

## นาโนเทคโนโลยีในการพัฒนางานคอนกรีต

ศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ ลินศิริ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ดร.วีรชาติ ตั้งจิรภัทร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หมายเหตุ เอกสารฉบับนี้ ได้ปรับปรุงเพิ่มเติมจากเอกสารประกอบการบรรยายในงานสัมมนาประจำปี ของบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวงจำกัด (มหาชน) เมื่อ 19 สิงหาคม 2549 ณ โรงแรม Miracle Grand กรุงเทพฯ

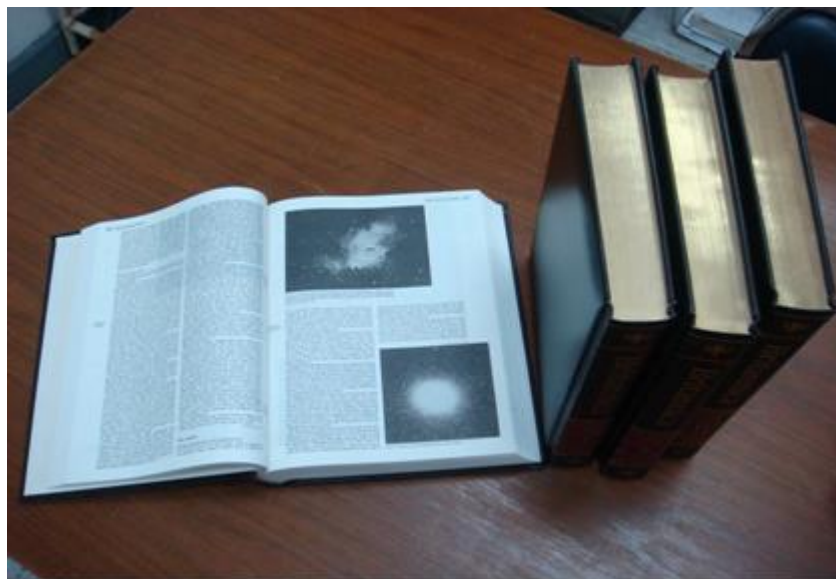
### จุดเริ่มต้นของนาโนเทคโนโลยี

ปลายปี พ.ศ. 2502 (ค.ศ. 1959) ในเดือน ธันวาคม Richard P. Feynman ผู้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ได้บรรยายให้สมาคมนักฟิสิกส์ฟังในเรื่อง *เล็กๆ ซึ่งเป็นเรื่องที่มีคนศึกษายังไม่มาก* แต่เขาคาดว่าจะมีผลอย่างใหญ่หลวงในอนาคต เช่น การนำเสนอให้ใส่ข้อมูลของสารานุกรม บริทานิกา (Encyclopedia Britanica) ซึ่งขณะนั้นมีจำนวน 30 เล่ม (ปัจจุบันน่าจะมีเกือบ 40 เล่ม หรือมากกว่า) แต่ละเล่มมีขนาด A4 และพิมพ์ด้วยตัวอักษรซึ่งค่อนข้างเล็ก (ขนาดตัวอักษรประมาณ 12 Angsana new หรือเล็กกว่า) ให้อยู่บนหัวเข็มหมุด 1 ตัว ซึ่งมีความกว้างของหัวเข็มหมุดประมาณ 1/16 นิ้ว หรือเสนอว่าเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้อยู่ในขณะนั้น (พ.ศ. 2502) ควรจะมีขนาดที่เล็กกว่านี้มากและมีประสิทธิภาพมากกว่าเดิม

# วารสารคอนกรีต TCA e-magazine



การบรรยายของ Feynman ในวันนั้น เขาใช้ชื่อเรื่องว่า “There is *Plenty* of Room at the Bottom” และ หมายความว่า หากสามารถทำสิ่งต่างๆ ซึ่งได้แก่ข้าวของเครื่องใช้และอุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์ให้มีขนาดเล็กเท่ากับ อะตอม สิ่งต่างๆ ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันจะต้องการพื้นที่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เช่น หนังสือที่น่าสนใจซึ่งอยู่ในห้องสมุดสำคัญทั่วโลกซึ่งขณะนั้นมีประมาณ 24 ล้านเล่มจะต้องการพื้นที่เก็บเพียง 3 ตารางหลา (ประมาณ 2.43 ตารางเมตร) เท่านั้น และมีพื้นที่ที่เหลืออีกมากมายที่จะเก็บข้อมูลต่างๆ จากการบรรยายครั้งนั้นได้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นอย่างมากในการศึกษาวัสดุที่มีขนาดอนุภาคระดับอะตอมและเป็นที่มาของศาสตร์ด้าน “นาโนเทคโนโลยี”



รูปที่ 1 หนังสือ บริทานิกา

ปัจจุบัน เราสามารถใช้คอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง ที่ต่อเข้ากับระบบอินเทอร์เน็ต และสามารถเข้าถึงข้อมูลและหนังสือต่างๆ ได้ทั่วโลก โดยใช้พื้นที่ดำเนินการน้อยกว่า 3 ตารางหลา นอกจากนี้ Hard drive และ Handy drive ที่ใช้ในขณะนี้มีความจุสูงมาก สูงกว่าสมัยที่ Feynman ใช้อยู่อย่างมาก และ Feynman อาจจะนึกไม่ถึงว่าแนวคิดของเขามีกการพัฒนาไป

## สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

ชั้น 3 อาคารสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย 487 รามคำแหง 39 ถ.รามคำแหง แขวงพลับพลา เขตวังทองหลาง กรุงเทพฯ 10310  
โทรศัพท์ 0-2935-6539 โทรสาร 0-2935-6538 Email : thaitca@gmail.com Homepage : <http://www.thaitca.or.th>

# วารสารคอนกรีต TCA e-magazine



ได้ไกลถึงขนาดนี้ ยกตัวอย่างที่ระยะเวลาที่ใกล้ๆ ขณะนี้ คือ มีการเปลี่ยนการใช้ diskette ขนาด 8 นิ้ว มาเป็น 5 ¼ นิ้ว จากนั้นไม่นานเท่าไรก็พัฒนามาเป็น 3 ½ นิ้ว เป็น CD และปัจจุบันเป็น Handy drive ซึ่งมีขนาดเล็ก พกพาสะดวก และราคาไม่ถึงพันบาท แต่สามารถเก็บข้อมูลต่างๆ ได้มาก และสามารถเก็บข้อมูลสารานุกรม บริทานิกา ได้ทั้งหมด!!!

ท่านผู้อ่านจะไม่สนใจเรื่องนาโนเทคโนโลยี เลยหรือ เมื่อเห็นวิวัฒนาการที่ก้าวกระโดดของศาสตร์ทางด้านนี้?



รูปที่ 2 แสดง Diskette ขนาด 8 นิ้ว, 5.25 นิ้ว, 3.5 นิ้ว, แผ่น CD และ Handy Drive ขนาด 4 GB

นาโนเทคโนโลยีคืออะไร?

คำนิยามโดย National Science Foundation ของสหรัฐอเมริกา มี 3 ลักษณะด้วยกันคือ

- การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีระดับอะตอม หรือ โมเลกุลที่มีขนาดเล็กในช่วง 1 ถึง 100 นาโนเมตร

## สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

ชั้น 3 อาคารสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย 487 รามคำแหง 39 ถ.รามคำแหง แขวงพลับพลา เขตวังทองหลาง กรุงเทพฯ 10310  
โทรศัพท์ 0-2935-6539 โทรสาร 0-2935-6538 Email : thaitca@gmail.com Homepage : <http://www.thaitca.or.th>

- การ สร้างและใช้ประโยชน์จากโครงสร้างของอุปกรณ์หรือระบบต่างๆ ที่มีคุณสมบัติและการทำงานใหม่ๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากขนาดที่เล็กลงของวัสดุหรืออุปกรณ์ในระดับนาโนเมตร
- ความสามารถในการจัดการและควบคุมได้อย่างถูกต้องแม่นยำในระดับอะตอม

คำว่า “*Nanotechnology*” เป็นคำที่ Norio Taniguchi ได้นำเสนอในปี พ.ศ. 2517 (ค.ศ. 1974) ซึ่งปัจจุบันได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง และเป็นเรื่องที่ประเทศที่พัฒนาและกำลังพัฒนาทั้งหลายให้ความสนใจอย่างมาก หลายๆ ประเทศได้จัดตั้งหน่วยงานพัฒนาและวิจัยเกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยีขึ้น เช่น สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น จีน ไต้หวัน เป็นต้น

สำหรับประเทศไทย ได้ตั้งศูนย์นาโนเทคโนโลยีขึ้นเมื่อวันที่ 13 สิงหาคม 2546 โดยเป็นหน่วยงานในกำกับ สังกัดกระทรวงวิทยาศาสตร์ฯ

### ระดับขนาดนาโนเมตร

เพื่อให้เห็นภาพของความเล็กของระดับนาโนเมตร ขอยกตัวอย่างดังนี้ 1 นาโนเมตรมีขนาดเท่ากับ 1/1000 ล้านเมตร หรือเล็กประมาณหนึ่งแสนเท่าของเส้นผมหนึ่งเส้น โดยเส้นผมของคนมีขนาดประมาณ 80,000 ถึง 120,000 นาโนเมตร ขนาดของนาโนเมตรจึงอยู่ในระดับอะตอมและไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า

เมื่อวัสดุ อุปกรณ์ และระบบที่มีขนาดเล็กลงจนถึงระดับนาโนเมตร จะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้า คุณสมบัติทางแม่เหล็ก คุณสมบัติทางแสง คุณสมบัติทางกล และคุณสมบัติทางเคมีที่แตกต่างจากวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งหลายๆ คุณสมบัติที่กล่าวถึงจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการนำมาแทนที่เทคโนโลยีเดิมซึ่งใช้อยู่ในปัจจุบัน

ตัวอย่างที่เห็นได้ง่าย เช่น คอมพิวเตอร์ยุคแรกๆ ใช้หลอดทรานซิสเตอร์ (Transistor) จึงทำให้คอมพิวเตอร์มีขนาดใหญ่มาก Feynman เสนอว่าหากให้เส้นลวดที่เชื่อมต่อในวงจรต่างๆ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 หรือ 100 อะตอม วงจร (Circuit) ต่างๆ มีขนาดกว้าง 2-3000 อังสตรอม (1 อังสตรอม เท่ากับ  $10^{-10}$  เมตร) จะสามารถลดขนาดของคอมพิวเตอร์ลงได้อย่างมากและมีประสิทธิภาพดีขึ้นด้วย เพราะข้อมูลและการประมวลผลต่างๆ สามารถใช้ระยะทางสั้นลงในการเดินทาง ปัจจุบันนี้ (พ.ศ. 2549) คอมพิวเตอร์มีขนาดเล็กลง

# วารสารคอนกรีต

## TCA e-magazine



มาก (ไม่ได้ใช้หลอดทรานซิสเตอร์อีกต่อไป) แต่มีความสามารถในการคำนวณสูงมาก รูปที่ 3 แสดงถึงเครื่องคิดเลขรุ่นโบราณ (เป็นต้นแบบของเครื่องคอมพิวเตอร์) ที่ใช้ในสมัยสงครามโลก ซึ่งมีขนาดประมาณ 0.5x2x8 เมตร ซึ่งใช้ในกิจการกองทัพเรือสหรัฐอเมริกา แต่มีความสามารถสู้เครื่องคิดเลขราคาเพียง 500-600 บาท ในปัจจุบันไม่ได้



รูปที่ 3 เครื่อง MARK II ใช้หลอดทรานซิสเตอร์ในการคำนวณ ซึ่งอาศัยหลักการของเลขฐาน 2 คือใช้การติดและดับของหลอดทรานซิสเตอร์ในการคำนวณ

ที่มาของคำว่า *BUG* มาจากเครื่อง *Mark II* เพราะ ในการคำนวณครั้งหนึ่งพบว่า หลอดทรานซิสเตอร์ทำงานอย่างผิดพลาดและรวนเร ผู้ที่ต้องการคำตอบจากการคำนวณถามว่า เกิดอะไรขึ้นกับเครื่อง MARK II ผู้ดูแลเครื่องตอบว่ามี “BUG” อยู่ในเครื่อง คือ มีแมลง (BUG) บินเข้าไปอยู่ในระบบวงจรของหลอดทรานซิสเตอร์ ทำให้เกิดปัญหาในการทำงานของเครื่อง และปัญหานี้เกิดขึ้นบ่อยๆ เพราะเครื่องดังกล่าวทำงานใกล้ทะเลซึ่งมักมีตัวแมลงเป็นจำนวนมากที่อาจบิน หลงเข้าไปในตัวเครื่อง MARK II

### สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

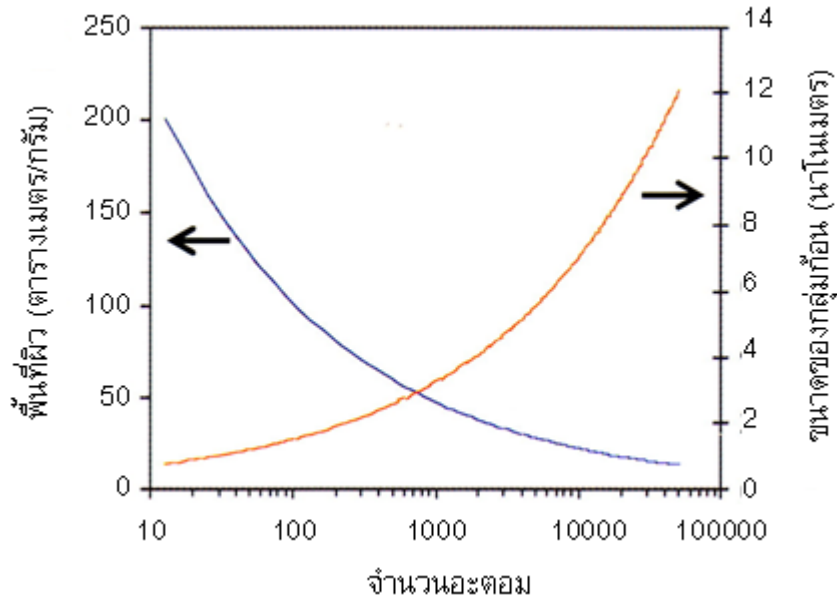
ชั้น 3 อาคารสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย 487 รามคำแหง 39 ถ.รามคำแหง แขวงพลับพลา เขตวังทองหลาง กรุงเทพฯ 10310  
โทรศัพท์ 0-2935-6539 โทรสาร 0-2935-6538 Email : [thaitca@gmail.com](mailto:thaitca@gmail.com) Homepage : <http://www.thaitca.or.th>

### คุณสมบัติที่เปลี่ยนไปของวัสดุที่มีขนาดระดับนาโน

เมื่อวัสดุมีขนาดระดับนาโนจัดว่าเป็นโครงสร้างที่มีระบบมิติต่ำ ทั้งนี้มิติทางกายภาพ (กว้าง ยาว หรือ สูง) อย่างน้อย 1 มิติจะต้องมีขนาดอยู่ในช่วงนาโน คือ 1 ถึง 100 นาโนเมตรเท่านั้น ซึ่งขนาดดังกล่าวมีขนาดใกล้เคียงอะตอม ดังนั้นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในวัสดุย่อมแตกต่างจากวัสดุที่มีขนาดใหญ่ ส่งผลให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าทางแม่เหล็ก หรือการเป็นสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงไป เช่น กลุ่ม ก้อนอะตอมโลหะที่มี 13 อะตอมจะไม่มีคุณสมบัติในการเป็นโลหะแต่เมื่อประกอบกันมากกว่า 309 อะตอมขึ้นไปจึงจะมีคุณสมบัติเป็นโลหะเหมือนโลหะแบบก้อนที่เราพบเห็นโดยทั่วไป

ทองคำที่เรารู้จักกันโดยทั่วไปมีสีเหลืองอร่ามสวยงาม เนื่องจากทองคำดูดกลืนแสงสีน้ำเงินเอาไว้ แต่ ถ้าทองคำมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าความยาวคลื่นแสงที่มากกระทบมากๆ จะดูดกลืนแสงสีเขียวแทนและส่งผลให้อนุภาคนาโนของทองคำมีสีแดงทับทิม (Ruby Red) หรืออนุภาคนาโนของโลหะเงินจะมีสีเหลืองแทนที่จะมีสีเงินดังที่เราคุ้นเคย เป็นต้น

วัสดุที่มีอนุภาคนาโนเมตรจะมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (Surface to Volume) สูงมากเมื่อเทียบกับวัสดุเดียวกันที่มีขนาดใหญ่กว่า เช่น ทองคำ (ยกตัวอย่างนี้อีกแล้ว) ที่มีขนาด 2 นาโนเมตรมีพื้นที่ผิวสูงถึง 150 ตารางเมตรต่อกรัม (เน้นอีกครั้ง 150 ตารางเมตรต่อกรัม) ดังแสดงในรูปที่ 4 หรือพิจารณาวัสดุอื่นที่ใช้ในคอนกรีต เช่น ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยขนาด 10-20 นาโนเมตรพบว่าพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเท่ากับ 10-20 ตารางเมตรต่อกรัม เป็นต้น



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอะตอมกับพื้นที่ผิวของอนุภาคทองคำระดับนาโน [2]

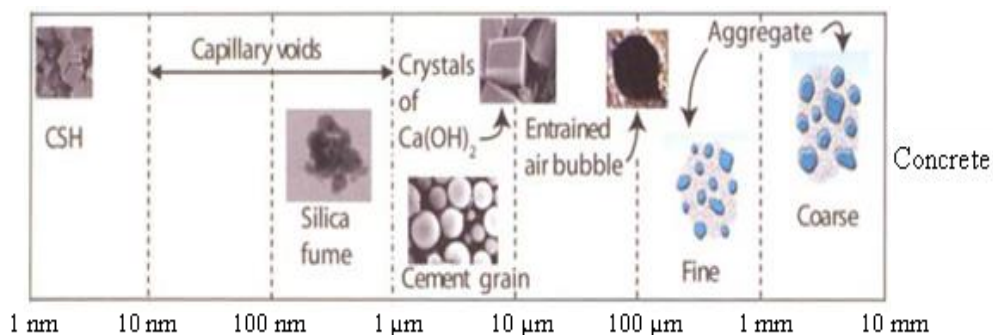
การที่วัสดุมีพื้นที่ผิวสูงมากย่อมทำให้การทำปฏิกิริยาทางเคมีเป็นไปอย่างรวดเร็ว และสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ และเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้งาน เช่น การนำโลหะบางชนิดซึ่งปกติแล้วจะมีผิวชั้นนอกสุดหนาหลายไมโครเมตรมาสังเคราะห์จนถึงระดับนาโนเมตรจะทำให้โครงสร้างของโลหะชนิดนี้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (ทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจน) ทั้งหมด ดังนั้นจึงไม่เหลือสารให้ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันอีกต่อไป ซึ่งเป็นหลักการของการนำวัสดุที่ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันทั้งหมดแล้วมาใช้เคลือบผิวหน้าสิ่งของเครื่องใช้ต่างๆ ให้กลายเป็นอุปกรณ์ที่สามารถทำความสะอาดตัวเองได้

วัสดุประเภทโลหะและเซรามิกที่มีเม็ดขนาดเล็กระดับนาโนเมตร มีความแข็งแรงและแข็งแกร่ง ทนทานต่อการแตกหักสูงกว่าวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดเม็ดในระดับไมโครเมตร อย่างมาก มีคุณสมบัติในการต้านทานกระแสไฟฟ้ามากขึ้น มีความจุความร้อนมาก

ขึ้นและขยายตัวได้ดีขึ้น เช่น ทองแดงที่มีขนาดเม็ดระดับนาโนเมตรจะมีความแข็งกว่าทองแดงปกติถึง 5 เท่าเซรามิก และสารประกอบออกไซด์ของโลหะที่มีโครงสร้างผลึก (ปูนซีเมนต์เมื่อแข็งตัวพบว่ามีอยู่ในรูปหนึ่งของเซรามิก) ระดับนาโนเมตรจะมีความเหนียวมากขึ้นและทนทานต่อการแตกหักได้ดีขึ้นสามารถยืด ตัวหรือเปลี่ยนรูปได้มากขึ้นก่อนที่จะแตกหัก ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวเป็นคุณสมบัติที่ต้องการอย่างยิ่งของเซรามิก

### นาโนเทคโนโลยีกับการพัฒนางานคอนกรีต

ก่อนที่จะเข้าไปถึงการใช้นาโนเทคโนโลยีในงานคอนกรีต มาทำการสำรวจเกี่ยวกับคอนกรีตก่อน รูปที่ 3 แสดงถึงขนาดของวัสดุต่างๆ ที่นำมาทำคอนกรีต เห็นได้ว่าเมื่อทำเป็นคอนกรีตแล้วขนาดของคอนกรีตใหญ่กว่าระดับนาโนเป็นหลายล้านเท่า คอนกรีตส่วนใหญ่มีขนาด กว้างxยาวxสูง มากกว่าเซนติเมตรทุกมิติ และในหลายครั้งที่มีขนาดมากกว่า เมตรหรือหลายร้อยเมตรขึ้นไป เช่น พวกโครงสร้างของเขื่อน เป็นต้น

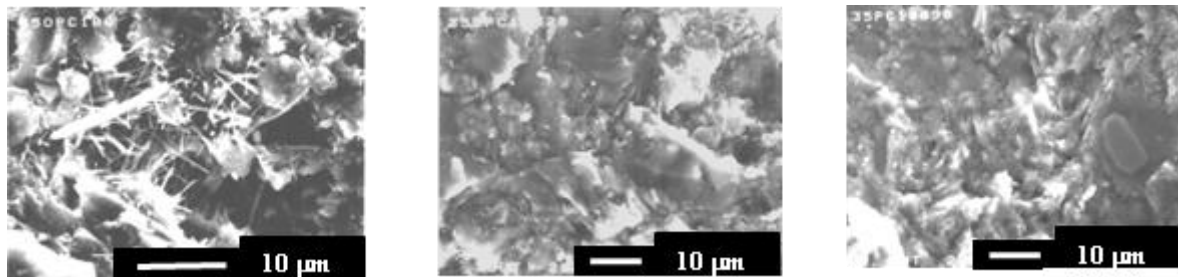


รูปที่ 5 ขนาดของวัสดุที่ประกอบเป็นคอนกรีต [6]

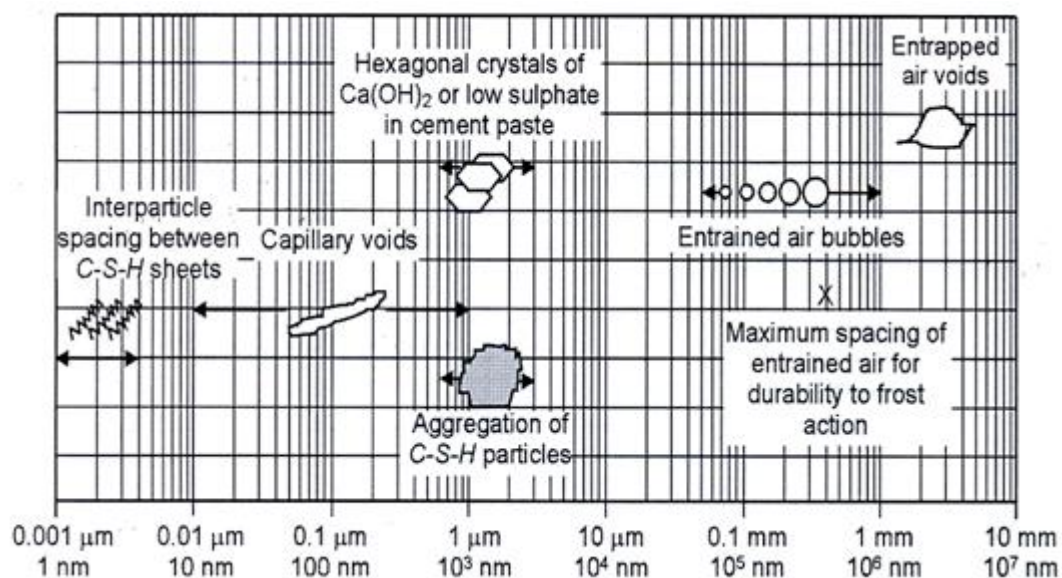
ซี ลิกาฟุมซึ่งถือว่าเล็กมากเพราะใหญ่กว่าเม็ดปูนซีเมนต์ประมาณ 100 เท่ายังไม่สามารถจัดอยู่ในระดับนาโนได้เพราะยังมีขนาดใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร โดยปูนซีเมนต์มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 10-20 ไมโครเมตร (1000 นาโนเมตร เท่ากับ 1 ไมโครเมตร) อย่างไรก็ตาม ช่องว่าง (Voids) และ แคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (CSH) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (ดูรูปที่ 6 แสดงการพัฒนาของโครงสร้างของปฏิกิริยาไฮเดรชันของ



ปูนซีเมนต์) สามารถจัดอยู่ในระดับนาโนเมตรได้ ดังแสดงในรูปที่ 7 โดย ช่องว่างที่กล่าวถึงต้องเป็นช่องว่างที่เล็กกว่า 100 นาโนเมตรขึ้นไป ซึ่งช่องว่างเหล่านี้มีทั้งช่องว่างคาปิลารีและช่องว่างของเจลซึ่งนิยมเรียก อีกชื่อหนึ่งว่าโพรงของเจล (Gel Pores)



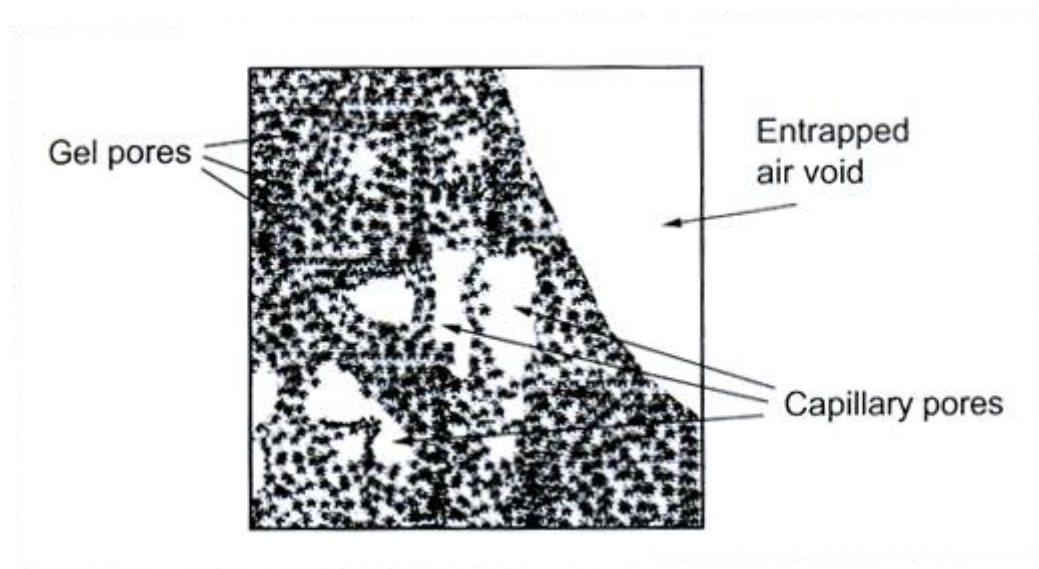
รูปที่ 6 ภาพถ่ายขยายโดย SEM ของซีเมนต์เพสต์ [8]



รูปที่ 7 ขนาดของ ของแข็งและโพรงในซีเมนต์เพสต์ [14]

การจำแนกโพรงแบ่งตามขนาดของโพรง และพฤติกรรมของน้ำในโพรง เหล่านั้น สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ โพรงของเจล และ โพรงคาปิลารี ดังแสดงในรูปที่ 8

โพรง ของเจลที่มีขนาดเล็กกว่า 0.5 นาโนเมตร ถือว่าเป็นโพรงของเจลขนาดเล็กมากและ เป็นโพรงระหว่างแผ่น โดยสภาพของน้ำในโพรงมีแรงยึดเหนี่ยว เมื่อขนาดของโพรงใหญ่ขึ้นโดยอยู่ระหว่าง 0.5 -2.5 นาโนเมตร ถือว่าเป็นโพรงของเจลขนาดเล็กโดยสภาพของน้ำในโพรงอยู่ในสภาพดูดซับที่ผิว และเมื่อขนาดของโพรงเพิ่มเป็น 2.5-100 นาโนเมตร ถือว่าเป็นโพรงของเจลขนาดใหญ่ (หรือโพรงคาปิลารีขนาดเล็ก) โดยสภาพของน้ำในโพรงมีแรงตึงผิวสูง



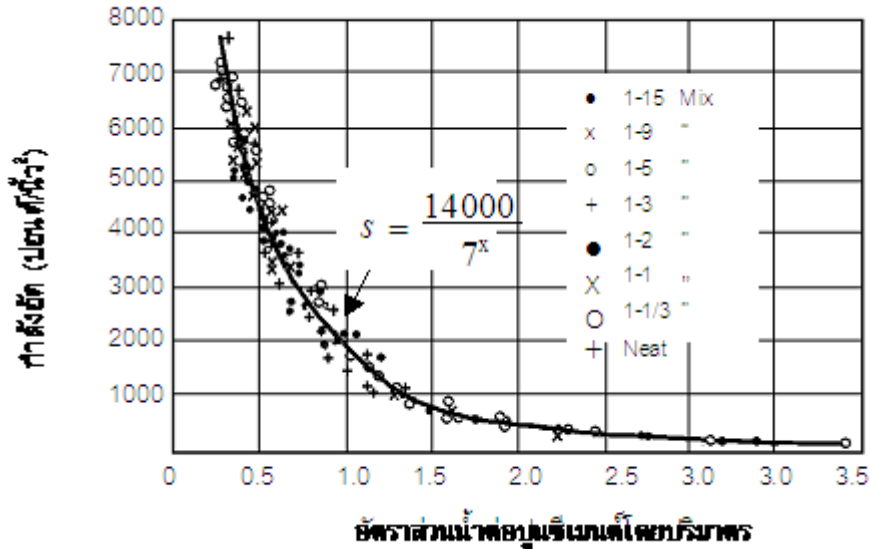
รูปที่ 8 โครงสร้างของโพรง [14]

สำหรับ โพรงคาปิลารีขนาดระหว่าง 100-500 นาโนเมตร ถือว่าเป็นโพรงคาปิลารีขนาดกลางโดยสภาพของน้ำในโพรงมีแรงตึงผิวปานกลาง และเมื่อเป็นโพรงคาปิลารีขนาดใหญ่ (500-10000 นาโนเมตร) พบว่าน้ำในโพรงอยู่ในสภาพอิสระ

โรงแรงที่มีขนาดใหญ่จะทำให้สารละลายหรือน้ำซึมผ่านได้ขณะที่โรงแรงขนาดเล็กหรือโรงแรงของเจลงน้ำจะซึมผ่านไม่ได้ ดังนั้นในงานคอนกรีตจึงต้องให้เนื้อคอนกรีตหรือซีเมนต์เพสต์มีโรงแรงของเจลงมากกว่าที่จะเป็นโรงแรงคาปิลารีขนาดใหญ่ ซึ่งงานวิจัยเกี่ยวกับการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตจะต้องพิจารณาขนาดโรงแรงของเจลงควบคู่ไปกับโรงแรงคาปิลารี

### ปูนซีเมนต์และคอนกรีต

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุหลักที่ใช้ในการทำคอนกรีตและเป็นวัสดุสำคัญที่ใช้ในการก่อสร้างทั่วโลกเนื่องจากการผลิตใช้เทคโนโลยีไม่สูงมาก วัตถุดิบหาได้ง่ายเกือบทั่วโลก และที่สำคัญมีการใช้ปูนซีเมนต์อย่างต่อเนื่องมาได้ประมาณ 200 ปีแล้ว (การผลิตปูนซีเมนต์ที่เป็นต้นแบบปัจจุบันเริ่มในปี พ.ศ. 2356) ดังนั้นคนทั่วไปจึงมีความคุ้นเคยต่อการใช้ปูนซีเมนต์หรือคอนกรีตอย่างมาก และที่สำคัญการพัฒนาปูนซีเมนต์และคอนกรีตในรอบเกือบ 200 ปี ยังไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากนักกล่าวคือ คอนกรีตยังประกอบด้วยปูนซีเมนต์ ทราย หิน และ น้ำ เป็นหลัก โดยอาจมีการเติม ซุปเปอร์พลาสติกไซเซอร์ ใช้วัสดุปอซโซลาน (เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าปาล์ม น้ำมัน เถ้าชานอ้อย หรือซิลิกาฟูม) แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน แต่คอนกรีตเมื่อเกือบ 200 ปีก่อนกับคอนกรีตในปัจจุบันยังคงไม่แตกต่างกันมากนัก กฎของAbrams ซึ่ง เสนอไว้ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2461 ยังคงใช้ได้เช่นเดิม กล่าวคือกำลังอัดของคอนกรีตจะแปรผกผันตามอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (หรือวัสดุประสาน ในกรณีที่ใช้วัสดุปอซโซลานร่วมกับปูนซีเมนต์) ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ [7]

อย่างไรก็ตาม ความคุ้นเคยของการใช้ปูนซีเมนต์หรือคอนกรีตที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน ยังคงห่างไกลกับคำว่า “นาโนเทคโนโลยี” อย่างมาก หากสามารถเข้าใจถึงโครงสร้างอันซับซ้อนของการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ กับน้ำและคุณสมบัติทางกายภาพในระดับนาโนได้ จะทำให้เกิดการพัฒนาเปลี่ยนแปลงคุณภาพของปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้นไปอีกขั้น หนึ่ง ซึ่งจะทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงสูงขึ้น มีความทนทานมากขึ้น มีการยึดตัวได้มากขึ้น และเป็นวัสดุที่นำใช้งานมากขึ้นกว่าในปัจจุบัน (คาดว่าเมื่อปูนซีเมนต์มีโครงสร้างระดับนาโนเมตรจะมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น หรืออาจตรงข้ามก็ได้?) เพราะปัจจุบันคนทั่วไปมองคอนกรีตเป็นวัสดุที่ต้องมีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก และรับแรงได้น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของคอนกรีต

### ผลกระทบของนาโนเทคโนโลยีต่อวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง

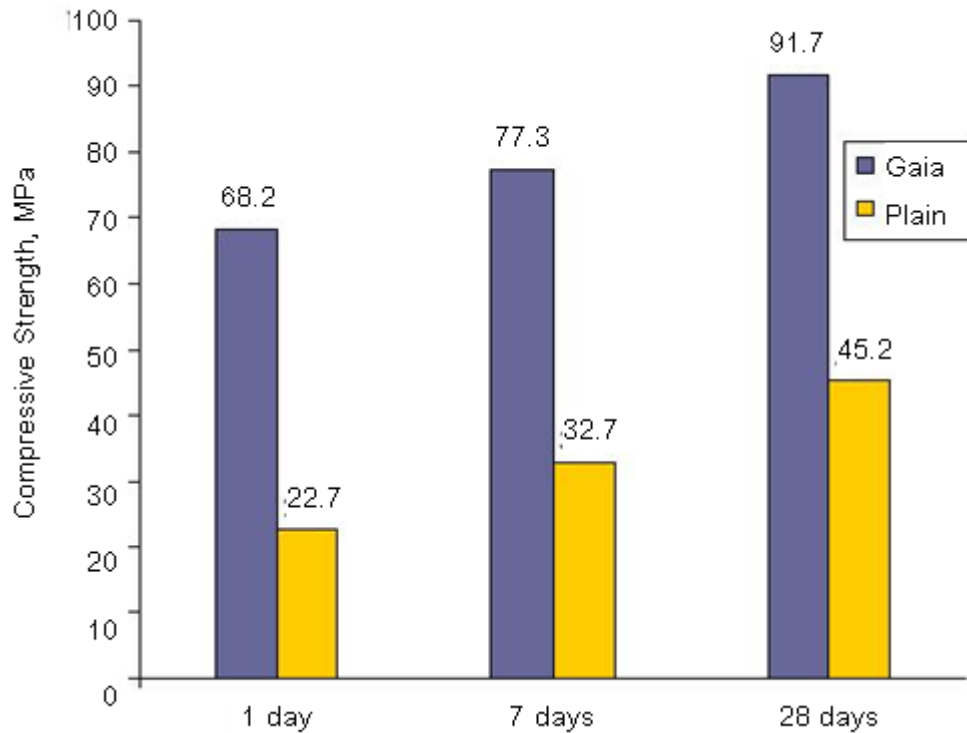
ตัวอย่างแรกที่น่าสนใจที่เกี่ยวกับงานคอนกรีตคือผลิตภัณฑ์ใหม่ของซูเปอร์พลาสติกไฮเซออร์ที่เป็น Polycarboxylic Ether Polymer Based PCE Sky ซึ่ง ออกแบบโดยใช้หลักการของ นาโนเทคโนโลยีเพื่อยืดเวลาของการยุบตัวของคอนกรีตให้นานขึ้น โดยมีวัสดุนาโน

เมตรผสมอยู่ในซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ และเมื่อนำไปผสมร่วมกับคอนกรีตตามปกติจะทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติและคุณภาพ ที่สูงขึ้น ทั้งการรับกำลัง และ ความคงทน เป็นต้น

การ ใส่วัสดุนาโนในซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ทำให้หลักการที่เคยใช้ซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์เพื่อลดปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีตและทำให้คอนกรีตมีกำลังเพิ่มขึ้นโดยอาศัยหลักการลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/C) ต้องเปลี่ยนแปลงไป เพราะนอกจากจะลด W/C แล้ว ยังมีอนุภาคของวัสดุในขนาดนาโนเมตรที่ช่วยอุดช่องว่างและช่วยทำให้การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำมีความสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้มีกำลังเพิ่มขึ้นไปอีกชั้นหนึ่ง

การใช้ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ที่มีอนุภาคนาโนเมตร (ซิลิกอนไดออกไซด์ เป็นออกไซด์หลักที่มีอยู่มากกว่าร้อยละ 90 ในเถ้าแกลบ หรือ ซิลิกาฟูม) เพื่อใช้เป็นส่วนผสมเพิ่มเติม (Additive) เพื่อทำคอนกรีต คุณภาพสูง หรือ คอนกรีตที่ไหลเข้าแบบได้ด้วยตัวเอง ซึ่งการใช้ซิลิกอนไดออกไซด์ขนาดนาโนทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทดีขึ้นและยังเพิ่มกำลังอัดประลัยให้กับคอนกรีตอีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 10

คาร์บอนนาโนทิว (Carbon Nanotubes) เป็นคาร์บอนแผ่น โครงข่ายที่ม้วนตัวเป็นท่อ มีความแข็งแรงกว่าเหล็กถึง 10 เท่า แต่มีน้ำหนักเบากว่ามาก เป็นโครงข่ายคาร์บอนแบบใหม่ที่ค้นพบ (ไส้ดินสอดำ ก็เป็นธาตุคาร์บอนรูปแบบหนึ่ง เช่นเดียวกับ เพชร) เมื่อนำคาร์บอนนาโนทิวไปเป็นส่วนหนึ่งของเส้นใยเหล็ก พบว่าสามารถทำให้เส้นใยเหล็กดังกล่าวมีความแข็งแรงขึ้นกว่าเดิมได้มากกว่า ร้อยละ 50 ซึ่งการที่เส้นใยเหล็กมีความแข็งแรงมากขึ้นเมื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก (Fiber Reinforced Concrete) ย่อมทำให้กำลังรับแรงของคอนกรีตผสมเส้นใยสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งกำลังรับแรงดึง (ซึ่งเป็นจุดอ่อนของคอนกรีตที่รับแรงดึงได้ต่ำ)



รูปที่ 10 การใช้ซูเปอร์พลาสติกไซเซออร์ที่ผสมอนุภาค  $\text{SiO}_2$  ระดับนาโนในคอนกรีต เปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่มีอนุภาค  $\text{SiO}_2$  ระดับนาโน ซึ่งพบว่ากำลังอัดแตกต่างกันประมาณ 1 เท่า [5]

### คอนกรีตที่มีขนาดของวัสดุระดับนาโน

แม้ว่าคอนกรีตไม่มีทางที่จะมีขนาดระดับนาโนเมตร แต่เม็ดปูนซีเมนต์ (ซึ่งมีขนาดเล็ก) ยังเป็นส่วนสำคัญของคอนกรีตอยู่ ดังนั้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจึงเป็นการนำวัสดุนาโนผสมเพิ่มเติมลงไปในคอนกรีต จาก นั้นศึกษาถึงคุณสมบัติของคอนกรีตดังกล่าว เช่น การศึกษาความทนทานต่อการขัดสีของคอนกรีตที่ทำเป็นพื้นถนนที่มีวัสดุนาโนผสม อยู่, การเปรียบเทียบคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้นาโน  $\text{SiO}_2$  และที่ใช้ซิลิกาฟูม, การศึกษาการซึมผ่านน้ำและโครงสร้างของคอนกรีตที่ผสมนาโน  $\text{SiO}_2$  เป็นต้น นอกจากนั้นยังมีการศึกษาถึง

คุณสมบัติของ  $TiO_2$  และ  $Fe_2O_3$  ที่มีอนุภาคระดับนาโน (ออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดคือ  $SiO_2$ ,  $TiO_2$  และ  $Fe_2O_3$  มีอยู่ในปูนซีเมนต์, คูตารางที่ 1 ประกอบ)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [8]

องค์ประกอบเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก
CaO	60-67
$SiO_2$	17-25
$Al_2O_3$	3-8
$Fe_2O_3$	0.5-6.0
MgO	0.1-4.0
$Na_2O$	0.1-1.8
$K_2O$	0.1-1.8
$SO_3$	0.5-3.0
สารประกอบอื่นๆ (รวมทั้ง $TiO_2$ )	0.5-3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On Ignition)	0.1-3.0

ผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดและกำลังดึงของมอร์ต้าร์ที่ผสมอนุภาคนาโนข้างต้นมีค่าเพิ่มขึ้น หรือมีการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตน้อยลง เนื่องจาก

- อนุภาคระดับนาโนมีการกระจายตัวดีขึ้นในส่วนผสม เพิ่มความหนืดของของเหลวในมอร์ต้าร์ (เพราะอนุภาคระดับนาโนเล็กมาก) จึงทำให้เม็ดปูนซีเมนต์ และมวลรวมสามารถลอย

อยู่ในของเหลว (ระหว่างที่เป็นมอร์ตาร์สด) ได้ดีขึ้น จึงลดการแยกตัวของส่วนผสมและทำให้กำลังของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น

- อนุภาคระดับนาโนไปอุดช่องว่างต่างๆระหว่างเม็ดปูนซีเมนต์ และไล่น้ำอิสระในส่วนผสมให้ออกไป จึงทำให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลง กำลังจึงสูงขึ้น

- การกระจายตัวที่ดีและสม่ำเสมอของอนุภาคนาโนจะเป็นแกนในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วและสมบูรณ์มากขึ้น

-  $\text{SiO}_2$  ระดับนาโนจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับ  $\text{Ca(OH)}_2$  ได้อย่างรวดเร็วและสมบูรณ์มากขึ้น เพิ่มปริมาณ CSH ส่งผลให้มอร์ตาร์มีกำลังสูงขึ้น ผลดีที่ตามมาอีกประการหนึ่งก็คือ การที่  $\text{Ca(OH)}_2$  มีปริมาณน้อยลงย่อมเป็นผลดีต่อกอนกรีต เพราะจะทำให้คอนกรีตมีความคงทนต่อสารละลายซัลเฟตหรือกรดต่างๆ ได้ดีขึ้น

- อนุภาคระดับนาโนทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมดีขึ้น จึงทำให้กำลังของมอร์ตาร์ดีขึ้น

- อนุภาค ระดับนาโนช่วยลดหรือป้องกันไม่ให้อายุแตกร้าวขยายตัวขึ้น จึงเพิ่มการรับแรงเฉือนแรงดึง แรงคัด ตลอดจนความแข็งแรงของวัสดุที่ใช้อนุภาคนาโนในส่วนผสม

### งานวิจัยและพัฒนาในอนาคต

คาดหมายกันว่าในอนาคตอันใกล้ จะมีงานวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยี ออกมาเป็นจำนวนมาก ที่เกี่ยวข้องกับงานคอนกรีตได้แก่

- การพัฒนาคาตะลิสต์เพื่อใช้ในการลดอุณหภูมิในการเผาเม็ดปูนซึ่งจะทำให้ราคาของการผลิตปูนซีเมนต์ลดลง หรือทำคาตะลิสต์เพื่อใช้ในการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีต

- พัฒนาเครื่องบดวัสดุที่สามารถบดวัสดุให้มีขนาดอนุภาคเล็กจนถึงระดับต่ำกว่า 100 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังต้องพัฒนาเครื่องวัดขนาดระดับนาโนที่มีความแม่นยำและราคาถูกลงด้วย

- การประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิว หรือใช้อุณหภูมิระดับนาโนในการเพิ่มคุณสมบัติและความทนทานให้แก่คอนกรีต



- การพัฒนาปูนซีเมนต์ที่มีเส้นใยนาโนซึ่งมีความแข็งแรงสูงผสมอยู่ซึ่งจะทำให้ปูน ซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้วมีความแข็งแรงกว่าปูนซีเมนต์ปัจจุบันอย่างมาก
- การพัฒนาซูเปอร์พลาสติกไซเซออร์ที่อาจผสมอนุภาคนาโนชนิดอื่นๆ (นอกจาก SiO<sub>2</sub>) เข้าไป และเพิ่มคุณสมบัติด้านการรับแรงและความทนทานของคอนกรีต
- การพัฒนาปูนซีเมนต์เพื่อใช้ทำคอนกรีตที่ผิวหน้ามีความสวยงามโดยไม่ต้องฉาบ, ไม้ฉิ้นรา หรือน้ำไม่ซึมผ่าน เมื่อน้ำหรือสารละลายต่างๆ ไม่ซึมผ่านคอนกรีตย่อมทำให้เหล็กที่เสริมในคอนกรีตไม่เป็นสนิม ส่งผลให้อายุการใช้งานของคอนกรีตยาวนานขึ้น
- วัสดุที่ใช้ก่อสร้างอาคารบ้านเรือนไม่นำไฟฟ้า, เบาล, ไม่นำความร้อน, ไม่ติดไฟ หรือทนต่ออุณหภูมิสูงๆ ได้นาน
- วัสดุที่เป็นฟิล์มบางๆ เพื่อใช้เคลือบผิวหน้าเหล็กเสริมในการป้องกันไม่ให้เหล็กเป็นสนิม ซึ่งหมายความว่าคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับน้ำทะเลก็จะไม่มีปัญหาของการเกิดสนิมเหล็ก เนื่องจากน้ำทะเลอีกต่อไป
- การพัฒนาปูนซีเมนต์ซึ่งมีเม็ดปูนซีเมนต์บางส่วน (ในจำนวนที่พอเหมาะ) ที่มีอนุภาคอยู่ระดับนาโนเมตร เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวอุดช่องว่างหรือโพรงต่างๆ ในซีเมนต์เพสต์ และเพิ่มกำลังให้กับปูนซีเมนต์
- การพัฒนาปูนซีเมนต์ที่สามารถรับแรงดึงได้สูงกว่าร้อยละ 10 ของกำลังอัด ซึ่งอาจมีกำลังรับแรงดึงเท่ากับกำลังรับแรงอัด ซึ่งหากทำได้ก็ไม่จำเป็นต้องเสริมเหล็กอีกต่อไป

หัวข้องานวิจัยหรือพัฒนาเหล่านี้เป็นเพียงตัวอย่างที่ยกมาเท่านั้น (บางเรื่องอาจทำไม่ได้จริง หรือทำได้แต่อาจไม่คุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์) แต่เชื่อว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีทางด้านนี้เกิดขึ้นแน่นอน สำหรับในประเทศไทยนั้นคาดว่าจะใช้เวลาานกว่าประเทศในแถบยุโรปและอเมริกา จีน ไต้หวัน หรือญี่ปุ่นมาก เพราะดูเรื่องงบประมาณและบุคลากรที่ใช้เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีนาโนแล้ว ยังห่างไกลกว่าประเทศที่กล่าวมาค่อนข้างมาก

นอกจากนี้ในการพบปะกับเพื่อนอาจารย์ด้วยกันหรืออาจารย์ในมหาวิทยาลัยอื่นๆ หลายคนเชื่อว่างานวิจัยด้านคอนกรีต “เกือบ จะไม่มีอะไรให้ทำแล้ว เพราะรู้กันหมดแล้ว งานที่ทำก็ซ้ำๆ กัน ไม่สามารถตีพิมพ์ผลงานในระดับนานาชาติได้เพราะจะซ้ำกับที่ฝรั่งได้ทำมาตั้ง

นานแล้ว” โดยส่วนตัวแล้วผมไม่เห็นด้วยอย่างยิ่ง เพราะผมเห็นอาจารย์ไทยหลายๆ ท่านยังสามารถผลิตผลงานด้านคอนกรีตออกไปได้เป็นจำนวนมากและอยู่ในระดับนานาชาติด้วยซ้ำ ยิ่งงานวิจัย ระดับนาโนด้วยแล้ว ผมเชื่อว่ายังมีงานวิจัยที่รอการค้นพบอีกมาก แต่ของเราจะทำได้ยากกว่าเพราะขาดเครื่องมือที่ทันสมัยค่อนข้างมาก

### บทส่งท้าย

เทคโนโลยีทางด้านนาโน แม้ว่าเริ่มขึ้นจากสาขาฟิสิกส์แต่ได้แพร่ขยายไปสู่สาขาอื่นๆ อย่างรวดเร็ว ไม่ว่าจะเป็นด้านแพทย เกษตร อาหาร คอมพิวเตอร์ วิศวกรรมศาสตร์ และสาขาต่างๆ อีกมาก ไม่เว้นในสาขาปูนซีเมนต์และคอนกรีต

สำหรับนาโนเทคโนโลยีในงานปูนซีเมนต์และคอนกรีต กล่าวได้ว่าเพิ่งเริ่มต้นไม่นาน และ “There is *Plenty* of Room at the Bottom” เช่นเดียวกับสาขาอื่น ในอนาคตเราอาจเห็นปูนซีเมนต์ที่มีคุณภาพสูงมาก ซึ่งอาจสูงจนมีกำลังไม่แพ้เหล็ก แต่มีน้ำหนักเบากว่าเดิมหรือเบากว่าปัจจุบัน และสามารถก่อสร้างสะพานได้ยาวมากขึ้น ก่อสร้างตึกได้สูงมากขึ้น โดยไม่มีข้อจำกัดเนื่องจากน้ำหนักของตัวเอง (คอนกรีตมีน้ำหนักประมาณ 2400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แต่การรับน้ำหนักต่ำ) ดังนั้นการออกแบบอาคารสูงหรือสะพานที่มีช่วงยาวมากๆ จึงมักถูกจำกัดด้วยน้ำหนักของคอนกรีตเป็นหลัก

หากการพัฒนาเทคโนโลยีของงานคอนกรีตเป็นไปในทิศทางที่คาดไว้ เราอาจเห็นสะพานข้ามแม่น้ำเจ้าพระยาทำด้วยคอนกรีตที่มีความหนาเพียงครึ่งหนึ่ง ของที่ทำในปัจจุบัน หรือเห็นอาคารคอนกรีตที่สร้างเสร็จบางเหมือนกระดาษ และที่สำคัญไม่ต้องทาสีเลย แต่ยังคงความใหม่ตลอดเวลาเนื่องจากฝุ่นหรือสิ่งสกปรกไม่สามารถเกาะผิวหน้าคอนกรีตนาโนได้ เป็นต้น

เอกสารอ้างอิงซึ่งใช้ประกอบในการเรียบเรียงบทความนี้ ผู้สนใจสามารถหาอ่านเพิ่มเติมได้ มีดังต่อไปนี้:

1. <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html> ซึ่งเป็นการบรรยายเรื่อง “There is Plenty of Room at the Bottom: An Invitation to Enter a New Field of Physics”
2. ญัฐพันธุ์ ศุภกา “ไขปริศนา ... นาโนเทคโนโลยี” วิศวกรรมสาร ปีที่ 50 ฉบับที่ 3 เดือน พ.ค.-มิ.ย. 2549 หน้า 52-59
3. ญัฐพันธุ์ ศุภกา “มาตรฐานสากลทางด้านนาโนเทคโนโลยี” วิศวกรรมสาร ปีที่ 50 ฉบับที่ 3 เดือน พ.ค.-มิ.ย. 2549 หน้า 22-27
4. กองบรรณาธิการ “สัมภาษณ์พิเศษ ศ. ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล ผู้อำนวยการศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ” วิศวกรรมสาร ปีที่ 50 ฉบับที่ 3 เดือน พ.ค.-มิ.ย. 2549 หน้า 48- 50
5. Konstantin Sobolev and Miguel Ferrada-Gutierrez “Nanotechnology of Concrete”  
<http://nano-cement.50webs.com/>
6. Mohamed Saafi and Peter Romine “Nano-and Microtechnology, Wireless devices in concrete for monitoring quality and durability” Concrete International, Dec. 2005 pp. 28-34
7. Abrams, D. A., Design of Concrete Mixtures, Bulletin 1, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago, Revised Edition, 1918.

8. ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล “ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และ คอนกรีต” สมาคมคอนกรีตไทย, พิมพ์ครั้งที่ 1 ตุลาคม 2547, 346 หน้า
9. Hui Li, Hui-gang Xiao, Jie Yuan, and Jinping Ou “Microstructure of Cement Mortar with Nano-Particles” Composites, Part B: Engineering, Vol. 35, 2004, pp. 185-189.
10. Hui Li, Mao-hua Zhang, and Jinping Ou “Abrasion Resistance of Concrete Containing Nano-Particles for Pavement” Wear, Vol. 260, Issues 11-12, 2006, pp. 1262-1266.
11. Ye Qing, Zhang Zenan, Kong Deyu, and Chen Rongshen “Influence of Nano-SiO<sub>2</sub> Addition on Properties of Hardened Cement Paste as Compared with Silica Fume” Construction and Materials, In Press, Corrected Proof, Available online 24 October 2005.
12. Tao Ji “Preliminary Study on the Water Permeability and Microstructure of Concrete Incorporating Nano-SiO<sub>2</sub>” Cement and Concrete Research, Vol. 35, Issue 10, 2005, pp. 1943-1947.
13. Lecture Note from Dr. Antonio Porro “Nanoscience and Nanotechnology in Construction Materials, the 2nd Symposium on Nanotechnology in Construction Materials.
14. Richardson M.G. “Fundamentals of Durable Reinforced Concrete, Spon Press, London and New York, 2002.