

รีแอคทีฟพาวเดอร์คอนกรีต: วัสดุแห่งอนาคต

REACTIVE POWDER CONCRETE: MATERIAL OF THE FUTURE

กริสน์ ชัยมูล^๑

^๑สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ความเชี่ยวชาญ : คอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ, คอนกรีตเสริมเหล็ก, โครงสร้างอิฐก่อ, และกลศาสตร์ของแข็ง



นันทวัฒน์ ขมหวาน^๒

^๒ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

ความเชี่ยวชาญ : การซ่อมแซมและเสริมกำลังโครงสร้าง, ความคงทนของคอนกรีต, ไฟไนต์เอลิเมนต์, และการบำรุงรักษาคอนกรีต



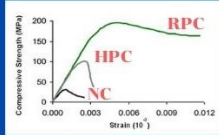
กฤษฎา ศรีสมพร^๓

^๓บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด



ความเชี่ยวชาญ : ความคงทนของคอนกรีต, คอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ, เทคโนโลยีซีเมนต์และคอนกรีต, และแบบจำลองพฤติกรรมคอนกรีต



RPC • High Strength
• High Ductility
• High Durability



<p>W (kg/m)</p> <p>H</p> <p>RPC</p> <p>RPC Beam</p>	<p>0.85W (kg/m)</p> <p>H</p> <p>Steel</p> <p>Steel Beam</p>	<p>3.62W (kg/m)</p> <p>1.94H</p> <p>PC</p> <p>PC Beam</p>	<p>4.06W (kg/m)</p> <p>1.94H</p> <p>RC</p> <p>RC Beam</p>
--	--	--	--

Sustainable Structures using Future Material



1. บทนำ

ในปัจจุบันคงไม่มีใครปฏิเสธได้ว่า ความยั่งยืน (sustainability) เป็นสิ่งแรกๆ ที่ทุกภาคส่วนต้องให้ความสำคัญและตระหนักถึง เพราะโลกของเราต้องการความยั่งยืนเพื่อให้ยังคงอยู่สืบไปตราบนานเท่านาน แม้แต่ภาคอุตสาหกรรมการก่อสร้างเอง วัสดุก่อสร้างก็ควรเป็นวัสดุที่เอื้อต่อความยั่งยืนของสิ่งก่อสร้าง โดยเฉพาะคอนกรีตที่เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีการใช้มากที่สุดในโลก โดยมีการใช้มากกว่า 3 หมื่นล้านตันทั่วโลกในแต่ละปี คิดเป็นประมาณ 3 เท่าของเมื่อ 40 ปีที่แล้ว และยังคงมีความต้องการใช้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ มากกว่าความต้องการเหล็กหรือไม้ [1]

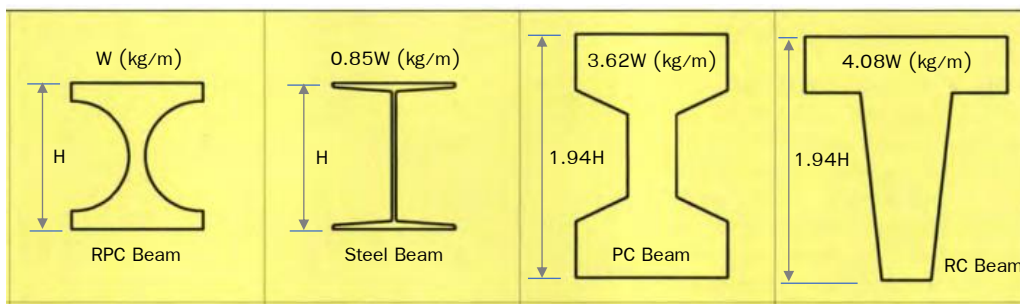
รีแอคทีฟเพาเดอร์คอนกรีต (reactive powder concrete, RPC) เป็นคอนกรีตชนิดใหม่ชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นในประเทศฝรั่งเศสและมีการตีพิมพ์เผยแพร่อย่างเป็นทางการประมาณปี ค.ศ. 1995 [2] RPC มีกำลังอัดสูงมาก (200 – 800 MPa) มีความเหนียวสูง มีความทนทานดี และมีสมรรถนะเหนือกว่าคอนกรีตทั่วไปและคอนกรีตกำลังสูงในทุกๆ ด้าน RPC กลายเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จากนักวิจัยและวิศวกรโยธา และทั่วโลกกำลังมีการประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ สูงขึ้นเรื่อยๆ แม้ในปัจจุบัน RPC จะยังคงมีราคาต่อหน่วยที่ค่อนข้างสูงและมีข้อจำกัดเรื่องมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง แต่ด้วยกำลังของวัสดุที่สามารถเทียบเท่ากับเหล็กแต่ไม่เป็นสนิมและทนต่อไฟไหม้ได้นานกว่า จึงทำให้ RPC มีศักยภาพสูงมากที่จะตอบโจทย์เรื่องความยั่งยืน [3] และจะเป็นคอนกรีตแห่งอนาคตได้ เหมาะสมอย่างยิ่งกับสิ่งก่อสร้างสมัยใหม่ที่ต้องตอบสนองต่อความต้องการในด้านต่างๆ ที่ทวีคูณขึ้น เช่น ด้านการใช้งานที่ต้องรับแรงได้มากขึ้น (รวมทั้งทนต่อแรงแผ่นดินไหว แรงกระแทก และแรงระเบิด) เหนียวขึ้น ทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่รุนแรงขึ้น มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น ด้านรูปลักษณะต้องมีหน้าตัดเล็กลง เบาลง ช่วงพาดยาวขึ้น แลดูทันสมัย ด้านการก่อสร้างต้องเร็วขึ้น ขนส่งและติดตั้งง่ายขึ้น ใช้แรงงานน้อยลง เสริมเหล็กลดลง ลดผลกระทบต่อเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม เป็นต้น

บทความนี้สรุปและแนะนำเกี่ยวกับ RPC ทั้งส่วนผสม อัตราส่วนผสม คุณสมบัติทางกล และตัวอย่างการประยุกต์ใช้ RPC รวมทั้งข้อจำกัดและแนวโน้มของ RPC ในอนาคต

2. รีแอคทีฟเพาเดอร์คอนกรีต

รีแอคทีฟเพาเดอร์คอนกรีต (reactive powder concrete, RPC) พัฒนาโดยบริษัทบูยิก (Bouygues) ในประเทศฝรั่งเศส ซึ่งเป็นบริษัทแม่ของบริษัทวีเอสแอล (VSL) และทำการตลาดภายใต้ชื่อทางการค้าว่า ดักทัล (Ductal) [4] RPC มีลักษณะเฉพาะคือ ใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง ใส่ซิลิกาฟูม ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานที่ทำปฏิกิริยาได้เร็ว และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมาก ทำให้ RPC

สามารถมีกำลังอัดสูงมาก มีความทนทานดี และมีความสามารถเทได้สูง และเป็นคอนกรีตสมรรถนะสูง พิเศษ (ultra-high performance concrete, UHPC) ชนิดหนึ่ง เนื่องจากมีคุณสมบัติตามนิยามของ ASTM C1856 [5] ที่ระบุว่า UHPC เป็นคอนกรีตที่ (1) มีกำลังอัดไม่ต่ำกว่า 120 MPa (2) ใช้มวลรวม ขนาดระบุใหญ่สุดไม่เกิน 5 mm (3) มีค่าการไหลแผ่ 200-250 mm ด้วยกำลังที่สูงของ RPC ทำให้ คาน RPC อัดแรงมีความสามารถในการรับแรงดัดได้เท่าๆ กันกับคานเหล็กรูปพรรณ (steel beam) โดยมีขนาดหน้าตัดและน้ำหนักต่อความยาวที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อเทียบกับคานคอนกรีตอัดแรง (prestressed concrete beam, PC beam) และคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (reinforced concrete beam, RC beam) ทั่วไปจะมีขนาดหน้าตัดและน้ำหนักน้อยกว่ามาก [6] ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเปรียบเทียบขนาดหน้าตัดคานต่างๆ ที่มีความสามารถรับแรงดัดเทียบเท่ากัน [6]

2.1 ส่วนผสมและอัตราส่วนผสม

RPC มีวัสดุที่เป็นส่วนผสมหลัก คือ (1) ปูนซีเมนต์ (2) ซิลิกาฟูม (3) ทรายละเอียด (4) น้ำ (5) สารลดน้ำพิเศษ และ (6) เส้นใยเหล็กขนาดเล็ก (ใส่ถ้าต้องการเพิ่มความเหนียว) จาก ส่วนประกอบหลักจะเห็นว่าจริง ๆ แล้ว RPC เป็นเพียงมอร์ต้าไม่ใช่คอนกรีตเพราะไม่มีหินหรือมวลรวม หยาบ แต่ใช้งานเหมือนคอนกรีตจึงเรียกว่าคอนกรีตเท่านั้น และด้วยส่วนประกอบที่เป็นของแข็งทั้งหมด มีขนาดอนุภาคเล็กเป็นผงละเอียดที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ คอนกรีตชนิดนี้จึงมีชื่อเรียกดังกล่าว

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมโดยทั่วไปของ RPC

วัสดุ	น้ำหนัก (kg/m^3)	คุณสมบัติที่ต้องการ
ปูนซีเมนต์	710 - 1,100	C ₃ A ต่ำ
ซิลิกาฟูม	150 - 300	ไม่อัดแน่น

วัสดุ	น้ำหนัก (kg/m ³)	คุณสมบัติที่ต้องการ
ทราย	950 - 1,400	ขนาด 0.15 - 0.60 mm
น้ำ	100 - 245	-
สารลดน้ำพิเศษ	5 - 25	ชนิดโพลีอะครีเลต
เส้นใยเหล็ก (ถ้ามี)	150 - 250	$L/\phi \approx 0.70$

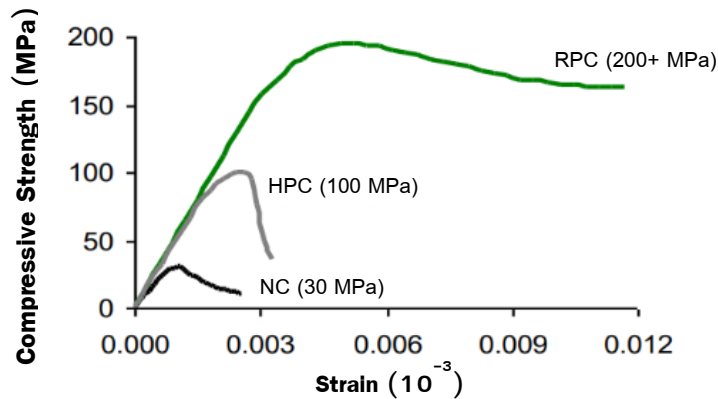
อัตราส่วนผสมทั่วไปของ RPC ที่มีการใช้งานจริงโดยมีกำลังอัดมากกว่า 120 MPa ด้วยวิธีการผสมและการบ่มปกติ (การบ่มร้อนมักจะให้กำลังอัดมากขึ้น) ซึ่งรวบรวมจากการตีพิมพ์เผยแพร่ [2, 6-8] และคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดที่ต้องการหรือที่เหมาะสมสำหรับ RPC แสดงในตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมแรกเริ่มของ RPC ที่พัฒนาขึ้นและให้กำลังอัด 200 - 800 MPa เผยแพร่ใน [2] ส่วนผสมและอัตราส่วนผสมของ RPC เป็นผลจากหลักการสำคัญ 3 ประการ [2] คือ (1) เพื่อเพิ่มความเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุโดยการไม่ใส่มวลรวมหยาบ (2) เพื่อเพิ่มความหนาแน่นโดยให้มีขนาดคละที่ดี (3) เพื่อเพิ่มความเหนียวโดยใส่เส้นใยเหล็ก

2.2 คุณสมบัติทางกล

คุณสมบัติทางกลของ RPC เปรียบเทียบกับคอนกรีตสมรรถนะสูง (high performance concrete, HPC) และคอนกรีตทั่วไป (normal concrete, NC) แสดงในตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า RPC มีกำลังอัดมากกว่า HPC และ NC ประมาณ 2-13 เท่า และ 5 - 40 เท่าตามลำดับ รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความเครียดโดยทั่วไปของ RPC เปรียบเทียบกับ HPC และ NC

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกลของ RPC และคอนกรีตอื่นๆ

คุณสมบัติ	RPC [2]	HPC [9]	NC
กำลังอัด (MPa)	200 - 800	60 - 100	20 - 40
กำลังดัด (MPa)	30 - 141	6 - 10	3 - 5
โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	50 - 75	23 - 37	14 - 41



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความเครียดของคอนกรีตต่างๆ [10]

3. การประยุกต์ใช้ RPC

การประยุกต์ใช้ RPC ในงานโครงสร้างนั้น ช่วยลดหรือไม่ต้องมีเหล็กเสริมทั่วไป โดยการอัดแรงจะช่วยให้การรับความเค้นดึงหลัก (main tensile stresses) และเส้นใยเหล็กซึ่งมีกำลังสูงจะช่วยรองรับความเค้นดึงรอง (secondary tensile stresses) ที่เกิดขึ้น [4]

ในปี พ.ศ. 2540 มีการประยุกต์ใช้ RPC ในการก่อสร้างจริงเป็นครั้งแรกในโลก คือสะพานคนเดินในเมืองเซอร์บรูค รัฐควิเบก ประเทศแคนาดา ดังรูปที่ 3 สะพานเป็นโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงแบบดึงเหล็กที่หลัง นอกจากเหล็กอัดแรงไม่มีการเสริมเหล็กอื่นๆ สะพานมีช่วงยาวถึง 60 m และพื้นสะพานมีความหนาเพียง 3 cm โดยชั้นส่วนคอนกรีตหล่อสำเร็จจากโรงงาน RPC ที่ใช้ปัมในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C มีกำลังอัด 200 MPa กำลังดึง (direct tensile strength) 7 MPa กำลังดัด 40 MPa และโมดูลัสยืดหยุ่น 50 GPa [6, 11, 12] ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นเหนือคอนกรีตอื่นๆ ทำให้ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ RPC ในการก่อสร้างโครงสร้างต่างๆ มากขึ้นเรื่อยๆ ในหลายๆ ประเทศ ตัวอย่างเช่น

สถานีรถไฟรางเบาซอร์เวเนสซี เมืองแคลกอรี่ ในรัฐแอลเบอร์ตา ประเทศแคนาดา [13] ดังรูปที่ 4 ก่อสร้างประมาณปี พ.ศ. 2547 หลังคาเปลือกบางหล่อสำเร็จ (precast shell canopy) ขนาดใหญ่ของสถานีมีขนาดและค่าก่อสร้างเทียบเท่าได้กับโครงสร้างเหล็ก โดยมีความหนาเพียง 2 cm

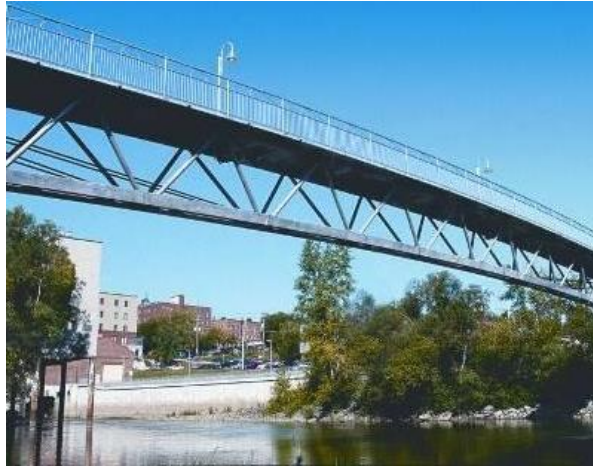
สะพานรถยนต์ ในรัฐนิวเซาท์เวลส์ ประเทศออสเตรเลีย [14] ดังรูปที่ 5 RPC (บ่มด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 90°C 48 ชั่วโมง มีกำลังอัด 160 MPa กำลังตัด 24 MPa กำลังดัด ณ การแตกร้าว ครั้งแรก 20 MPa โมดูลัสยืดหยุ่น 47 GPa การหดตัวน้อยกว่า 500 $\mu\epsilon$ โดยการหดตัวทั้งหมด พบว่าเกิดเพียงระหว่างการบ่มร้อนเท่านั้น) ใช้ในการหล่อคานคอนกรีตอัดแรงแบบดิงเหล็ก ก่อนที่ไม่มีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือน และแผ่นพื้นหล่อสำเร็จรูปหนาเพียง 2.5 cm ที่วางระหว่าง คานและใช้เป็นแบบหล่อในการเทแผ่นพื้นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยไปในตัว คาน RPC อัดแรงมีน้ำหนักเพียง 40 – 50% ของคานคอนกรีตอัดแรงทั่วไป และที่สำคัญราคาต่ำกว่าสร้างทั้ง สะพานเทียบกับการใช้คอนกรีตทั่วไปพบว่าแพงขึ้นเพียง 10%

ระบบทางเท้าบนสะพานทางรถไฟชิงไห่-ทิเบต ในประเทศจีน ดังรูปที่ 6 RPC (บ่มร้อนที่ อุณหภูมิ 75°C มีกำลังอัด 147.3 MPa กำลังดึงผ้าซีก 21.1 MPa โมดูลัสยืดหยุ่น 48.5 GPa) ใช้ ในงานดังกล่าวด้วยเหตุผลการเป็นคอนกรีตที่มีคุณสมบัติทางกลดีเยี่ยมและมีความทนทานสูง เพราะโครงสร้างตั้งอยู่บนพื้นที่เยือกแข็งที่ระดับความสูงมากกว่า 4,000 m และสภาพอากาศที่ เลวร้าย [15]

สำหรับประเทศไทย ได้มีการประยุกต์ใช้ RPC เป็นครั้งแรกในการก่อสร้างจริงแล้ว โดยเป็น สะพานคนเดินช่วงสั้นที่ใช้แผ่นพื้นต้น RPC สำเร็จรูปในการติดตั้ง ดังรูปที่ 7 แผ่นพื้นแต่ละแผ่น กว้าง 0.35 m ยาว 5.0 m หนา 0.05 m RPC มีกำลังอัด 160 MPa ก่อสร้างในพื้นที่ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ภายใต้ความร่วมมือระหว่างบริษัท SCG มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ในปี พ.ศ. 2564 บริษัท CPAC ได้ทำการก่อสร้างสะพานคนเดิน UHPC ช่วงคานยาวที่สุดใน ประเทศไทย ดังรูปที่ 8 โดยสะพานได้ทำการก่อสร้างในบริเวณพื้นที่สำนักงานใหญ่ของบริษัท SCG และมีความยาวประมาณ 28 m กว้าง 4 m สะพานถูกออกแบบทางสถาปัตยกรรมเป็น สะพานโค้ง (arch bridge) แต่โครงสร้างทางวิศวกรรมถูกปรับเป็นระบบคานยื่น (cantilever beams) ออกจากสองฝั่งเพื่อลดแรงถีบเข้าฐานราก

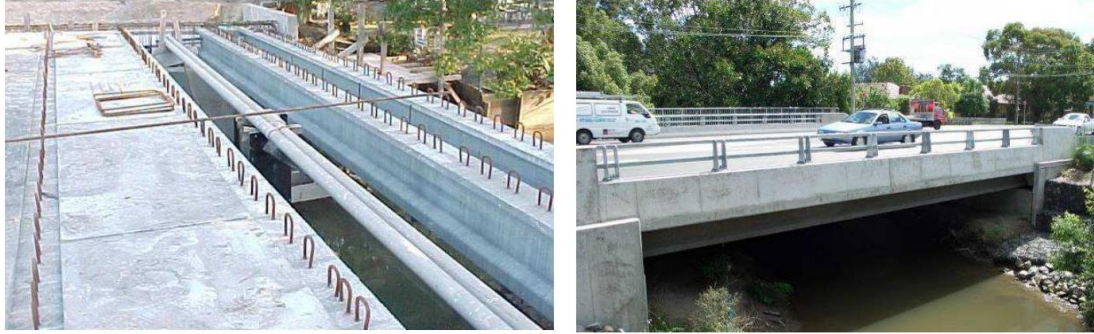
นอกจากนั้นยังมีการประยุกต์ใช้ RPC เป็นวัสดุซ่อมแซมหรือวัสดุเสริมกำลัง [16] และใช้หล่อ ชิ้นส่วนตกแต่งอาคาร (facade element) [17, 18] ดังรูปที่ 9



รูปที่ 3 สะพานคนเดิน เมืองเชอร์บรูค ประเทศแคนาดา [11]



รูปที่ 4 สถานีรถไฟรางเบาซอร์เนสซี ประเทศแคนาดา และองค์อาคารที่หล่อด้วย RPC [13, 19]



รูปที่ 5 สะพานรถยนต์ ในรัฐนิวเซาท์เวลส์ ประเทศออสเตรเลีย [14]



รูปที่ 6 สะพานทางรถไฟชิงไห่-ทิเบต ในประเทศจีน [19]



รูปที่ 7 สะพานคนเดิน RPC ในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน [20]



รูปที่ 8 สะพาน RPC ช่วงคานยาวที่สุดในประเทศไทยที่ SCG สำนักงานใหญ่



รูปที่ 9 ชั้นส่วนตกแต่งอาคาร RPC ที่สนามบินราบัต-ซาเล ประเทศโมร็อกโค [18]

4. ข้อจำกัดและแนวโน้มของ RPC ในอนาคต

ในปัจจุบัน ยังไม่มีมาตรฐานต่างๆ สำหรับ RPC ทำให้การประยุกต์ใช้งานยังจำกัดอยู่เพียงเฉพาะผู้ที่มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับ RPC และราคาต่อหน่วยของวัสดุยังแพงมากเมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไป จึงอาจทำให้เกิดความรู้สึกไม่มั่นใจและยังไม่เป็นทางเลือกที่จะใช้งาน การใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน หรือการใช้วัสดุอื่นแทนเส้นใยเหล็ก เช่น เส้นใยโพลีโพรพิลีน (Polypropylene Fiber, PP Fiber) ช่วยลดราคาต่อหน่วยลงได้ นอกจากนั้นการพิจารณาทางเศรษฐศาสตร์นั้น ควรพิจารณาในภาพรวมทั้งโครงการ และผลต่างๆ ที่จะได้ตามมาด้วย อย่างเช่นที่มีรายงานว่าราคาการก่อสร้างสะพานรถยนต์ ในรัฐนิวเซาท์เวลส์ ประเทศออสเตรเลียด้วย RPC นั้นต่างจากการใช้คอนกรีตทั่วไปเพียง 10% [14] ดังนั้นการพิจารณาครบทุกด้านอาจ

ทำให้ RPC เป็นทางเลือกที่เหมาะสมหรือดีกว่าได้ โดยเฉพาะเมื่อค่าอื่นๆ และผลกระทบต่างๆ จะส่งผลต่อค่าก่อสร้างมากกว่าเมื่อพิจารณาเฉพาะค่าวัสดุเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 3 แสดงค่ากำลังอัดต่อหน่วยน้ำหนักของ RPC NC และ เหล็กรูปพรรณ โดยใช้กำลังอัดโดยทั่วไปของแต่ละวัสดุ จากตารางจะเห็นได้ว่า RPC มีหน่วยน้ำหนักประมาณ $2,600 \text{ kg/m}^3$ มากกว่า NC เพียง 1.08 เท่า และน้อยกว่าเหล็กอย่างน้อย 3 เท่า เป็นผลให้ RPC ซึ่งมีกำลังอัดโดยทั่วไปประมาณ 150 MPa สามารถมีค่ากำลังอัดต่อหน่วยน้ำหนัก ($0.058 \text{ MPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$) มากกว่าเหล็กรูปพรรณได้ถึง 1.8 เท่า ขณะที่ NC มีค่าน้อยกว่าเหล็กรูปพรรณ 2.67 เท่า

ตารางที่ 3 กำลังอัดต่อหน่วยน้ำหนักของ RPC NC และเหล็กรูปพรรณ

วัสดุ	หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)	กำลังอัดโดยทั่วไป (MPa)	กำลังอัดต่อหน่วยน้ำหนัก ($\text{MPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$)
RPC	2,600	150	0.058
NC	2,400	28	0.012
เหล็กรูปพรรณ	7,850	250	0.032

สำหรับมุมมองด้านสิ่งแวดล้อม อาจจะมีการตั้งคำถามเกี่ยวกับ RPC เนื่องจากถ้าดูเพียงปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการผลิต RPC ต่อหน่วย (ประมาณ 900 kg/m^3) เทียบกับคอนกรีตทั่วไป (ประมาณ 300 kg/m^3) RPC จะใช้ปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่า แต่เมื่อพิจารณาอย่างรอบด้านแล้วก็จะพบว่า RPC เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไปด้วยซ้ำ อย่างน้อยด้วยเหตุผล RPC ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์น้อยกว่าคอนกรีตทั่วไปประมาณ 1.9 เท่า เพื่อให้ได้กำลังอัดที่เท่ากัน ดังแสดงใน**ตารางที่ 4**

ด้วยคุณสมบัติและสมรรถนะที่โดดเด่นต่างๆ ของ RPC จะทำให้โครงสร้างที่ก่อสร้างด้วย RPC สามารถรักษาจุดเด่นและแก้จุดด้อยของโครงสร้างคอนกรีตและโครงสร้างเหล็กได้ และมีความเหมาะสมสำหรับโครงสร้างสมัยใหม่และในอนาคตที่ต้องการให้โครงสร้างมีสมรรถนะและความยั่งยืนสูงยิ่งขึ้น

ตารางที่ 4 กำลังอัดต่อปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ของ RPC และ NC

วัสดุ	ปริมาณปูนซีเมนต์โดยทั่วไป (kg/m ³)	กำลังอัดโดยทั่วไป (MPa)	กำลังอัดต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (MPa·m ³ /kg)
RPC	900	150	0.17
NC	300	28	0.09

5. สรุป

RPC เป็นคอนกรีตสมัยใหม่ชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติพิเศษมากกว่าคอนกรีตอื่นๆ โดยมีทั้งกำลังอัดที่สูงมากๆ มีความเหนียวสูง และมีความทนทานดี อย่างไรก็ตามเนื่องจากการที่เป็นวัสดุที่ยังคงค่อนข้างใหม่ จึงยังไม่มีมาตรฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องและราคาต่อหน่วยยังคงสูง แต่ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นจึงเชื่อว่า เมื่อข้อจำกัดต่างๆ ลดลงหรือบริบทต่างๆ เปลี่ยนแปลงไป RPC จะสามารถเป็นคอนกรีตสำหรับอนาคตที่จะตอบโจทย์เรื่องสมรรถนะและความยั่งยืนของโครงสร้างได้อย่างแน่นอน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ SCG และบริษัท สยามวิจัยและนวัตกรรม จำกัด ในทุนอุดหนุนงานวิจัยหัวข้อ ”โครงการการศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตสมรรถนะสูงสำหรับโครงสร้างสะพาน”

เอกสารอ้างอิง

[1] York, I., & Europe, I. (2021). Concrete needs to lose its colossal carbon footprint. *Nature*, 597(7878), 593-594.

[2] Richard, P., & Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concretes. *Cement and concrete research*, 25(7), 1501-1511.

[3] Akeed, M., Qaidi, S., Ahmed, H., Faraj, R., Mohammed, A., Mahmood, W., Tayeh, B., & Azevedo, A. (2022). Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. Part IV: Durability properties, cost assessment, applications, and challenges. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01271.

[4] Cavill, B., & Chirgwin, G. (2004). The world's first RPC road bridge at Shepherds Gully Creek, NSW. *Austroroads Bridge Conference, 5th, 2004, Hobart, Tasmania, Australia*.

- [5] ASTM-C1856/C1856M-17. (2017). Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [6] Blais, P. Y., & Couture, M. (1999). PRECAST, prestressed pedestrian BRIDGE-WORLD'S first reactive powder concrete bridge. *PCI journal*, 44(5).
- [7] Ahmed, S., Al-Dawood, Z., Abed, F., Mannan, M. A., & Al-Samarai, M. (2021). Impact of using different materials, curing regimes, and mixing procedures on compressive strength of reactive powder concrete-A review. *Journal of Building Engineering*, 44, 103238.
- [8] Prasertlar, K., & Chaimoon, K. (2013). Properties of reactive powder concrete using densified silica fume. *Applied Mechanics and Materials*, 2928-2932.
- [9] Lee, N., & Chisholm, D. (2005). Reactive Powder Concrete, Study Report SR 146. Ltd. Judgeford, New Zealand, 29.
- [10] vsl.com. (2008). Ductal® Footbridges – New Zealand.
- [11] Perry, V. (2015). Ultra-high-performance-concrete advancements and industrialization—the need for standard testing. *Advances in Civil Engineering Materials*, 4(2), 1-16.
- [12] vsl.com. (2012). Sherbrooke footbridge – Canada.
- [13] LafargeHolcim. *Projects*. 2022 [cited December 1, 2022; Available from: <https://www.ductal.com/en/shawnessy-lrt-station>].
- [14] Rebentrost, M., & Wight, G. (2009). UHPC perspective from a specialist construction company. *Proceedings of UHPFRC*.
- [15] Wen-yu, J., Ming-zhe, A., Gui-ping, Y., & Jun-min, W. (2004). Study on reactive powder concrete used in the sidewalk system of the Qinghai-Tibet railway bridge. *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, Beijing, China*, 333-338.
- [16] Ghazy, M. F., Taman, M. H., & El Ahwal, R. M. (2020). PROPERTIES OF REACTIVE POWDER CONCRETE AND IT'S UTILIZING AS A REPAIR AND STRENGTHEN MATERIALS. *MEJ. Mansoura Engineering Journal*, 42(3), 21-29.

- [17] Mueller, U., Williams Portal, N., Chozas, V., Flansbjerg, M., Larazza, I., da Silva, N., & Malaga, K. (2016). Reactive powder concrete for facade elements–A sustainable approach. *Journal of Facade Design and Engineering*, 4(1-2), 53-66.
- [18] Fabbri, R., & Corvez, D. (2013). Rationalisation of complex UHPFRC façade shapes. *Toutlemonde F, Resplendino J, eds. Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete. Marseille, France, 27-36.*
- [19] Weisman, J. *Reactive Powder Concrete*. 2012 [cited December 1, 2022; Available from: <https://www.slideshare.net/shruthicivil/reactive-powder-concreteppt-10747345>].
- [20] Final Report: KU-SCG. (2019). Project on Study of High-Performance Concrete Behavior for Bridge Structure (in Thai).

เกี่ยวกับผู้แต่งบทความ

กฤษณ์ ชัยมูล ปัจจุบันเป็นรองศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ต.ขามเรียง อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150 ประวัติการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย และปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนิวเซาท์เวลส์ ประเทศออสเตรเลีย งานวิจัยที่สนใจ คอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ คอนกรีตเสริมเหล็ก โครงสร้างอิฐก่อ และกลศาสตร์ของแข็ง

นันทวัฒน์ ขมหวาน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสนมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140 ประวัติการศึกษา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนิวเซาท์เวลส์ ประเทศออสเตรเลีย งานวิจัยที่สนใจเกี่ยวกับการซ่อมแซมและเสริมกำลังโครงสร้าง ความคงทนของคอนกรีต ไฟไฟต์เอลิเมนต์ และการบำรุงรักษาคอนกรีต

กฤษฎา ศรีสมพร บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด ประวัติการศึกษา ดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีฮัมบวร์ก ประเทศเยอรมัน งานวิจัยที่สนใจเกี่ยวกับความคงทนของคอนกรีต คอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ เทคโนโลยีซีเมนต์และคอนกรีต และแบบจำลองพฤติกรรมคอนกรีต

การอ้างอิงบทความ (citation)

กริสัน ชัยมูล นันทวัฒน์ ขมหวาน และกฤษฎา ศรีสมพร (2565), "รีแอคทีฟพาวเดอร์คอนกรีต: วัสดุแห่งอนาคต (Reactive Powder Concrete: Material of the Future)," วารสารคอนกรีต, สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, ปีที่ 16, ฉบับที่ 1, บทความหมายเลข TCA_M 160101, มกราคม-เมษายน, 14 หน้า.

Chaimoon, K., Khomwan, N., and Sisomphon, K. (2022) "Reactive Powder Concrete: Material for the Future," *TCA Magazine*, Thailand Concrete Association, Vol.16, Issue 1, Paper ID TCA_M 160101, Jan.-Apr., 14 pages.