละชนิด การทดสอบแบ่งเป็นสองประเภท คือ ทดสอบสมบัติทางกายภาพ (physical) และทางเคมี (chemical) ของวัสดุนั้น ๆ กับทดสอบผลที่เกิดขึ้นต่อสิ่งมีชีวิต (biological) เช่น พิษวิทยา (toxicology) ของวัสดุเดียวกัน ด้วยแนวความคิดที่ว่า ในระยะต่อ ๆ ไปของการดำเนินงาน จะนำข้อมูลที่ได้ มาสร้างแบบจำลอง (model) ที่เชื่อมโยงสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ไปสู่ผลต่อสิ่งมีชีวิต เมื่อพบวัสดุนาโนชนิดใหม่ที่ไม่เคยมีการทดสอบมาก่อน ก็เพียงแต่ตรวจหาสมบัติทางกายภาพและเคมี แล้วนำข้อมูลป้อนเข้าไปในแบบจำลอง ก็จะได้คำพยากรณ์จากแบบจำลองว่าวัสดุนาโนชนิดใหม่นั้นน่าจะมีผลอย่างไรต่อสิ่งมีชีวิต

วัสดุนาโนที่ได้รับเลือกเป็นตัวแทนของวัสดุนาโนที่ผลิตขึ้น

(Representative Manufactured Nanomaterials)

1. fullerenes (C_{60}) โดยมีญี่ปุ่นและสหรัฐอเมริกาเป็นเจ้าภาพหลัก
2. single-walled carbon nanotubes โดยมีญี่ปุ่นและสหรัฐอเมริกาเป็นเจ้าภาพหลัก
3. multi-walled carbon nanotubes โดยมีญี่ปุ่นและสหรัฐอเมริกาเป็นเจ้าภาพหลัก
4. silver nanoparticles โดยมีเกาหลีและสหรัฐอเมริกาเป็นเจ้าภาพหลัก
5. iron nanoparticles โดยมีจีนเป็นเจ้าภาพหลัก
6. titanium dioxide โดยมีฝรั่งเศสและเยอรมนีเป็นเจ้าภาพหลัก
7. aluminium oxide โดยมีเยอรมนี ญี่ปุ่น และสหรัฐอเมริกาเป็นผู้สนับสนุน
8. cerium oxide โดยมีสหรัฐอเมริกา สหราชอาณาจักร และ BIAC เป็นเจ้าภาพหลัก
9. zinc oxide โดยมีสหราชอาณาจักร และ BIAC เป็นเจ้าภาพหลัก
10. silicon dioxide โดยมีฝรั่งเศสและสหภาพยุโรป เป็นเจ้าภาพหลัก

---

[3] เจ้าภาพหลัก (lead sponsor) หมายถึงประเทศหรือหน่วยงานที่อาสารับผิดชอบการทดสอบและประสานงานให้ประเทศอื่น ๆ ช่วยกันทดสอบวัสดุนาโน เจ้าภาพร่วม (co-sponsor) หมายถึงประเทศหรือหน่วยงานที่อาสาทำการทดสอบบางรายการ ส่วนผู้สนับสนุน (contributor) หมายถึงประเทศหรือหน่วยงาน ที่ยินดีสนับสนุนข้อมูลทดสอบที่เคยทำไว้แล้ว หรือวัสดุอ้างอิง (reference testing material) หรือข้อมูลอื่นที่เกี่ยวข้อง ให้แก่เจ้าภาพหลักและเจ้าภาพร่วม

11. dendrimers โดยมีสเปนกับสหรัฐอเมริกาเป็นเจ้าภาพร่วม
12. nanoclays โดยมี BIAC เป็นเจ้าภาพหลัก
13. gold nanoparticles โดยมีแอฟริกาใต้เป็นเจ้าภาพหลัก

ตัวแปรที่ทดสอบ (endpoints)

ทั้งในส่วนที่เกี่ยวข้องกับสุขภาพและที่เกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม แบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ดังนี้

1. Nanomaterial information/identification (9 endpoints)
   e.g. substance name, chemical identity, uses, coating
2. Physical-chemical properties and material characterization (17 endpoints)
   e.g. water solubility, particle size, agglomeration/aggregation
3. Environmental fate (15 endpoints)
   e.g. biodegradability, adsorption, accumulation
4. Environmental toxicology (6 endpoints)
   e.g. effects on aquatic and terrestrial organisms
5. Mammalian toxicology (9 endpoints)
   e.g. inhalative toxicology, reproductive toxicology, genotoxicity
6. Material safety (3 endpoints)
   e.g. flammability

ที่มา

1. เอกสาร ENV/JM/MONO(2009)20/REV
2. เอกสาร ENV/JM/MONO(2009)20/REV

ภาคผนวก 9

ตัวอย่างระดับการควบคุมการสัมผัส ของสถาบันมาตรฐานแห่งสหราชอาณาจักร (British Standard Institute, BSI)

จากการแบ่งวัสดุนาโนออกเป็น 4 กลุ่ม ในปี พ.ศ. 2550 โดยสถาบันมาตรฐานแห่งสหราชอาณาจักร ตามระดับความเป็นอันตราย คือ

(1) วัสดุนาโนที่เป็นแท่งหรือเป็นเส้น
(2) วัสดุนาโนที่น่าจะเป็นพิษอยู่แล้ว (CMAR)
(3) วัสดุนาโนที่ไม่ละลายน้ำ
(4) วัสดุนาโนที่ละลายน้ำ

BSI ได้แนะนำให้ใช้มาตรการควบคุมโดยแบ่งกิจกรรมในโรงงานเป็นสี่กลุ่ม และแบ่งระดับความเป็นอันตรายของวัสดุนาโนเป็นสองกลุ่ม ดังนี้

กิจกรรมกลุ่มที่หนึ่ง: การพ่นเป็นละออง หรือการทำให้กระจายตัวในอากาศ (deliberate aerosolization, e.g. manufacturing, spray coating)

กลุ่มของวัสดุนาโน	มาตรการควบคุม
เป็นแท่งหรือเส้น (fibrous) และน่าจะเป็นพิษอยู่แล้ว (CMAR)	ควรทำในที่ปิด (enclosed) หรือแยก (separate) ออกจากผู้ปฏิบัติงาน
ไม่ละลายน้ำ/ละลายน้ำ	ควรทำในที่ปิดหรือแยกออกจากผู้ปฏิบัติงาน ถึงแม้ว่าการระบายอากาศ (ventilated engineering controls) เช่นใช้ท่อดูดลมหรือตู้ดูดควัน (extraction booths or hoods) อาจจะเพียงพอก็ตาม

กิจกรรมกลุ่มที่สอง: การผสม (mixing), การเติม (filling), การตักหรือโกยวัสดุแห้ง (scooping of dry material)

กลุ่มของวัสดุนาโน	มาตรการควบคุม
เป็นแท่งหรือเส้น (fibrous) และน่าจะเป็นพิษอยู่แล้ว (CMAR)	ควรทำในที่ปิดหรือแยกออกจากผู้ปฏิบัติงาน
ไม่ละลายน้ำ/ละลายน้ำ	ควรทำในที่ปิดหรือแยกออกจากผู้ปฏิบัติงาน ถึงแม้ว่าการระบายอากาศเช่นใช้ท่อดูดลมหรือตู้ดูดควันอาจจะเพียงพอก็ตาม ถ้าวัสดุนาโนมีเพียงเล็กน้อย (หนักเป็นมิลลิกรัม) อาจใช้การแยกดำเนินการ (segregation) หรือใช้อุปกรณ์ป้องกันการหายใจ (RPE)

กิจกรรมกลุ่มที่สาม: การขนย้าย (transferring), การผสม (mixing), การเติมสารแขวนลอย (filling of suspension)

กลุ่มของวัสดุนาโน	มาตรการควบคุม
เป็นแท่งหรือเส้น (fibrous) และน่าจะเป็นพิษอยู่แล้ว (CMAR)	ควรทำในที่ปิดหรือแยกออกจากผู้ปฏิบัติงาน อย่างไรก็ตามในกรณีส่วนใหญ่ การระบายอากาศควรจะเพียงพอ ถ้าวัสดุนาโนมีเพียงเล็กน้อย (หนักเป็นมิลลิกรัม) อาจใช้การแยกดำเนินการ หรือใช้อุปกรณ์ป้องกันการหายใจ
ไม่ละลายน้ำ/ละลายน้ำ	การระบายอากาศเช่นใช้ท่อดูดลมหรือตู้ดูดควันอาจจะเพียงพอ ถ้าวัสดุนาโนมีเพียงเล็กน้อย (หนักเป็นมิลลิกรัม) อาจใช้การแยกดำเนินการ หรือใช้อุปกรณ์ป้องกันการหายใจ

กิจกรรมกลุ่มที่สี่: การดูแลทำความสะอาด (maintenance and cleaning)

กลุ่มของวัสดุนาโน	มาตรการควบคุม
เป็นแท่งหรือเส้น (fibrous) และน่าจะเป็นพิษอยู่แล้ว (CMAR)	ควรจะทำในระบบปิดเท่าที่จะทำได้ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ การใช้อุปกรณ์ป้องกันการหายใจและป้องกันผิวหนังควรจะใช้ได้ผล การทำความสะอาดจะต้องไม่ทำให้วัสดุนาโนฟุ้งกระจาย
ไม่ละลายน้ำ/ละลายน้ำ	ในกรณีส่วนใหญ่ การใช้อุปกรณ์ป้องกันการหายใจและป้องกันผิวหนังควรจะใช้ได้ผล การทำความสะอาดจะต้องไม่ทำให้วัสดุนาโนฟุ้งกระจาย

ตารางมาตรการควบคุมของ BSI มีลักษณะเกือบจะเป็นแถบควบคุม (control banding) ถึงแม้จะไม่ได้เรียกว่าเป็นแถบควบคุมก็ตาม เนื่องจากมีการแบ่งกลุ่มของวัสดุนาโน (ตามระดับความน่าจะเป็นอันตราย) และแบ่งกลุ่มของกิจกรรม

อนึ่ง ระดับการควบคุมการสัมผัสที่ทำเสนอในภาคผนวกนี้ เป็นจุดเริ่มต้นของการสร้างแถบควบคุมในตาราง 5.2 โดยแบ่งกลุ่มของกิจกรรมเป็น 13 กลุ่ม ตามลักษณะการสัมผัส

เอกสารอ้างอิง

BSI (2007) Nanotechnologies - Part 2: Guide to safe handling and disposal of manufactured nanomaterials. British Standards Institute. Published Document PD 6699-2:2007.

ภาคผนวก 10

ตัวอย่างการควบคุมการสัมผัสท่อคาร์บอนนาโน

ข้อความต่อไปนี้ เป็นคำแนะนำการใช้งาน CNT ยี่ห้อ HiPCO

- ✳ ในขณะที่ CNT ถูกกักเก็บไว้ในภาชนะปิด ให้ปฏิบัติตามมาตรฐานสุขลักษณะของห้องปฏิบัติการทั่วไป
- ✳ ในปัจจุบันมีผลการศึกษาเป็นจำนวนมากที่ชี้ให้เห็นว่า CNT เป็นสารที่มีอันตรายปานกลาง (moderately hazardous material) สำหรับการสัมผัสทางปอด
- ✳ ใช้เครื่องดูดฝุ่นที่ติดไส้กรอง HEPA ดูดวัสดุที่ตกหล่นเปรอะเปื้อน หรือใช้วิธีเช็ดเปียกเพื่อกำจัด CNT ที่ติดอยู่บนพื้นผิว
- ✳ ใช้วิธีเช็ดเปียกสำหรับเก็บ CNT ที่อาจจะหลงเหลืออยู่บนผิวของภาชนะบรรจุ
- ✳ ในขณะถ่ายโอนผลิตภัณฑ์ ให้สวมอุปกรณ์ป้องกันอย่างเต็มที่ (wear full protection)
  - เสื้อคลุมสำหรับห้องปฏิบัติการ
  - หน้ากากกรองฝุ่นที่ใช้ไส้กรอง HEPA
  - แว่นนิรภัยสำหรับห้องปฏิบัติการ (goggles) หรือกระบังหน้านิรภัย (face shield)
- ✳ การถ่ายโอนวัสดุเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้น ๆ ดังนั้น สำหรับ CNT ที่ไม่ได้ฝังตัวอยู่ในวัสดุอื่น (fee/unbound) จึงควรตรงกับ band #2 ตามแนวปฏิบัติของบริษัท (หรือตรงกับ band 3 ในแนวปฏิบัตินี้)
- ✳ สำหรับการสัมผัสทางผิวหนังนั้น ไม่น่าจะเป็นช่องทางให้ CNT เข้าสู่ร่างกายได้ ดังนั้นมาตรฐานสุขลักษณะของห้องปฏิบัติการทั่วไปจึงน่าจะเป็นการเพียงพอ

ที่มา: GoodNanoGuide (http://www.goodnanoguide.org/HiPCO+Handling) (เข้าถึงเมื่อวันที่ 15 สิงหาคม 2554)

ภาคผนวก 11

เทคโนโลยีตรวจวัดระดับความเข้มข้นของวัสดุนาโน

วัสดุนาโนมีพารามิเตอร์หลายตัวที่เกี่ยวข้องในการกำหนดสมบัติของวัสดุนั้น เช่น ชนิดของพื้นผิว ประจุบนผิว (Zeta Potential) รูปทรงของวัสดุ และขนาดของวัสดุเป็นต้น การวัดพารามิเตอร์เหล่านี้ อาจแบ่งง่าย ๆ ออกเป็นสองกลุ่ม คือการวัดแบบไม่จำเพาะ (non-specific measurement) ที่บอกได้เพียงขนาด พื้นที่ผิว จำนวน และมวลรวม กับการวัดแบบจำเพาะ (specific measurement) ที่สามารถบอกชนิดของพื้นผิวนาโนได้ด้วย ตัวอย่างเทคโนโลยีสำหรับการวัดวัสดุนาโนที่กระจายตัวอยู่ในอากาศเป็นละอองนาโน (nanoaerosol) ซึ่งพบได้ในโรงงานอุตสาหกรรม มีดังนี้

รูป A11.1: ตัวอย่างเครื่องวัดขนาดของอนุภาคด้วยวิธี Dynamic Light Scattering (DLS) ในอากาศ (ซ้าย) และในของเหลว (ขวา)

รูปซ้าย ยี่ห้อ TSI รุ่น DT8530 (DustTrak2) http://www.envcoglobal.com/files/imagecache/product_page_image/MO-TSI-Dusttrak-2_0.jpg รูปขวา ยี่ห้อ Wyatt รุ่น Dyna Pro Nano Scan http://www.directindustry.com/prod/wyatt-technology/dynamic-light-scattering-macromolecular-characterization-instrument-250526.jpg

- **Dynamic Light Scattering (DLS)** ใช้ quasielastic laser light scattering สร้างแผนภูมิ number distribution ตามขนาดของอนุภาค เครื่องมือแทบทั้งสิ้นในประเทศไทยได้รับการออกแบบมาสำหรับใช้กับของเหลว (รูป A11.1 ขวา) แต่ในต่างประเทศมีเครื่องที่ออกแบบมาใช้กับอากาศ (รูป A11.1 ซ้าย) โดยมี limit of detection ประมาณ 50 นาโนเมตร ทำให้เป็น

จุดอ่อนของเทคนิคนี้ เนื่องจากไม่ครอบคลุมอนุภาคนาโนทุกขนาด นอกจากนั้นยังมีความไวในการวัดค่อนข้างต่ำ

รูปที่ A11.2: ตัวอย่างเครื่องวัดขนาดของอนุภาคแบบ Condensation Particle Counter (CPC) แบบตั้งโต๊ะ (ซ้าย) และแบบมือถือ (ขวา)

รูปซ้าย ยี่ห้อ TSI รุ่น 3025 วัดอนุภาคได้เล็กที่สุด 3 นาโนเมตร http://www.pnl.gov/atmospheric/programs/aerosol.stm

รูปขวา ยี่ห้อ TSI รุ่น 3007 วัดอนุภาคได้เล็กที่สุด 100 นาโนเมตร http://www.driesen-kern.de/produkte/partikelseiten/tsi3007.html

- **Condensation Particle Counter (CPC)** แก้ปัญหาที่ DLS ในอากาศวัดอนุภาคขนาดเล็กมากไม่ได้ ด้วยการทำให้ไอ (vapor) ของของเหลวเช่น เอทานอล ควบแน่นลงบนอนุภาคนาโนที่เย็น ทำให้ได้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจนตรวจวัดได้ง่ายด้วยเทคนิค DLS ตัวเครื่อง CPC ราคาเครื่องละประมาณ 15,000 ยูโร[4] สามารถวัดอนุภาคได้เล็กถึงประมาณ 3 นาโนเมตร โดยที่ขยายให้กลายเป็นอนุภาคขนาด 10 นาโนเมตรเสียก่อนลงมือวัดด้วย DLS
- **Electrostatic Deflection** ทำให้อนุภาคมีประจุไฟฟ้าเสียก่อน แล้วจึงใช้สนามไฟฟ้าแยกอนุภาคขนาดเล็กกับขนาดใหญ่ออกจากกัน มีความไวมากคือมี lower limit of detection เล็กกว่า 1 นาโนเมตร ราคาเครื่องละประมาณ 15,000 ยูโร

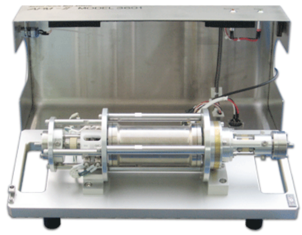
[4] ราคาของเครื่องมือต่าง ๆ ในหัวข้อนี้ เป็นราคาโดยประมาณในประเทศฝรั่งเศสเมื่อปี 2550 ที่มา: Tardif, F. 2007. *Nanoparticle Monitoring: State of the Art and Development Strategy.* NanoSafety Hub, Brussel, 23 March 2007.

รูปที่ A11.3: ตัวอย่างกระบอกแยกอนุภาคนาโนชนิด
Differential Mobility Analyzer (DMA)
ยี่ห้อ NanoRanger แยกอนุภาคได้ 1-100 นาโนเมตร เวลาใช้ต้องใช้เป็นส่วนหนึ่งของเครื่องมือใหญ่
ที่มา: http://www.particleinstruments.com/products_measurement_aerosolsize.html

- **Differential Mobility Analyzer (DMA)** ทำให้อนุภาคมีประจุไฟฟ้าเสียก่อน ด้วยรังสีจากธาตุ Am241 แล้วใช้สนามไฟฟ้าคล้ายกับ Electrostatic Deflection แต่ทำขณะที่อากาศไหลผ่านท่อทรงกระบอกกลม อนุภาคขนาดเล็กจะออกมาทางแกนกระบอก ส่วนอนุภาคขนาดใหญ่จะหลุดออกมาทางตะแกรงที่ปลายกระบอก

รูปที่ A11.4: ตัวอย่างเครื่องวัดอนุภาคนาโนชนิด
Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)
ยี่ห้อ WPS รุ่น Wide-Range Particle Spectrometer ภายในประกอบด้วย DMA+CPC+DLS
ที่มา: http://www.newstarenvironmental.com/product/widerange-particle-spectrometer-wps

● **Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)** ใช้การแยกขนาดของอนุภาคใน อากาศด้วย DMA เสียก่อน จากนั้นนำมาผ่าน CPC เพื่อให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น แล้วจึงตรวจวัดด้วยวิธี DLS ข้อเสียของวิธีนี้ คือราคาเครื่องละกว่า 80,000 ยูโร และต้องใช้โดยผู้เชี่ยวชาญ นอกจากนั้นยังไม่บอกขนาดที่แท้จริงของอนุภาคอีกด้วย (ถ้าเครื่องวัดคร่าว ๆ ราคาถูกลงมา เรียกว่า Stepped Mobility Particle Sizer)



รูปที่ A11.5: เครื่องวัดอนุภาคนาโนชนิด

Aerosol Particle Mass Analyzer (APM)

รูปซ้าย: เครื่องตั้งโต๊ะยี่ห้อ KANOMAX รุ่น APM3600 http://www.directindustry.com/prod/kanomax-usa/aerosol-particle-mass-analyzers-62704-495645.html รูปขวา: ภายในเครื่อง APM ยี่ห้อ KANOMAX รุ่น APM3601 http://www.kanomax-usa.com/research/APM2/APM3601.html

● **Aerosol Particle Mass Analyzer (APM)** เป็นวิธีแยกอนุภาคนาโนด้วยสนามไฟฟ้าอีกวิธีหนึ่ง ที่ให้อากาศซึ่งมีอนุภาคนาโนแขวนลอยหรือกระจายตัวอยู่ ผ่านเข้าไปในช่องแคบ ๆ ระหว่างทรงกระบอกลูกนอกกับทรงกระบอกลูกในที่ต่างกำลังหมุนร่วมแกนกัน โดยใช้หลักการว่าอนุภาคนาโนที่มีค่า mass/charge ratio ค่าใดค่าหนึ่งที่พอดีทำให้แรงลัพธ์บนอนุภาคนาโนนั้นเป็นศูนย์จะวิ่งข้ามช่องแคบระหว่างทรงกระบอกลูกในกับลูกนอกได้ตลอดทาง ในขณะที่อนุภาคอื่นที่มีค่า mass/charge ไม่ตรงกับค่าที่ตั้งไว้จะพุ่งเข้าชนทรงกระบอกลูกใดลูกหนึ่ง จึงไม่สามารถวิ่งผ่านช่องแคบได้ตลอด

รูปที่ A11.6: เครื่องแยกอนุภาคนาโนชนิด
Low Pressure Cascade Impactor
ยี่ห้อ MSP รุ่น M100/110R Rotating MOUDI Impactor
ที่มา: http://www.mspcorp.com/aero_products.php

- **Low Pressure Cascade Impactor** ใช้หลักว่าอนุภาคยิ่งมีขนาดใหญ่จะยิ่งมีมวลมากจนปลิวไปตามการไหลของอากาศได้ยาก ตัวเครื่องประกอบด้วย impactor (Electrical Low Pressure Impactor หรือ ELPI) เป็นแผ่นโลหะตั้งขวางทางเดินของอากาศ อนุภาคที่มีค่า mass/charge ratio สูงมากจะพุ่ง ชนกับ impactor ที่กั้นทางเดินของอากาศอยู่ในหัววัด ส่วนอนุภาคขนาดเล็กที่รอดไปได้ ก็จะไปพบกับ Impactor ตัวถัดไป (cascade) สำหรับดักอนุภาคนาโนที่มี mass/charge ratio น้อยกว่าที่ถูกดักไว้ใน Impactor ในขั้นตอนก่อนหน้านั้น ในทางปฏิบัติ nanoaerosol จะถูกเติมประจุไฟฟ้าเสียก่อนเข้า impactor ดังนั้นเมื่ออนุภาคนาโนก้อนใดชนเข้ากับ impactor มันก็จะถ่ายประจุไฟฟ้าไปให้ impactor เกิดเป็นสัญญาณไฟฟ้า ต่อไปเข้าคอมพิวเตอร์เพื่อนับจำนวนอนุภาคนาโนที่ชนกับ impactor ในแต่ละขั้นตอน (stage) แล้ววาดแผนภูมิออกมาเป็น number distribution ตามขนาดของอนุภาค อย่างไรก็ตามเครื่องวัดแบบนี้ราคาสูงกว่า 80,000 ยูโร และต้องใช้โดยผู้เชี่ยวชาญเท่านั้น
- **Aerosol Surface Area Measurement** เริ่มต้นด้วยการให้ประจุไฟฟ้าแก่อากาศ ที่มีอนุภาคนาโนอยู่ จากนั้นจึงใช้ electrometer วัดประจุที่อยู่บนอนุภาค โดยใช้หลักการว่า ยิ่งวัดประจุบนอนุภาคได้มากแปลว่าอนุภาคยิ่งมีพื้นผิวมาก
- **Aerosol Mass Spectrometry** เป็นวิธีที่ใช้แพร่หลายกับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร (ใหญ่กว่าขนาดนาโน) เช่น อนุภาคนาโนที่เกาะตัวกันเป็นต้น

สำหรับการวัดแบบจำเพาะนั้น ในปัจจุบันแทบทั้งสิ้นเป็นเครื่องต้นแบบ ที่ใช้ความจำเพาะ (specificity) ของการจับตัว (binding) ระหว่างมหชีวโมเลกุล (macrobiomolecule) เป็นพื้นฐานของตัวหยั่งรู้แบบชีวภาพ (biosensor)

โดยสรุปแล้ว เทคโนโลยีการวัดอนุภาคนาโนยังมีราคาของเครื่องวัดค่อนข้างแพง ถึงขนาดที่ปัจจุบันยังไม่มีความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ ที่จะให้ทุกโรงงานต้องติดตั้งเครื่องวัดอนุภาคนาโนในอากาศ เพื่อการเฝ้าระวังผลต่อสุขภาพของผู้ใช้แรงงาน ดังนั้นมาตรการที่เสนอแนะไว้ในแนวทางปฏิบัติเบื้องต้นด้านความปลอดภัยนาโน จะต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติด้วย

ในขณะเดียวกัน วิกฤตินี้ก็อาจถูกเปลี่ยนเป็นโอกาสได้ ด้วยการลงทุนทำวิจัยและพัฒนาเพื่อหาเทคโนโลยีใหม่ ๆ ในการวัดอนุภาคนาโน ตัวอย่างเช่นการลงทุนในโครงการ NANOBADGE ของสหภาพยุโรป เพื่อพัฒนา badge ขนาดเล็กใช้ติดเสื้อเพื่อบอกจำนวนสะสมของอนุภาคนาโนขนาดต่าง ๆ ที่ผู้ปฏิบัติงานในโรงงานได้รับในระหว่างวันทำงาน เป็นต้น

ภาคผนวก 12

ตัวอย่างแนวปฏิบัติด้านความปลอดภัยนาโน ของหน่วยงานในต่างประเทศ

จากการสืบค้นผ่านเครือข่ายอินเตอร์เน็ตเมื่อกลางปี พ.ศ. 2553 พบแนวปฏิบัติด้านความปลอดภัยนาโนที่หน่วยงานต่าง ๆ ตั้งแต่ระดับระหว่างประเทศ ประมาณเพียงสิบกว่ารายการ อย่างไรก็ตาม จำนวนของแนวปฏิบัติด้านความปลอดภัยนาโน ที่สามารถสืบค้นได้ผ่านเครือข่ายอินเตอร์เน็ตในปี พ.ศ. 2554 ได้เพิ่มขึ้นเป็นหลายร้อยรายการ

ในที่นี้เป็นตัวอย่างรายชื่อแนวปฏิบัติด้านความปลอดภัยนาโนของหน่วยงานต่าง ๆ พร้อมโครงเรื่องย่อ ๆ ไว้เพื่อให้ผู้สนใจศึกษาเปรียบเทียบ ได้นำไปเป็นจุดตั้งต้นในการหาข้อมูลในการศึกษา

1. ตัวอย่างจากหน่วยงานระหว่างประเทศ

1.1 องค์การระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐาน (International Organization for Standardization, ISO) ได้จัดเตรียมเอกสารมาตรฐาน แนวปฏิบัติ และรายงาน ฯลฯ หลายรายการ พอจะแบ่งเป็นหมวดหมู่ได้เป็น คำศัพท์และคำนิยาม การวัดและวิเคราะห์ ความปลอดภัยต่อชีวิตและสิ่งแวดล้อม และเอกสารที่ยังอยู่ในระหว่างการพัฒนา ดังนี้

ในส่วนของคำศัพท์และคำนิยาม ที่ ISO พัฒนาขึ้นเสร็จเรียบร้อย สำหรับใช้ในมาตรฐานและแนวปฏิบัติต่าง ๆ ดังที่ได้นำเสนอไปบางส่วนในภาคผนวกที่ 1 นั้น มีเอกสารมาตรฐานและแนวปฏิบัติดังต่อไปนี้

- **Technical Specification ISO/TS 27687 Nanotechnologies - Terminology and definitions for nano-objects - Nanoparticle, nanofibre and nanoplate** พิมพ์ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2551 แก้ไขในปี พ.ศ. 2552

- **Technical Specification ISO/TS 80004-1 Nanotechnologies - Vocabulary - Part 1: Core terms** พิมพ์ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2553 คำหลัก ๆ ที่นิยามไว้ในเอกสารนี้ ได้แก่ nanoscale, nanoscience, nanotechnology, nanomaterial, nano-object, nanostructure, nanostructured material, engineered nanomaterial, manufactued nanomaterial, incidental nanomaterial, nanomanufacturing, nanomanufacturing process, nanoscale phenomenon และ nanoscale property

- **Technical Specification ISO/TS 80004-3 Nanotechnologies - Vocabulary - Part 3: Carbon nano-objects** พิมพ์ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2553 คำที่นิยามไว้ในเอกสารนี้ ได้แก่ nanoscale, nano-object, nanoparticle, nanoplate, nanofibre, nanotube, nanorod, nano-onion, nanocone, nanoribbon, graphene, graphite, fullerene, fullerene derivative, endohedral fullerene, metallofullerene, carbon nano-onion, carbon nanofibre, graphitic nanofibre, carbon nanotube, single-wall carbon nanotube (SWCNT), chiral vector or SWCNT, multiwall carbon nanotube (MWCNT), double-wall carbon nanotube (DWCNT), cup-stack carbon nanotube, carbon nanopeapod, carbon nanohorn, และ carbon nanoribbon ดังปรากฏในภาคผนวก 1

- **Technical Specification ISO/TS 80004-4:2011 Nanotechnologies - Vocabulary - Part 4: Nanostructured materials** เป็นนิยามศัพท์ที่เกี่ยวกับ nanostructured materials

- **Technical Specification ISO/TS 80004-5:2011 Nanotechnologies - Vocabulary - Part 5: Bio/nano interface** เป็นนิยามศัพท์ที่เกี่ยวกับการต่อเชื่อมระหว่างนาโนเทคโนโลยีกับระบบชีวภาพ

- **Technical Specification ISO/TS 80004-7:2011 Nanotechnologies - Vocabulary - Part 7: Diagnostics and therapeutics for healthcare** เป็นนิยามศัพท์ที่เกี่ยวกับการวินิจฉัยและบำบัดรักษาโรคด้วยนาโนเทคโนโลยี

- **Technical Report ISO/TR 11360 Nanotechnologies - Methodology for the classification and categorization of nanomaterials** พิมพ์ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2553 เป็นเอกสารพื้นฐาน ที่แสดงการจัดหมวดหมู่ของวัสดุนาโน และสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของวัสดุนาโน

- **Technical Report ISO/TR 12802 Nanotechnologies - Model taxonomic framework for use in developing vocabularies - Core concepts** พิมพ์ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2553 เป็นเอกสารที่แสดงพัฒนาการทางความคิด ในการจัดกลุ่มคำศัพท์หลัก ๆ ด้านนาโนเทคโนโลยี อันจะไปปรากฏเป็นคำศัพท์และนิยามอยู่ในเอกสาร ISO/TS 80004-1 ที่กล่าวมาแล้ว ผู้อ่านเอกสารนี้ จะได้รับความเข้าใจว่าคำศัพท์แต่ละคำมีที่มาที่ไป และมีความเกี่ยวข้องกับคำศัพท์อื่นอย่างไร โดยพิจารณาจากแผนภูมิเป็นจำนวนมาก ที่แสดงความเชื่อมโยงของคำศัพท์นาโนเหล่านี้

ในส่วนของการวัดและวิเคราะห์หาสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุนาโนนั้น ISO มีเอกสารมาตรฐาน แนวปฏิบัติ และรายงาน ดังต่อไปนี้

- **Technical Specification ISO/TS 10867 Nanotechnologies - Characterization of single-wall carbon nanotubes using near infrared photoluminescence spectroscopy** พิมพ์ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2553 เอกสารนี้เจาะลึกลงไปถึงปรากฏการณ์ band gap photoluminescence ของ SWCNT และการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อวัดสมบัติของ SWCNT รวมทั้งให้ตัวอย่างเป็นกรณีศึกษาไว้ด้วย

- **Technical Specification ISO/TS 11251 Nanotechnologies - Characterization of volatile components in single-wall carbon nanotube samples using evolved gas analysis/gas chromatograph-mass spectrometry** พิมพ์ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2553 เอกสารนี้เจาะลึกลงไปในวิธีการใช้เทคนิค evolved gas analysis/gas chromatography-mass spectrometry ในการหาชนิดของสารระเหยง่าย (volatile component) ในตัวอย่าง SWCNT รวมทั้งให้ตัวอย่างเป็นกรณีศึกษาไว้ด้วย

ในส่วนของความปลอดภัยต่อชีวิตและสิ่งแวดล้อมนั้น ISO มีเอกสารมาตรฐานและแนวปฏิบัติดังต่อไปนี้

- **Technical Report ISO/TR 12885 Nanotechnologies - Health and safety practices in occupational settings relevant to nanotechnologies** พิมพ์ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2551 เอกสารฉบับนี้ มีความยาวเกือบ 80 หน้า แม้จะจัดพิมพ์มาหลายปีแล้ว ก่อนที่นิยาม

ต่าง ๆ จะลงตัว และก่อนที่ผลงานวิจัยเป็นจำนวนมากจะทยอยออกตีพิมพ์ในปี พ.ศ. 2553 (ค.ศ. 2009) เป็นต้นมา แต่รายงานนี้ก็มีรายละเอียดมาก ครอบคลุมวิธีการสังเคราะห์หรือผลิตวัสดุนาโน ความเป็นอันตรายของวัสดุนาโน การประเมินการสัมผัสวัสดุนาโน การประเมินความเสี่ยงในสถานที่ทำงาน วิธีการควบคุม การเฝ้าระวังสุขภาพ และข้อมูลหรือเอกสารที่ควรจะให้แก่ลูกค้าหรือผู้บริโภค

- **Technical Report ISO/TR 13121 Nanotechnologies - Nanomaterial risk evaluation** พิมพ์ครั้งแรกเมื่อเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2554 รายงานฉบับนี้ มีลักษณะเป็นคู่มือการประเมินความเสี่ยงของวัสดุนาโน ที่ทันสมัยและให้กรอบการประเมิน เพื่อแต่ละองค์กรสามารถนำไปปรับใช้ได้ รายงานฉบับนี้จึงเป็นเอกสารที่น่าศึกษาโดยทุกองค์กรที่เกี่ยวข้องกับการประเมินความเสี่ยง

- **Technical Report ISO/TR 27628, Workplace atmospheres – Ultrafine, nanoparticles and nano-structured aerosols – Inhalation exposure characterization and assessment** พิมพ์ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2550 รายงานนี้นอกจากจะเกี่ยวกับเทคนิคการประเมินการสัมผัสอนุภาคนาโนในอากาศที่หายใจเข้าไปแล้ว ยังเน้นที่ aerosol mass spectrometry ในฐานะที่เป็นอุปกรณ์หลักในการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคนาโนในอากาศ ในขณะที่กล้องจุลทรรศน์ชนิด scanning probe ใช้สำหรับวิเคราะห์สภาพพื้นผิวของแต่ละอนุภาคนาโน โดยสามารถให้รายละเอียดได้ถึงระดับอังสตรอม

- **International Standard ISO 10801 Nanotechnologies - Generation of metal nanoparticles for inhalation toxicity testing using the evaporation/condensation method** พิมพ์ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2553 เอกสารนี้เป็นเอกสารกำหนดมาตรฐานของการผลิตนาโนโลหะที่อยู่ในสภาพเป็นไอฟุ้งกระจาย เพื่อใช้ในการทดสอบความเป็นพิษของการสูดดมนาโนโลหะดังกล่าวเข้าไป หลักการโดยย่อคือ ใช้ความร้อนระเหิดโลหะที่เป็นของแข็งออกมาเป็นไอโลหะ แล้วลดอุณหภูมิให้ไอของโลหะควบแน่นกลายเป็นอนุภาคของโลหะนั้นที่มีขนาดนาโน คือมีขนาดอยู่ระหว่างประมาณ 1 ถึง 100 นาโนเมตร

- **International Standard ISO 10808 Nanotechnologies - Characterization of nanoparticles in inhalation exposure chambers for inhalation toxicity testing** พิมพ์ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2553 เอกสารนี้เป็นมาตรฐานการวัดค่าต่าง ๆ ที่กำหนดลักษณะ

ของอนุภาคนาโนที่ผลิตขึ้น รวมทั้งวิธีทำการทดลองหาพิษจากการสูดดม และตัวอย่างการทดสอบจริง พร้อมการวิเคราะห์และแปลผลข้อมูล

- **International Standard ISO 29701 Nanotechnologies - Endotoxin test on nanomaterial samples for *in vitro* systems - *Limulus* amebocyte lysate (LAL) test** พิมพ์ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2553 เอกสารนี้เป็นเอกสารมาตรฐานของการทดสอบหา endotoxin จากแบคทีเรียแกรมลบ ที่อาจจะปนเปื้อนอยู่ในสารตัวอย่างที่นำมาทดสอบความเป็นพิษของวัสดุนาโน เพื่อให้สามารถแปลผลการทดสอบได้ คือเมื่อหักความเป็นพิษจาก endotoxin ออกจากความเป็นพิษของสารตัวอย่างแล้ว ที่เหลือก็พอจะมั่นใจได้ว่าเกิดจากความเป็นพิษของวัสดุนาโน

อย่างไรก็ตาม มีเอกสาร ISO อีกหลายฉบับ ที่ยังอยู่ในระหว่างการจัดทำ อาทิ

- **Technical Specification ISO/DTS 12901-1 Nanotechnologies - Occupational risk management applied to engineered nanomaterials - Part 1: Principles and approaches** อยู่ในสถานภาพ Committe stage: Close of voting/comment period. (http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_tc_browse.htm?commid=381983&development=on สำรวจเมื่อ 30 มกราคม 2555)

- **Technical Specification ISO/NP TS 12901-2 Nanotechnologies - Occupational risk management applied to engineered nanomaterials - Part 2: Use of the control banding approach** ซึ่งอยู่ในสถานภาพ Proposal stage: New project approved. (http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_tc_browse.htm?commid=381983&development=on สำรวจเมื่อ 30 มกราคม 2555)

- **Technical Specification ISO/AWI TS 80004-6 Nanotechnologies - Vocabulary - Part 6: Nanoscale measurement and instrumentation** เกี่ยวกับการวัดและเครื่องมือวัด เป็นเอกสารที่ยังอยู่ระหว่างการจัดทำโดย ISO (New project registered in TC/SC work programme (http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=52333 สำรวจเมื่อ 30 มกราคม 2555)

- **Technical Specification ISO/NP TS 80004-8 Nanotechnologies - Vocabulary - Part 8: Nanomanufacturing processes** เป็นเอกสารที่อยู่ระหว่างการจัดทำโดย ISO โดยยังอยู่ในขั้นตอน Proposal stage: New project approved (http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=52937 สืบค้นเมื่อวันที่ 30 มกราคม 2555)

1.2 องค์การเพื่อความร่วมมือทางเศรษฐกิจและการพัฒนา (Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD) คณะทำงาน Working Parties on Manufactured Nanomaterials (WPMN) เป็นศูนย์กลางของการบริหารการผลิตองค์ความรู้ และเป็นแหล่งพัฒนาเอกสารแนวปฏิบัติเป็นจำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็นวิธีการทดสอบวัสดุนาโนในทุกแง่มุม แนวปฏิบัติเกี่ยวกับการเตรียมวัสดุนาโนเพื่อการทดสอบ ไปจนถึงแนวปฏิบัติเกี่ยวกับการวัดการสัมผัส และการป้องกันการสัมผัสกับวัสดุนาโนในลักษณะต่าง ๆ ภายใน OECD-WPMN มีโครงการประเมินความเสี่ยงนาโน ซึ่งดูแลโดย Steering Group 6 (SG6) โดยมีรายงานที่สำคัญดังนี้

- **ENV/CHEM/NANO(2011)11 Report on Risk Assessment of Manufactured Nanomaterials: Critical Issues** นำเสนอครั้งแรกในการประชุม OECD-WPMN8 เมื่อเดือนมีนาคม พ.ศ. 2554 จากการสืบค้นเครือข่ายอินเตอร์เน็ต ไม่พบว่ามีการเปิดเผยต่อสาธารณชน รายงานฉบับนี้มีความยาว 47 หน้า เป็นการวิเคราะห์ประเด็นสำคัญที่จะต้องมีการศึกษาและตกลงกันให้ได้หลายสิบประเด็น ควรอ่านคู่กันไปกับเอกสาร ISO/TR 13121 Nanotechnologies - Nanomaterial risk evaluation ซึ่งตีพิมพ์ครั้งแรกในเวลาไล่เลี่ยกัน คือเมื่อเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2554

นอกจากนี้ WPMN ยังมีโครงการ Co-operation on Exposure Measurement and Exposure Mitigation[5] ซึ่งกำกับดูแลโดยคณะกรรมการ Steering Group 8 (SG8) นำโดยสหรัฐอเมริกา มีสมาชิกเกือบ 20 ประเทศและหน่วยงาน ประเทศไทยก็เป็นสมาชิกอยู่ด้วยตั้งแต่แรกตั้ง โดยมีบทบาทส่วนใหญ่ในการวิจารณ์ร่างเอกสารก่อนจะประกาศใช้

SG8 ของ OECD-WPMN เริ่มต้นหาแนวทางการทำงาน โดยทำการศึกษาเอกสารที่หน่วยงานอื่นได้ทำไว้ก่อนปี พ.ศ. 2552 เกี่ยวกับการวัดการสัมผัสวัสดุนาโนในสถานที่ปฏิบัติงาน และมาตรการลดการสัมผัส ได้ผลออกมาเป็นเอกสาร

- **Preliminary Analysis of Exposure Measurement and Exposure Mitigation in Occupational Setting: Manufactured Nanomaterials**. พิมพ์เผยแพร่เมื่อปี พ.ศ. 2552 มีเนื้อหาหลัก ๆ เป็น 3 ส่วน ได้แก่ (1) ผลการศึกษาเอกสารที่เกี่ยวกับการวัดการสัมผัส (2) ข้อสรุปจากการทบทวนเอกสารเกี่ยวกับการลดผลกระทบจากการสัมผัส และ (3) ข้อเสนอแนะเบื้องต้นของ OECD ในการทำงานขั้นต่อไป ทั้งในส่วนการวัดการสัมผัส และในส่วนการลดผลกระทบของการสัมผัส

ตามแนวทางที่ได้วางไว้ดังกล่าว SG8 ของ OECD-WPMN ได้พิมพ์ผลการศึกษาอีกหลายฉบับ ดังนี้

- **Emission Assessment for the Identification of Sources and Release of Airborne Manufactured Nanomaterials in the Workplace: Compilation of Existing Guidance** พิมพ์เผยแพร่ต่อสาธารณชนเมื่อปี พ.ศ. 2552 ในชุด Series of Safety of Manufactured Nanomaterials No. 11

- **Comparison of Guidance on Selection of Skin Protective Equipment and Respirators for Use in the Workplace: Manufactured Nanomaterials** พิมพ์เผยแพร่

[5] OECD-WPMN. 2011. *Exposure Measurement and Exposure Mitigation: Status of the Projects.* เอกสาร ENV/CHEM/NANO(2011)12 ลงวันที่ 3 มีนาคม 2554 เอกสารนี้แสดงวิธีการทำงาน เนื้องานที่ทำ และโครงการย่อย ๆ เป็นจำนวนมาก ใน SG8 ซึ่งแบ่งเป็นโครงการในส่วน exposure measurement กับ exposure mitigation แต่ละโครงการจะมีผลการวัด การค้นคว้า และแนวปฏิบัติ พิมพ์เป็นเอกสาร เมื่อสิ้นสุดโครงการ

ต่อสาธารณชนเมื่อปี พ.ศ. 2552 ในชุด Series of Safety of Manufactured Nanomaterials No. 12

- **ENV/CHEM/NANO(2010)14/ADD Compilation of Nanomaterial Exposure Mitigation Guidelines Relating to Laboratories** เป็นแนวปฏิบัติเพื่อลดการสัมผัสวัสดุนาโน ในห้องปฏิบัติการ เขียนขึ้นเมื่อปี พ.ศ. 2553 จากนั้นในปี พ.ศ. 2554 ก็ได้แก้ไขเพื่อเสนอต่อ Chemical Committee ของ OECD ให้รับรอง จากนั้นจึงจะมีการเปิดเผยต่อสาธารณชน

- **ENV/JM/MONO(2010)47 Preliminary Analysis of Exposure Measurement and Exposure Mitigation in Occupational Settings: Manufactured Nanomaterials** นำเสนอผลการวิเคราะห์เอกสารวิธีการวัดการสัมผัส และมาตรการลดการสัมผัสวัสดุนาโน ในโรงงานอุตสาหกรรม เอกสารนี้จัดทำขึ้นเมื่อปลายปี พ.ศ. 2553 และได้รับการเปิดเผยสู่สาธารณชนแล้ว ในชุด Series of Safety of Manufactured Nanomaterials No. 8

2. ตัวอย่างหน่วยงานระดับภูมิภาค

2.1 คณะกรรมาธิการยุโรป (European Commission) ซึ่งเป็นหน่วยงานของสหภาพยุโรป (EU) ได้จัดพิมพ์ผลงานเป็นจำนวนมาก เนื่องจาก EU มี Council Directive 98/24/EC of the 7th April 1998 on the protection of the health and safety of workers from the risks related to chemical agents at work (14th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC) ซึ่งวางเงื่อนไขขั้นต่ำ ในการป้องกันผู้ปฏิบัติงานจากความเสี่ยงต่อความปลอดภัยและสุขภาพที่เกิดจากหรืออาจจะเกิดจากผลของสารเคมีที่มีอยู่ในสถานปฏิบัติงาน หรือจากผลของการทำกิจกรรมเกี่ยวกับสารเคมี สำหรับเอกสารเรื่องความปลอดภัยนาโนที่เกี่ยวข้องกับแนวปฏิบัติ ได้แก่

- **Nanosciences and Nanotechnologies: An action for Europe 2005-2009. First Implementation Report 2005-2007** เป็นเอกสารสรุปกิจกรรมและผลงานความก้าวหน้าของนาโนเทคโนโลยีในทวีปยุโรประหว่างปี พ.ศ. 2548-2550 มาตรฐานและแนวปฏิบัติที่เกี่ยวกับสุขภาพอนามัยและสิ่งแวดล้อม ได้รับการนำไปปฏิบัติในหลายโครงการและหน่วยงาน เช่น CEN (European Committee for Standardization), CENELEC (European

Committee for Electrotechnical Standardization), and ETSI (European Telecommunications Standards Institute) ภายใต้ European Technology Platform (ETP) on Sustainable Chemistry (SusChem), เอกสารหลายฉบับได้รับการเขียนขึ้นโดยเฉพาะในหัวข้อ exposure mitigation รวมทั้ง “a code of conduct on nanotechnology” “a guide on safet manufacturing and activities involving nanoparticles at workplaces” และวิธีการอย่างละเอียดในการตรวจสอบวัสดุนาโน ในขณะเดียวกัน ETP on Industrial Safety (ETPIS) ก็ได้รวมวัสดุนาโน เป็นส่วนหนึ่งของความปลอดภัยนาโน ที่ ETPIS ดำเนินการศึกษาอยู่

3. ตัวอย่างหน่วยงานระดับประเทศ

แม้ว่าแนวโน้มระดับโลก จะเป็นการช่วยเหลือพึ่งพากันระหว่างประเทศต่างๆ ก็ตาม หน่วยงานระดับประเทศ (หรือร่วมกับหน่วยงานอื่นในประเทศ) ก็ได้สร้างผลงานในแนวปฏิบัติไว้บ้าง เช่น

3.1 German Federal Institute for Occupational Safety and Health (BAuA) ซึ่งเป็นหน่วยงานของรัฐบาลเยอรมัน ร่วมกับ **German Chemical Industry Association (VCI)** ซึ่งเป็นสมาคมของภาคเอกชน จัดทำเอกสาร

- **Guidance for Handling and Use of Nanomaterials at the Workplace** (http://www.baua.de/nn_49456/en/Topics-from-A-to-Z/Hazardous-Substances/Nanotechnology/pdf/guidance.pdf) จัดทำขึ้นในปี พ.ศ. 2549 และเริ่มนำออกเผยแพร่ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2550 จุดเด่นของเอกสารนี้ อยู่ที่มีการแก้ไขแบบ on-line เป็นระยะๆ ตามความก้าวหน้าของเทคโนโลยี เอกสารนี้กล่าวถึงวิธีวัดอนุภาคนาโนที่ผลิตขึ้น ที่ฟุ้งกระจายอยู่ในอากาศ (เทียบกับอนุภาคนาโนที่มีอยู่ในอากาศบ้างแล้วตามปกติจากควันไฟ ฯลฯ) โดยเน้นว่า การระบุชนิดและวัดมวลของวัสดุนาโนอาจไม่พอเพียงต่อการประเมินความเสี่ยง อาจจะต้องวัดพื้นที่ผิวด้วย จากนั้นได้แนะนำมาตรการพื้นฐาน สำหรับใช้ป้องกันการสัมผัสวัสดุนาโน

3.2 Health and Safety Executive ซึ่งเป็นหน่วยงานของรัฐ แต่ไม่สังกัดกระทรวงใดในรัฐบาลอังกฤษ (กำกับดูแลโดยกระทรวงงานและบำนาญ - Department of Work and Pension - DWP) ในปี พ.ศ. 2549 ได้จัดทำรายงาน

- **The Assessment of Different Metrics of the Concentration of Nano (Ultrafine) Particles in Existing and New Industries** เป็นรายงานผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมวล (หาจากเครื่อง Tapered Element Oscillating Microbalance หรือ TEOM) จำนวน (หาจากเครื่อง SMPS ที่กล่าวถึงแล้วในภาคผนวก) และพื้นที่ผิวกัมมันต์ (หาโดยวิธี Diffusion Charging) ของวัสดุนาโนหลายชนิด ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีต่าง ๆ กัน และมีรูปร่างของอนุภาคต่าง ๆ กัน โดยสรุปแล้ว การเกาะตัวของอนุภาคนาโนเป็นกลุ่มมวล (agglomeration) น่าจะเป็นสาเหตุของข้อมูลที่ขัดกัน โดยมีคำแนะนำที่สำคัญ คือ มีความจำเป็นต้องวัดทั้งมวล จำนวน และพื้นที่ผิวของอนุภาคนาโน เนื่องจากถ้าวัดเฉพาะค่าใดค่าหนึ่งหรือบางค่า จะไม่มีข้อมูลพอที่จะคาดคะเนความเป็นพิษของวัสดุนาโนได้ และต้องไม่ใช้ข้อมูลจาก SMPS มาคำนวณพื้นที่ผิวและมวลของวัสดุนาโน โดยปราศจากข้อมูลทางเคมีว่าวัสดุนาโนเป็นสารเคมีอะไร และทางกายภาพว่าวัสดุนาโนนี้มีการเกาะตัวกันแบบไหนบ้าง

- **Risk management of carbon nanotubes** จัดพิมพ์บนเว็บที่ http://www.hse.gov.uk/pubns/web38.pdf และแก้ไขปรับปรุงอยู่เสมอ (ล่าสุดแก้ไขเมื่อปี พ.ศ. 2554) เป็นเอกสารการบริหารความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับ CNT ซึ่งในขณะที่เขียนแนวปฏิบัตินี้อยู่ เป็นวัสดุนาโนสมัยใหม่ที่มนุษย์มีข้อมูลมากที่สุด

3.3 British Standard Institute (BSI) ได้พัฒนาเอกสารมาตรฐานขึ้น 3 ฉบับ สองฉบับแรกนับเป็นเอกสารต้นแบบของเอกสารในยุคต่อ ๆ มา โดยเฉพาะอย่างยิ่งเอกสารมาตรฐานของ ISO

- PD 6699-1 **Nanotechnologies - Part 1. Good practice guide for specifying manufactured nanomaterials** จัดพิมพ์เมื่อปี พ.ศ. 2550 (http://www.bsigroup.com/upload/Standards%20&%20Publications/Nanotechnologies/PD6699-1.pdf) นับเป็นความพยายามในยุคแรก ที่จะพิจารณาวัสดุนาโน อย่างเป็นวิทยาศาสตร์ เริ่มต้นด้วยการให้นิยาม (ในปัจจุบันนิยมใช้นิยามของ ISO ซึ่งแตกต่างจากนิยามของ BSI อยู่บ้าง) ตามด้วยตัวแปรที่ใช้กำหนดสมบัติของวัสดุนาโนในประเภทต่าง ๆ ไม่ว่าจะมีขนาดนาโนเพียงมิติเดียว สองมิติ หรือทั้งสามมิติก็ตาม จากนั้นก็ให้คำแนะนำในการวัดค่าต่าง ๆ ที่ใช้กำหนดสมบัติ

ของวัสดุนาโน (ปัจจุบันนิยมใช้คำแนะนำของ OECD) แล้ว เกริ่นสั้นๆ ถึงความเป็นไปได้ของผลกระทบของวัสดุนาโนต่อสิ่งแวดล้อม และแนวทางการลดผลกระทบ จบลงด้วยคำแนะนำในการบรรจุ ติดฉลาก และขนส่งวัสดุนาโน อย่างไรก็ตาม คำแนะนำเหล่านี้เป็นคำแนะนำอย่างกว้าง มากๆ ถึงความรับผิดชอบตามกฎหมายระเบียบข้อบังคับของสหราชอาณาจักร คือใช้ได้กับวัสดุนาโนทุกชนิดในฐานะที่เป็นสารเคมีหรือเป็นวัตถุอันตราย โดยไม่ได้คำนึงถึงระดับความอันตรายของวัสดุ และไม่ได้คำนึงถึงสภาวะหรือสถานะของวัสดุด้วย

- PD 6699-2 **Nanotechnologies - Part 2. Guide to safe handling and disposal of manufactured nanomaterials** จัดพิมพ์เมื่อปี พ.ศ. 2550 (http://www.bsigroup.com/upload/Standards%20&%20Publications/Nanotechnologies/PD6699-2.pdf) เป็นเอกสารที่จัดทำคู่กับ Part 1 ที่กล่าวถึงแล้ว เนื้อเรื่องเป็นการบริหารจัดการความเสี่ยงที่อาจเกิดจากวัสดุนาโน เริ่มด้วยการให้ความรู้สั้นๆ เกี่ยวกับวัสดุนาโน ที่เน้นตระกูลคาร์บอนและตระกูลสารกึ่งตัวนำ แล้วเริ่มเกริ่นนำเกี่ยวกับความเสี่ยงของการสัมผัสอนุภาคนาโน ว่าสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทางปอด ทางผิวหนัง และทางปาก รวมทั้งความเสี่ยงในฐานะที่เป็นวัสดุอันตราย เช่นจากสมบัติการติดไฟและการระเบิดของอนุภาคนาโน แล้วจึงเข้าสู่กรอบความคิดในการบริหารจัดการความเสี่ยงจากวัสดุนาโน ซึ่งมีขั้นตอนการเก็บข้อมูล การประเมินความเสี่ยง การตัดสินใจว่าจะใช้มาตรการควบคุมอย่างไร การพิจารณาการเฝ้าระวังสุขภาพ การประเมินผลการควบคุม การกำจัดขยะนาโน การป้องกันไฟและระเบิด และการบันทึกและทบทวน ในการปฏิบัติตามกรอบนี้ประกอบด้วยแปดขั้นตอน ได้แก่ (1) การชี้บ่งอันตรายและประเมินความเสี่ยง (2) การตัดสินใจว่าต้องการการป้องกันอะไรบ้าง (3) การป้องกันการสัมผัสหรือการควบคุมการสัมผัสอย่างเพียงพอ (4) ต้องให้แน่ใจว่ามาตรการควบคุมมีการใช้งานและการดูแล (5) เฝ้าสังเกตการสัมผัส (6) ดำเนินการเฝ้าระวังสุขภาพ (7) เตรียมแผนและขั้นตอนสำหรับรับมือกับอุบัติเหตุและเหตุฉุกเฉิน (8) แจ้งให้พนักงานทุกคนทราบ มีการฝึกอบรม และดูแลกวดขัน จากนั้น เอกสาร Part 2 ก็ได้อธิบายแต่ละขั้นตอนในรายละเอียด

- PD 6699-3 **Guide to assessing airborne exposure in occupational settings relevant to nanomaterials** ตีพิมพ์เมื่อเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2553 และมีเผยแพร่ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต (http://shop.bsigroup.com/ProductDetail/?

pid=000000000030206667 สืบค้นเมื่อวันที่ 4 กรกฎาคม 2554 ราคาค่าเข้าชมเอกสาร 142.00 ยูโร) เอกสารฉบับนี้มี cross reference กลับไปถึง ISO/TR 27628:2007 ดังกล่าวข้างต้นแล้ว

3.4 Nanoscale Science Research Centers, US Department of Energy (DOE) ได้จัดทำเอกสาร

- **Approach to Nanomaterial ES&H Revision 3a** เมื่อเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2551 (http://www.sc.doe.gov/bes/DOE_NSRC_Approach_to_Nanomaterial_ESH.pdf เข้าถึงเมื่อ 11 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2554) เอกสารนี้ให้แนวปฏิบัติ เพื่อลดความไม่แน่นอนในการทำงานวิจัยกับวัสดุนาโนที่ไม่ทราบอันตราย ลดความเสี่ยงของการเจ็บป่วยของผู้ปฏิบัติงาน และลดผลกระทบในทางลบต่อสิ่งแวดล้อม โดยกล่าวถึงองค์ประกอบของระบบเฝ้าระวังสุขภาพเบื้องต้นของผู้ปฏิบัติงาน ให้นิยาม "ผู้ปฏิบัติงานกับวัสดุนาโน" ให้คำแนะนำต่อห้องปฏิบัติการ ชี้ความท้าทายของการศึกษาการสัมผัสวัสดุนาโน โดยสรุป เอกสารนี้ใช้วิธีการแบ่งระดับในการควบคุม โดยขึ้นกับการกระจายตัว (dispersibility) ของวัสดุนาโน และให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเฝ้าระวังและการหาสมบัติของวัสดุนาโน และการรักษาความปลอดภัยนาโนของโรงงานอุตสาหกรรม

3.5 National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) เป็นหน่วยงานวิชาการด้านอาชีวอนามัย สังกัด Center for Disease Control and Prevention กระทรวงสาธารณสุขสหรัฐ NIOSH จัดทำเอกสารเกี่ยวกับความปลอดภัยนาโนไว้หลายฉบับ เช่น

- **Approaches to Safe Nanotechnology: Information Exchange with NIOSH** ขึ้นเมื่อปี พ.ศ. 2006 เป็นเอกสารยุคบุกเบิก เคยมีการเผยแพร่บนเครือข่ายอินเทอร์เน็ต (http://www.cdc.gov/niosh/topics/nanotech/safenano/) แต่ปัจจุบันไม่สามารถเข้าถึงได้แล้ว[6] เนื้อเรื่องส่วนใหญ่เป็นภาพรวมของเทคนิคการวัดการสัมผัสวัสดุนาโน ในสภาพของโรงงานอุตสาหกรรมและคำแนะนำ ซึ่งในขณะที่จัดทำเอกสารฉบับนั้นขึ้น นักวิทยาศาสตร์ก็ยังไม่มี

---

[6] เนื้อหาในที่นี้ ดัดแปลงมาจากบทสรุปที่มีอยู่ใน OECD. 2009. *Preliminary Analysis of Exposure Measurement and Exposure Mitigation in Occupational Setting: Manufactured Nanomaterials.* Organization for Economic Cooperation and Development. ENV/JM/MONO(2009)6. http://www.oecd.org/dataoecd/36/36/42594202.pdf เข้าถึงเมื่อวันที่ 29 มิถุนายน 2554

องค์ความรู้ด้านพิษวิทยาเชิงกลไก เกี่ยวกับวัสดุนาโน ดีพอที่จะใช้ในการเลือกวิธีวัดในสถานที่ทำงานได้ ความรู้คร่าว ๆ ก็คือมวลกับสมบัติเคมีของสารในระดับใหญ่ ไม่มีความสำคัญในการกำหนดความเป็นพิษมากเท่ากับพื้นที่ผิวและธรรมชาติทางเคมีผนผิวนั้น ตัวรายงานกล่าวถึงข้อคำนึงในการวัด mass concentration การวัดพื้นที่ผิว และการวัด number concentration แล้วให้ข้อเสนอแนะในการวัดวัสดุนาโน พร้อมกับข้อเสนอแนะในการลดผลกระทบจากวัสดุนาโน นับเป็นเอกสารประวัติศาสตร์ที่น่าศึกษา เนื่องจากให้หลักพื้นฐานไว้หลายประการ

- **Progress Toward Safe Nanotechnology in the Workplace, A report from the NIOSH Nanotechnology Research Center** พิมพ์เมื่อปี พ.ศ. 2550 (http://www.cdc.gov/niosh/docs/2007-123/pdfs/2007-123.pdf) เป็นรายงานความก้าวหน้าของการทำงานของ NIOSH ที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยนาโนในสถานที่ปฏิบัติงาน งานแต่ละด้านแบ่งออกเป็นที่มาหรือเรื่องเดิม ขอบเขตของโครงการที่ NIOSH มีในด้านนั้น ๆ ความร่วมมือกับหน่วยงานอื่น ๆ ที่เกิดขึ้น ความก้าวหน้าของเนื้องาน และงานที่จะต้องทำต่อไปในอนาคต ตัวเนื้องานแบ่งออกเป็น 10 ด้าน ได้แก่ (1) งานด้านพิษวิทยา, (2) งานประเมินความเสี่ยง, (3) งานระบาดวิทยาและเฝ้าระวัง, (4) งานควบคุมทางวิศวกรรมและอุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล, (6) งานประเมินการสัมผัสวัสดุนาโน, (7) งานป้องกันไฟและระเบิด, (8) งานร่างข้อเสนอแนะและแนวปฏิบัติ, (9) งานให้การศึกษาประชาสัมพันธ์ และ (10) งานประยุกต์ (applications) ซึ่งหมายถึงการนำวัสดุนาโน ไปประยุกต์ใช้เพื่อลดความเสี่ยงในการปฏิบัติงาน เช่น ใช้ทำอุปกรณ์ป้องกันฝุ่น ฯลฯ เอกสารฉบับนี้เหมาะกับผู้สนใจประวัติความเป็นมาของแนวปฏิบัติด้านความปลอดภัยนาโน การอ่านเอกสารนี้จะทำให้ได้รับความเข้าใจอย่างลึกซึ้ง

- แผ่นพับ **Safe Nanotechnology in the Workplace** พิมพ์เมื่อปี พ.ศ. 2551 (http://www.cdc.gov/niosh/docs/2008-112/pdfs/2008-112.pdf) เป็นแผ่นพับหนึ่งแผ่น (มีด้านหน้าและด้านหลัง) ที่ให้ความรู้สั้น ๆ แก่นายจ้าง ผู้จัดการ และบุคลากรด้านความปลอดภัยและสาธารณสุข โดยใช้ภาษาง่าย ให้ผู้อ่านพอได้รับความรู้ว่า อนุภาคนาโนอันตรายหรือไม่ ผู้ปฏิบัติงานอาจสัมผัสวัสดุนาโนได้อย่างไร เราจะวัดอนุภาคนาโนได้อย่างไร และจะควบคุมการสัมผัสได้อย่างไร นอกจากนั้นยังให้วิธีที่จะหาข้อมูลละเอียดเพิ่มเติมอีกด้วย

- **Approaches to Safe Nanotechnology** พิมพ์เมื่อเดือนมีนาคม พ.ศ. 2552 (http://www.cdc.gov/niosh/docs/2009-125/pdfs/2009-125.pdf) เป็นรายงานขนาด 85 หน้า ที่อธิบายให้ผู้อ่านเข้าใจว่า เพราะเหตุใดจึงเป็นห่วงเรื่องความปลอดภัยต่อสุขภาพ ธรรมชาติของการทำงานกับวัสดุนาโน ความน่าห่วงใยทั้งที่เป็นความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานและที่เป็นความเสี่ยงต่อการติดไฟและระเบิด การประเมินการสัมผัสกับวัสดุนาโน การใช้หลักป้องกันไว้ก่อน แนวปฏิบัติสำหรับการทำงานกับวัสดุนาโน และการเฝ้าระวังทางอาชีวอนามัย เอกสารฉบับนี้ เหมาะสำหรับผู้ที่ใหม่ต่อเรื่องความปลอดภัยนาโนในโรงงานอุตสาหกรรม

- ร่วมกับ **RAND Corporation** ได้จัดทำรายงาน **Nanomaterials in the Workplace: Policy and Planning Workshop on Occupational Safety and Health** (http://www.rand.org/pubs/conf_proceedings/2006/RAND_CF227.pdf) เป็นผลจากการสัมมนาเรื่อง Workshop on Nanotechnology and Occupational Safety and Health ซึ่ง RAND Corporation บริษัทที่ปรึกษายักษ์ใหญ่ เป็นเจ้าภาพ จัดขึ้นเมื่อวันที่ 17 ตุลาคม พ.ศ. 2548 การสัมมนาได้สะท้อนให้เห็นสภาพในขณะนั้นว่า (1) การขาดองค์ความรู้เกี่ยวกับความเสี่ยงต่อสุขภาพและวิธีการป้องกันผู้ปฏิบัติการ ทำให้มีความเป็นห่วงถึงความรับผิดของนายจ้างซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อไปถึงการพัฒนาและการนำวัสดุนาโนชนิดใหม่ ๆ ออกมาใช้ประโยชน์ (2) ความพยายามในการบริหารความเสี่ยงจากวัสดุนาโนแต่ละชนิด ถูกขัดขวางด้วยการขาดแคลนองค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์เกี่ยวกับวัสดุนาโนในภาพรวม (3) ทรัพยากรรวมทั้งเงินทุนทั้งในภาครัฐและภาคเอกชน ที่ใส่ลงไปในการทำความเข้าใจความเสี่ยงในอาชีวอนามัย สุขภาพ และสิ่งแวดล้อม ของวัสดุนาโนใหม่ ๆ ไม่ได้สัดส่วนกับความเร็วในการพัฒนาวัสดุนาโน และ (4) ภาครัฐและภาคเอกชนจำเป็นต้องร่วมมือกันแก้ปัญหาเหล่านี้ ผลการสัมมนานี้ ได้มีส่วนช่วยชี้ประเด็นที่หน่วยงานภาครัฐควรจะต้องตระหนัก ในการบริหารจัดการความเสี่ยงในการปฏิบัติงาน ที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยนาโน ซึ่งได้แก่ (1) หน่วยงานภาครัฐรวมทั้ง NIOSH ด้วย ซึ่งมีงบประมาณและกำลังคนจำกัด ควรทุ่มเททรัพยากรลงไปทำงานที่รัฐบาลกลางควรจะมีบทบาท เช่น ทำการศึกษาขั้นพื้นฐานด้านพิษวิทยา และให้ความช่วยเหลือระยะใกล้เพื่อป้องกันผู้ปฏิบัติงานจากวัสดุนาโนที่มีใช้อยู่และกำลังจะมีใช้ (2) ผู้พัฒนานาโนเทคโนโลยี ประชาคมผู้ใช้ และ NIOSH กับหน่วยงานของรัฐที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน จะต้องมีปฏิสัมพันธ์กันมากกว่าที่เป็นอยู่ (3)

ความพยายามของรัฐบาลกลางที่จะพัฒนาองค์ความรู้ที่จะใช้เพื่อการบริหารจัดการความเสี่ยงของการปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนาโน ควรจะกระทำโดยมียุทธศาสตร์ของรัฐบาลกลางเป็นหนึ่งเดียว เพื่อที่จะให้เกิดการวิจัย การทดสอบ และการประเมินเพื่อการบริหารจัดการความเสี่ยงดังกล่าว ในระดับที่เหมาะสม

- ร่วมกับ **University of dayton Research Institute** ในปี พ.ศ. 2549 จัดทำรายงาน **NIOSH Health Hazard Evaluation Report** เกี่ยวกับ carbon nanofiber (http://www.cdc.gov/niosh/hhe/reports/pdfs/2005-0291-3025.pdf) เป็นรายงานความยาวเพียง 20 หน้า ที่แสดงให้ผู้อ่านได้เห็นตัวอย่างการประเมินอันตรายต่อสุขภาพ ที่ NIOSH เป็นผู้ดำเนินการ ด้วยการร้องขอของ University of Dayton ว่าการทำงานกับ carbon nanofiber ที่ Center for Basic and Applied Polymer Research ในสังกัด University of Dayton Research Institute (UDRI) อาจจะปล่อยวัสดุนาโนออกมาเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานและต่อสิ่งแวดล้อมแค่ไหน เพียงใด รายงานดังกล่าวได้นำเสนอวิธีการตรวจวัด พร้อมตัวเลขจริงที่วัดได้ ตลอดจนการแปลผล การสรุปผล และการให้ข้อเสนอแนะ

3.6 US Environmental Protection Agency (US EPA) ได้จัดทำ

- **US EPA Nanotech White Paper, EPA 100/B-07/001** ขึ้นในปี พ.ศ. 2550 (http://www.epa.gov/OSA/pdfs/nanotech/epa-nanotechnology-whitepaper-0207.pdf เข้าถึงเมื่อ 29 มิถุนายน พ.ศ. 2554) ถึงแม้เอกสารสมุดปกขาวนี้จะจัดทำโดยหน่วยงานสิ่งแวดล้อม แต่จำเป็นต้องกล่าวถึงในที่นี้เนื่องจากมีความเกี่ยวข้องกับโรงงานอุตสาหกรรม ในฐานะที่โรงงานอุตสาหกรรมสามารถเป็นแหล่งสร้างมลภาวะด้านนาโนได้โดยตรง สมุดปกขาวนี้ให้คำแนะนำวิธีการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุนาโน และให้แนวคิดเกี่ยวกับการควบคุม (control) ในโรงงานอุตสาหกรรม

3.7 Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) เป็นหน่วยงานของรัฐบาลสหรัฐอเมริกา สังกัดกระทรวงสาธารณสุข (U.S. Department of Health and Human Services) มีหน้าที่ให้ข้อมูลและความรู้แก่สาธารณชน เพื่อป้องกันการสัมผัสกับเชื้อโรคและสารพิษต่าง ๆ อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ ATSDR จะเป็นแหล่งรวมขององค์ความรู้เกี่ยวกับสารพิษ จากการสืบค้นเว็บไซต์ของ ATSDR เมื่อเดือนกันยายน 2554 ไม่พบว่า ATSDR มีแนวปฏิบัติ (guideline) ที่เกี่ยวกับ

วัสดุนาโน หรือ fullerene หรือ carbon black แต่เป็นจุดเชื่อมโยง (link) ไปถึงแนวปฏิบัติของหน่วยงานอื่น เช่น U.S. EPA เป็นต้น

3.8 GoodNanoGuide (http://www.goodnanoguide.org) ก่อตั้งขึ้นเมื่อประมาณปี พ.ศ. 2553 โดยหน่วยงานทั้งภาครัฐและภาคเอกชนหลายแห่งของสหรัฐอเมริกาและแคนาดา เพื่อให้ความรู้ด้านการจัดการความปลอดภัยนาโน GoodNanoGuide ได้ให้ความรู้ในการประเมินและบริหารความเสี่ยงของวัสดุนาโน ผ่านทางเว็บไซต์ดังกล่าว นับเป็นเว็บไซต์ที่ผู้เกี่ยวข้องควรเข้าไปเยี่ยมชม

3.9 Safe Work Australia ซึ่งเป็นหน่วยงานด้านอาชีวอนามัยของประเทศออสเตรเลีย ได้จัดทำรายงานที่ค่อนข้างทันสมัยขึ้นระหว่างปี 2552-2553 หลายเรื่อง ดังต่อไปนี้

- **Engineered Nanomaterials: A Review of the Toxicology and Health Hazards** (http://www.safeworkaustralia.gov.au/AboutSafeWorkAustralia/WhatWeDo/Publications/Documents/313/EngineeredNanomaterials_%20Review_ToxicologyHealthHazards_2009_PDF.pdf) ความยาว 163 หน้า จัดทำขึ้นในปี พ.ศ. 2552 โดยการว่าจ้างบริษัทที่ปรึกษาชื่อ Toxikos Pty ให้ทบทวนเอกสารการวิจัยด้านความปลอดภัยนาโน ซึ่งแบ่งได้กว้าง ๆ เป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกเป็นงานวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบต่อสุขภาพจากอนุภาคขนาดเล็กและเล็กมาก ๆ ซึ่งมนุษย์เราก็ได้สูดดมอนุภาคเหล่านี้มาเป็นเวลานานแล้ว เพียงแต่ต้องสูดดมมากขึ้นหลังจากการปฏิวัติอุตสาหกรรม งานวิจัยเหล่านี้มีจำนวนมาก และสะสมเป็นองค์ความรู้อยู่มาก เนื่องจากมีการทำมานาน ความเป็นห่วงที่สืบเนื่องจากงานวิจัยในกลุ่มนี้ มาจากหลักฐานทางระบาดวิทยาว่า มลภาวะทางอากาศจากอนุภาค (fine particulate) อาจมีส่วนเหนี่ยวนำให้เกิดโรคในทางเดินหายใจ หรือทำให้โรคที่เป็นอยู่แล้วมีอาการหนักขึ้น และทำให้อัตราตายสูงขึ้นในหมู่คนที่มีความโน้มเอียงอยู่แล้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มคนที่มีปัญหาด้านหัวใจและปอด ตัวอย่างเหล่านี้เป็นที่ทราบกันดีในกรณีโรงงานแร่หินฟันม้า (quartz) และแร่ใยหิน (asbestos) ลักษณะของงานวิจัยจึงมักจะเป็นการหากลไก (mechanism) ที่เชื่อมโยงการสัมผัสเข้ากับผลที่เกิดขึ้น ส่วนการวิจัยกลุ่มที่สองมุ่งไปที่พิษวิทยาของวัสดุนาโน เพื่อหาระดับความเป็นอันตรายของวัสดุเหล่านี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโรงงานผลิตวัสดุนาโนหรือผลิตภัณฑ์นาโน งานวิจัยกลุ่มนี้มีลักษณะตรงข้ามกับงานวิจัยในกลุ่มแรก เพราะเป็นความพยายามที่จะหาว่าการสัมผัสวัสดุนาโนจะทำให้เกิดผลกระทบอันไม่พึงประสงค์อย่างไรบ้าง และหาระดับของการสัมผัสที่จะ

ทำให้เกิดพิษหรือความผิดปกติขึ้นได้ หลังจากทำความเข้าใจในนิยามและหลักการต่าง ๆ รวมทั้งกฎหมายระเบียบข้อบังคับของออสเตรเลียที่มีอยู่แล้ว รายงานฉบับนี้ก็ได้พิจารณาสภาวะของการทดลอง (experimental conditions) และการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของอนุภาคนาโนที่ผลิตขึ้น (characterization) ก่อนที่จะพิจารณาข้อมูลของวัสดุนาโนสามชนิด ได้แก่ CNT, TiO_2, และ Quantum dots ลงท้ายด้วยการสรุปสิ่งที่ได้เรียนรู้จากการทบทวนเอกสารการวิจัย และสิ่งที่ควรจะทำต่อไป รายงานฉบับนี้ นับเป็นหนึ่งในเอกสารที่ผู้เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยนาโน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริบทของอาชีวอนามัย ควรจะได้อ่าน

- **An Evaluation of MSDS and Labels Associated with the Use of Engineered Nanomaterials** (http://www.safeworkaustralia.gov.au/AboutSafeWorkAustralia/WhatWeDo/Publications/Documents/374/AnEvaluationofMSDSandLabelsassociatedwiththeuseofengineerednanomaterials_June_2010.pdf) ความยาว 52 หน้า จัดทำขึ้นในปี พ.ศ. 2553 โดยการว่าจ้างบริษัทที่ปรึกษา Toxikos Pty เช่นกัน เนื้อหาเป็นการศึกษา material safety data sheet (MSDS) ของวัสดุนาโนจำนวน 50 รายการ กับฉลากสินค้านาโนจำนวน 15 รายการ เพื่อประเมินว่า ข้อมูลใน MSDS และในฉลาก สะท้อนให้เห็นถึงองค์ความรู้ที่มีอยู่ เกี่ยวกับอันตราย ความเสี่ยง และการควบคุม เพียงใด ซึ่งโดยสรุปแล้ว มีทั้งที่สะท้อนองค์ความรู้ และที่ขาดตกบกพร่อง

- **Developing Workplace Detection and Measurement Techniques for Carbon Nanotubes** (http://www.safeworkaustralia.gov.au/AboutSafeWorkAustralia/WhatWeDo/Publications/Documents/375/DevelopingWorkplaceDetectionandMeasurementTechniquesforCarbonNanotubes.pdf) ความยาว 69 หน้า Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) ซึ่งเป็นองค์การวิทยาศาสตร์แห่งชาติของออสเตรเลีย ทำนองเดียวกับสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของไทย จัดทำขึ้นในปี พ.ศ. 2553 โดยการจ้างของ Safe Work Australia ด้วยทุนของ National Nanotechnology Strategy เป็นรายงานที่ลงลึก ในเทคนิคการวัด CNT ในสถานที่ปฏิบัติงาน โดย CSIRO ต่อยอดขึ้นจากรายงานและงานวิจัยที่มีผู้ทำไว้แล้ว จึงค่อนข้างจะเป็นองค์ความรู้ที่ทันสมัย การวัดใช้ทั้งที่เป็นการวัดจาก

membrane และการวัดแบบ real-time จาก SMPS และ ELPI เหมาะสำหรับเป็นคู่มือในการลงมือปฏิบัติจริง

- **Engineered Nanoparticles: Investigating substitution and modification options to reduce potential hazards** (http://www.safeworkaustralia.gov.au/AboutSafeWorkAustralia/WhatWeDo/Publications/Documents/501/Nanomaterials_Investigating_substitution_modification_options_reduce_potential_hazards.pdf) ความยาว 81 หน้า RMIT OHS Research and Education Centre ของ RMIT University ในเมือง Melbourne จัดทำขึ้นในปี พ.ศ. 2553 โดยการจ้างของ Safe Work Australia ด้วยทุนของ National Nanotechnology Strategy เป็นความพยายามลดความเสี่ยงจากการใช้วัสดุนาโน ด้วยการหาวัสดุอื่นมาทดแทน (substitution) หรือด้วยการดัดแปลง (modification) ให้มีความเป็นพิษน้อยลง โดยใช้ความรู้ทางวิทยาศาสตร์เป็นพื้นฐาน ซึ่งหมายความว่า วัสดุที่จะนำมาทดแทน หรือการดัดแปลงวัสดุเดิม ต้องพยายามคงสภาพทางฟิสิกส์และเคมีของวัสดุที่จำเป็นต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์นาโนไว้ ในขณะที่ลดความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตลง รายงานฉบับนี้ครอบคลุมวัสดุนาโนหลายชนิด อาทิ CNT, fullerenes, nano TiO_2, nano CeO_2, nano ZnO, nano gold, nano silver, nano silica และ quantum dots รายงานฉบับนี้น่าอ่านเนื่องจากเป็นการนำความรู้ทางวิทยาศาสตร์ที่ได้จากการวิจัย มาประยุกต์ใช้ในชีวิตจริง ได้ประโยชน์ให้เห็นได้จริง และถึงแม้จะไม่ได้เป็นแนวปฏิบัติของความปลอดภัยนาโนในโรงงานอุตสาหกรรมแต่ก็มีความสำคัญ เนื่องจากการทดแทนหรือการดัดแปลงวัสดุนาโน จะช่วยเพิ่มความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานในโรงงานอุตสาหกรรม ด้วยการลดความเป็นพิษหรืออันตรายของวัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิต จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งของการคุ้มครองความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน

4. ตัวอย่างองค์กรปกครองระดับมลรัฐและส่วนท้องถิ่น

4.1 City of Berkeley, California, USA ในปี พ.ศ. 2549 ได้ออกข้อบัญญัติให้หน่วยงานใด ๆ ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับวัสดุนาโน ต้องกรอกแบบฟอร์มเรียกว่า Nanoparticle Safe Management Report (NSMR) ยื่นต่อ Toxics Management Division ทุก ๆ ปี เพื่อแสดงว่ามีมาตรการความปลอดภัย และอาจต้องยื่นเอกสารเพิ่มเติม เช่น แผนจัดการในกรณีเหตุวัสดุนาโนรั่วไหลออกนอกโรงงาน เป็นต้น

(http://www.ci.berkeley.ca.us/Commissions/environmentaladvisory/2006environmentaladvisory/pdf/030206AE15.pdf)

4.2 Office of Technical Assistance & Technology (OTA), State of Massachusetts, USA ในปี พ.ศ. 2553 ได้ตีพิมพ์เอกสาร OTA Technology Guidance Document: Nanotechnology - Consideration for Safe Development (http://www.mass.gov/Elwd/docs/dos/nano/OTA_nanotech_guidance_doc.pdf) ความยาว 8 หน้า มีเนื้อหาเป็นการออกแบบระบบบริหารความเสี่ยงในโรงงานอุตสาหกรรมนาโน

4.3 Department of Labor and Industries, State of Washington, USA ได้เปิดระบบการศึกษาทางไกลผ่านเว็บไซต์เรื่อง Nanotechnology Safety (http://www.lni.wa.gov/Safety/TrainTools/Online/Courses/courseinfo.asp?P_ID=172) ซึ่งมีเนื้อหาหลัก ๆ 3 ส่วน ได้แก่ (1) What is nanotechnology (2) Potential hazards, (3) Safety Measures

5. ตัวอย่างหน่วยงานเอกชนหากำไร

บริษัทเอกชนที่มีชื่อเสียงหลายแห่ง ได้เริ่มประกาศแนวปฏิบัติ (ใช้คำว่า code of conduct หรือ guideline) ของบริษัทเองเกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยีและการใช้วัสดุนาโน ในการผลิตผลิตภัณฑ์ของบริษัท ในที่นี้จะยกตัวอย่างเฉพาะเอกสารของบริษัทที่มีชื่อเสียง และที่มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานในโรงงานอุตสาหกรรม

5.1 The European Chemical Industry Council (cefic) จัดทำเอกสาร

- **Responsible Production and Use of Nanomaterials: Implementing Responsible Care®** ขึ้นเมื่อปี พ.ศ. 2553 ให้หลักการ 6 ข้อ ในการทำงานอย่างมี responsible care โดยมีการอ้างอิงไปถึง guidelines และ code of conduct ของบริษัทในเครือหลายแห่ง

5.2 BASF จัดทำเอกสารหลายฉบับ เช่น

- **Code of Conduct Nanotechnology** (http://www.basf.com/group/corporate/en/sustainability/dialogue/in-dialogue-with-politics/nanotechnology/code-of-conduct) เป็นหลักการใหญ่สี่ข้อของบริษัท ซึ่งมีการกล่าวถึงความเสี่ยงต่อสุขภาพอยู่ด้วย[7]

- **Guide to Safe Manufacture and for Activities Involving Nanoparticles at Workplaces in BASF AG** (http://basf.com/group/corporate/en/function/conversions:/publish/content/sustainability/dialogue/in-dialogue-with-politics/nanotechnology/images/BASF_Guide_to_safe_manufacture_and_for_activities_involving_nanoparticles.pdf) เป็นเอกสารยาว 2 หน้า แสดงถึงแนวปฏิบัติ 7 ประการ ของการใช้วัสดุนาโน ในสถานที่ปฏิบัติงาน โดยเน้นวัสดุนาโน ที่เป็นฝุ่นผง รวมทั้งผลิตภัณฑ์ที่มีฝุ่นผงนาโนเป็นองค์ประกอบ อันเป็นเรื่องที่เกี่ยวข้องกับสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานในโรงงานอุตสาหกรรมโดยตรง สรุปได้ว่า ควรมีมาตรการป้องกันฝุ่นนาโนในสถานปฏิบัติงาน ในขณะที่ยังไม่มีตัวเลขระดับปลอดภัย ก็ไม่ควรให้ผู้ปฏิบัติงานได้สัมผัสกับฝุ่นนาโนมากกว่าที่มีอยู่ในอากาศตามปกติ และแม้ความเสี่ยงจากการสัมผัสฝุ่นละอองนาโนกับผิวหนังจะมีน้อย ก็ควรจะมีมาตรการป้องกันโดยใช้อุปกรณ์ป้องกันตามมาตรฐานความปลอดภัยปกติที่เกี่ยวข้อง ในด้านการป้องกันการสัมผัสกับวัสดุนาโนนั้น ให้ใช้การป้องกันด้านเทคนิคเป็นหลัก และหากจำเป็นก็ให้ใช้การป้องกันด้านการบริหารจัดการและด้านการคุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลเสริมด้วย โดยที่พยายามผลิตวัสดุนาโนในระบบปิด ถ้าจำเป็นต้องเปิดออกซ่อม ต้องใช้อุปกรณ์ป้องกัน สำหรับการใช้การป้องกันด้านเทคนิคนั้น ขั้นตอนการบรรจุย้ายภาชนะ ไส บรรจุหีบห่อ หรือเก็บตัวอย่าง ต่างมีความเสี่ยงที่ฝุ่นนาโนจะฟุ้งกระจายออกมา ควรใช้ระบบดูดฝุ่น (extractor) ช่วยลดฝุ่นด้วย และควรเสริมมาตรการป้องกันทางเทคนิคนี้ด้วยมาตรการคุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล โดยใช้หน้ากากที่มีไส้กรอง class P2 และ P3 ซึ่งสามารถเพิ่มระดับการป้องกันได้โดยใช้ไส้กรองที่ seal อย่างแน่นหนา เช่น ใช้หน้ากากครอบทั้งหน้าที่มี P3 respiratory filter หรือที่มีอุปกรณ์ช่วยหายใจในตัว การ

---

7 (2) To the extent that new technologies are converted into concrete processes and products, the expertise required to weigh up the opportunities against the potential risks related to the use of new technologies in the form of innovative products and processes increases. The same is true for nanotechnology. We take these risks seriously and, in parallel with technological progress, work continuously to identify potential environmental and health risks. ...

ป้องกันผิวหนังทำได้โดยใช้อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล เช่น ถุงมือกันสารเคมี และผ้ากันเปื้อนชนิดใช้แล้วทิ้ง ถ้าต้องการเพิ่มระดับการป้องกัน ให้สวมชุดป้องกันสารเคมี ท้ายที่สุด ให้มีการเฝ้าระวังบริเวณปฏิบัติงานที่วัสดุนาโนอาจฟุ้งกระจายได้ ทั้งตามมาตรฐานฝุ่นที่มีใช้อยู่แล้ว และโดยการใช้ SMPS เพื่อหาจำนวนของอนุภาคนาโน และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วย

- **Safety Assessment of Nanomaterials -BASF as an example of the chemical industry** (http://www.dtsc.ca.gov/technologydevelopment/nanotechnology/upload/rdavid_nanov.pdf) เป็นเอกสารสไลด์ยาว 36 รูป เตรียมโดย Raymond M. David, Ph.D., DABT, Manager, Toxicology, BASF Corporation เริ่มต้นด้วย Code of Conduct ของ BASF และ Cific ความร่วมมือของ Environmental Defense กับ DuPont การทดสอบความปลอดภัยของวัสดุนาโน การวิจัยเกี่ยวกับความเป็นพิษและการสัมผัสวัสดุนาโน ข้อมูลการกระจายตัวในร่างกายมนุษย์ของวัสดุนาโน ความเป็นพิษต่อสารพันธุกรรม ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และวิธีทดสอบ สไลด์นี้น่าสนใจ เพราะมีข้อมูลผลการทดลองหลายอย่างที่หาดูได้ยาก

5.3 **Bayer** จัดทำเอกสารนโยบาย จุดยืน หลักการ แนวปฏิบัติ ฯลฯ หลายชิ้น ทั้งที่เกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งมาเกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยีและวัสดุนาโนโดยทางอ้อม และที่เกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยีและวัสดุนาโนโดยตรง ดังนี้

- **Bayer's Position on Nanotechnology** (http://www.baycareonline.com/nanomaterial_stewardship_EN.asp) เป็น web page ขนาดความยาว 3 หน้ากระดาษ A4 เนื้อหาเป็นเอกสารนโยบาย ที่แถลงจุดยืนด้านนาโนเทคโนโลยีของ Bayer โดยมีหัวข้อเรื่องความปลอดภัยต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมแยกออกมาต่างหาก อย่างไรก็ตาม เอกสารนี้เป็นเอกสารนโยบาย หรือเอกสารแม่บท ที่ยังไม่ลงลึกถึงขั้นเป็นแนวปฏิบัติ

- **Nanotechnology Stewardship Guiding Principles** (http://www.baycareonline.com/apac/search_view_EN.asp?ID=19) เป็น web page ขนาดความยาว 2 หน้ากระดาษ A4 เป็นเอกสารที่เริ่มลงลึก โดยให้แนวปฏิบัติ ที่ใช้กับวัสดุนาโน ในภาพรวม คือยังไม่เจาะจงชนิดของวัสดุ แนวปฏิบัติจึงเป็นหลักการ กว้าง ๆ แต่น่าจะเหมาะสมกับโรงงานทั่ว ๆ ไป รวม

ทั้งในประเทศไทยด้วย ได้แก่ (1) จะพยายามใช้วัสดุนาโนในรูปที่แขวนลอยในของเหลว ชิ้นเป็นแป้งเปียก ผสมไว้ในวัสดุอื่นเป็นเม็ดเล็ก ๆ หรือฝังตัวอยู่ในโครงข่ายวัสดุอื่น (2) เมื่อกิจกรรมในโรงงานไม่เปิดโอกาสให้ควบคุมการสัมผัสโดยใช้การห่อหุ้มวัสดุนาโนได้ ต้องใช้มาตรการลดความเสี่ยงสามด้าน คือ ด้านการป้องกันด้านเทคนิค ด้านการบริหารจัดการ และด้านการคุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล (3) พยายามทำงานที่อนุภาคนาโนจะฟุ้งกระจายได้ในระบบปิด ถ้าไม่สามารถทำได้ (เช่น ในขณะเก็บตัวอย่าง หรือซ่อมเครื่อง) ให้ใช้ท่อดูดลมเฉพาะที่ ในการทำความสะอาดบริเวณทำงาน ให้ใช้เครื่องดูดฝุ่นที่มีไส้กรองชนิด HEPA และเช็ดด้วยผ้าเปียก อย่าปัดกวาดหรือใช้ลมเป่า (4) ก่อนเริ่มทำงานกับวัสดุนาโน ผู้ปฏิบัติงานต้องได้รับทราบข้อมูลของวัสดุนั้น และรับทราบวิธีปฏิบัติกับวัสดุ รวมทั้งอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้น การใช้อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล และการควบคุมทางวิศวกรรมที่ใช้อยู่ นอกจากนั้น กรรมวิธีของการปฏิบัติงานต้องเขียนเป็นลายลักษณ์อักษร และได้รับการอนุมัติก่อนใช้กรรมวิธีนั้น ๆ และต้องมีการเฝ้าระวังเป็นประจำ ว่ามีการปฏิบัติตามนี้หรือไม่ (5) ถ้าไม่สามารถใช้การป้องกันด้านเทคนิคและการป้องกันด้านบริหารจัดการได้ ก็ต้องมีการคุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลอย่างพอเพียง การเลือกหน้ากากกรองฝุ่นให้ใช้วิธี risk-based โดยขึ้นกับกิจกรรม โดยทั่วไปเพียงพอที่จะใช้หน้ากากที่มีไส้กรอง เช่น FFFP2/FFFP3 หรือ N95/N100 (แบบที่ใช้กันในประเทศไทยเมื่อคราวไข้หวัดนกระบาด) และพยายามอย่าให้วัสดุนาโนสัมผัสกับผิวหนัง โดยการสวมใส่เสื้อคลุมที่เหมาะสม นอกจากนั้น ต้องปฏิบัติตามสุขลักษณะหลังจากทำงานกับวัสดุนาโนและระหว่างกำจัดขยะนาโนด้วย (7) ต้องมีมาตรการเฝ้าระวังการสัมผัสกับวัสดุนาโนในสถานที่ปฏิบัติงาน โดยใช้เครื่องมือวัดสำหรับอนุภาคนาโนโดยเฉพาะ ในปัจจุบันเนื่องจากยังไม่มี occupational exposure limit สำหรับวัสดุนาโนในอากาศ จึงต้องตั้งระดับการสัมผัสไว้ที่ระดับพื้นหลัง (background) โดยวัดระดับพื้นหลังก่อนจะทำงานกับวัสดุนาโน (8) ต้องมีมาตรการเฝ้าระวังสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน ถ้าเริ่มมีปัญหาต้องรีบเยียวยาแก้ไข และควรปรึกษานักอาชีวอนามัย ถึงการตรวจร่างกายและทดสอบที่จำเป็น

- **Baytubes® CarbonNanotubes Safe Handling Guidelines** เป็นแนวปฏิบัติความยาว 16 หน้า (เป็นเนื้อหาจริง ๆ เพียง 6 หน้า) มาพร้อมกับสไลด์สำหรับบรรยายสรุป (http://www.aiha.org/localsections/html/pitts/PDF_files/NanoSeminarFeeley.pdf) มีลักษณะเป็นกรณีศึกษา ในการเอาแนวปฏิบัติกว้าง ๆ ที่ใช้กับวัสดุนาโนทุกชนิด มาใช้ในกรณีเฉพาะ

CNT นอกจากนั้น สไลด์บรรยายก็ประกอบด้วยรายละเอียดการคำนวณ ที่ทำให้ผู้ทำงานกับ CNT ได้เห็นตัวอย่างการใช้งานจริงของแนวปฏิบัติ นับว่าเป็นเอกสารที่น่าสนใจฉบับหนึ่ง

5.4 Business and Industry Advisory Committee (BIAC) หรือคณะกรรมการที่ปรึกษาขององค์การเพื่อความร่วมมือทางเศรษฐกิจและการพัฒนา (Organisation for Economic Co-operation and Development หรือ OECD) ซึ่งประกอบด้วยตัวแทนจากภาคธุรกิจ และเป็นกลไกที่ทำให้ OECD ได้รับฟังความคิดเห็นจากบริษัทต่าง ๆ ได้มีกิจกรรมในหลายแง่มุม ที่เกี่ยวข้องกับแนวปฏิบัติด้านนาโนในโรงงานอุตสาหกรรม ทั้งที่ทำในนามของ BIAC เอง และที่ทำในนามของบริษัทในเครือ (เช่น DuPont)

5.5 DuPont บริษัทเคมีข้ามชาติรายใหญ่ ได้ร่วมมือกับ Environmental Defense ซึ่งเป็นองค์กรพัฒนาเอกชน (ไม่หากำไร)

- เริ่มพัฒนากรอบ **framework for the responsible development, production, use and disposal of nano-scale materials** มาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2549 ในปัจจุบันได้เปิดให้บริการดาว์นโหลดทางเว็บไซต์ (http://www.nanoriskframework.com/page.cfm?tagID=1095) โดยมีตัวอย่างคำชมจากผู้วิจารณ์ (http://asutriplehelix.org/node/50) กรอบ (framework) นี้เป็นความพยายามที่ทดลองทำมานาน โดยพิจารณาตลอด life cycle ของผลิตภัณฑ์ และเป็นความภูมิใจของทั้ง DuPont ซึ่งเป็นเอกชนรายใหญ่ กับ Environmental Defense ซึ่งเป็นองค์กรพัฒนาเอกชน ที่สามารถร่วมมือกันสร้างกรอบนี้ขึ้นมาได้ ผู้ใช้จะได้รับความรู้ทั้งในด้านหลักการ และได้รับคำแนะนำมาตรการที่ควรใช้ เพื่อลดการสัมผัสกับวัสดุนาโนในสภาพของการทำงานในสถานปฏิบัติงาน

5.6 Swiss Retailers' Organization (IG DHS) หรือสมาคมผู้ขายปลีกสวิส ได้จัดทำ

- **Code of Conduct for Nanotechnology** (http://www.rachel.org/?q=es/node/6944) เริ่มใช้ในปี พ.ศ. 2551 มีลักษณะเป็นแนวปฏิบัติของผู้ขายปลีก ดังนั้นจึงมีแนวคิดหลัก อยู่ที่การคุ้มครองผู้บริโภคด้วยการให้ข้อมูลที่เป็นจริงอย่างละเอียด อันจะช่วยลดข้อพิพาทระหว่างผู้บริโภคกับผู้ขายปลีก และลดความรับผิดของผู้ขายปลีกด้วย อย่างไรก็ตาม มี

บางส่วนของ Code of Conduct นี้ ที่มีผลกระทบกลับไปถึงผู้ผลิตและผู้ขายส่งในแง่ของข้อมูลที่ผู้ขายปลีกเรียกร้อง

5.7 **Mercer** ทำธุรกิจในการเป็นที่ปรึกษาข้ามชาติ ในการบริหารจัดการความปลอดภัยในโรงงานอุตสาหกรรม ในการบริหารงานบุคคล และในการบริหารการลงทุน เมื่อกลางปี พ.ศ. 2553 Mercer ได้ควบรวมกิจการกับ ORC Worldwide ซึ่งเป็นบริษัทที่ปรึกษาด้านการบริหารงานบุคคลข้ามชาติขนาดใหญ่ โดยมี home page อยู่ที่ http://www.orc-dc.com

- เมื่อกลางปี พ.ศ. 2552 ORC Networks ได้นำเสนอ **Nanotechnology Consensus Workplace Safety Guidelines** (http://www.orc-dc.com?q=node/1962) ซึ่งนำด้วยเอกสาร background information (http://www.orc-dc.com/files/2008/1962/background.pdf) แล้วลงท้ายด้วยตารางที่มี 9 คอลัมน์ X 6 แถว คอลัมน์ทั้งเก้าเป็นองค์ประกอบสำคัญของความปลอดภัยต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม อันได้แก่ (1) การประเมินลักษณะที่เป็นอันตรายของวัสดุนาโน (2) การประเมินการสัมผัสของผู้ปฏิบัติงานกับวัสดุนาโน (3) การประเมินประเด็นที่ต้องระวังเพื่อความปลอดภัยของกรรมวิธีปฏิบัติงาน (4) การประเมินการปล่อยวัสดุนาโนออกสู่สิ่งแวดล้อมและการเปลี่ยนแปลงของวัสดุนาโนหลังจากการปล่อยนั้น (5) ประเมินความเสี่ยงด้านความปลอดภัยต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมของวัสดุนาโน (6) ดำเนินมาตรการควบคุมความเสี่ยงด้านความปลอดภัย ต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมของวัสดุนาโน (7) การเฝ้าระวังทางการแพทย์ (8) การสื่อสารและการฝึกอบรม และ (9) การจัดทำเอกสารที่เกี่ยวข้อง สำหรับแถวทั้งหก ได้แก่ (1) การทดสอบความเป็นพิษ (2) วิธีการตั้งระดับการสัมผัสสูงสุด (exposure limit) (3) ศักยภาพในการติดไฟ (4) ศักยภาพในการระเบิด (5) ความไม่บริสุทธิ์ที่ปะปนมา (6) การกระจายของขนาดอนุภาค ในแต่ละช่องตารางจะโยงไปสู่เอกสารแนวปฏิบัติที่เกี่ยวข้อง และ peer review comments ของเอกสารนั้นด้วย อย่างไรก็ตาม ผู้อ่านต้องพิเคราะห์อย่างระมัดระวัง เป็นต้นว่าเครื่องมือบางอย่างในเอกสารได้รับการพัฒนาขึ้นสำหรับวิเคราะห์ผงระดับไมครอนและไม่เคยได้รับการทดสอบกับอนุภาคระดับนาโน หรือเทคนิคการเฝ้าระวังฝุ่นนาโนนั้นได้รับการออกแบบมาสำหรับพื้นที่ปฏิบัติงาน ไม่ใช่ใช้กับแต่ละบุคคล คือแนะนำให้ใช้ cascade impactor สำหรับเฝ้าระวัง mass concentration และ scanning mobility particle sizer สำหรับวัด number concentration เนื่องจากมีราคาถูก (สำหรับหน่วยงานต่างประเทศ) ใช้ง่าย และวัดมวลได้ค่อนข้างจะโดยตรง และ diffusion charger สำหรับเฝ้าระวังพื้นที่ผิวของอนุภาค

นาโน เนื่องจากวัดการกระจายของขนาดอนุภาคได้เป็นช่วงกว้างในเวลาจำกัดในขณะที่มีราคาถูกกว่าเครื่องอื่น ๆ นอกจากนั้นแนวปฏิบัตินี้ ยังอธิบายวิธีเก็บตัวอย่าง วิธีวิเคราะห์ และการเฝ้าระวังวิธีอื่น เช่น การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน อีกด้วย

6. ตัวอย่างหน่วยงานเอกชนไม่หากำไร

6.1 American Society for Testing and Materials (ASTM) (http://www.astm.org/Standards/nanotechnology-standards.html) ได้จัดพิมพ์เอกสาร

- **Standard Guide for Handling Unbound Engineered Nanoscale Particles in Occupational Settings (ASTM E2535-07)** เมื่อปี พ.ศ. 2550 (http://www.astm.org/Standards/E2535.htm) เป็นเอกสารความยาว 24 หน้า ซึ่ง ASTM ขายในราคา 55 เหรียญสหรัฐ เนื้อหาเป็นแนวปฏิบัติด้านความปลอดภัย ที่ใช้สำหรับวัสดุนาโนที่ผลิตขึ้น ซึ่งอยู่ในสภาพผงฝุ่น ไม่ได้แขวนลอยในของเหลว หรือฝังไว้ในพอลิเมอร์ ฯลฯ

7. ตัวอย่างมหาวิทยาลัย

ในปัจจุบัน มหาวิทยาลัยเป็นจำนวนมากที่มีกิจกรรมวิจัย และ/หรือ วิจัยและพัฒนา เกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยี ได้พัฒนาแนวปฏิบัติภายในมหาวิทยาลัยขึ้น ตัวอย่างเช่น

7.1 TUDelft University

- จัดทำเอกสาร **TNW Nanosafety Guidelines** ขึ้นเมื่อเดือนกันยายน พ.ศ. 2551 อย่างไรก็ตาม เอกสารส่วนใหญ่ในกลุ่มนี้ มีเนื้อหาเน้นไปที่ห้องปฏิบัติการวิจัย มีเพียงบางส่วนที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับโรงงานอุตสาหกรรมได้

7.2 International Council on Nanotechnology (ICON) เป็นหน่วยงานเทคนิคที่เกิดจากการสนับสนุนของภาคเอกชน ภาคเอกชนที่ไม่หากำไร และรัฐบาลสหรัฐ โดยได้รับงบประมาณผ่าน National Science Foundation (NSF) ตั้งอยู่ที่มหาวิทยาลัย Rice University มี โครงการวิเคราะห์แนวปฏิบัติด้านนาโนเทคโนโลยี

- **Phase One Report: Current Knowledge and Practices Regarding Environmental Health and Safety in the Nanotechnology Workplace** (http://cohesion.rice.edu/CentersAndInst/ICON/emplibrary/Phase%20I%20Report_UCSB_ICON%20Final.pdf เข้าถึงเมื่อวันที่ 30 มิถุนายน 2554) เป็นเอกสารที่พิมพ์เผยแพร่ในปี พ.ศ. 2549 เนื้อหาเป็นการสรุปแนวปฏิบัติ ฯลฯ ที่มีผู้อื่นพัฒนาไว้ก่อนปี พ.ศ. 2548 และตั้งกรอบของการประเมินความเสี่ยงขึ้น

- **Phase Two Report: Survey of Current Practices in the Nanotechnology Workplace.** (http://cohesion.rice.edu/CentersAndInst/ICON/emplibrary/ICONNanotechSurveyFullReduced.pdf เข้าถึงเมื่อวันที่ 30 มิถุนายน 2554) เป็นเอกสารที่พิมพ์เผยแพร่เมื่อปลายปี พ.ศ. 2549 เนื้อหาเป็นผลการสำรวจการปฏิบัติตามมาตรการความปลอดภัยนาโนในสถานปฏิบัติงาน 337 แห่ง ซึ่งเป็นบริษัทเอกชน 64 แห่ง ในช่วงเวลาที่ความปลอดภัยนาโน ยังไม่เป็นที่รู้จัก และยังไม่มีการเฝ้าระวังอนุภาคนาโนที่ผลิตขึ้น

สรุปแนวปฏิบัติด้านความปลอดภัยนาโนของต่างประเทศ

เอกสารต่าง ๆ ของหน่วยงานต่างประเทศดังกล่าวข้างต้นพอจะแบ่งเป็น กลุ่มใหญ่ ๆ ได้ 4 กลุ่มดังนี้

กลุ่มแรก เป็นเอกสารนิยามต่าง ๆ ของ ISO ซึ่งโดยตัวของมันเองไม่ได้เป็นแนวปฏิบัติ แต่มีความสำคัญในฐานะเอกสารกำหนดนิยามศัพท์ ให้เป็นที่เข้าใจร่วมกันของทุกฝ่าย เป็นต้นว่าในปี พ.ศ. 2549 งานด้านความปลอดภัยนาโนภายใต้ OECD เกือบจะต้องหยุดชะงัก เนื่องจากความไม่แน่นอนในนิยามศัพท์ จึงได้มีการประสานเป็นการภายใน ขอให้ ISO/TC229 เร่งบัญญัติและนิยามศัพท์ที่ถือว่าเป็นศัพท์หลัก ๆ (core terms) อย่างรีบด่วน

กลุ่มที่สอง เป็นแนวปฏิบัติในการวัด (measurement) ที่ใช้กับวัสดุนาโน เนื้อหาของเอกสารในกลุ่มนี้ ลงลึกไปถึงการหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่กำหนดสมบัติของวัสดุนาโนแต่ละชนิด หลักการของการวัด เครื่องมือที่ใช้วัด วิธีเตรียมสารตัวอย่าง วิธีวิเคราะห์ข้อมูลดิบที่ได้จากการวัด (การคำนวณการแปลผลการวัด) ตลอดไปจนถึงการเปรียบเทียบจุดอ่อนจุดแข็งของเครื่องมือแบบต่าง ๆ ฯลฯ แนวปฏิบัติเหล่านี้ กำลังได้รับการประมวล กลั่นกรอง และพัฒนาเสริมขึ้น โดย OECD ซึ่งควรจะได้เป็นเอกสารใหม่ล่าสุด ราวปลายปี พ.ศ. 2554 หรือต้นปี พ.ศ. 2555

กลุ่มที่สาม เน้นการป้องกันอันตรายจากการสัมผัสกับวัสดุนาโน โดยอิงหลักการบริหารความเสี่ยงครบรูปแบบ ซึ่งต้องพิจารณาจากทั้งความเป็นอันตรายของวัสดุนาโนแต่ละชนิด และโอกาสในการสัมผัสกับวัสดุนาโนชนิดนั้น ๆ ในระหว่างการปฏิบัติงาน เอกสารในกลุ่มนี้มักจะจัดทำไว้ก่อนปี พ.ศ. 2551 ด้วยความพยายามเล็งผลเลิศ อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดความตระหนักมากขึ้น ว่าความเป็นอันตรายของวัสดุนาโนแต่ละชนิดยังไม่มีข้อยุติ บางกรณีมีผลการวิจัยที่ขัดหรือแย้งกัน และแทบจะไม่มีงานวิจัยที่สามารถอ้างอิงเพื่อกำหนดระดับความปลอดภัยของวัสดุนาโนออกมาเป็นตัวเลข สำหรับในประเทศไทยนั้นถึงแม้จะพยายามบริหารความเสี่ยงในระดับคุณภาพ (qualitative) เช่นใช้ control banding ก็อาจจะมีปัญหาเช่นกัน เนื่องจากนอกจากจะไม่มีตัวเลขระดับมาตรฐานที่ควรจะต้องระวังแล้ว เครื่องมือวัดทุกชนิดยังมีราคาแพงมากอีกด้วย

กลุ่มสุดท้าย ยอมรับข้อจำกัดว่า ข้อมูลความเป็นอันตรายของวัสดุนาโนแต่ละชนิดยังไม่ลงตัวนัก มีงานวิจัยใหม่ ๆ เพิ่มขึ้นอย่างทวีคูณในแต่ละปี และวัสดุนาโน ก็มีชนิดแปลก ๆ ใหม่ ๆ เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ดังนั้น การบริหารความเสี่ยงในเอกสารกลุ่มนี้ จึงยอมให้มีความยืดหยุ่นในด้านอันตรายของวัสดุนาโน เพื่อรองรับหลักฐานและข้อสรุปใหม่ ๆ ด้วย โดยอิงหลักการระวังไว้ก่อน (precautionary principle) และเน้นที่การลดการสัมผัสกับวัสดุนาโน โดยที่หากรัฐบาลหรือโรงงานอุตสาหกรรมต้องการจะเพิ่มเติมข้อมูลอันตรายลงไปในกรอบแนวคิด ก็สามารถเพิ่มเติมได้หลายระดับ ตั้งแต่ระดับคุณภาพ (qualitative) ไปจนถึงระดับปริมาณ (quantitative) โดยที่ภาคอุตสาหกรรมเองก็มองว่า การทำงานอย่างปลอดภัย คือการที่ไม่ให้ปริมาณหรือความเข้มข้นของวัสดุนาโน ฟุ้งกระจายในอากาศมากกว่าที่มีอยู่ตามปกติ (จากวัสดุนาโนตามธรรมชาติ รวมกับวัสดุนาโนที่ไม่ได้จงใจผลิตขึ้น)

เอกสารในกลุ่มที่ 3 และกลุ่มที่ 4 หลายฉบับ น่าจะมีประโยชน์ต่อการพัฒนาแนวปฏิบัติด้านความปลอดภัยนาโนในโรงงานอุตสาหกรรมไทย ดังนี้

เอกสารที่จัดพิมพ์ในช่วงปี พ.ศ. 2549 - 2551 เป็นแหล่งอ้างอิงที่ดีของเทคโนโลยีการวัดการสัมผัส (exposure measurement technologies) สำหรับอนุภาคนาโน เนื่องจากเทคโนโลยีการวัดส่วนใหญ่เริ่มอยู่ตัวแล้วในช่วงเวลานั้น รวมทั้งเทคนิคการเตรียมตัวอย่าง (sample preparation) ด้วย

เอกสารที่ทบทวนและสรุปไว้ข้างต้น หลายฉบับให้หลักการประเมินความเสี่ยงในภาพรวมไว้ได้อย่างดี และนำหลักการมาประยุกต์กับกรณีวัสดุนาโน ซึ่งข้อมูลความเป็นอันตราย (hazard)

แทบจะไม่มีอยู่เลยในช่วงเวลานั้น แล้วจึงใช้วิธีใดวิธีหนึ่ง ได้แก่ (1) เรื่องความเป็นอันตรายรอไว้ก่อน จึงพิจารณาละเอียดเฉพาะประเด็นการสัมผัส หรือ (2) เปลี่ยนจากการประเมินเชิงปริมาณ (quantitative) ไปใช้การประเมินเชิงคุณภาพ (qualitative) เช่น พยายามนำวิธี control banding ซึ่งมีลักษณะกึ่งเชิงปริมาณ มาประยุกต์ใช้เป็นต้น

ผลจากการทบทวนเอกสารดังกล่าว เป็นที่มาของแนวปฏิบัติเบื้องต้นด้านความปลอดภัยนาโนสำหรับภาคอุตสาหกรรม ซึ่งมีลักษณะที่พึงประสงค์สำคัญ คือ

1. ไม่ต้องรอผลการศึกษาความเป็นอันตรายของวัสดุนาโนแต่ละชนิดเพื่อทำการประเมินความเสี่ยง เพราะเน้นที่การลดการสัมผัสเป็นหลัก

2. ต่อไปในอนาคต เมื่อเริ่มมีข้อสรุป เกี่ยวกับความเป็นอันตรายของวัสดุนาโนแต่ละชนิด หรือมีตัวเลขระดับ exposure limit ต่าง ๆ ออกมา ก็สามารถนำมาผนวกเข้าในกรอบแนวคิดได้อย่างไม่ยากลำบาก และไม่ต้องทิ้งผลการศึกษาที่ทำมาแล้วด้วย โดยสามารถจะขยับวิธีการประเมินความเสี่ยงขึ้นไปตามลำดับ จากเชิงคุณภาพ (qualitative) เป็นเชิงกึ่งปริมาณ (semi-quantitative) และเชิงปริมาณ (quantitative) ได้ตามข้อมูลที่มีเพิ่มขึ้นในอนาคต

3. เนื่องจากแนวปฏิบัติเบื้องต้นด้านความปลอดภัยนาโนสำหรับภาคอุตสาหกรรม เน้นขั้นตอนที่ผู้ปฏิบัติงานทำในโรงงาน ดังนั้นจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับทุกอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถนำข้อมูล การสัมผัส (exposure) และการควบคุม (control) สำหรับขั้นตอนย่อย ๆ มาประกอบเข้ากันเป็นขั้นตอนของอุตสาหกรรมประเภทใหม่ได้ทันที

คณะทำงาน

ที่ปรึกษา

อธิบดีกรมโรงงานอุตสาหกรรม
รองอธิบดีกรมโรงงานอุตสาหกรรม

คณะกรรมการประสานและรับมอบงาน

นางเฮเลน อารมย์ดี	ประธานกรรมการ
นางสาวอิสราภรณ์ วิจิตรจรรยากุล	กรรมการ
นายชัยอนันต์ อรุณฤกษ์ดีกุล	กรรมการ
นายบวร สัตยาวุฒิพงศ์	กรรมการ
นางสาวกฤติยา เหมือนใจ	กรรมการและเลขานุการ

คณะผู้จัดทำ

ดร. เลอสรร ธนสุกาญจน์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ดร. เฉลิมชัย ชัยกิตติภรณ์	คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ดร. ศิรศักดิ์ เทพาคำ	ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

คณะผู้เชี่ยวชาญ ที่ได้ให้ข้อคิดเห็นในการจัดทำแนวปฏิบัติเบื้องต้นฯ

นายภาณุ ชมภูพงศ์	สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
ดร. วิสันติ เลาหอุดมโชค	กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน กระทรวงแรงงาน
ศ. ดร. สุพจน์ หารหนองบัว	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ. ดร. วราพรรณ ด่านอุตรา	ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ดร. สุจิตรา วาสนาดำรงดี	ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศ. ดร. สุวบุญ จิรชาญชัย	วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ดร. รัฐพล รังกุพันธ์	สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ดร. สุพิณ แสงสุข	ศูนย์ข้อมูลข่าวสารและองค์ความรู้ด้านความปลอดภัยนาโน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ดร. ณัฏฐิตา ชวนเกริกกุล	ศูนย์นวัตกรรมนาโนเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
นายสุทัศน์ มังคละคีรี	สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม

ผู้ประกอบการและผู้บริหารภาคเอกชน ที่เอื้อเฟื้อให้สำรวจโรงงาน และให้ข้อคิดเห็นในการจัดทำแนวปฏิบัติเบื้องต้นฯ

นายสมพร ศิรินุพงศ์	บริษัทไลอ้อน (ประเทศไทย) จำกัด
นายบุญ ยงยุทธสุทธิการ	บริษัทไลอ้อน (ประเทศไทย) จำกัด
นายศิวาวุธ ชารพ	บริษัท แพน ราชเทวี กรุ๊ป จำกัด (มหาชน)
นายสุทัศน์ ตันบริภัณฑ์	บริษัท แพน ราชเทวี กรุ๊ป จำกัด (มหาชน)
นางเสาวณีย์ อัศวพงษ์อนันต์	บริษัท นิปปอนเพนต์ (ประเทศไทย) จำกัด
เภสัชกร สุนทร วรกุล	องค์การเภสัชกรรม
นายวินิต เหลืองศรีสุข	องค์การเภสัชกรรม
เภสัชกรหญิงอัจฉรา เอกแสงศรี	องค์การเภสัชกรรม
เภสัชกรหญิง ดร. พนัสยา ศุภสารสาทร	องค์การเภสัชกรรม
ดร. ชัชฎา โพธิพุกกณะ	องค์การเภสัชกรรม
นายโชคชัย บัณฑาลัย	องค์การเภสัชกรรม
นายพิชัย อุตมาภินันท์	บริษัทยูไนเต็ด เท็กซ์ไทล์ มิลส์ จำกัด
Mr. Hiroshi Kajiyama	บริษัทบริดจสโตน คาร์บอน แบล็ค (ประเทศไทย) จำกัด
นางสาวเกศรา เกตุสุริยา	บริษัทบริดจสโตน คาร์บอน แบล็ค (ประเทศไทย) จำกัด
นายชัยศิริ ยลยินประเสริฐ	บริษัทบริดจสโตน คาร์บอน แบล็ค (ประเทศไทย) จำกัด
นายชัชวาล แก้วไร่	บริษัทบริดจสโตน คาร์บอน แบล็ค (ประเทศไทย) จำกัด

นายสุริพันธ์ โทนะพันธ์	บริษัทบริดจสโตน คาร์บอน แบล็ค (ประเทศไทย) จำกัด
นายกุศล ชินวินิจกุล	บริษัทไออาร์พีซีจำกัด (มหาชน)
นายธนเดช ชั้นประเสริฐ	บริษัทไออาร์พีซีจำกัด (มหาชน)

สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม

75/6 ถนนพระรามที่ 6 แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400

โทรศัพท์ 0-2202-4215-6 โทรสาร 0-2354-3392

http://www.diw.go.th