

Thailand 4.0 : อุตสาหกรรม Ultra High Performance Concrete (UHPC)

Thailand 4.0 : Industry of Ultra High Performance Concrete (UHPC)

นันทวัฒน์ ขมหวาน<sup>1</sup> และ นิมิตร เจริญรัตน์พิพัฒน์<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน  
จ.นครปฐม

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสนมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต  
กำแพงแสน จ.นครปฐม

### 1. บทนำ

คอนกรีตกำลังสูงมีแนวความคิดและการนำมาใช้ในงานก่อสร้างทางหลวงและในโครงสร้างสะพานที่มีช่วงความยาวมากในสหรัฐอเมริกาตั้งแต่ปี ค.ศ.1965 ซึ่งเป็นการเกิดขึ้นของคอนกรีตสมรรถนะสูง (High Performance Concrete) อย่างเป็นทางการโดย American Concrete Institute (ACI) และหนึ่งในชนิดของคอนกรีตสมรรถนะสูงคือ Reactive Powder Concrete (RPC)

RPC เป็นการรวมกันของวัสดุที่มีอนุภาคเล็กๆ ที่ไม่เหมือนคอนกรีตดั้งเดิม คือ วัสดุที่มีซีเมนต์เป็นตัวประสานมวลรวมขนาดเล็กต่างๆ โดยใช้การก่อผลึกโครงสร้างระดับจุลภาคของคอนกรีตร่วมกับปฏิกิริยาเคมีของปูนซีเมนต์ โดยคอนกรีตนั้นเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่ใช้มวลรวมหยาบ การอัดแน่นส่วนผสมที่แน่นที่สุด การก่อสร้างผลิตภัณฑ์จุลภาคเพื่อความทนทานในระยะยาว และการเพิ่มประสิทธิภาพความเหนียวโดยการผสมเส้นใยเหล็กขนาดเล็ก

การคิดค้นวิจัยงานของ RPC นั้นเริ่มต้นจาก HDR Engineering Inc ผู้ก่อตั้งบริษัท Bouygues โดยเริ่มทำการศึกษาดังแต่ปี ค.ศ.1990 โดยได้ส่วนผสมเริ่มต้นในสัดส่วนของการพัฒนา RPC จาก Richard และ Cheyrezy (1995) ผลที่ได้ทำให้ RPC มีกำลังอัดระหว่าง 1,700 ถึง 6,800 กก.ต่อ ตร.ซม. กำลังดัดอยู่ระหว่าง 300 ถึง 600 กก.ต่อ ตร.ซม. ส่วนสำหรับ RPC ที่ใส่เส้นใยเหล็กเป็นส่วนผสมมีกำลังอัดสูงถึง 6,500 ถึง 8,100 กก.ต่อ ตร.ซม. และกำลังดัดสูงถึง 450 ถึง 1,410 กก.ต่อ ตร.ซม.

ในปัจจุบัน มีการพัฒนาของ RPC และ UHPC ตามวัตถุประสงค์ต่างๆ เพื่องานก่อสร้างที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น การวิจัยที่พัฒนาคุณภาพในหลายๆ ด้าน เพื่อลดต้นทุน ความยุ่งยากของขบวนการผลิต และใช้วัสดุเส้นใยเหล็กที่หาได้ง่ายและราคาถูก แต่เนื่องจาก RPC และ UHPC มีต้นทุนการผลิตที่สูงมากเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป ความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์จึงส่งผลให้ RPC และ UHPC ถูกใช้ในโครงสร้างที่อยู่เหนือข้อจำกัดดั้งเดิมที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน

นอกจากนั้นโครงสร้างที่ก่อสร้างจริงในประเทศไทยนั้นจาก RPC และ UHPC หรืองานโครงสร้างสะพานยังไม่มีการศึกษาวิจัยมาก่อน ด้วยการประยุกต์ใช้จริงเป็นแนวทางของงานควบคุมการผลิตและการก่อสร้างแนวใหม่ การนำวัสดุใหม่มาใช้ไม่เพียงแต่เพื่อตอบสนองเทคโนโลยีใหม่ที่ทันสมัยเท่านั้น การศึกษากระบวนการทั้งหมดนำไปสู่ความสำเร็จของงานคอนกรีตของอุตสาหกรรมก่อสร้างของประเทศในอนาคต

ดังนั้นการศึกษาคอนกรีตสมรรถนะสูงเป็นสิ่งจำเป็นกับแนวทางก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตและคอนกรีตอัดแรงเพื่องานขนาดใหญ่ในประเทศต่อไป

## 2. กรอบแนวคิด

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานทางด้านโครงสร้างด้วยคุณสมบัติและกลสมบัติที่ดีหลายๆ อย่าง โดยคอนกรีตเป็นวัสดุที่ผสมจากมวลรวมที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน การขึ้นรูปของคอนกรีตสามารถทำได้ง่ายตามต้องการ การก่อสร้างในปัจจุบันจึงใช้โครงสร้างคอนกรีตเป็นหลัก

การพัฒนาของคอนกรีตมีอย่างต่อเนื่องทั้งทางด้านทางกล เคมี และคุณสมบัติด้านอื่นๆ ตามวัตถุประสงค์ในการใช้งานประเภทนั้นๆ อีกทั้งการพัฒนากำลัง และความคงทนให้สูงขึ้น เพื่อช่วยลดขนาดและน้ำหนักของโครงสร้างคอนกรีต ซึ่งสอดคล้องกับสถานการณ์ปัจจุบันที่มีอาคารสูงและโครงสร้างสาธารณูปโภคขนาดใหญ่

คอนกรีตสมรรถนะสูง หรือ Ultra High Performance Concrete (UHPC) เป็นนวัตกรรมที่ได้ทำให้วงการอุตสาหกรรมคอนกรีตได้ยอมรับมานานในช่วงเวลา 20 ปีที่ผ่านมา ด้วยคุณสมบัติและกลสมบัติที่ดีเยี่ยมในการใช้งานและง่ายต่อการก่อสร้างมากขึ้น การใช้งาน UHPC นั้นได้เริ่มตั้งแต่ ปี ค.ศ.1997 ซึ่งเพื่อให้อสอดคล้องกับงานทางสถาปัตยกรรมและวิศวกรรมในการใช้เทคโนโลยีคอนกรีตที่ล้ำสมัย หลังจากนั้นการใช้งานของ UHPC มีความแพร่หลายมากขึ้นทั้งใน ทวีปอเมริกา ยุโรป และออสเตรเลีย ยิ่งไปกว่านั้นการพัฒนา UHPC ได้ถูกนำมาใช้ในประเทศเพื่อนบ้านอย่างมาเลเซีย ซึ่งมีการใช้งานนวัตกรรมคอนกรีตในอาคารสูงปีโตรนัสมาก่อน

ในประเทศไทยมีการวิจัยด้าน UHPC ในห้องปฏิบัติการทางด้านวิศวกรรมมานาน และการใช้งานจากเส้นใยเหล็กในคอนกรีตได้นำมาสู่อุตสาหกรรมของพื้นโรงงานอุตสาหกรรม ด้วยการรับน้ำหนักที่ดีขึ้นและการก่อสร้างที่ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้งานดังกล่าวยังไม่สามารถแพร่หลายในงานทางด้านวิศวกรรมโครงสร้างขนาดใหญ่ได้ การใช้งาน UHPC ในไทยที่กล่าวมาข้างต้นนั้นอาจยังไม่ได้ใช้ประสิทธิภาพของ UHPC เต็มที่ จึงทำให้ไม่เป็นที่แพร่หลายในประเทศเท่าที่ควร การใช้งาน UHPC จึงจำเป็นต้องใช้กับโครงสร้างที่มีลักษณะพิเศษในการรับน้ำหนัก เช่น คอนกรีตอัดแรง เป็นต้น เพื่อนำเทคโนโลยีการรับน้ำหนักของลวดอัดแรงและคอนกรีตกำลังสูงมาใช้ร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพ

### 3.การศึกษาพฤติกรรมของ UHPC ในห้องปฏิบัติการ

การพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ ทำให้คอนกรีตสมรรถนะสูงมาก (Ultra High Performance Concrete, UHPC) และคอนกรีตเสริมเส้นใยสมรรถนะสูงมาก (Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete, UHPFRC) ได้รับความสนใจมากขึ้น ทั้งในด้านการประยุกต์ใช้ในโครงสร้างใหม่และในงานซ่อมแซม

Richard และ Cheyrezy (1995) ได้รายงานผลการพัฒนา RPC โดยส่วนผสมที่ใช้ต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 1,000 กิโลกรัม ทรายละเอียดและควอทซ์บด 900-1,000 กิโลกรัม ซิลิกาฟุ่ม 230 กิโลกรัม น้ำ 150-180 กิโลกรัม และเส้นใยเหล็กละเอียด 630 กิโลกรัม ร่วมกับน้ำยาลดน้ำอย่างยั้งยวด ตัวอย่างถูกอัดให้แน่นด้วยวิธีทางกลและบ่มที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงถึง 6,800 กก.ต่อ ตร.ซม. และกำลังต้านทานแรงดึงสูงถึง 1,000 กก.ต่อ ตร.ซม. และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น  $7.5 \times 10^5$  กก.ต่อ ตร.ซม.

Colleparidi และคณะ (1996) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของประเภทของปูนซีเมนต์และซิลิกาฟุ่มที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของ RPC โดยทดลองกับปูนซีเมนต์ 3 ชนิดที่มีค่า  $C_3A$  และ Blaine Fineness ต่างๆ กัน และซิลิกาฟุ่ม 3 ชนิดที่มีสีและองค์ประกอบทางเคมีต่างกัน พบว่าปูนซีเมนต์ที่ให้ผลดีกับกำลังรับแรงอัดคือ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่มี  $C_3A$  ต่ำและมีค่า Blaine Fineness 340 ตร.ม.ต่อ กก. และซิลิกาฟุ่มที่ให้ผลดีกับกำลังรับแรงอัดคือ ซิลิกาฟุ่มสีขาวที่ไม่มีคาร์บอนและมีขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ยที่ 0.7 ไมครอน สามารถพัฒนา กำลังอัดของ RPC ได้ถึง 2,000 กก.ต่อ ตร.ซม. โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.18 และบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และผลเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ที่มี  $C_3A$  ระหว่าง ร้อยละ 45 ถึง 11 พบว่าทำให้อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงเหลือ 1,600 กก.ต่อ ตร.ซม. โดยใช้วิธีการบ่มเช่นเดิม

Zenni, H และคณะ (1995) ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาไฮเดรชันของ RPC และปฏิกิริยาปอซโซลานด้วยวิธี SI NMR ที่มีส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ซิลิกาฟุ่ม และควอทซ์บด โดยตัวอย่างมีการผ่านกระบวนการทางความร้อนระหว่างอุณหภูมิ 20-25 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาอิทธิพลของปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลาน จากผลการศึกษาพบว่าปริมาณการใช้ซิลิกาฟุ่มในปฏิกิริยาปอซโซลานและความยาวของสายแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) มีค่าเพิ่มขึ้นตามขบวนการทางความร้อนที่เพิ่มขึ้น

Colleparidi และคณะ (1997) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของสารลดน้ำยั้งยวดที่มีต่อสมรรถนะของ RPC พบว่าสารลดน้ำยั้งยวดที่เป็นส่วนประกอบของอคริลิกโพลีเมอร์ให้สมรรถนะที่ดีกว่าสารลดน้ำยั้งยวดที่มีส่วนประกอบของแนฟธาซีนและเมลามีนโดยให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ต่ำกว่าและค่ากำลังรับแรงอัดที่คอนกรีตอายุ 3 วันสูงกว่า โดยที่อายุ 1 วัน RPC ที่ใช้อคริลิกโพลีเมอร์จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามากเมื่อใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ที่มี  $C_3A$  ต่ำและมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำ ทั้งนี้เกิดจากผลของการหน่วงอย่างแรงเมื่อใช้ปูนซีเมนต์

ประเภทนี้ร่วมกับซิลิกาฟุ่มบางประเภท เมื่อใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ประเภทอื่นแล้ว ไม่ปรากฏผลของการหน่วงของสารลดน้ำประเภทอาคริลิกนี้ทำให้กำลังอัดที่อายุ 1 วันมีค่าค่อนข้างสูงและที่อายุ 28 วันเมื่อบ่มที่อุณหภูมิห้องค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่ามากขึ้นอยู่กับประเภทของปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟุ่ม และสารลดน้ำยิ่งยวด อย่างไรก็ตามผลการศึกษาที่ได้ให้ค่ากำลังอัดอยู่ระหว่าง 1,600-1,800 กก.ต่อ ตร.ซม. ซึ่งต่ำกว่าที่ผู้คิดค้นได้รายงานไว้ซึ่งมีกำลังอัดอยู่ระหว่าง 1,700-2,300 กก.ต่อ ตร.ซม.

Colleparidi และคณะ (2000) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการดัดแปลง RPC ด้วยมวลรวมเทียมที่ทำจากปูนซีเมนต์เม็ดบดหยาบที่มีขนาด 100-400 ไมครอน ซึ่งใช้แทนทรายและที่มีขนาด 0.1-8 มม. เปรียบเทียบกับ RPC ตามสูตรดั้งเดิมที่ใช้ทรายและหินตามขนาดข้างต้น โดยใช้แหล่งปูนซีเมนต์เม็ดบดหยาบแหล่งเดียวกับที่ผลิตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ใช้ในการผสมซึ่งแนวความคิดนี้เกิดขึ้นเพื่อที่จะปรับปรุงกำลังการยึดเกาะของซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมโดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ผิวของปูนเม็ด และบ่มตัวอย่างทั้งหมดที่ 1) อุณหภูมิห้อง 2) บ่มด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส 3) บ่มด้วยไอน้ำแรงดันสูงที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และทดสอบกำลังรับแรงอัดตามอายุจาก 1 วันถึง 28 วัน ผลการทดสอบพบว่าสามารถพัฒนากำลังอัดที่ 28 วันได้สูงถึง 2,000 กก.ต่อ ตร.ซม. ซึ่งจะเห็นได้ว่าการอัดเหนียวระหว่างปูนซีเมนต์กับมวลรวมได้รับการปรับปรุงเมื่อใช้ปูนซีเมนต์เม็ดบดหยาบแทนมวลรวมที่ได้จากธรรมชาติ จากการสังเกตด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าสอดคล้องกับสมมุติฐานที่ตั้งขึ้นและบ่งชี้ว่าผิวสัมผัสระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมธรรมชาติเป็นจุดที่อ่อนแอใน RPC

Jian Xinma และ Holger Schneider (2002) ได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของ UHPC ซึ่งเป็นคอนกรีตที่มีสัดส่วนผสมใกล้เคียงกับ RPC แต่ไม่มีการใช้เส้นใยเสริมกำลังในคอนกรีตเท่านั้น โดยได้ดัดแปลง UHPC สูตรดั้งเดิมด้วยการใช้ผงควอทซ์ละเอียดแทนปูนซีเมนต์และซิลิกาฟุ่ม พบว่าสามารถผลิต UHPC ที่ไหลตัวได้ที่กำลังอัด 1,550 กก.ต่อ ตร.ซม. โดยไม่จำเป็นต้องใช้วิธีการบ่มด้วยความร้อนหรือวิธีการพิเศษอื่น และสามารถผลิต UHPC ที่มีกำลังอัดสูงถึง 2,000 กก.ต่อ ตร.ซม. เมื่อสามารถควบคุมปริมาณฟองอากาศภายในคอนกรีตไว้ไม่ให้เกินร้อยละ 1 และพบว่า UHPC เกิดการหดตัวแบบออโตเจเนียส (Autogeneous) มากกว่าคอนกรีตปกติที่อายุ 28 วัน

Yazici, H. (2006) ได้ทำการศึกษาถึงการบ่ม Ultra High Strength Concrete (UHSC) ที่ใช้เกลือลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กแทนที่ในส่วนของปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนต่างๆ โดยนำแต่ละส่วนผสมผ่านกระบวนการบ่มด้วยวิธีมาตรฐาน การบ่มด้วยวิธีไอน้ำแรงดันสูงและบ่มด้วยไอน้ำในระยะเวลาที่ต่างกัน จากการศึกษาพบว่า UHSC ที่มีส่วนผสมของเกลือลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 ผ่านการบ่มด้วยไอน้ำ ระยะเวลา 12 วัน ให้กำลังอัดประมาณ 1630 กก.ต่อ ตร.ซม. ส่วนตะกรันเตาถลุงแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 ผ่านการบ่มด้วยไอน้ำแรงดันสูง 8 ชั่วโมงให้กำลังอัดประมาณ 1937 กก.ต่อ ตร.ซม. ซึ่งค่าดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับค่าต่ำสุดของ RPC

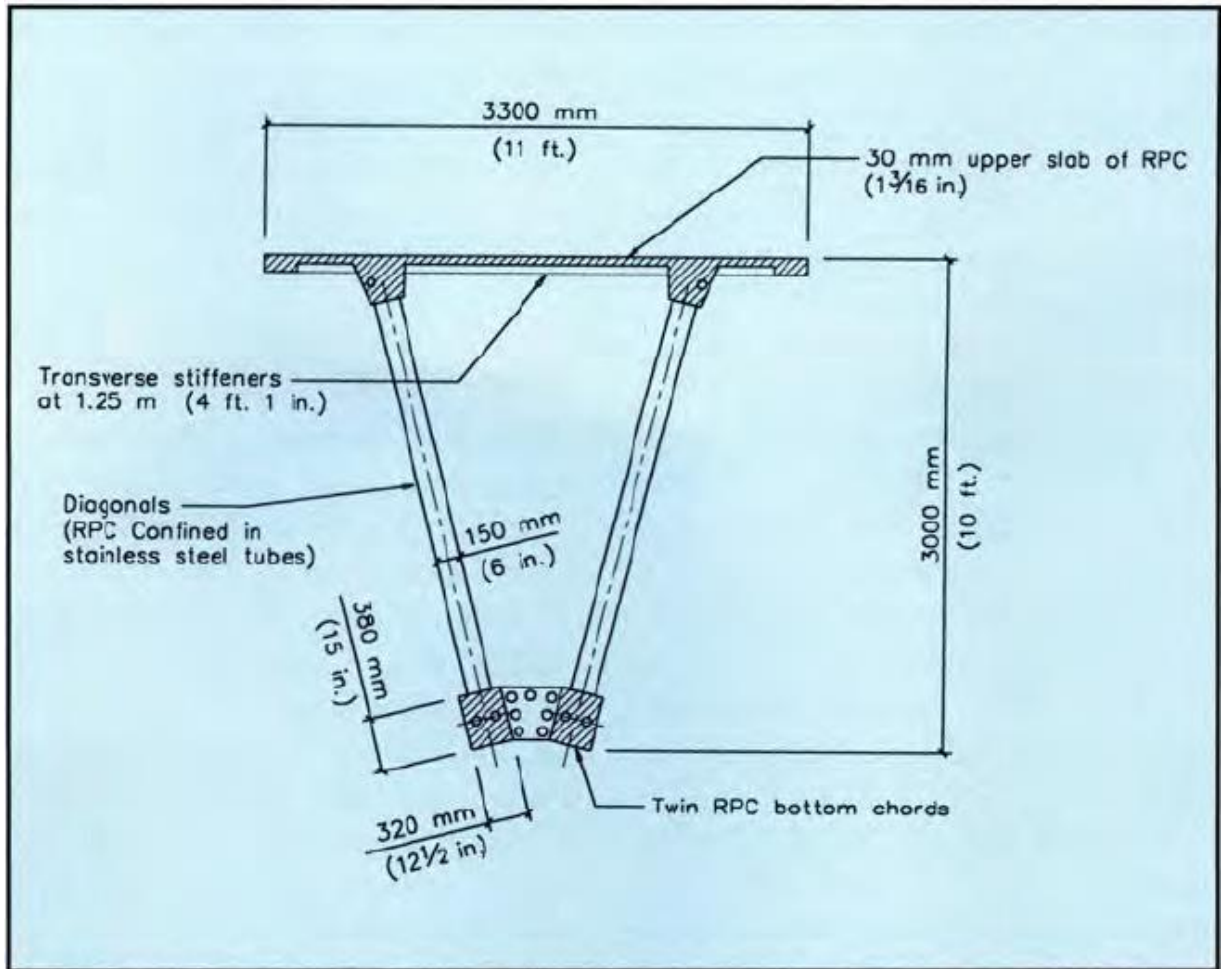
Adel A, A. และคณะ (2011) ได้ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมของ UHPC ที่ผสมเส้นใยเหล็ก โดยทำการทดลองและเปรียบเทียบพฤติกรรมด้วยวิธี Finite Element จากโปรแกรม ANSYS ในการทดลองได้แปรผันชนิดของสารปอซโซลาน 2 ชนิด คือซิลิกาฟูมกำหนดที่ร้อยละ 10 และดินขาวร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก และกำหนดปริมาณสัดส่วนของเส้นใยเหล็กที่ร้อยละ 1, 1.5, และ 2 ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มขึ้นของเส้นใยเหล็กจะทำให้กำลังอัดสูงขึ้น จากการทดลองได้กำลังอัดสูงสุดที่ 2019 กก.ต่อ ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน

Shamsad A. และคณะ (2015) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปัจจัยหลักกับสมรรถนะของ RPC โดยการคัดสัดส่วนคละของทรายที่เหมาะสมที่สุดในการผสม RPC กำหนดให้ปริมาณทรายและเส้นใยเหล็กคงที่ ส่วนผสมทั้งหมด 27 ส่วนผสมนำมาจัดอันดับแยกเป็น 3 ส่วนคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุปอซโซลาน (w/b) ปริมาณปูนซีเมนต์ และปริมาณของซิลิกาฟูม และนำข้อมูลทั้งหมดวิเคราะห์ทางสถิติ ผลการทดลองพบว่าการใช้ทรายตามธรรมชาติที่มีอยู่ในประเทศซาอุดีอาระเบียนั้นได้ผลการทดลองในภาพรวมที่ดีกว่าการนำทรายมาจัดสัดส่วนคละ และปริมาณของสารลดน้ำมีผลอย่างมากกับอัตราส่วน w/b โดยมีปริมาณการใช้ร้อยละ 3.6, 1.5-2 และ 1-1.5 ที่อัตราส่วน w/b 0.15, 0.175, 0.2 ตามลำดับ จากข้อมูลทั้งหมดค่ากำลังอัดประลัย โมดูลัสการแตกหัก และโมดูลัสความยืดหยุ่น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักคือ w/b และเมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ ค่ากำลังอัดประลัยจะเพิ่มขึ้นในขณะที่โมดูลัสการแตกหักและโมดูลัสความยืดหยุ่นลดลง แนวโน้มสมการการถดถอยทำให้เห็นได้ว่า ที่กำลังอัดประลัยเท่ากัน ค่าโมดูลัสการแตกหักของ RPC มีค่ามากกว่า 3 เท่าเทียบกับคอนกรีตปกติ และมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมากกว่าคอนกรีตกำลังสูงประมาณร้อยละ 20

#### 4.การใช้งาน UHPC สำหรับโครงสร้างสะพาน

จากรูปที่ 1 Sherbrooke (1997) เป็นสะพานแรกของโลกที่ใช้ UHPC ในการก่อสร้างที่ Sherbrooke Canada สะพานนั้นมีความยาว 60 ม. สำหรับคนเดินข้าม/ทางจักรยาน ประกอบด้วยชิ้นส่วนสำเร็จรูป 6 ชิ้น โดยแต่ละชิ้นมีความยาวชิ้นละ 10 m. ลักษณะของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นจะประกอบกันเป็นโครงถัก และรูปแบบแผ่นพื้นอยู่ด้านบนโครงถัก การใช้ UHPC ร่วมกับท่อสแตนเลส โดยเท UHPC ในท่อ ใช้เป็นชิ้นส่วนในแนวทแยงและชิ้นส่วนแนวด้านล่างของโครงถักประกอบด้วยคานคอนกรีตอัดแรงซึ่งเป็นคานต่อเนื่อง 2 ชิ้น ประกอบกัน โดยชิ้นส่วนบนและล่างมีกำลังอัดสูงถึง 2039 กก.ต่อ ตร.ซม.





รูปที่ 1 สะพานใน Sherbrooke (a) ภาพโดยรวมของสะพาน และ (b) หน้าตัดของสะพาน



รูปที่ 2 การประกอบสะพานใน Sherbrooke

## 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>

Shepherds Creek Road Bridge (2005) (รูปที่ 2) เริ่มต้นจากการทำวิจัยที่ University of New South Wales ในปี 2003 เป็นสะพาน ที่สร้างขึ้นในประเทศออสเตรเลีย สำหรับทางรถยนต์ ซึ่งประกอบด้วย 4 ช่องจราจรและทางเดินเท้า โดยกำหนดการออกแบบสำหรับรถขนาด T44 และ HLP320 มีช่วงความยาว 15 ม. มีชั้นส่วนหล่อสำเร็จของคานคอนกรีตอัดแรง RPC และหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับแผ่นพื้นหนา 170 มม. ลักษณะของคานเป็นหน้าตัดรูปตัว I มีความลึก 600 มม. และการวางคานขนานกันทุก 1.3 ม. การก่อสร้างมีขั้นตอนตามการก่อสร้างสะพานดั้งเดิม คานที่ใช้ RPC มีน้ำหนัก 4.2 ตัน (280 กก./ม.) เบากว่าคานรูปแบบเดิมซึ่งต้องใช้น้ำหนักถึง 9 ตัน จึงทำให้สามารถลดขนาดโครงสร้างแบบหล่อได้



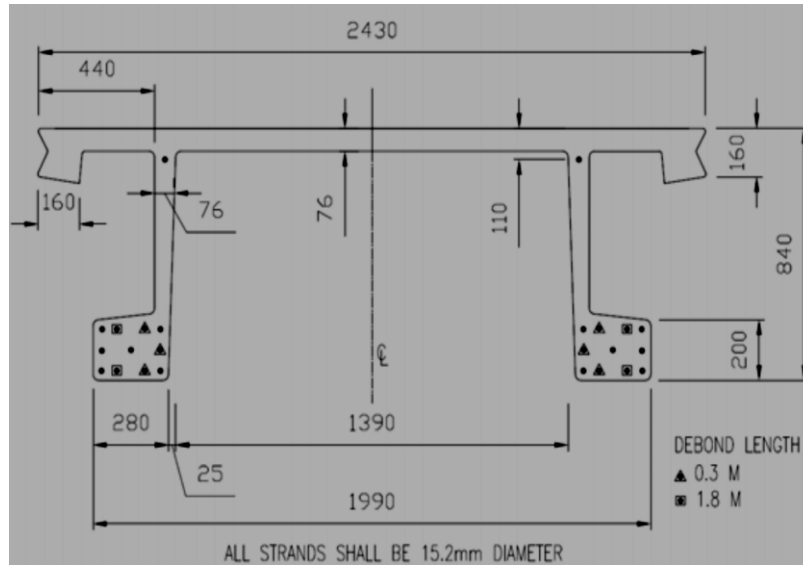
(a)



(b)

รูปที่ 3 สะพาน Shepherds Creek Road (a) การติดตั้งสะพาน และ (b) เปิดใช้งาน

Optimised RPC Prototype Bridge สร้างขึ้นที่วอชิงตัน สหรัฐอเมริกา ประกอบด้วยคานมีความยาว 21.3 ม. วางคู่ขนานกัน มีหน้าตัดเป็น Pi-Shaped Section รองรับแผ่นพื้นหนา 76 มม. หน้าตัดของคานเป็นระบบการอัดแรงด้วยลวด Tendon ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.2 มม. และส่วนปลายของคานยึดด้วยไดอะแฟรมทั้งสองด้านขนาดความหนา 50 มม.



(a)



(b)

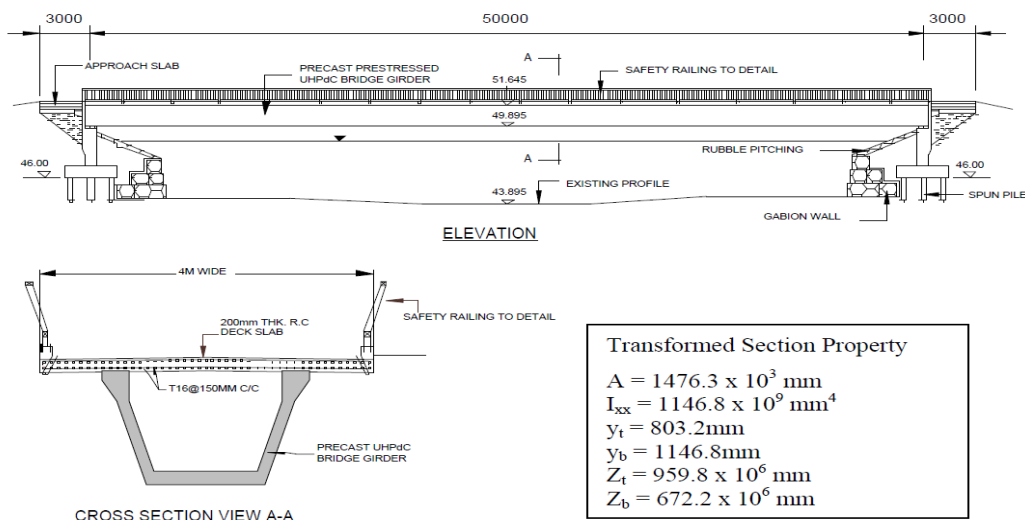




(c)

รูปที่ 4 สะพาน Optimised RPC Prototype Bridge (a) หน้าตัด Pi-Shaped และ (b) ขณะติดตั้ง และ (c) เมื่อติดตั้งเสร็จ

Sungai Linggi Road Bridge (2011) สร้างขึ้นที่ Negeri Sembilan มาเลเซีย ทำจาก Ultra High Performance ductile Concrete (UHPDC) ที่กำลังอัด 1835 กก.ต่อ ตร.ซม. และ กำลังดึง 306 กก.ต่อ ตร.ซม. ประกอบด้วยคานรูปตัวยู Single U-Trough Girder มีความยาว 50 ม. ออกแบบอายุการใช้งาน 120 ปี คานมีความลึก 1.75 ม. ขนาดความกว้าง 2.5 ม. รองรับการจราจรด้วยแผ่นพื้นหล่อในที่ด้านบนหนา 200 มม. กว้าง 4 ม. การก่อสร้างสะพานโดยไม่มีการใช้เหล็กปลอก



(a)



(b)

รูปที่ 5 สะพาน Sungai Linggi Road Bridge (a) หน้าตัด Single U-Trough Girder และ (b) ขณะหล่อ

## 5.การศึกษาพฤติกรรมของ UHPC ในประเทศไทย

บุรฉัตร และคณะ (2551) ได้ศึกษาแนวทางออกแบบและพัฒนาคอนกรีตชนิด RPC โดยคุณสมบัติที่ทำการศึกษาประกอบด้วย คุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพได้แก่ ความสามารถในการลดน้ำ และระยะเวลาการก่อตัว นอกจากนี้คุณสมบัติทางกลได้แก่ กำลังอัดที่อายุ 1, 3, 7, และ 28 วัน จากผลการทดสอบ พบว่า ปริมาณซิลิกาฟูมมีผลกระทบต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต โดยเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาฟูมขึ้นมีผลทำให้ระยะเวลาการก่อตัวสั้นลง และเมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำมีผลในการยืดระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งที่ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งที่ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวยาวนานมากหรืออาจจะไม่ก่อตัวได้ ปริมาณสารลดน้ำที่เหมาะสมในการผลิต UHSC ของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีค่าสูงสุดร้อยละ 6 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และปริมาณซิลิกาฟูมที่เหมาะสมในการผลิต UHSC ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ค่าอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ที่เหมาะสมในการผลิต RPC มีค่าเท่ากับ 0.23 โดยมีกำลังอัดประลัย ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 942 กก.ต่อ ตร.ซม. มีการก่อตัวสุดท้ายที่ 180 นาที

Krit and Krit (2013) ได้ศึกษา RPC ซึ่งประกอบด้วยการใช้ซิลิกาฟุ่ม 2 ชนิด โดยมีอัตราส่วนซิลิกาฟุ่มต่อปูนซีเมนต์อยู่ระหว่างร้อยละ 15-35 โดยน้ำหนัก คุณสมบัติทางกายภาพและกลสมบัติของ RPC ที่อายุ 3, 7, 28 วัน ได้กำลังอัดประลัย 907, 1183, 1509 กก.ต่อ ตร.ซม. ตามลำดับ ผลที่ได้สรุปว่าคุณสมบัติของ RPC ขึ้นอยู่กับชนิดของซิลิกาฟุ่ม ปริมาณของซิลิกาฟุ่ม และปริมาณของสารผสมเพิ่มที่ใช้

Chatchawan และคณะ (2014) ศึกษาผลกระทบจากปริมาณการใช้ซิลิกาฟุ่มและสารผสมเพิ่มต่อกำลังอัดของ RPC ในการศึกษาได้ใช้ Densified Silica fume โดยกำหนดอัตราส่วนซิลิกาฟุ่มต่อปูนซีเมนต์ (f/c) ที่ร้อยละ 20 และ 25 โดยน้ำหนัก สำหรับสารผสมเพิ่มชนิด Polycarboxilate ในอัตราส่วนสารผสมเพิ่มต่อปูนซีเมนต์ (sp/c) ที่ร้อยละ 2-3.5 โดยน้ำหนัก ส่วนผสมทั้งหมดจะใช้กับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และทรายแม่น้ำ ผลการทดลองของการวัดอัตราการไหลอยู่ระหว่างร้อยละ 110-141 และได้กำลังอัดประลัยที่อายุ 3 วัน สูงสุดเท่ากับ 890 กก.ต่อ ตร.ซม. ที่ f/c ร้อยละ 25 และ กำลังอัด เท่ากับ 900 กก.ต่อ ตร.ซม. ที่ sp/c ร้อยละ 3

### 6.การใช้งาน UHPC ในประเทศไทย

สำหรับการใช้งาน UHPC ในเชิงอุตสาหกรรมในประเทศไทยไม่ปรากฏอย่างชัดเจน การพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีคอนกรีตมุ่งสู่การแก้ปัญหาเฉพาะจุดและมีการใช้นวัตกรรมใหม่ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้างพื้นฐาน งานการซ่อมแซมโครงสร้าง และอื่นๆ ตามวัตถุประสงค์ โดยการใช้งาน UHPC ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างอาจยังไม่สามารถสร้างจุดเด่นที่สำคัญในการช่วยในงานเทคนิควิศวกรรมอาคารสูงและโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ ซึ่งการพัฒนาต่อไปในอนาคตของคอนกรีตในประเทศไทยต้องอาศัยงานทางด้านวิชาการส่งต่อความรู้ ความเข้าใจ เพื่อเพิ่มศักยภาพของงานวิศวกรรมด้านคอนกรีตในยุคประเทศไทย 4.0 ต่อไป

### เอกสารอ้างอิง

[1] บุรฉัตร ฉัตรวีระ, ธวัชชัย คงศักดิ์ตระกูล และณรงค์ศักดิ์ มากุล (2551).คุณสมบัติพื้นฐานของ Reactive Powder Concrete. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 31 ฉบับที่ 1 มกราคม-มีนาคม, 177-189

[2] Chatchawan Martlerng, Terapat Tongluan, Krit Prasertlar, Krit Chaimoon,(2014) "Effects of Silica Fume and Superplasticizer Contents on Compressive Strength of Reactive Powder Concrete", Proceedings of sixth International Conference on science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB VI 2014), Apsara Angkor Resort & Conference, Siem Reap, Cambodia, pp. 94-97, 28-30 August (2014).

[3] Coppola L., R. Troli, S. Collepari, A. Borsoi, T. Cerulli, M. Collepari, "Materiali Cementizi Innovativi: dagli HPC verso gli RPC. Parte II. L'Influenza del Cemento e del Fumo di Silice sulla Resistenza Meccanica del Reactive Powder Concrete/Innovative Cementitious

Materials: from HPC to RPC. Part II. The Effect of Cement and Silica Fume Type on the Compressive Strength of Reactive Powder Concrete", L'Industria Italiana del Cemento, 707, pp. 112-125, Roma (1996).

[4] Coppola L., T. Cerulli, R. Troli, M. Collepardi, "The Influence of Raw Materials on Performance of Reactive Powder Concrete", Proceedings of International Conference on High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures, Florianopolis, Brasil, pp. 502-503, 5-7 Giugno (1996).

[5] Collepardi S., L. Coppola, R. Troli e M. Collepardi, Mechanical Properties of Modified Reactive Powder Concrete. Proceedings of the Fifth CANMET/ACI International Conference on "Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete", SP-173, pp. 1-21, (1997).

[6] Collepardi S., S. Monosi, G. Pignoloni, R. Troli and M. Collepardi, Modified Reactive Powder Concrete with Artificial Aggregate, Proceedings of Sixth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Nice, France, 10-13 October 2000, pp. 447 - 459.

[7] Collepardi S., R. Troli, S. Monosi and O. Favoni, L'Influenza del tipo di fibre sulle prestazioni di conglomerati tipo RPC / The Influence of the Fiber Type on the Performance of RPC Industria Italiana del Cemento, n. 786, April 2003.