ผลกระทบของการพัฒนานาโนเทคโนโลยีต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ
The Impact of the Development of Nanotechnology on the Environment and Health

วิรจิรวัส รวิชญทรัพย์[1], จักรกฤษณ์ ศิวะเดชาเทพ[1] และจันทราทิพย์ คาระวะ[1]
Wirajirawat Rawichayasub[1], Jakkris Sivadechathep[1] and Chandrathip Karawa[1]
[1]คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม
[1]Faculty of Public Health, Siam University
Received: January 3, 2020
Revised: February 22, 2020
Accepted: February 28, 2020

บทคัดย่อ

ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นของนาโนเทคโนโลยี จึงถูกนำมาใช้ในรูปของอนุภาคนาโนเชิงวิศวกรรมกับอุตสาหกรรมต่าง ๆ เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ ทำให้เกิดความก้าวหน้าทางเศรษฐกิจ รวมทั้งการจ้างงานเพื่อเพิ่มการผลิตสินค้าให้ตอบสนองต่อความต้องการสินค้า จนเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ที่สังเกตได้จากมีการตรวจพบอนุภาคนาโนในธรรมชาติ แน่นอนว่าสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในสิ่งแวดล้อมย่อมหลีกเลี่ยงการสัมผัสอนุภาคนาโนเชิงวิศวกรรมไม่ได้อย่างแน่นอน ซึ่งนักวิจัยได้พยายามศึกษาความเป็นพิษของอนุภาคนาโนชนิดต่าง ๆ โดยใช้พืช สัตว์และเซลล์มนุษย์ในการทดลอง พบว่าอนุภาคนาโนที่อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม จะสามารถสร้างความเป็นพิษได้หลายรูปแบบ เช่น ยับยั้งการเจริญเติบโตในพืช การทำลายสารพันธุกรรมในสัตว์ทดลองและเซลล์มนุษย์ รวมทั้งเป็นสาเหตุของการเกิดเนื้องอกหรือเซลล์มะเร็งได้ ยิ่งไปกว่านั้น จากการทบทวนผลการศึกษาเกี่ยวกับผลจากการได้รับสัมผัสอนุภาคนาโนที่ผ่านมา พบว่า ผลการศึกษาส่วนใหญ่ได้ศึกษาในพืชและสัตว์ทดลองแสดงให้เห็นว่าการได้รับสัมผัสอนุภาคนาโนมีความอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต แต่อย่างไรก็ตามนาโนเทคโนโลยีถือว่าเป็นเทคโนโลยีเกิดใหม่ ต้องมีการศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอีกมาก รวมทั้งการศึกษาการได้รับสัมผัสระยะยาว ซึ่งจะช่วยให้ได้ข้อสรุปที่ชัดเจนว่าการได้รับสัมผัสอนุภาคนาโนเชิงวิศวกรรมมีความรุนแรงต่อมนุษย์อย่างไร อีกทั้งเป็นการนำไปสู่การออกแบบข้อบังคับและวิธีการต่าง ๆ ในการลดผลกระทบจากนาโนเทคโนโลยีต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพได้

คำสำคัญ: นาโนเทคโนโลยี, อนุภาคนาโนเชิงวิศวกรรม, ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม, ผลกระทบต่อสุขภาพ

Abstract

The great features of nanotechnology are used as Engineered Nanomaterial--ENM, in many industries to increase the value of products that increase economic growth, including the hiring of workers in response to demand. This cause and effect action in the environment that ENM exhibits are also detected in nature. Plant and animal life are absolutely exposed to ENMs. Moreover, the result of ENM's exposure in plants and in vivo showed harmful impacts on living things. However, nanotechnology is a new technology that needs more study about its impact on the environment and health. Including the effects of long-term exposure that shows clear results about the harmful nature of ENM's exposure to humans. In addition, these results will be referred to when designing the regulations and methods that reduce the harmful impacts of nanotechnology on the environment and health.

Keywords: nanotechnology, engineering nanomaterial, environmental impact, health impact

บทนำ

นาโนเทคโนโลยี เป็นเทคโนโลยีการสังเคราะห์อนุภาคสารให้มีขนาดเล็กในช่วง 1-100 นาโนเมตร และมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า 60 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (European Commission, 2011) หรือมีขนาดเล็กกว่าเส้นผม 1,000-100,000 เท่าของเส้นผม ประกอบกับคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เป็นต้นว่า การดูดกลืนสเปคตรัมของแสง ความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี และความแข็งแรง เป็นต้น (Institute for Innovation & Development of Learning Process, 2006) ทำให้นาโนเทคโนโลยีถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์โดยใช้นาโนเทคโนโลยีในรูปวัสดุนาโนเชิงวิศวกรรม (engineering nanomaterial) ดังแสดงในตาราง 1 ส่งผลให้เกิดการลงทุนด้านการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีในอุตสาหกรรมอย่างมหาศาล โดยในสหรัฐอเมริกามีการลงทุนด้านนาโนเทคโนโลยีเพิ่มขึ้นจาก 500 ล้านเหรียญสหรัฐในปี ค.ศ. 2001 เป็น 1.8 พันล้านเหรียญสหรัฐ ในปี ค.ศ. 2010 (Shapira & Wang, 2010) และคาดการณ์ว่าจะเพิ่มขึ้นเป็น 75.8 พันล้านเหรียญสหรัฐในปี ค.ศ. 2020 (RNCOS, 2015). ส่งผลให้มีการจ้างงานในอุตสาหกรรมนาโนเทคโนโลยีทั่วโลกมากถึง 400,000 คน ในปี ค.ศ. 2008 และคาดการณ์ว่า ในปี ค.ศ. 2020 จะมีแรงงานทั่วโลกในอุตสาหกรรมนาโนเทคโนโลยีมากถึง 6,000,000 คน (Roco, Mirkin, & Hersam, 2011) ทำให้การพัฒนาด้านนาโนเทคโนโลยีในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เป็นไปอย่างรวดเร็ว สวนทางกับองค์ความรู้เกี่ยวกับผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมจากนาโนเทคโนโลยี ซึ่งปัจจุบันยังไม่มีงานวิจัยหรือองค์ความรู้ที่เพียงพอต่อการกำหนดมาตรฐานหรือข้อกำหนดที่เป็นสากลเกี่ยวกับปริมาณการได้รับสัมผัสอนุภาคนาโนที่จะไม่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมได้

ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบจากนาโนเทคโนโลยีต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมเพื่อเข้าใจความเป็นพิษ และอันตรายที่อาจเกิดขึ้นต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมของผู้ปฏิบัติงานในกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมที่มีการใช้นาโนเทคโนโลยี สิ่งแวดล้อมโดยรอบกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จากนาโนเทคโนโลยี รวมทั้งตัวผู้ใช้ผลิตภัณฑ์

ตาราง 1

วัสดุนาโนที่มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ

ประเภทวัสดุนาโน	ประเภทอุตสาหกรรม
อนุภาคนาโนเงิน	บรรจุภัณฑ์ เครื่องสำอาง เครื่องมือแพทย์
หมุดควอนตัม	เครื่องมือแพทย์
ซิงค์ออกไซด์	บรรจุภัณฑ์ เครื่องสำอาง
ไทเทเนียมออกไดออกไซด์	บรรจุภัณฑ์ เครื่องสำอาง วัสดุก่อสร้าง
ท่อนาโนคาร์บอน	เครื่องมือแพทย์ ยานยนต์
อนุภาคนาโนทอง	อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

Note. Adapted from "*Nanosafety*" by Department of Labour Protection and Welfare, 2011, Retrieved from http://www.oshthai.org/attachments/article/146/146.pdf; "*Nanosafety Guideline for Industries*", by Department of Industrial Works, 2012, Bangkok: Chokun copies; "*Guidance for Industry on Nano Health Products*" by Food and Drug Administration, 2015, Nonthaburi: Food and Drug Administration

ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

จากการขยายตัวอย่างรวดเร็วของนาโนเทคโนโลยีในวงการอุตสาหกรรม ประกอบกับการตรวจพบอนุภาคนาโนที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ในธรรมชาติมากขึ้น (Shi et al., 2016) จึงเริ่มเกิดความกังวลเกี่ยวกับการปนเปื้อนอนุภาคนาโนในสิ่งแวดล้อม เช่น การปล่อยน้ำเสียที่ปนเปื้อนอนุภาคนาโน ซึ่งมีสาเหตุสำคัญคือ ระบบบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอที่จะแยกอนุภาคนาโนออกจากน้ำเสียได้ การใช้ปุ๋ยนาโนเทคโนโลยีในภาคเกษตรกรรม รวมทั้งในขั้นตอนกระบวนการผลิตปุ๋ยด้วยเช่นกัน (Rodrigues et al., 2017) สาเหตุเหล่านี้ทำให้อนุภาคนาโนตกค้างในสิ่งแวดล้อมและผลผลิตทางการเกษตรจำนวนมาก ซึ่งมีความเป็นพิษต่อพืชและสัตว์ ดังจะเห็นได้จากการศึกษาการดูดซึมอนุภาคนาโนเงิน (Nano-Ag) ในแตงกวาและข้าวสาลี พบว่า พืชทั้งสองชนิดเติบโตช้าลง และมีการสะสมของอนุภาคนาโนเงินที่ใบของพืชทั้งสองชนิด (Wang et al., 2017) และความเป็นพิษของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อหัวหอม (*Allium cepa*) และต้นยาสูบ (*Nicotiana tabacum*) พบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ทำลายสารพันธุกรรมของพืชทั้งสองชนิด (Ghosh, Bandyopadhyay & Mukherjee, 2010) แต่บางงานวิจัยกลับพบว่า อนุภาคนาโนและการเจริญเติบโตของพืชไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ โดยการศึกษาของ Lin และ Xing พบว่า ท่อนาโนคาร์บอนแบบหลายชั้น (multi-walled carbon nanotube) ไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตและการงอกของพืชอย่างมีนัยสำคัญ (Lin & Xing, 2007) จึงอาจเป็นไปได้ว่ามีตัวแปรอื่นที่ส่งผลต่อระดับความเป็นพิษของอนุภาคนาโน เช่น การศึกษาระดับความเป็นพิษของซิงค์ออกไซด์ (นาโน) (Nano-ZnO) ต่อการเจริญเติบโตของพืชที่สภาวะต่าง ๆ ได้แก่ การทดสอบซิงค์ออกไซด์ (นาโน) ที่ pH เท่ากับ 4.5 ซิงค์ออกไซด์ (นาโน) ที่ pH มากกว่า 7 และซิงค์ออกไซด์ (นาโน) ที่เคลือบด้วย Lemna minor พบว่า ซิงค์ออกไซด์ (นาโน) ที่ pH เท่ากับ 4.5 มีความเป็นพิษสูงสุด ทั้งนี้เนื่องมาจากซิงค์ออกไซด์ (นาโน) สามารถละลายได้ดีที่ pH เท่ากับ 4.5 (Chen et al., 2016) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการศึกษาความเป็นพิษของแคดเมียม (นาโน) (Nano-Cd) ในไรแดงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า ที่ความเข้มข้นสูง ไรแดงจะมีภาวะเครียดออกซิเดชั่น (Oxidative damage) เพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับรายงานความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) ที่พบว่า ความเข้มข้นสูง อัตราการตายของปูน้ำจืดบางชนิดจะเพิ่มขึ้น (Ab, Hussain, Suman, & Khalid, 2016) รวมทั้งการทดสอบความเป็นพิษของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และ ซิงค์ออกไซด์(นาโน) ต่อแบคทีเรียในน้ำ พบว่าอนุภาคนาโนทั้งสองชนิดทำให้แบคทีเรียในน้ำตายได้เช่นกัน เนื่องจากเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียถูกทำลาย (Das et al.,2017) นอกจากนี้พื้นที่ผิวสัมผัสของอนุภาคนาโนก็มีผลต่อความเป็นพิษเช่นกัน โดยอนุภาคนาโนที่มีผิวสัมผัสมาก เมื่อเข้าสู่สิ่งแวดล้อมจะสามารถจับกับมลพิษอื่นได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ความเป็นพิษเปลี่ยนแปลงไป (Zou et al., 2016)

จะเห็นได้ว่าอนุภาคนาโนบางชนิดสามารถทำอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้ หรือเกิดความเป็นพิษได้หากอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม เช่นเดียวกับสารเคมีอื่น ๆ ตามหลักพิษวิทยา นอกจากนี้อนุภาคนาโนยังสามารถตกค้างในสิ่งมีชีวิตที่เป็นห่วงโซ่อาหารของมนุษย์ได้ ทำให้มนุษย์อาจได้รับสัมผัสอนุภาคนาโนจากทางอ้อมผ่านการทานเป็นอาหารได้ด้วยเช่นกัน

ผลกระทบทางสุขภาพ

ด้วยลักษณะเด่นของอนุภาคนาโนที่มีขนาดเล็กมากซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 10-100 นาโนเมตร จึงเป็นเรื่องง่ายที่จะเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ผ่านทางการหายใจเข้าไปและทำอันตรายต่ออวัยวะหรือระบบการทำงานต่างในร่างกาย โดยในเด็กอ่อนอายุไม่เกิน 1 เดือนที่หายใจนำอนุภาคนาโนเข้าสู่ร่างกาย พบว่า มีโอกาสเป็นโรคหอบหืด การเสื่อมสมรรถภาพของปอด และอาการไอ (Meldrum et al., 2017) หากอนุภาคนาโนเข้าสู่กระแสโลหิต จะทำให้การแข็งตัวของเลือดผิดปกติ หรือการทดลองนำหมุดควอนตัมชนิดแคดเมียม เทลลูไลด์ (CdTe-QD) เข้าไปในเซลล์ พบว่า ไมโตคอนเดรียในเซลล์เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และเป็นสาเหตุของมะเร็งตับ (Nguyen, Rippstein & Willmore, 2015) หรือการค้นพบว่า การได้รับสัมผัสท่อนาโนคาร์บอน และไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งอาจเป็นสาเหตุของเนื้องอกได้เช่นกัน (Becker, Herzberg, Schulte & Kolossa-Gehring, 2011) รวมทั้งได้รับสัมผัสอนุภาคนาโนเข้าสู่ร่างกายยังทำให้เกิดความผิดปกติได้อีกหลายอย่าง เช่น เกิดภาวะเครียดจากปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (Oxidation stress) สารพันธุกรรมและเยื่อหุ้มเซลล์ถูกทำลาย การอักเสบ เป็นต้น (Fede et al., 2015)

จะเห็นได้ว่า การศึกษาด้านพิษวิทยาของอนุภาคนาโนที่ผ่านมา แทบทั้งหมดเป็นการศึกษาในตัวอย่างที่เป็นพืช สัตว์ทดลองและเซลล์มนุษย์เท่านั้น ซึ่งให้ข้อมูลได้เพียงว่าอนุภาคนาโนสามารถสร้างความเสียหายต่อสิ่งมีชีวิตหรือเซลล์ของสิ่งมีชีวิตได้เท่านั้น แต่ปัจจุบันยังไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของปริมาณที่ได้รับต่อการตอบสนอง (dose-response relationship) และผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ในระยะยาว (Schulte, Kuempel & Drew, 2018) ซึ่งเป็นข้อมูลพิษวิทยาที่สำคัญต่อการระบุความอันตรายในมนุษย์ ทำให้ทราบระบบและกลไกของร่างกายที่จะเกิดขึ้นจากการได้รับสัมผัสอนุภาคนาโน นอกจากนี้ยังเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบมาตรฐาน ข้อกำหนดหรือข้อปฏิบัติที่เกี่ยวข้องกับนาโนเทคโนโลยีให้เหมาะสมต่อสุขภาพของผู้ได้รับสัมผัสได้อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามนาโนเทคโนโลยีถือว่าเป็นศาสตร์ใหม่ ซึ่งยังมีข้อมูลด้านสุขภาพและสิ่งแวดล้อมอยู่น้อยนิด ยังต้องใช้เวลาศึกษาและค้นพบอีกมาก

ค่ามาตรฐานและข้อปฏิบัติในการใช้อนุภาคนาโน

ปัจจุบันความรู้ด้านความอันตรายและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพจากอนุภาคนาโนยังมีอยู่อย่างจำกัด เป็นอุปสรรคสำคัญที่ทำให้ไม่สามารถออกแบบการประเมินความเสี่ยงหรือข้อกำหนดเกี่ยวกับการสัมผัสอนุภาคนาโนที่ได้มาตรฐานสากล (Harper et al., 2015; Koivisto et al., 2017) การออกกฎระเบียบหรือข้อบังคับต่าง ๆ จึงเกิดขึ้นได้ยาก (Organization for Economic Co-operation and Development, 2016) อย่างไรก็ตามหลายหน่วยงานได้พยายามออกระเบียบหรือข้อบังคับการใช้วัสดุนาโนซึ่งอ้างอิงข้อมูลจากการศึกษาที่มีอยู่ในปัจจุบัน เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา หน่วยงานมาตรฐานสถาบันความปลอดภัยและอนามัยในการทำงานแห่งชาติประเทศสหรัฐอเมริกา (National Institute for Occupational Safety and Health--NIOSH) ได้กำหนดปริมาณการได้รับสัมผัสท่อนาโนคาร์บอนที่แนะนำใน 8 ชั่วโมง (TWA) และอนุภาคระดับนาโนที่แนะนำใน 10 ชั่วโมง เท่ากับ 1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 0.3 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับ (NIOSH, 2013) ส่วนในประเทศอื่น ๆ เช่น สถาบันมาตรฐานแห่งชาติประเทศอังกฤษ (British Standard Institute--BSI) กำหนด “ระดับมาตรฐาน” สำหรับอนุภาคนาโนแบบเส้นใยไว้ที่ 0.01 ไฟเบอร์ต่อมิลลิลิตร (BSI, 2007) สถาบันอาชีวอนามัยและความปลอดภัยประเทศเยอรมัน (German Institute for Occupational Safety and Health) กำหนด “ระดับมาตรฐาน” สำหรับอนุภาคนาโนที่มีองค์ประกอบของโลหะและโลหะออกไซด์ (ความหนาแน่นมากกว่า 6,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

เท่ากับ 20,000 อนุภาคต่อตารางเซนติเมตร เป็นต้น (Institute for Occupational Safety and Health of the German (IFA), 2011) ซึ่งมาตรฐานต่าง ๆ ที่กล่าวมาเป็นเพียงส่วนหนึ่งของอนุภาคนาโนที่มีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับความเป็นพิษเท่านั้น ในหลาย ๆ ประเทศจึงใช้วิธีออกข้อปฏิบัติในการใช้อนุภาคนาโน เพื่อเป็นการป้องกันในเบื้องต้น เช่น ในสหรัฐอเมริกา สำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency--USEPA) ได้ออกข้อปฏิบัติ การให้ข้อมูลวัสดุนาโนเบื้องต้นแก่ผู้ใช้งาน (USEPA, 2016) ซึ่งคล้ายคลึงกับคำแนะนำขององค์การจัดการสารเคมีแห่งสหภาพยุโรป (European Chemicals Agency--ECHA) ที่ใช้กฎหมายว่าด้วยสารเคมี (Regulation on Registration Evaluation Authorization and Restriction of Chemical--REACH) กับวัสดุนาโนในภาคพื้นยุโรป สำหรับประเทศไทย ในปี 2012 ได้จัดทำแนวปฏิบัติเบื้องต้นด้านความปลอดภัยนาโนสำหรับภาคอุตสาหกรรม โดยกรมโรงงานอุตสาหกรรม (Department of Industrial Works, 2012) ต่อมาในปี 2015 สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา สังกัดกระทรวงสาธารณสุขได้จัดทำแนวปฏิบัติที่จำเพาะต่อประเภทอุตสาหกรรมมากขึ้น คือ แนวปฏิบัติสำหรับผู้ประกอบการผลิตภัณฑ์สุขภาพนาโน (Food and Drug Administration, 2015)

ถึงแม้ว่ากฎระเบียบหรือข้อบังคับต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการได้รับสัมผัสอนุภาคนาโนในปัจจุบันจะนำข้อมูลจากงานวิจัยที่ศึกษาจากสัตว์ทดลองหรือหลอดทดลองมาเป็นพื้นฐานในการออกแบบ นับว่าเป็นจุดเริ่มต้นที่ดีในการพัฒนา ต่อยอดและปรับปรุงกฎระเบียบหรือข้อบังคับในอนาคต เมื่องานวิจัยมีความก้าวหน้ามากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาการได้รับสัมผัสอนุภาคนาโนในมนุษย์

บทสรุป

นาโนเทคโนโลยี เป็นเทคโนโลยีหลายอุตสาหกรรมนิยมนำมาใช้ในปัจจุบันเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะประเทศที่พัฒนาแล้วพยายามพัฒนานาโนเทคโนโลยีเพื่อปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์อย่างรวดเร็ว ต่างจากองค์ความรู้เกี่ยวกับความเป็นพิษและอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมจากการได้รับสัมผัสอนุภาคนาโน ซึ่งปัจจุบันนี้ยังคงไม่มีความชัดเจน แต่ในปัจจุบันเริ่มมีการศึกษาหรืองานวิจัยที่ค้นพบอันตรายจากการสัมผัสอนุภาคนาโนมากขึ้น เป็นต้นว่า การยับยั้งการเจริญเติบโตหรือการทำลายสารพันธุกรรมในพืชที่ได้รับอนุภาคนาโน การเป็นสาเหตุของโรคทางเดินหายใจในเด็กอ่อน เนื้องอกและมะเร็งในตับของเซลล์สิ่งมีชีวิต เป็นต้น ถึงแม้ว่าขณะนี้โลกจะยังไม่มีมาตรฐานหรือข้อกำหนดที่เป็นสากลสำหรับการสัมผัสอนุภาคนาโน แต่ในหลายประเทศที่มีการใช้นาโนเทคโนโลยีได้พยายามนำองค์ความรู้และงานวิจัยที่มีอยู่มาพัฒนาเป็นมาตรฐานหรือข้อกำหนดเบื้องต้นให้ผู้ปฏิบัติงานด้านนาโนเทคโนโลยีได้ปฏิบัติ เพื่อป้องกันสุขภาพและสิ่งแวดล้อมให้มากที่สุด ซึ่งมาตรฐานและข้อกำหนดดังกล่าวยังต้องการงานวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของนาโนเทคโนโลยีต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมอีกมาก เพื่อพัฒนามาตรฐาน และข้อกำหนดที่เป็นสากลและสามารถป้องกันอันตรายจากการได้รับสัมผัสอนุภาคนาโนได้อย่างชัดเจน

References

Ab, A., Hussain, M., Suman, V. B., & Khalid, P. (2016). Toxicology of Carbon Nanotubes-A review. *International Journal of Applied Engineering Research, 11*(1), 148-157. https://pdfs.semanticscholar.org/1a41/b8d22802b1f2bc79b471a9bac5432464e41a.pdf

Becker, H., Herzberg, F., Schulte, A., & Kolossa-Gehring, M. (2011). The carcinogenic potential of nanomaterials, their release from products and options for regulating them. *International Journal of Hygiene and Environmental Health, 214*(3), 231–238. https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2010.11.004

British Standard Institute (BSI). (2007). *PD 6699-2 Nanotechnologies-part2: Guide to safe handling and disposal of manufactured*. Retrieved from https://ethics.iit.edu/NanoEthicsBank/node/28

Chen, X., Wang, R., Lutsey, P. L., Zee, P. C., Javaheri, S., Alcántara, C., Jackson, C. L., Szklo, M., Punjabi, N., Redline, S., & Williams, M. A. (2016). Racial/ethnic differences in the associations between obesity measures and severity of sleep-disordered breathing: The multi-ethnic study of atherosclerosis. *Sleep Medicine, 26*(1), 46–53. https://doi.org/10.1016/j.sleep.2015.06.003

Das, B., KumarDash, S. K., Mandal, D., Ghosh, T., Chattopadhyay, S., Tripathy, S., Das, S., Sankar KumarDey, S. K., Das, D., & Roy, S. (2017). Green synthesized silver nanoparticles destroy multidrug resistant bacteria via reactive Oxygen species mediated membrane damage. *Arabian Journal of Chemistry, 10*(6), 862-876. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.08.008.

Department of Industrial Works. (2012). *Nanosafety guideline for industries*. Bangkok: Chokun copies. (in Thai)

Department of Labour Protection and Welfare. (2011). *Nanosafety*. Retrieved from http://www.oshthai.org/attachments/article/146/146.pdf (in Thai)

European Commission (EC). (2011). Recommendation on the definition of a nanomaterial. Retrieved from http://data.europa.eu/eli/reco/2011/696/oj.

Fede, C., Fortunati, I., Weber, V., Rossetto, N., Bertasi, F., Petrelli, L., Guidolin, D., Signorini, R., De Caro, R., Albertin, G., & Ferrante, C. (2015). Evaluation of gold nanoparticles toxicity towards human endothelial cells under static and flow conditions. *Microvascular Research, 97*(1), 147–155. https://doi.org/10.1016/j.mvr.2014.10.010

Food and Drug Administration. (2015). *Guidance for industry on nano health products*. Nonthaburi: Food and Drug Administration. (in Thai)

Ghosh, M., Bandyopadhyay, M., & Mukherjee, A. (2010). Genotoxicity of Titanium Dioxide (TiO_2) nanoparticles at two trophic levels: Plant and human lymphocytes. *Chemosphere, 81*(10), 1253–1262. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.09.022

Harper, S., Wohlleben, W., Doa, M., Nowack, B., Clancy, S., Canady, R., & Maynard, A. (2015). Measuring nanomaterial release from Carbon Nanotube Composites: Review of the state of the science. *Journal of Physics: Conference Series, 617*(1), 012026. doi: 10.1088/1742-6596/617/1/012026

Institute for Innovation & Development of Learning Process. (2006). *Nanotechnology*. Retrieved from https://il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/main.html. (In Thai)

Institute for Occupational Safety and Health of the German (IFA). (2011). *Criteria for assessment of the effectiveness of protective measures*. Retrieved from https://www.dguv.de/ifa/fachinfos/nanopartikel-am-arbeitsplatz/beurteilung-von-schutzmassnahmen/index-2.jsp

Koivisto A.J., Jensen A.C.Ø., Kling K.I., Nørgaard A., Brinch A., Christensen F., & Jensen, K.A. (2017). Quantitative material releases from products and articles containing manufactured nanomaterials: Towards a release library. *NanoImpact, 5*(1), 119-32. https://doi.org/10.1016/j.impact.2017.02.001.

Lin, D., & Xing, B. (2007). Phytotoxicity of nanoparticles: Inhibition of seed germination and root growth. *Environmental Pollution (Barking Essex: 1987), 150*(2), 243–250. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.01.016

Ma, J., Mercer, R. R., Barger, M., Schwegler-Berry, D., Cohen, J. M., Demokritou, P., & Castranova, V. (2015). Effects of amorphous silica coating on Cerium Oxide nanoparticles induced pulmonary responses. *Toxicology and Applied Pharmacology, 288*(1), 63–73. https://doi.org/10.1016/j.taap.2015.07.012

Meldrum, K., Guo, C., Marczylo, E. L., Gant, T. W., Smith, R., & Leonard, M. O. (2017). Mechanistic insight into the impact of nanomaterials on asthma and allergic airway disease. *Particle and Fibre Toxicology, 14*(1), 45-53. https://doi.org/10.1186/s12989-017-0228-y

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (2013). *Occupational exposure to Carbon Nanotubes and Nanofibres*. Retrieved from https://www.cdc.gov/niosh/docs/2013-145/pdfs/2013-145.pdf

Nguyen, K. C., Rippstein, P., Tayabali, A. F., & Willmore, W. G. (2015). Mitochondrial toxicity of Cadmium Telluride Quantum dot nanoparticles in Mammalian Hepatocytes. *Toxicological Sciences: An official journal of the Society of Toxicology, 146*(1), 31–42. https://doi.org/10.1093/toxsci/kfv068

Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). (2016). *Categorization of manufactured nanomaterials*. Retrieved from http://go.nature.com/2uQY5lS

RNCOS E-services Pvt. Ltd. (2015). *Nanotechnology market outlook 2020*. Retrieved from http://www.imea.com.br/site/upload/pdf/arquivos/AgroMT_Outlook_2022_(Ingles).pdf

Rodrigues, S. M., Demokritou, P., Dokoozlian, N., Hendren, C. O., Karn, B., Mauter, M. S., Sadik, O. A., Safarpour, M., Unrine, J. M., Viers, J., Welle, P., White, J. C., Mark R. Wiesnerde, M. R., & Lowry, G. V. (2017). Nanotechnology for sustainable food production: promising opportunities and scientific challenges. *Environmental Science: Nano, 4*(4), 767-781. https://doi.org/10.1039/C6EN00573J

Roco, M. C., Mirkin, C. A., & Hersam, M. C. (2011). *Nanotechnology research directions for societal needs in 2020*. Boston: Springer.

Schulte, P. A., Kuempel, E. D., & Drew, N. M. (2018). Characterizing risk assessments for the development of occupational exposure limits for engineered nanomaterials. *Regulatory Toxicology and Pharmacology: RTP, 95*(1), 207–219. https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2018.03.018

Shapira, P., & Wang, J. (2010). Follow the money. *Nature, 468*, 627–628. https://doi.org/10.1038/468627a

Shi, X., Li, Z., Chen, W., Qiang, L., Xia, J., Chen, M., Zhu, L., & Alvarez, P. J. J. (2016). Fate of TiO_2 nanoparticles entering sewage treatment plants and bioaccumulation in fish in the receiving streams. *NanoImpact, 3-4*(1), 96-103. http://dx.doi.org/10.1016/j.impact.2016.09.002

U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). (2017). *Reviewing new chemicals under the Toxic Substances Control Act (TSCA): Control of nanoscale materials under the Toxic Substances Control Act*. Retrieved from https://www.epa.gov/reviewing-new-chemicals-under-toxic-substances-control-act-tsca/fact-sheet-nanoscale-materials

Wang, P., Lombi, E., Sun, S., Scheckel, K. G., Malysheva, A., McKenna, B. A., Menzies, N. W., Fang-Jie Zhao, F., & Kopittke, P. M. (2017). Characterizing the uptake, accumulation and toxicity of Silver Sulfide nanoparticles in plants. *Environmental Science: Nano, 4*(2), 448-460. https://doi.org/10.1039/C6EN00489J

Zou, Y., Wang, X., Khan, A., Wang, P., Liu, Y., Alsaedi, A., Hayat, T., & Wang, X. (2016). Environmental remediation and application of Nanoscale Zero-Valent Iron and its composites for the removal of heavy metal ions: A review. *Environmental Science & Technology, 50*(14), 7290-7304. https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01897