



นาโนคอมพิวเตอร์

ธนาวุฒิ ประกอบผล*

บทคัดย่อ

นาโนเทคโนโลยีในธรรมชาติมีอยู่มากมายหลายศาสตร์ เช่น การเรียงตัวของโมเลกุลอย่างเป็นระเบียบของแคลเซียมคาร์บอเนตทำให้เกิดเป็นเปลือกหอย เป็นไข่มุก ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า หอยมีกรรมวิธีที่เรียกว่านาโนวิศวกรรม (nanoengineering) ตามธรรมชาติหรือการจัดเรียงอะตอมของคาร์บอนอย่างเป็นระเบียบที่ต่างกันทำให้เกิดเป็นถ่าน กราไฟต์และเพชร

ความก้าวหน้าทางนาโนเทคโนโลยีทำให้เกิดแนวโน้มการพัฒนาคอมพิวเตอร์ เพื่อเป็นหน่วยควบคุมหรือหน่วยประมวลผลซึ่งเป็นส่วนสมองของจักรกลนาโน หรือที่เรียกว่านาโนคอมพิวเตอร์ขึ้น (nanocomputer) นาโนคอมพิวเตอร์ต่างจากคอมพิวเตอร์ธรรมดาที่เราเข้าใจ เช่น คอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะที่ทำงานโดยการปฏิสัมพันธ์กับประสาทสัมผัสของมนุษย์โดยตรง เช่น มีส่วนรับข้อมูลเข้า คือ คีย์บอร์ด มีส่วนแสดงผล คือ มอนิเตอร์ แต่นาโนคอมพิวเตอร์จะมีการรับข้อมูลเข้าทางเซนเซอร์ มีการแสดงผลออกเป็นสัญญาณหรือการทำงานกับจักรกลนาโน ทั้งนี้นาโนคอมพิวเตอร์จะมีปฏิสัมพันธ์โดยตรงกับอุปกรณ์ที่ทำงานมากกว่ากับมนุษย์

แนวทางการพัฒนานาโนคอมพิวเตอร์สามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ

1. นาโนคอมพิวเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ (electronic nanocomputer)
2. นาโนคอมพิวเตอร์เชิงเคมี (chemical nanocomputer)
3. นาโนคอมพิวเตอร์เชิงกล (mechanical nanocomputer)
4. ควอนตัมนาโนคอมพิวเตอร์ (quantum nanocomputer)

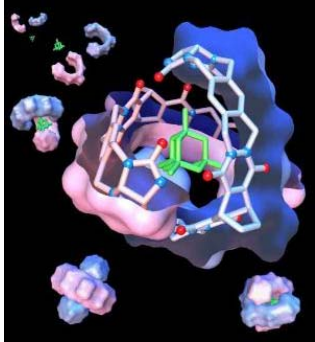
การวิจัยและพัฒนาทางด้านนาโนเทคโนโลยียังคงดำเนินต่อไป นาโนเทคโนโลยีนับว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีบทบาทมากในปัจจุบัน โดยเป็นวิทยาศาสตร์พื้นฐานที่มีอิทธิพลในทุกสาขา และจะเป็นเทคโนโลยีหลักที่ขาดไม่ได้ในศตวรรษที่ 21

คำสำคัญ : นาโนเทคโนโลยี นาโนคอมพิวเตอร์

ปัจจุบันได้เกิดศัพท์คำใหม่คำนี้ “นาโนเทคโนโลยี” (nanotechnology) ซึ่งเป็นสิ่งที่กำลังจะนำเอาพื้นฐานของเราก้าวไปสู่ยุคของยุคใหม่อย่างแท้จริง เมื่อมนุษย์มีขีดความสามารถที่จะสร้างสิ่งประดิษฐ์ที่เล็ก

ที่สุดเท่าที่กฎเกณฑ์ ธรรมชาติจะยอมให้ทำได้ นั่นคือการนำเอาอะตอมมาต่ออะตอมได้เป็นตัว ๆ เหมือนกับการเอาไม้ชนิดต่าง ๆ มาต่อให้เป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ใช้ปลูกสร้างเพื่อเป็นที่อยู่ที่พักอาศัย

* อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ



รูปที่ 1 โมเลกุลสามารถประกอบกันด้วยแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่เหมาะสม

นาโนเทคโนโลยี (nanotechnology) เป็นคำอุปสรรค (prefix) มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก แปลว่า “คนแคระ” นาโน มีค่าเท่ากับ สิบยกกำลังลบเก้า หรือ หนึ่งในพันล้านส่วน เมื่อนำคำว่า “นาโน” ไปใช้ในหน่วยวัดใดก็จะหมายถึงพันล้านส่วนของหน่วยนั้น ดังนั้นสิ่งของที่มีขนาด 1 นาโนเมตร จึงหมายถึง มีขนาด 1 ในพันล้านเมตร กล่าวได้ว่านาโนเทคโนโลยี หมายถึง เทคโนโลยีระดับโมเลกุลหรือระดับนาโนเมตร (nanometer) เป็นเทคโนโลยีเกี่ยวข้องกับสสารหรือวัสดุที่มีขนาด 1-100 นาโนเมตร นาโนเทคโนโลยีมีความหมายอีกแห่งหนึ่งคือ วิทยาศาสตร์ประยุกต์ซึ่งเกี่ยวข้องกับสิ่งที่มีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตร ได้แก่ การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีระดับอะตอม หรือมาโครโมเลกุล ซึ่งอยู่ในระดับขนาดประมาณ 1-100 นาโนเมตร การสร้างและใช้โครงสร้างเครื่องมือที่มีคุณสมบัติและหน้าที่ที่แปลกใหม่ เนื่องจากมันมีขนาดเล็ก ความสามารถในการควบคุมหรือจัดการเปลี่ยนแปลงได้ในระดับอะตอม

นาโนเทคโนโลยี เป็นความพยายามสร้างและพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับสิ่งที่มีขนาดเล็กมาก ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1. นำไปประกอบเป็นวัสดุต่าง ๆ เช่น นำ

เส้นใยขนาดเล็กมาทอเป็นผ้าที่มีคุณลักษณะพิเศษ

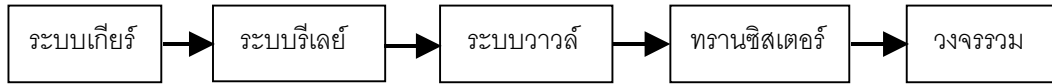
2. ประกอบเป็นวัสดุ สิ่งของ อุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นมา เช่น คอมพิวเตอร์ หรือ ชิป ที่มีขนาดเล็กจิ๋วกว่าปกติ

นักวิทยาศาสตร์ผู้ที่ชี้แนะให้เห็นความสำคัญของนาโนเทคโนโลยีอย่างเป็นทางการคนแรก คือ ศาสตราจารย์ ริชาร์ด ฟีนแมน (Richard Feynman) ซึ่งเป็นนักฟิสิกส์ผู้ได้รับรางวัลโนเบลเมื่อปี ค.ศ. 1965 (ฟีนแมนเป็นผู้ที่อธิบายให้ชาวโลกเข้าใจถึงสาเหตุที่ยานอวกาศแชลแลนเจอร์ระเบิด) ในปี ค.ศ. 1959 ฟีนแมนกล่าวกระตุ้นเตือนให้นักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกหันมาสนใจในสิ่งที่มีขนาดเล็กแทนการมุ่งศึกษาของที่มีขนาดใหญ่ โดยเขาชี้ให้เห็นประสิทธิภาพของเซลล์ขนาดเล็กในสิ่งที่มีชีวิตที่ทำงานได้อย่างมหัศจรรย์

นาโนเทคโนโลยีในธรรมชาติมีอยู่มากมายหลายศาสตร์ เช่น การเรียงตัวของโมเลกุลอย่างเป็นระเบียบของแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นสารประกอบสำคัญในโครงสร้างของเปลือกหอยทำให้เปลือกหอยกลายเป็นไข่มุก ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า หอยมีกรรมวิธีที่เรียกว่านาโนวิศวกรรม (nanoengineering) ตามธรรมชาติ หรือการจัดเรียงอะตอมของคาร์บอนอย่างเป็นระเบียบที่ต่างกัน ทำให้เกิดเป็นถ่าน กราไฟต์ และเพชร เช่นเดียวกับการทำงานของนาโนคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะทำงานโดยการสร้างหรือทำลายพันธะทางเคมี โดยสามารถเก็บและดำเนินการทางตรรกะ (logic) ได้ จากอาศัยหลักการของโครงสร้างทางเคมี เช่น แรงกระทำระหว่างส่วนต่าง ๆ ของโมเลกุล แสดงไว้ดังรูปที่ 1

นาโนคอมพิวเตอร์

อนาคตข้างหน้าอุปกรณ์หรือจักรกลต่าง ๆ จะมีขนาดเล็ก อุปกรณ์เหล่านั้นได้รับการเรียกขาน



รูปที่ 2 วิวัฒนาการของเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์

ต่าง ๆ กัน เช่น หุ่นยนต์นาโน (nanorobot) จักรกลนาโน (nanomachine) จักรกลโมเลกุล (molecular machine) อุปกรณ์เหล่านั้นจะต้องมีหน่วยควบคุมหรือหน่วยประมวลผลซึ่งเป็นส่วนสมอง จึงมีความคิดว่าน่าจะมีการพัฒนานาโนคอมพิวเตอร์ขึ้นมาเพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ หรือจักรกลเหล่านั้น

นาโนคอมพิวเตอร์ คือแนวโน้มของการพัฒนาทางด้านคอมพิวเตอร์ที่สำคัญในยุคถัดไป วิวัฒนาการของคอมพิวเตอร์เป็นวงรอบของการเปลี่ยนแปลงจากระบบเกียร์ ระบบปริเลย์ ระบบวาล์ว ทรานซิสเตอร์ และวงจรรวม สำหรับแผนภาพแสดงวิวัฒนาการของเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์แสดงไว้ดังรูปที่ 2

นาโนคอมพิวเตอร์ผลิตขึ้นจากส่วนประกอบที่มีขนาดในระดับนาโน ส่วนประกอบได้แก่ กลไก และแผงวงจร ส่วนประกอบที่สำคัญของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์หรือชิพ ได้แก่ ลวดนำไฟฟ้าสำหรับเชื่อมโยงซึ่งหมายถึง ลวดนำไฟฟ้านาโนหรือนาโนไวร์ (nanowire)

นาโนไวร์หรือลวดนำไฟฟ้านาโนเป็นการสร้างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขนาดจิ๋ว (microscopic electronic circuits) ในอนาคตมีนักวิทยาศาสตร์กล่าวว่า สายโปรตีนสามารถใช้เป็นตัวสร้างลวดโลหะขนาดนาโนได้ในอนาคต ซึ่งปัจจุบันได้มีความพยายามทำวิจัยโดยนักวิจัยทั่วโลก

การค้นหาลวดที่ทำลวดนำไฟฟ้านาโนนั้นมีแนวคิดที่หลากหลาย เช่น การนำเอาไวรัสที่เป็นไพรอน-โปรตีน (prion-protein = PrP) เคลือบผิวด้วย

โลหะทอง ไพรอน-โปรตีนเป็นวัสดุที่แข็งแรงและมีความเหนียวสูงซึ่งถูกสร้างขึ้นโดยยีสต์ นักวิทยาศาสตร์ของมหาวิทยาลัยในสหรัฐอเมริกา และเยอรมันเชื่อว่าการจัดเรียงตัวโปรตีนนั้นสามารถทำได้ในเชิงอุตสาหกรรมเพื่อนำไปสู่การผลิตลวดที่เคลือบด้วยทองหรือเงิน ซึ่งจะทำให้ได้ลวดนำไฟฟ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหนึ่งในพันของลวดนำไฟฟ้าร้อนและขาดได้ง่าย ลวดนำไฟฟ้านาโนที่ได้จากไพรอนโปรตีนให้ค่าความต้านทานประมาณ 80 โอห์ม (ohm)

นาโนคอมพิวเตอร์ต่างจากคอมพิวเตอร์ธรรมดาที่เราเข้าใจ เช่น คอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะที่ทำงานโดยการปฏิสัมพันธ์กับประสาทสัมผัสของมนุษย์โดยตรง เช่น มีส่วนรับข้อมูลเข้า นั่นคือคีย์บอร์ด มีส่วนแสดงผล นั่นคือมอนิเตอร์ แต่นาโนคอมพิวเตอร์จะมีการรับข้อมูลเข้าทางเซนเซอร์ มีการแสดงผลออกเป็นสัญญาณหรือการทำงานกับจักรกลนาโน ทั้งนี้ นาโนคอมพิวเตอร์จะมีปฏิสัมพันธ์โดยตรงกับอุปกรณ์ที่ทำงานมากกว่ามนุษย์ การพัฒนาอิเล็กทรอนิกส์เชิงโมเลกุลจะมีประโยชน์ต่อการพัฒนานาโนคอมพิวเตอร์ รวมทั้งยังมีประโยชน์ต่อการพัฒนาคอมพิวเตอร์รูปแบบเดิมเช่น คอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะด้วย

เราสามารถแบ่งแนวทางการพัฒนานาโนคอมพิวเตอร์ออกเป็น 4 ประเภท คือ

1. นาโนคอมพิวเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ (electronic nanocomputer)

นาโนคอมพิวเตอร์อิเล็กทรอนิกส์มีพื้นฐานการทำงานคล้ายกับคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันคือทำงานจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน แต่ต่างกัน



ที่นาโนคอมพิวเตอร์อิเล็กทรอนิกส์จะไม่อาศัยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจำนวนมากที่เป็นอย่างที่เป็นอยู่ในคอมพิวเตอร์ปัจจุบัน แต่จะใช้อิเล็กตรอนตัวเดียวหรือมากกว่านั้น ซึ่งจะทำงานโดยอาศัยประโยชน์จากผลของควอนตัม (quantum effect) ซึ่งสิ่งนี้ คือใช้ความสามารถในการจัดวางตัวหรือจับตัวของอะตอมเป็นตัวกำหนดลักษณะของปฏิกิริยาการทำงานให้กับระบบคอมพิวเตอร์ ทำให้มีความสามารถในการทำงานสูงขึ้นอย่างมาก ซึ่งสิ่งนี้เป็นอุปสรรคของคอมพิวเตอร์ยุคปัจจุบันแต่กลับเป็นกลไกให้นาโนคอมพิวเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ของนาโนคอมพิวเตอร์แบบนี้จึงต้องมีขนาดเล็กในระดับโมเลกุลเกิดเป็นคำใหม่ขึ้นมาว่า อิเล็กทรอนิกส์เชิงโมเลกุล

2. นาโนคอมพิวเตอร์เชิงเคมี (chemical nanocomputer)

นาโนคอมพิวเตอร์เชิงเคมีทำงานโดยการสร้างหรือทำลายพันธะทางเคมี มันสามารถเก็บและดำเนินการทางตรรกะและสารสนเทศโดยอาศัยหลักของโครงสร้างทางเคมี เช่น อันตรกิริยาระหว่างส่วนต่าง ๆ ในโมเลกุล การปรับเปลี่ยนรูปแบบพันธะเคมี (conformation) เป็นต้น ประจักษ์พยานที่แสดงถึงความเป็นไปได้ของนาโนคอมพิวเตอร์เชิงเคมีมีให้เห็นอยู่แล้วในธรรมชาติ นั่นคือการดำเนินการทางชีวสารสนเทศในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต

3. นาโนคอมพิวเตอร์เชิงกล (mechanical nanocomputer)

นาโนคอมพิวเตอร์เชิงกลนั้นมีมาก่อนคอมพิวเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ หลักการทำงานของนาโนคอมพิวเตอร์เชิงกลก็จะอิงวิธีการของคอมพิวเตอร์เชิงกลที่คิดค้นโดยชาลส์ บาบเบจ (Charles Babbage) ผลมผลานกับคำชี้แนะของริชาร์ด ฟินแมน (Richard

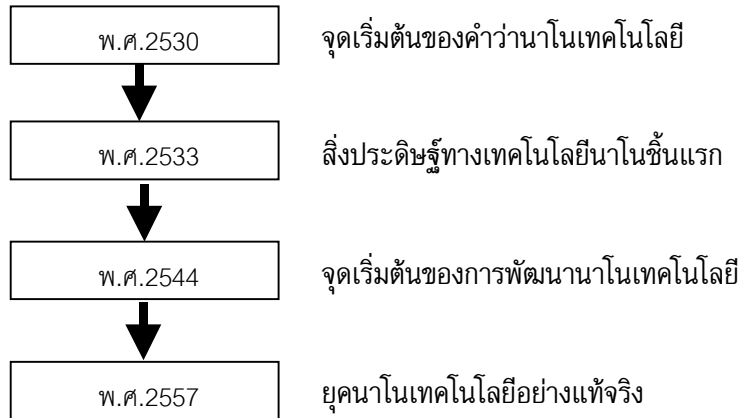
Feynman) คือมีการทำงานทางตรรกะและดำเนินการทางสารสนเทศโดยอาศัยกลไกของเกียร์ แบริง และเพลลา เพียงแต่ย่อส่วนลงไปสู่ระดับโมเลกุล

4. ควอนตัมนาโนคอมพิวเตอร์ (quantum nanocomputer)

ควอนตัมนาโนคอมพิวเตอร์อาศัยการทำงานตามสถานะควอนตัม (quantum state) ของหน่วยพื้นฐานซึ่งสามารถทำให้เล็กสุดถึงระดับของอะตอมจึงสามารถสร้างให้มีความหนาแน่นของวงจสูงมาก การทำงานเชิงตรรกะของหน่วยพื้นฐานควบคุมจากสภาวะรอบข้าง เช่น สนามแม่เหล็ก ความเป็นไปได้ของนาโนคอมพิวเตอร์แบบนี้เป็นแนวคิดของริชาร์ด ฟินแมน ทำให้ปัจจุบันมีกลุ่มวิจัยที่ทำงานเรื่องนี้อยู่เป็นจำนวนมาก

สำหรับการพัฒนานาโนคอมพิวเตอร์เป็นสิ่งสำคัญอันดับหนึ่งในการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยี นาโนคอมพิวเตอร์จะเป็นคอมพิวเตอร์ขนาดจิ๋ว ซึ่งมีองค์ประกอบพื้นฐานไม่เกินนาโนเมตร หรือมีขนาดเล็กเท่ากับ 2-3 โมเลกุล กล่าวคือ มีขนาดเล็กลงไปจากไมโครคอมพิวเตอร์ (1 ใน 1 ล้านส่วนของเมตร) โดยเปรียบเทียบได้ว่าชิ้นส่วนของนาโนคอมพิวเตอร์มากกว่า 1 หมื่นชิ้น สามารถนำมาบรรจุลงได้ในพื้นที่ส่วนประกอบของวงจรรวมของไมโครคอมพิวเตอร์เพียง 1 ชิ้นเท่านั้น

บางเรื่องของนาโนเทคโนโลยีไม่ใช่ของใหม่ เช่น เทคโนโลยีการถ่ายภาพ และเทคโนโลยีในเรื่องปฏิกิริยาเร่ง ส่วนนาโนเทคโนโลยีที่เป็นเรื่องใหม่ในปัจจุบัน (ปี พ.ศ. 2547) ได้แก่ ชิพคอมพิวเตอร์ชนิดเพนเทียมโปรเซสเซอร์รุ่นที่ 4 (Pentium IV) ของบริษัท อินเทล เป็นชิพที่มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร



รูปที่ 3 แสดงการพัฒนานาโนเทคโนโลยีตั้งแต่อดีตถึงอนาคต

สำหรับแนวโน้มและการพัฒนานาโนเทคโนโลยีนั้นในประเทศสหรัฐอเมริกา คาดว่าปี พ.ศ. 2557 คงเป็นยุคนาโนเทคโนโลยีอย่างแท้จริง สำหรับแผนภาพแสดงการพัฒนานาโนเทคโนโลยีแสดงไว้ดังรูปที่ 3

IBM ระดับนาโน

ปรากฏการณ์สำคัญสำหรับสิ่งประดิษฐ์นาโนเทคโนโลยี ได้แก่ การทดลองฝังอะตอมของซีนอน (xenon) บนแผ่นนิเกิลโดยเขียนคำว่า IBM โดย เอลเกลอร์ (D.M.Elger) และชวีเซอร์ (E.K. Schweizer) ซึ่งเป็นนักวิจัยของบริษัท IBM สิ่งประดิษฐ์ดังกล่าวทำขึ้นในปี พ.ศ. 2533 ซึ่งถือว่าเป็นสิ่งประดิษฐ์โดยนาโนเทคโนโลยีเป็นชิ้นแรก

หากกล่าวถึงความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในอดีต คงต้องกล่าวถึงเทคโนโลยีที่อัจฉริยะได้แก่ ไมโครเทคโนโลยี ซึ่งเป็นเทคโนโลยีประดิษฐ์วัสดุอุปกรณ์ขนาดไมโครเมตร หนึ่งไมโครเมตรเป็นขนาดความยาวหนึ่งในล้านส่วนของ 1 เมตร หรือเท่ากับ 0.000001 เมตร หรือขนาดที่มองเห็นได้ด้วยกล้อง

จุลทัศน์ (microscope) ตัวอย่างของไมโครเทคโนโลยี ได้แก่ เทคโนโลยีการผลิตไมโครชิพ (microchip) อุปกรณ์แผงวงจรไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กที่ใช้ในไมโครอิเล็กทรอนิกส์ หรือคอมพิวเตอร์ที่ผลิตก่อนปี พ.ศ. 2545

บทสรุป

นาโนคอมพิวเตอร์เป็นส่วนหนึ่งของการปฏิวัติทางด้านเทคโนโลยีครั้งสำคัญ ซึ่งโดยปกตินาโนคอมพิวเตอร์จะเป็นคอมพิวเตอร์ที่มีองค์ประกอบพื้นฐานวัดขนาดได้ระดับนาโนเมตร

นาโนเทคโนโลยีเป็นเทคโนโลยีที่รวมศาสตร์ทุกแขนงเข้าด้วยกัน นาโนเทคโนโลยีเกิดขึ้นจากความพยายามที่จะใช้ประโยชน์จากคุณลักษณะทางฟิสิกส์ เคมี และชีวภาพ ของระบบที่มีขนาดอยู่ระหว่างอะตอม (โมเลกุลเดี่ยวๆ) กับระบบสสารที่มีขนาดใหญ่ นับว่าเป็นเทคโนโลยีที่กำลังมีบทบาทอย่างยิ่งในปัจจุบัน

ปัจจุบันทั่วโลกมีความตื่นตัวและให้ความสนใจต่อนาโนเทคโนโลยีเป็นอย่างมาก ไม่ว่า



จะเป็นสหรัฐอเมริกา ประเทศในยุโรป เช่น อังกฤษ เยอรมนี สวิตเซอร์แลนด์ สวีเดน ฝรั่งเศส รัสเซีย รวมทั้งประเทศในแถบทวีปเอเชีย จีน ไต้หวัน เกาหลี และออสเตรเลีย ได้พยายามจัดกิจกรรมประชุมให้ความร่วมมือกันในการพัฒนานาโนเทคโนโลยีนี้

สำหรับการดำเนินการนาโนเทคโนโลยีในประเทศไทยมีขอบเขตกว้างขวางครอบคลุมทุกสาขาวิชาทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและมีการพัฒนา

ไปอย่างรวดเร็วมาก ซึ่งแม้ว่าการวิจัยและพัฒนาด้านนาโนเทคโนโลยีของไทยได้เกิดขึ้นแล้วในหลายสถาบัน แต่ทุกสถาบันยังไม่มีความร่วมมือหรือแลกเปลี่ยนความคิดเห็นซึ่งกันและกัน ซึ่งการแก้ไขควรมีการรวบรวม นักวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและอาศัยหน่วยงานที่มีอยู่แล้วเช่น สภาวิจัยแห่งชาติหรือสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ร่วมกันส่งเสริมและพัฒนาวิจัยให้เกิดประโยชน์เป็นรูปธรรมยิ่งขึ้นต่อไป

บรรณานุกรม

- ยอดหทัย เทพธานนท์ และคณะ. (2545) **นาโนเทคโนโลยี เทคโนโลยีซูปเปอร์จีวี**. กรุงเทพฯ : สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- Ferry, D. K. (1995) **Quantum Mechanics: An Introduction for Device Physicists and Electrical Engineers**. London : IOP.
- Hong, F. T. (1989) **Molecular Electronics: Biosensors and Biocomputers**. New York : Plenum Press.
- Ellenbogen, K. C. and Love, J. (1999) **Architecture for Molecular Electronic Computers**. Virginia : McLean.
- Atkins, P. W. (1988) **Molecular Quantum Mechanics**. 2nd ed. Oxford : Oxford University Press.
- Pierret, R. F. (1996) **Semiconductor Device Fundamentals**. New York : Addison-Wesley.