ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคนาโนและเซลล์มนุษย์: บทนำสู่การแพทย์นาโน

Nanoparticle-Human Cell Interaction: An Introduction to Nanomedicine

ดร.นพ.อมรพันธุ์ เสรีมาศพันธุ์
คณะแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ครั้งที่ 1

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคนาโนและเซลล์มนุษย์: บทนำสู่การแพทย์นาโน

Nanoparticle-Human Cell Interaction: An Introduction to Nanomedicine

ดร.นพ.อมรพันธุ์ เสรีมาศพันธุ์
คณะแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ครั้งที่ 1

อมรพันธุ์ เสรีมาศพันธุ์
ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคนาโนและเซลล์มนุษย์: บทนำสู่การแพทย์นาโน
Nanoparticle-Human Cell Interaction: An Introduction to Nanomedicine

ISBN (e-book): ๙๗๘-๖๑๖-๖๑๒-๔๒๐-๐

พิมพ์ครั้งที่ ๑ เมษายน พ.ศ. ๒๕๖๗
สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ (ฉบับเพิ่มเติม) พ.ศ. ๒๕๕๙

ออกแบบปก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นายแพทย์อมรพันธุ์ เสรีมาศพันธุ์

นายรุทธกาญ สุเรนทร์รังสิกุล

ภาพปกและจัดรูปเล่ม

นายลลิต มณีนิล

ภาพประกอบ

นางสาวเมธาพร ศรีนุ่นวิเชียร

นายสหนวพล ธรรมโชติ

พิสูจน์อักษร

ดร.ขนิษฐา สุขเลิศ

นางสาวศิวาพร นิลใย

นางสาวนุชนาถ แซ่เลี่ยง

นางสาวพรพรรณ โพธิ์ไกร

จัดทำโดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นายแพทย์อมรพันธุ์ เสรีมาศพันธุ์
๕๕๕/๒๗๖ ถนนตากสิน-เพชรเกษม แขวงบุคคโล เขตธนบุรี
กรุงเทพมหานคร ๑๐๖๐๐
โทร. ๐๙๖ ๕๖๙ ๘๘๕๙
อีเมล amornpun.s@chula.ac.th

พิมพ์ที่ สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
๒๕๔ ถนนพญาไทย แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพ ๑๐๓๓๐
โทร. ๐๒ ๒๑๘ ๓๕๔๙-๕๐, ๐๒ ๒๑๘ ๓๕๖๓

คำนำ

ด้วยวิทยาศาสตร์ทางการแพทย์และเทคโนโลยีได้มีการปรับเปลี่ยนและพัฒนาให้เกิดองค์ความรู้ใหม่นำไปสู่ความก้าวหน้าอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มสุขภาวะที่ยั่งยืนให้กับประชากรทั่วโลก นาโนเทคโนโลยีและเวชพันธุศาสตร์เป็นสองศาสตร์ที่ได้รับการพัฒนารวดเร็วอย่างก้าวกระโดดในช่วงเวลาที่ผ่านมา ทำให้มีการประยุกต์ใช้วัสดุนาโน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง **“อนุภาคนาโน”** ซึ่งเป็นวัสดุนาโนที่มีการใช้มากที่สุดในทางการแพทย์ ในศตวรรษที่ 21 เป็นต้นมานี้ เป็นที่ประจักษ์ชัดถึงบทบาทของการนำอนุภาคนาโนมาประยุกต์ในทางการแพทย์ทั้งด้านการวินิจฉัยการดูแลรักษาและการป้องกันโรคเพื่อส่งเสริมและเพิ่มคุณภาพชีวิตให้กับผู้ป่วยและครอบครัว อย่างไรก็ดี องค์ความรู้ทั้งสองศาสตร์นี้ยังถูกแบ่งแยกเป็นคนละเรื่องและไม่ค่อยมีการเชื่อมโยงเพื่อให้เห็นภาพรวม

ที่มาของหนังสือ **"ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคนาโนและเซลล์มนุษย์: บทนำสู่การแพทย์นาโน"** เล่มนี้ เกิดจากการงานตกผลึกความคิดของผู้เขียนจากการทำงานวิจัยการแพทย์นาโนและชีววิทยาระดับโมเลกุลของเซลล์มนุษย์ที่ตอบสนองต่อการได้รับอนุภาคนาโน ร่วมกับงานสอนด้านมนุษย์พันธุศาสตร์และเซลล์ชีววิทยาระดับในคณะแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มาเป็นเวลามากกว่า 10 ปี โดยผู้เขียนได้เรียบเรียงองค์ความรู้ในหนังสือเล่มนี้จากงานวิจัยที่มีหลักฐานเชิงประจักษ์และการศึกษาวิจัยของผู้เขียนและคณะวิจัยเอง เพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจและเห็นถึงคุณค่าความสำคัญของการศึกษาความรู้วิทยาศาสตร์การแพทย์พื้นฐานเรื่องเซลล์ชีววิทยา อันจะเป็นพื้นฐานหลักที่สามารถเชื่อมโยงนำไปใช้ต่อยอด ในเรื่องการนำอนุภาคนาโนไปการประยุกต์ใช้จริงทางคลินิก เนื้อหาในหนังสือเล่มนี้ ประกอบด้วย ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยีวัสดุนาโน และการแพทย์นาโน จากนั้นจึงกล่าวถึงบทบาทของอนุภาคนาโนในการประยุกต์ใช้งานด้านการแพทย์แม่นยำรวมไปถึงความสำคัญของการตอบสนองระดับเซลล์ที่มีต่ออนุภาคนาโน พิษวิทยาของอนุภาคนาโน และแนวทางการดูแลป้องกันให้เกิดความปลอดภัยที่อาจเกิดได้จากอนุภาคนาโน หวังเป็นอย่างยิ่งว่าหนังสือเล่มนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับนิสิตนักศึกษา นักวิจัย แพทย์ และบุคลากรทางการแพทย์ อันจะเป็นประโยชน์ด้านสุขภาพ การแพทย์และการสาธารณสุขต่อไป

สำหรับคุณความดีของหนังสือเล่มนี้ ขอมอบเพื่อบูชาคุณบิดา มารดา ครูแพทย์ และปูชนียาจารย์ทุกท่าน อันเป็นต้นแบบความดีงาม ขอกราบเคารพบูชาพระคุณของอดีตบูรพมหากษัตริย์ทั้งสองพระองค์ผู้ก่อตั้งและสถาปนาจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อช่วยให้แสงสว่างแห่งปัญญากับประชาชนชาวไทยตลอดมา และขอ มอบให้ลูกศิษย์และผู้ป่วยทุกคนผู้เป็นความหวังและกำลังสำคัญของประเทศชาติไทย

อมรพันธุ์ เสรีมาศพันธุ์
เมษายน 2567

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ประสิทธิ์ประสาทสั่งสอนความรู้และคุณธรรม ให้เป็นแพทย์ที่เห็นแก่ประโยชน์ของส่วนรวม รวมทั้งขอขอบพระคุณ คณะแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ รพ.จุฬาลงกรณ์ สภากาชาดไทย สถานที่ทำงานที่ให้โอกาสผู้เขียนในการทำงานซึ่งเห็นคุณค่าให้ความสำคัญกับการเป็น ครูแพทย์และนักวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ ศ.นพ.สุทธิพงศ์ วัชรสินธุ รศ.นพ.ฉันชาย สิทธิพันธุ์ ศ.นพ.สมรัตน์ จารุลักษณานันท์ ศ.นพ.พงษ์ศักดิ์ วรรณไกรโรจน์ ศ.นพ.สมชาย ธนวัฒนาเจริญ รศ.พญ.นันทนา ศิริทรัพย์ รศ.ภญ.โสภิต ธรรมอารี รศ.ดร.วิไล อโนมะศิริ และคณาจารย์ คณะแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ฯ ผู้ให้ความรู้ ชี้นำทาง ให้โอกาสในการทำงานส่วนกลาง อันเป็นโอกาสการพัฒนาศักยภาพของผู้เขียนมาโดยตลอด รวมทั้งขอกราบขอบพระคุณ ศ.ดร.พญ.วิไล ชินธเนศ และ ศ.ดร.นพ.อภิวัฒน์ มุทิรางกูร อดีตหัวหน้าภาควิชากายวิภาคศาสตร์ คณะแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ฯ ที่ให้โอกาสรับผู้เขียนเป็นอาจารย์แพทย์ในภาควิชาฯ แห่งนี้ ขอบพระคุณหัวหน้าภาควิชาฯ ทุกท่าน คณาจารย์ในภาควิชาฯ ทุกท่าน รวมถึงพี่น้องเจ้าหน้าที่ธุรการ และพี่ ๆ นักวิทยาศาสตร์ในภาควิชาฯ ทุกท่าน ผู้ที่เป็นยิ่งกว่ากัลยาณมิตร ทำให้ผู้เขียนรู้สึกสนุกและมีความสุขกับการทำงานในทุก ๆ วัน ตลอดระยะเวลาทำงาน

ขอบพระคุณ ผู้ร่วมวิจัยทุกท่านที่ทำวิจัยร่วมกันมา โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ศ.ดร.สุวบุญ จิรชาญชัย รศ.ดร.จินตนา จิรถาวร รศ.ดร.พญ.กนิษฐา ภัทรกุล รศ.ดร.โรจน์ฤทธิ์ โรจนธเนศ ศ.นพ.วิโรจน์ ไววานิชกิจ Assoc.Prof.Gyeong Hun Baeg รวมถึงแหล่งทุนวิจัยจากคณะแพทยศาสตร์ฯ จากสำนักบริหารวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมถึงแหล่งทุนวิจัยภายนอกมหาวิทยาลัย อาทิ สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ฯลฯ ที่ให้ทุนวิจัยแก่ผู้เขียน

ขอบคุณลูกศิษย์ชาวห้องปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางนาโนชีวเวชศาสตร์ ดร.ขนิษฐา สุขเลิศ ดร.สโรชา เชิดโฉม ศิวาพร นิลใย นุชนาถ แซ่เลี่ยง พรพรรณ โพธิ์ไกร ศศิกานต์ ลู่ประเสริฐกุล และทุกท่านที่มิอาจกล่าวถึงได้หมด ผู้เป็นทั้งศิษย์ เพื่อนร่วมงาน และกัลยาณมิตรที่ได้ใช้เวลาอยู่ร่วมกัน แลกเปลี่ยนเรียนรู้ และเป็นกลุ่มที่ช่วยดูแลผลักดันให้ผู้เขียนทำหนังสือเล่มนี้ออกมาจนสำเร็จ

และสุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบุพการี และ “บ้าน” สมาชิกในครอบครัวผู้เขียน ต้นแบบแห่งความรักความเสียสละ พร้อมความเข้าใจและกำลังใจที่มีให้เสมอตลอดเวลาในการทำหนังสือเล่มนี้

คำนิยม

หนังสือ **"ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคนาโนและเซลล์มนุษย์: บทนำสู่การแพทย์นาโน"** นี้เป็นหนังสือการแพทย์นาโนเล่มแรกของประเทศไทย และเป็นหนังสือสำคัญสำหรับการเรียนการสอน แพทย์และนักวิทยาศาสตร์ทางการแพทย์ในทุกระดับ

ปัจจุบันเทคโนโลยีนาโนเป็นเทคโนโลยีสำคัญในการนำส่งยาหรือวัคซีนสู่เซลล์เป้าหมาย จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่แพทย์ เภสัชกร บุคลากรทางการแพทย์และนักวิจัยทางชีววิทยาการแพทย์ จะต้องรู้เภสัชวิทยาของอนุภาคนาโน ได้แก่ หลักวิชาและเนื้อหาความรู้โดยทั่วไป เภสัชจลนศาสตร์ การปฏิสัมพันธ์กับเซลล์ชนิดต่าง ๆ และอวัยวะต่าง ๆ ของมนุษย์ ความเป็นพิษ และการนำไปใช้ในรูปแบบที่ปลอดภัยและบรรลุวัตถุประสงค์

หนังสือของ ผศ.ดร.นพ.อมรพันธุ์ เสรีมาศพันธุ์ เล่มนี้ ได้รวบรวมเนื้อหาดังกล่าวอย่างครบถ้วนและทันสมัย เข้าใจง่าย เป็นประโยชน์ต่อบุคลากรทางการแพทย์ในทุกระดับ

ผศ.ดร.นพ.อมรพันธุ์ เสรีมาศพันธุ์ เป็นผู้นำทางการวิจัยการแพทย์นาโนของไทย ได้ตีพิมพ์และได้รับการอ้างอิงในวารสารวิชาการระดับนานาชาติในเรื่องการแพทย์นาโนจำนวนมาก และการเขียนหนังสือเล่มนี้ นพ.อมรพันธุ์ ได้รวบรวมความรู้และประสบการณ์จากงานวิจัย มาสังเคราะห์เป็นความรู้ ทำให้หนังสือการแพทย์นาโนเล่มแรกที่เขียนโดยนักวิจัยของไทยเล่มนี้ เป็นหนังสือที่มีคุณค่าเหมาะแก่วงการแพทย์ของไทยที่จะนำไปใช้ประกอบการศึกษาของบุคลากรทางการแพทย์ในทุกแขนงและทุกระดับ

ศาสตราจารย์ ดร. นายแพทย์อภิวัฒน์ มุทิรางกูร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

คำนำ	i
กิตติกรรมประกาศ	ii
คำนิยม	iii
สารบัญ	iv
สารบัญรูปภาพ	vii
สารบัญตาราง	ix
คำย่อ	x
บทที่ 1 วัสดุนาโนในการประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์	**1**
1.1 “นาโน” เล็กขนาดไหนและ “นาโนเทคโนโลยี” คืออะไร	1
1.2 “นาโน” เล็กแล้วดีอย่างไร	8
1.3 ทำไมนาโนเทคโนโลยีจึงมีความสำคัญในชีวิตประจำวัน	11
1.4 วัสดุนาโน (Nanomaterial) คืออะไร มีกี่แบบ อะไรบ้าง	14
1.5 การแพทย์นาโน (Nanomedicine) คืออะไร มีกี่ประเภท	18
1.6 การแพทย์นาโน (Nanomedicine) มีประโยชน์อย่างไร	21
1.7 นาโนเทคโนโลยีและการแพทย์นาโนในประเทศไทย	25
บทสรุปและมุมมองในอนาคต	28
เอกสารอ้างอิง	29
บทที่ 2 การใช้อนุภาคนาโนในทางการแพทย์แม่นยำ	**37**
2.1 บทนำ	38
2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการแพทย์แม่นยำ (Precision Medicine)	39
2.3 วิทยาศาสตร์โอมิกส์ (OMIC Science) และการแพทย์แม่นยำ	43
2.4 หลักการใช้อนุภาคนาโนเพื่อการตรวจหาสารชีวโมเลกุล	47
2.5 การประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนในด้านต่าง ๆ ของการแพทย์แม่นยำ	58
2.5.1 อนุภาคนาโนเพื่อการถ่ายภาพระดับโมเลกุล (Molecular Imaging)	58
2.5.2 อนุภาคนาโนเพื่อการวินิจฉัย (Diagnosis)	60
2.5.3 อนุภาคนาโนเพื่อการนำส่งยาและยีนสู่เซลล์เป้าหมาย (Drug and Gene Delivery System)	64

2.5.4 อนุภาคนาโนเพื่อการวินิจฉัยพร้อมการรักษามะเร็ง (Cancer Theranostics) 69
2.5.5 อนุภาคนาโนเพื่อใช้เป็นฤทธิ์ต้านจุลชีพ (Antimicrobial Activity) 70
บทสรุปและมุมองในอนาคต 71
เอกสารอ้างอิง 73

บทที่ 3 เซลล์ชีววิทยาของอนุภาคนาโนต่อเซลล์และร่างกายมนุษย์ 89
3.1 บทนำ 90
3.2 ปฏิสัมพันธ์ของอนุภาคนาโนต่อเซลล์มนุษย์ 91
3.2.1 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคนาโนกับสารน้ำนอกเซลล์ (Extracellular Fluid) 91
3.2.2 อนุภาคนาโนกับการดูดซึมเข้าเซลล์ (Cellular Uptake) 92
3.2.3 การเปลี่ยนแปลงเมื่อเข้าสู่ภายในเซลล์ (Intracellular Fate) 99
3.2.4 กลไกการขับอนุภาคนาโนออกจากเซลล์ (Exocytosis Mechanisms) 102
3.3 ปฏิสัมพันธ์ของอนุภาคนาโนต่อเนื้อเยื่อและอวัยวะของร่างกาย 103
3.3.1 ปฏิสัมพันธ์ของอนุภาคนาโนต่อระบบทางเดินหายใจ 105
3.3.2 ปฏิสัมพันธ์ของอนุภาคนาโนต่อระบบประสาทส่วนกลาง 106
3.3.3 ปฏิสัมพันธ์ของอนุภาคนาโนต่อผิวหนัง 109
3.3.4 ปฏิสัมพันธ์ของอนุภาคนาโนต่อระบบทางเดินอาหาร 110
3.3.5 ปฏิสัมพันธ์ของอนุภาคนาโนต่อระบบไหลเวียนโลหิต 112
3.3.6 ปฏิสัมพันธ์ของอนุภาคนาโนต่อระบบอื่น ๆ ของร่างกาย 115
บทสรุปและมุมมองในอนาคต 118
เอกสารอ้างอิง 120

บทที่ 4 พิษวิทยาของวัสดุนาโนต่อเซลล์และระบบร่างกายมนุษย์ 133
4.1 บทนำ 134
4.2 ประเภทของความเป็นพิษที่เกิดจากอนุภาคนาโน 136
4.3 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของวัสดุนาโน 138
4.3.1 ขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโน (Size and Shape) 138
4.3.2 องค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคนาโน (Chemical Composition) 140
4.3.3 ประจุที่ผิวโดยรวมของอนุภาคนาโน (Surface Charge) 140

4.3.4 การเกาะตัวกันของอนุภาคนาโน (Aggregation/Agglomeration) 141
4.3.5 สารชีวโมเลกุลหรือลิแกนด์ที่มาเชื่อมต่อกับผิวของอนุภาคนาโน (Nanoparticle Corona) 142
4.3.6 การมีสารปนเปื้อนในกระบวนการเตรียมอนุภาคนาโน 142
4.4 กลไกที่ทำให้เกิดความเป็นพิษต่อเซลล์ของอนุภาคนาโน 143
4.4.1 กลไกระดับโมเลกุลภายในเซลล์ 147
4.4.2 กลไกระดับโครงสร้างภายในเซลล์ 148
4.4.3 กลไกระดับเนื้อเยื่อและอวัยวะในร่างกาย 154
4.5 การศึกษาและการตรวจสอบความเป็นพิษของอนุภาคนาโน 156
บทสรุปและมุมมองในอนาคต 159
เอกสารอ้างอิง 161

บทที่ 5 ความปลอดภัยและการจัดการความเสี่ยงของวัสดุนาโน 173
5.1 ความปลอดภัยของวัสดุนาโน 174
5.2 การจัดการด้านความปลอดภัยในผู้ปฏิบัติงานที่มีความเสี่ยงต่อการสัมผัสอนุภาคนาโนจากการผลิต 176
5.3 การป้องกันผลกระทบต่อสุขภาพและการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมของวัสดุนาโน 180
5.4 แนวทางการลดความเป็นพิษของวัสดุนาโน 186
5.5 กฎหมายและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการดูแลความปลอดภัยของวัสดุนาโน 196
บทสรุปและมุมมองในอนาคต 201
เอกสารอ้างอิง 202

ภาคผนวก 211
ดัชนี 212
Index 214
ประวัติผู้นิพนธ์ 216

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1.1 แสดงขนาดตัวอย่างของสิ่งของต่าง ๆ รอบตัวในระดับนาโนเมตร 3
รูปที่ 1.2 แผนภาพแสดงความเป็นสหศาสตร์ของนาโนเทคโนโลยี 5
รูปที่ 1.3 แสดงพื้นผิวของอนุภาคนาโนเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคชนิดเดียวกัน ที่ขนาดใหญ่ 9
รูปที่ 1.4 แผนภาพแสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในวัสดุ ขนาดใหญ่ (ขวา) และวัสดุนาโน (ซ้าย) 10
รูปที่ 1.5 แผนภาพแสดงการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีสำหรับผู้บริโภค 13
รูปที่ 1.6 แผนภาพแสดงประเภทของวัสดุนาโน 20
รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบระหว่างการแพทย์ปัจจุบันกับ การแพทย์แม่นยำ 40
รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดง (A) องค์ประกอบและ (B) การประยุกต์ใช้ศาสตร์ต่าง ๆ จนนำไปสู่การแพทย์แม่นยำ 40
รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงเทคโนโลยีและเครื่องมือวิเคราะห์ทางชีวโมเลกุลที่นำมา ใช้ในการแพทย์แม่นยำ 41
รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงกลไกทางชีววิทยาระดับโมเลกุลภายในเซลล์ (A) กระบวนการหลักในการควบคุมการทำงานของสิ่งมีชีวิต และ (B) องค์ประกอบรวมของวิทยาศาสตร์โอมิกส์ 46
รูปที่ 2.5 ภาพรวมของความสัมพันธ์และความเชื่อมโยงระหว่างวิทยาศาสตร์โอมิกส์ แต่ละชนิดจนนำไปสู่การศึกษาวิทยาศาสตร์โอมิกส์โดยรวม 47
รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงหลักการนำอนุภาคนาโนมาใช้เพื่อการวินิจฉัยพร้อม การรักษาในการแพทย์แม่นยำ 50
รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงประเภทของอนุภาคนาโนที่นิยมนำมาใช้ในการแพทย์ แม่นยำด้านต่าง ๆ 50
รูปที่ 2.8 แสดงการเกิดปรากฏการณ์เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ ของอนุภาคนาโนทรงกลม 53
รูปที่ 2.9 แสดงองค์ประกอบทางกายภาพของแผ่นชุดตรวจแถบสี 56
รูปที่ 2.10 แผนภาพแสดงโครงสร้างพื้นฐานและหลักการของเซนเซอร์เชิงเคมีไฟฟ้า 57

รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงกลไกการป้องกันการรวมกลุ่มของอนุภาคทองคำนาโน ด้วยโปรตีน hCG ที่อยู่ในปัสสาวะของหญิงมีครรภ์ 61
รูปที่ 2.12 ภาพแสดงการใช้สารละลายคอลลอยด์อนุภาคทองคำนาโน เพื่อตรวจหาเชื้อแบคทีเรียก่อโรคเลปโตสไปโรซิสในปัสสาวะ 63
รูปที่ 2.13 แผนภาพแสดงกระบวนการสังเคราะห์และการประยุกต์ใช้อนุภาคพอลิเมอร์ของไคโตซาน 68
รูปที่ 2.14 แผนภาพแสดงหลักการการสังเคราะห์อนุภาคแคลเซียมซิเทรตนาโนที่ต่อกับสารยูจินอลและการแทรกซึมของอนุภาคนาโนสู่ผิวหนังในชั้นลึก 69
รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงการเกิด Nanoparticle Corona (A) โครงสร้าง (B) องค์ประกอบของ Nanoparticle Corona ที่ล้อมร้อบอนุภาคนาโนและ (C) ปัจจัยที่ส่งผลต่อ Nanoparticle Corona 92
รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงวิธีการเข้าสู่เซลล์ของอนุภาคนาโนแต่ละขนาดแบบไม่ใช้พลังงานภายในเซลล์ (Passive Transport) 93
รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงวิธีการเข้าสู่เซลล์ของอนุภาคนาโนแบบใช้พลังงานภายในเซลล์ (Active Transport) 97
รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงช่องทางการสัมผัสวัสดุนาโนในชีวิตประจำวัน 104
รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงช่องทางการรับอนุภาคนาโนเข้าสู่ร่างกายและการกระจายตัวของอนุภาคนาโนไปยังอวัยวะต่าง ๆ 117
รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงปัจจัยภายนอกและปัจจัยภายในต่อการเกิดความเป็นพิษต่อร่างกายของวัสดุนาโน 135
รูปที่ 4.2 แผนภาพแสดงประเภทของอนุภาคนาโนตามที่มาของแหล่งกำเนิด 137
รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคนาโน (A) ลักษณะการเกาะตัวกันของอนุภาคนาโนและ (B) การกระจายตัวของอนุภาคนาโน 141
รูปที่ 4.4 แผนภาพแสดงภาพรวมของกลไกการเกิดความเป็นพิษระดับโมเลกุลภายในเซลล์จากอนุภาคนาโน 148
รูปที่ 4.5 แผนภาพแสดงภาพรวมของกลไกการเกิดความเป็นพิษระดับโครงสร้างภายในเซลล์จากอนุภาคนาโน 149

รูปที่ 4.6 แผนภาพแสดงภาพรวมของกลไกการเกิดความเป็นพิษระดับเนื้อเยื่อและอวัยวะในร่างกายจากอนุภาคนาโน 155
รูปที่ 4.7 แผนภาพสรุปกลไกหลักที่ทำให้เกิดความเป็นพิษระดับเซลล์โดยอนุภาคนาโน 160
รูปที่ 5.1 แผนภาพแสดงภาพรวมของการควบคุมและการป้องกันการสัมผัสวัสดุนาโน 183
รูปที่ 5.2 แผนภาพแสดงเส้นทางของวัสดุนาโนตลอดวงจรชีวิตผลิตภัณฑ์ (Life-Cycle Perspective) 186

สารบัญตาราง

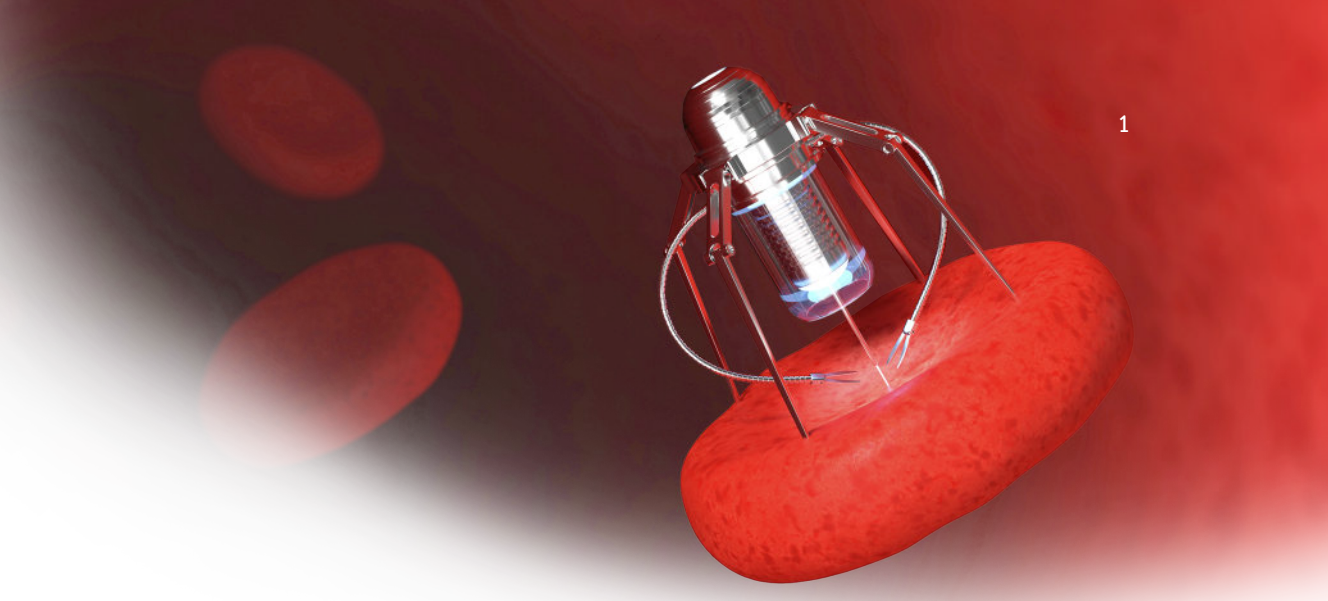
ตารางที่ 1.1 คำอุปสรรค (Prefix) ที่ใช้บ่อยในระบบเอสไอ 2
ตารางที่ 1.2 หน่วยวัดมาตรฐานในระบบเอสไอ 2
ตารางที่ 1.3 สรุปวิวัฒนาการของวิทยาศาสตร์นาโนและนาโนเทคโนโลยีโดยสังเขป 6
ตารางที่ 1.4 นิยามศัพท์ของวัสดุนาโนตามองค์การระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐาน 14
ตารางที่ 1.5 ประเภทของวัสดุนาโนตามแต่ละหลักเกณฑ์ 16
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างข้อมูลที่สำคัญสำหรับการใช้ประกอบในการดำเนินงานด้านการแพทย์แม่นยำ 42
ตารางที่ 2.2 ชนิด ความหมาย และเครื่องมือที่ใช้ศึกษาในศาสตร์ “เทคโนโลยีโอมิกส์” (OMICs Technology) แต่ละแขนง 44
ตารางที่ 2.3 ประเภทของอนุภาคนาโนที่นำมาใช้ในการแพทย์แม่นยำ 48
ตารางที่ 2.4 ข้อดีและข้อจำกัดของแผ่นชุดตรวจแถบสี 55
ตารางที่ 3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคนาโนกับเซลล์ 97
ตารางที่ 4.1 ความเป็นพิษของอนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ 144
ตารางที่ 4.2 ความเป็นพิษของอนุภาคนาโนที่มนุษย์สร้างขึ้นโดยไม่ได้ตั้งใจ 145
ตารางที่ 4.3 ความเป็นพิษของอนุภาคนาโนที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้น 146
ตารางที่ 4.4 ตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเป็นพิษต่อเซลล์ของอนุภาคนาโน 157

คำย่อ

AgNPs	Silver Nanoparticles
AI	Artificial Intelligence
Akt	Protein Kinase B
AuNPs	Gold Nanoparticles
BBB	Blood-Brain Barrier
CD	Circular Dichroism
CdSe	Cadmium Selenide
ChIP	Chromatin Immunoprecipitation
CNV	Copy Number Variation
Cryo-EM	Cryogenic Electron Microscopy
CSF	Cerebrospinal Fluid
CT scan	Computed Tomography Scan
Cu_2O	Copper Oxide
DCFH-DA	2'-7'-Dichlorodihydrofluorescein Diacetate
DDS	Drug Delivery System
DLS	Dynamic Light Scattering
DNA DSBs	DNA Single-Strand Breaks
DNA SSBs	DNA Double-Strand Breaks
DSC	Differential Scanning Calorimetry
Eg	Energy Band Gap
EKG	Electrocardiography
ELISA	Enzyme-linked Immunosorbent Assay
ENMs	Engineered Nanomaterials
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
GC-MS	Gas Chromatography-Mass Spectrometry

hCG	Human Chorionic Gonadotropin
HPV-16	Human Papilloma Virus 16
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry
ICP-OES	Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry
IL-1β	Interleukin-1 Beta
IL-6	Interleukin-6
IL-8	Interleukin-8
IL-10	Interleukin-10
ISO	International Standard Organization
LC50	50% Lethal Concentration
LC-MS/MS	Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry
LD50	50% Lethal Dose
LDH	Lactate Dehydrogenase
LFA	Lateral Flow Assay
lnc–RNA	Long Non-coding RNA
LOH	Loss of Heterozygosity
MAPK	Mitogen-activated Protein Kinase
miRNA	microRNA
MRI	Magnetic Resonance Imaging
mRNA	messenger RNA
MTT assay	3-(4,5-Dimethythiazo-2-yl)-2,5-Diphenyltetrazolium Bromide
NF-κB	Nuclear Factor Kappa B
NMR	Nuclear Magnetic Resonance
NPs	Nanoparticles
PET	Positron Emission Tomography
PGHD	Patient Generated Health Data

PI3-K	Phosphoinositide 3-Kinase
PM	Particulate Matter
PoCT	Point-of-Care Testing
Poly (A)	Poly Adenine
PPE	Personal Protection Equipment
QD	Quantum Dot
qPCR	Quantitative Polymerase Chain Reaction
QSAR	Quantitative Structure-Activity Relationship
RME	Receptor-mediated Endocytosis
SAGE	Serial Analysis of Gene Expression
SDS	Safety Data Sheet
SI Unit	International Standard Unit
SLN	Solid Lipid Nanoparticles
snc-RNA	Short Non-coding RNA
SNP	Single Nucleotide Polymorphism
SPECT	Single Photon Emission Computed Tomography
SPIONs	Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles
SPR	Surface Plasmon Resonance
Src	Non-receptor Tyrosine Kinase
TEM	Transmission Electron Microscope
TiO_2	Titanium Dioxide
TNF-α	Tumor Necrosis Factor Alpha
WST	Water-soluble Tetrazolium Salt
ZnS	Zinc Sulfide



1 นาโนเทคโนโลยี วัสดุนาโน และการแพทย์นาโน

เนื้อหา

1.1 “นาโน” เล็กขนาดไหน และ “นาโนเทคโนโลยี” คืออะไร
1.2 “นาโน” เล็กแล้วดีอย่างไร
1.3 ทำไมนาโนเทคโนโลยีจึงมีความสำคัญในชีวิตประจำวัน
1.4 วัสดุนาโน (Nanomaterial) คืออะไร มีกี่แบบ อะไรบ้าง
1.5 การแพทย์นาโน (Nanomedicine) คืออะไร มีกี่ประเภท
1.6 การแพทย์นาโน (Nanomedicine) มีประโยชน์อย่างไร
1.7 นาโนเทคโนโลยีและการแพทย์นาโนในประเทศไทย
บทสรุปและมุมมองในอนาคต

1.1 “นาโน” เล็กขนาดไหน และ “นาโนเทคโนโลยี” คืออะไร

“นาโน (Nano)” เล็กขนาดไหน

นาโน เป็นคำอุปสรรค (Prefix) ที่ใช้เติมหน้าคำอื่นในทางวิทยาศาสตร์ ซึ่งมีที่มาจากคำว่า nanos ในภาษากรีก หมายถึงเล็กแคระ ดังนั้น การเติมคำว่า “นาโน” เข้าไปหน้าคำอื่นจึงมีความหมายว่าสิ่งต่าง ๆ ที่มีขนาด รูปร่าง หรือลักษณะเล็กมาก ปัจจุบัน “นาโน” เป็นคำอุปสรรคคำหนึ่ง (ตารางที่ 1.1) ที่ถูกใช้เป็นหน่วยนับในระบบเมทริกซ์ ซึ่ง 1 นาโนเมตร หมายถึง 1/1,000,000,000 เมตร (หนึ่งในพันล้านส่วนของเมตร) หรือ 10^{-9} เมตร นั่นเอง

ตารางที่ 1.1 คำอุปสรรค (Prefix) ที่ใช้บ่อยในระบบเอสไอ

Prefix	Symbol	Power	Number	
Peta-	P	10^{15}	1,000,000,000,000,000	One quadrillion
Tera-	T	10^{12}	1,000,000,000,000	One trillion
Giga-	G	10^{9}	1,000,000,000	One billion
Mega-	M	10^{6}	1,000,000	One million
Kilo-	k	10^{3}	1,000	One thousand
Hecto-	h	10^{2}	100	One hundred
Deca-	da	10^{0}	1	One
Deci-	d	10^{-1}	1/10	One tenth
Centi-	c	10^{-2}	1/100	One hundredth
Milli-	m	10^{-3}	1/1,000	One thousandth
Micro-	μ	10^{-6}	1/1,000,000	One millionth
Nano-	**n**	**10^{-9}**	**1/1,000,000,000**	**One billionth**
Pico-	p	10^{-12}	1/1,000,000,000,000	One trillionth
Femto-	f	10^{-15}	1/1,000,000,000,000,000	One quadrillionth

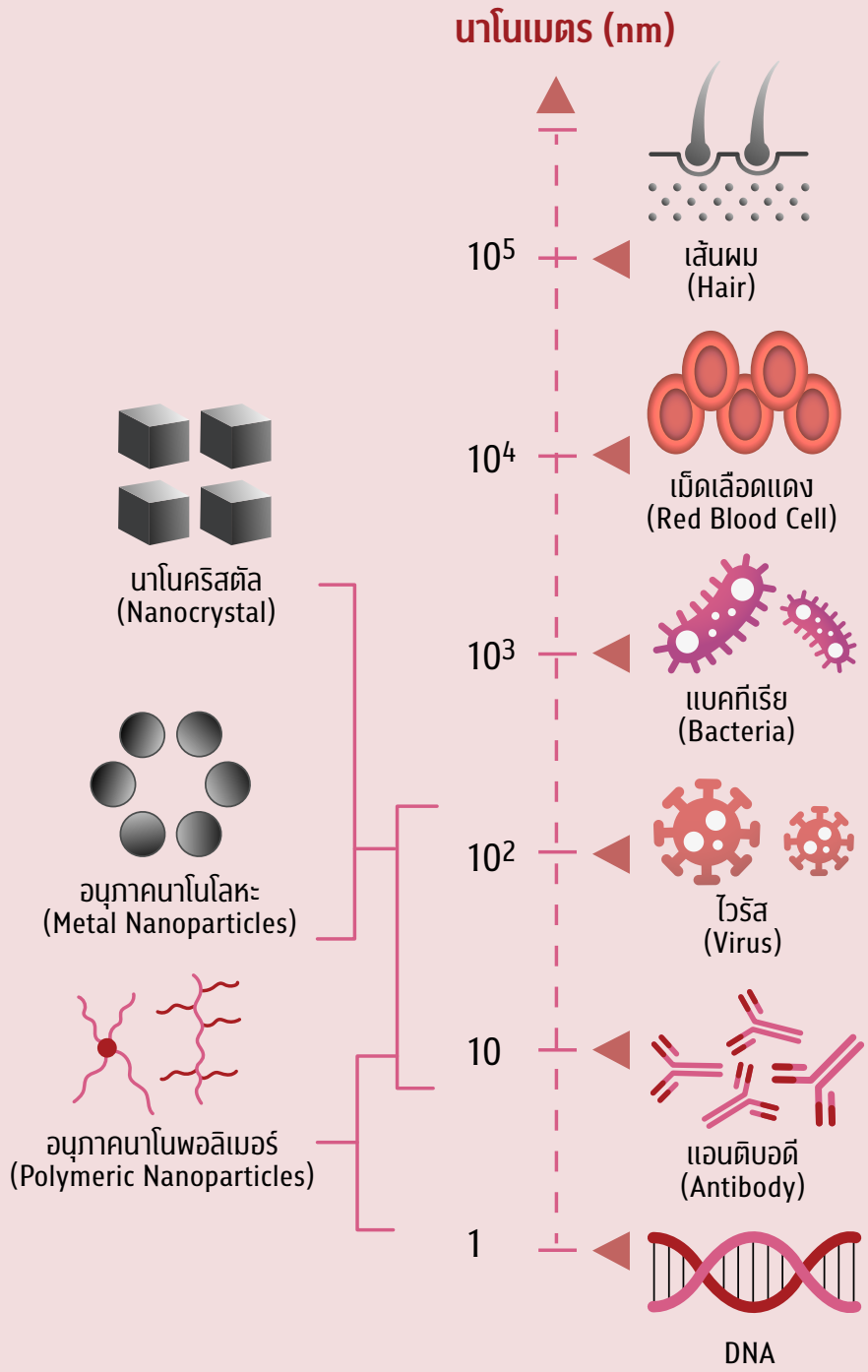
ระบบเมทริกซ์ เป็นระบบมาตรฐานสากลในทางวิทยาศาสตร์ (International System Unit; SI หรือเรียกว่า หน่วยเอสไอ) ที่มีการใช้อย่างแพร่หลาย โดยมีการแบ่งหน่วยเอสไอนี้ เป็นหน่วยนับด้านต่าง ๆ ประกอบด้วย เวลา ความยาว มวล อุณหภูมิ กระแสไฟฟ้า ปริมาณของสาร และความเข้มของแสง (ตารางที่ 1.2) หน่วยเอสไอ เป็นหน่วยนับสากลมีความสำคัญอย่างยิ่งในการศึกษาวิจัยทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี รวมทั้งใช้เป็นตัวกลางในการสื่อสารทางธุรกิจทั่วโลกด้วย

ตัวอย่างด้านล่าง คือ ขนาดตัวอย่างเพื่อเปรียบเทียบให้เห็นภาพชัดเจนขึ้นว่าขนาดในระดับนาโนเมตรนั้น มีความเล็กขนาดไหน (รูปที่ 1.1)

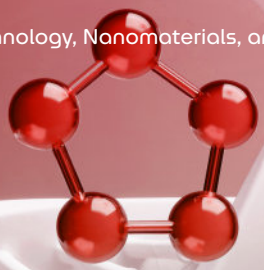
- เส้นผมของมนุษย์มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 60,000-100,000 นาโนเมตร
- แบคทีเรียมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 1,000 นาโนเมตร
- ไวรัสมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 100 นาโนเมตร
- แอนติบอดีมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 10 นาโนเมตร
- ความกว้างของสายดีเอ็นเอของมนุษย์ประมาณ 2.5 นาโนเมตร

ตารางที่ 1.2 หน่วยวัดมาตรฐานในระบบเอสไอ

Based Quantity		Based Unit	
Name	Symbol	Name	Symbol
Time	t	Second	s
Length	l	Meter	m
Mass	m	Kilogram	kg
Electric Current	I, i	Ampere	A
Temperature	T	Kelvin	K
Amount of Substance	n	Mole	mol
Luminous Intensity	lv	Candela	cd



รูปที่ 1.1 แสดงขนาดตัวอย่างของสิ่งต่าง ๆ รอบตัวในระดับนาโนเมตร



“นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology)” คืออะไร

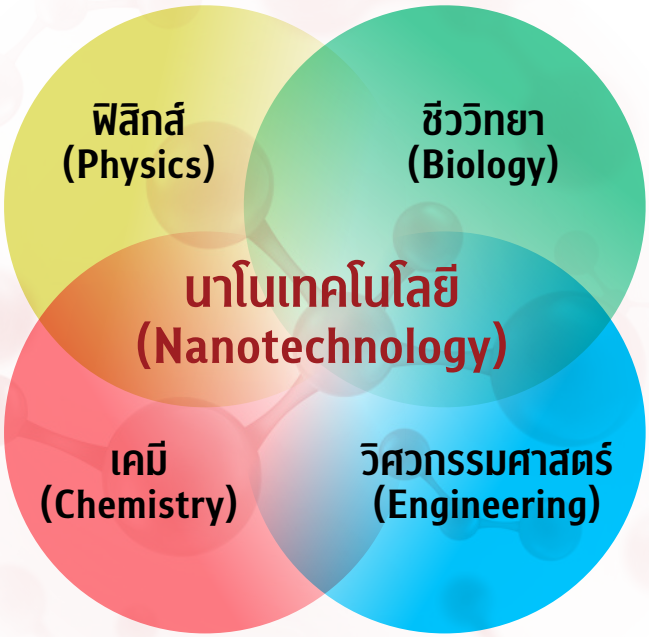
วิทยาศาสตร์นาโน (Nanoscience) คือ วิทยาศาสตร์แขนงหนึ่งซึ่งศึกษาสสาร วัตถุหรือสิ่งต่าง ๆ ที่มีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตร โดยทั่วไปถือว่าขนาดของวัสดุนาโนทั้งที่มีอยู่ในธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้น จะต้องมีขนาดอยู่ระหว่าง 1-100 นาโนเมตร (อย่างน้อยในหนึ่งมิติ คือ ด้านกว้าง ด้านยาว หรือด้านสูงก็ได้) ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า สิ่งที่มีขนาดเล็กระดับนาโนจะมีคุณสมบัติพิเศษแตกต่างจากสมบัติของวัสดุสิ่งเดียวกันที่มีขนาดใหญ่ (1, 2)

นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) เป็นแขนงหนึ่งของวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อสร้างวัสดุขนาดเล็กสำหรับนำมาประยุกต์ใช้งาน ในปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีเป็นการผสมผสานความรู้จากหลายศาสตร์เข้าด้วยกัน (ฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยา เป็นต้น) เพื่อนำมาใช้ในการจัดการเปลี่ยนแปลงสสารและอนุภาคของสิ่งต่าง ๆ ให้เกิดจัดเรียงอะตอม โมเลกุล หรือระดับเหนือโมเลกุลให้ได้ขนาดและตำแหน่งที่ต้องการอย่างถูกต้องและแม่นยำ การจัดการดังกล่าวเพื่อสร้างวัสดุนาโน (Nanomaterial) ขึ้นมานั้น หมายรวมถึงการควบคุม การออกแบบ การสร้างวัสดุ โครงสร้าง หรืออุปกรณ์ให้เกิดขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการทำเพื่อหวังผลนำมาประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรม (3, 4)

เนื่องด้วย นาโนเทคโนโลยีเป็นเรื่องที่มีผู้ให้ความสนใจและเห็นความสำคัญในการนำมาใช้ในงานมากขึ้นเรื่อย ๆ ในหลากหลายสาขา ในปี ค.ศ. 2000 รัฐบาลกลางของประเทศสหรัฐอเมริกาได้ตั้งองค์กรกลางใหม่ของรัฐบาลขึ้นมาชื่อว่า “National Nanotechnology Initiatives (NNI)” เพื่อทำหน้าที่ให้ความรู้ความเข้าใจที่ถูกต้องเกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยีสู่สาธารณชน รวมทั้งทำหน้าที่วิจัยและรวบรวมองค์ความรู้เกี่ยวกับสมบัติของวัสดุนาโนซึ่งองค์กรนี้ได้ให้นิยามของคำว่า นาโนเทคโนโลยี ดังนี้ (5, 6)

- การวิจัยและการพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวกับการจัดการโครงสร้างอย่างแม่นยำของวัสดุใด ๆ ให้มีขนาดอยู่ในระยะ 1-100 นาโนเมตร (อย่างน้อยใน 1 มิติ)
- วัสดุนาโนที่ถูกสร้างจากนาโนเทคโนโลยีจะมีคุณสมบัติพิเศษเฉพาะที่แตกต่างจากสมบัติของวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่ ไม่ว่าจะเป็นสมบัติทางฟิสิกส์ เคมี หรือชีวภาพ
- ต้องเป็นเทคโนโลยีที่สามารถควบคุมและจัดการสร้างวัสดุนาโนได้เหมือนเดิม มีความแม่นยำสูง

ช่วงเวลาที่เริ่มศึกษาวิทยาศาสตร์นาโนเกิดขึ้นเมื่อใดนั้นไม่ปรากฏหลักฐานแน่ชัด อย่างไรก็ดี เป็นที่ยอมรับในระดับนานาชาติว่า นักวิทยาศาสตร์หลายท่านจากทั่วโลกมีส่วนร่วมในวิวัฒนาการของวิทยาศาสตร์นาโนและนาโนเทคโนโลยี ส่งผลให้เกิดนวัตกรรมและอุตสาหกรรมมากมายจากความรู้วิทยาศาสตร์แขนงนี้ ดังตารางที่ 1.3



รูปที่ 1.2 แผนภาพแสดงความเป็นสหศาสตร์ของนาโนเทคโนโลยี

ตารางที่ 1.3 ตารางสรุปวิวัฒนาการของวิทยาศาสตร์นาโนและนาโนเทคโนโลยีโดยสังเขป

ปี ค.ศ.	นักวิทยาศาสตร์	การค้นพบ / เหตุการณ์สำคัญ
1856	Michael Faraday	ค้นพบอนุภาคคอลลอยด์ (นาโน) ของโลหะเป็นครั้งแรก (7)
1905	Albert Einstein	ตีพิมพ์ผลงานวิจัยเรื่องเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคโมเลกุลของน้ำตาล พบว่ามีขนาดประมาณ 1 นาโนเมตร (8, 9)
1935	Max Knoll Ernst Ruska (นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน)	ได้จัดสร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสำเร็จเป็นครั้งแรกของโลกทำให้สามารถเห็นอนุภาคของสิ่งต่าง ๆ ในเซลล์ระดับนาโนเมตรได้ (10)
1959	Richard Feynman (นักฟิสิกส์ชาวอเมริกัน)	ได้กล่าวปาฐกถาเรื่อง “There’s plenty of room at the bottom” ซึ่งกล่าวถึงว่าในอนาคตจะมีความสามารถในการจัดการระดับอะตอมที่นำไปสู่การสร้างเครื่องมือในขนาดเล็ก ๆ ได้ ซึ่งต่อมา ดร.ริชาร์ด ฟายน์แมน **ได้รับขนานนามว่าเป็น “บิดาแห่งนาโนเทคโนโลยี”** และได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 1992 (11)
1974	Norio Taniguchi	นักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่นที่เป็นคนแรกที่เริ่มใช้คำว่า นาโนเทคโนโลยี (12)
1979	T.F.C. Batten C.R. Hopkins (นักฮิสโตวิทยาชาวอังกฤษ)	ได้เริ่มการใช้อนุภาคทองคำนาโนเป็นสารย้อมทึบแสงของอิเล็กตรอนในการตรวจเซลล์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (13)

ปี ค.ศ.	นักวิทยาศาสตร์	การค้นพบ / เหตุการณ์สำคัญ
1981	Gerd Binnig Heinrich Rohrer (นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน)	ประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิด Scanning Tunneling Microscope ที่สามารถมองเห็นการจัดเรียงอะตอมของธาตุต่าง ๆ (14)
1985	Robert Curl Richard Smalley Harold Kroto	สังเคราะห์อะตอมของธาตุคาร์บอนจำนวน 60 อะตอม เรียงตัวเป็นรูปแบบทรงกลม เรียกว่า ฟูลเลอรีน (Fullerenes) ซึ่งต่อมา ทั้งสามคนได้รับรางวัลโนเบลร่วมกันในสาขาเคมี ประจำปี ค.ศ. 1996 (15)
1991	Sumio Iijima (นักเคมีชาวญี่ปุ่น)	สังเคราะห์อะตอมของธาตุคาร์บอนเรียงตัวเป็นท่อ (Carbon Nanotube) ซึ่งมีสมบัติพิเศษหลายอย่าง เช่น แข็งกว่าเหล็กแต่เบามาก เป็นทั้งตัวนำไฟฟ้าอย่างยิ่งยวดหรือกึ่งตัวนำ (16)
1997	Douglas และคณะวิจัย	ตีพิมพ์ผลงานวิจัยที่มีการใช้อนุภาคนาโนมาต่อกับโมโนโคลนอลแอนติบอดี (Monoclonal Antibody) เพื่อใช้ในการนำส่งยาแบบมุ่งเป้าสู่เซลล์มะเร็งเป็นครั้งแรก
1998	Bruchez และคณะวิจัย	ตีพิมพ์ผลงานวิจัยเรื่องการใช้นาโนคริสตัลที่สังเคราะห์ขึ้นมา เรียกว่า ควอนตัมดอท (Quantum Dot) เป็นสารเรืองแสงฟลูออเรสเซนต์ เพื่อใช้ตรวจติดตามสารชีวโมเลกุล ซึ่งควอนตัมดอทมีการเรืองแสงฟลูออเรสเซนต์ที่สว่างกว่าและอยู่ได้ยาวนานกว่าสารฟลูออเรสเซนส์แบบเดิม (17)

ปี ค.ศ.	นักวิทยาศาสตร์	การค้นพบ / เหตุการณ์สำคัญ
2000		ประเทศสหรัฐอเมริกาประกาศตั้ง National Nanotechnology Initiative สร้างกระแสตื่นตัวให้กับวงการวิทยาศาสตร์นาโนทั่วโลก (18)
2010	Andre Geim Konstantin Novoselov (นักวิจัยจากประเทศอังกฤษ)	ตีพิมพ์งานวิจัยเรื่องการสังเคราะห์คาร์บอนอะตอมเรียงตัวเป็นรูปแผ่น (บางระดับอะตอมเดี่ยว มีความบางมากแต่แข็งแรงมาก มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าอย่างยิ่งยวด และได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี 2010 (19, 20)
2015		พบว่า สินค้าทำจากวัสดุนาโนในภาคธุรกิจทั่วโลก มีมูลค่าประมาณการรวมว่าสูงถึง 1 ล้านล้านดอลล่าร์สหรัฐ (21, 22)

1.2 “นาโน” เล็กแล้วดีอย่างไร

นาโนเทคโนโลยีนอกจากจะเป็นศาสตร์ที่สามารถนำมาใช้สร้างวัสดุนาโนให้เล็กลงได้อย่างแม่นยำและมีแบบแผนแล้ว การที่สารต่าง ๆ มีขนาดเล็กลงจนถึงค่าที่น้อยกว่า 10 นาโนเมตรนั้นเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเฉพาะตัวด้านต่าง ๆ ของสารเหล่านั้นให้แตกต่างจากวัสดุเดียวกันที่มีขนาดใหญ่กว่า 100 นาโนเมตรอย่างสิ้นเชิงทั้งสมบัติทางฟิสิกส์ สมบัติทางเคมี และสมบัติทางชีวภาพ ยิ่งไปกว่านั้น การที่สารมีขนาดเล็กลงจนถึงระดับนาโนเมตร สมบัติที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนไปได้โดยขึ้นกับขนาดและรูปร่างเป็นหลัก สมบัติพิเศษของสารที่มีขนาดนาโนเมตรไม่ว่าจะเป็นสารกลุ่มใด สามารถสรุปการเปลี่ยนแปลงโดยแบ่งออกเป็นกลุ่ม ดังนี้