วารสารวิศวกรรมศาสตร์และการวิจัยเชิงนวัตกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
Journal of Engineering and Innovative Research
Faculty of Engineering RMUTI KKC

ISSN : 2822-129X (Print)
ISSN : 2985-0207 (Online)
Vol. 3 No. 2
July-December 2025
ปีที่ 3 ฉบับที่ 2
กรกฎาคม - ธันวาคม 2568

https : pho3.tci-thaijo/index.php/JEIRKKC
@eng.rmuti.kkc

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และการวิจัยเชิงนวัตกรรม
Journal of Engineering and Innovative Research
ปีที่ 3 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม-ธันวาคม 2568)
Vol. 3 No. 2 (July-December 2025)
ISSN : 2822-129X (Print)
ISSN : 2985-0207 (Online)

เจ้าของ

งานบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

นโยบายและขอบเขตการตีพิมพ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานวิทยาเขตขอนแก่น กำหนดออกวารสารฉบับออนไลน์รายหกเดือน ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม และจัดพิมพ์รูปเล่มรายปี ภายใต้ชื่อ “วารสารวิศวกรรมศาสตร์และการวิจัยเชิงนวัตกรรม” เพื่อตีพิมพ์เผยแพร่บทความและงานวิจัยด้านวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ นวัตกรรมและเทคโนโลยี รวมถึงงานวิจัยสหวิทยาการและสาขาอื่นที่เกี่ยวข้อง ซึ่งคลอบคลุมเนื้อหาที่เป็นองค์ความรู้พื้นฐาน การประยุกต์ จนกระทั่งการนำไปใช้ประโยชน์ ทั้งในแง่ทฤษฎี การทดลอง การออกแบบหรือการพัฒนาอุปกรณ์ รวมถึงการจำลองการทำงานของระบบ หรือกระบวนการต่างๆ เป็นต้น บทความที่ได้รับการตีพิมพ์จะถูกกลั่นกรองโดยผู้ทรงคุณวุฒิแบบ double blind peer review โดยพิจารณางานจากความคิดสร้างสรรค์ ความใหม่ คุณภาพของการเขียนบรรยายและผลการทดลองที่แสดงให้เห็นการค้นพบแบบมีนัยสำคัญ

วัตถุประสงค์และขอบเขตวารสาร

เพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานทางวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ โดยวารสารรับพิจารณาตีพิมพ์บทความวิชาการและบทความวิจัยคลอบคลุมอนุสาขาด้านวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์บริสุทธิ์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์และเทคโนโลยี งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคิดค้นสิ่งประดิษฐ์หรือนวัตกรรมใหม่ที่มีกระบวนการทำวิจัย วิเคราะห์และอภิปรายผลการทดสอบอย่างเป็นระบบ รวมทั้งงานวิจัยด้านนวัตกรรมการศึกษา หรือที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์ศึกษาและวิศวศึกษาหรือสาขาอื่นที่เกี่ยวข้อง

สาขาวิชาที่เปิดรับผลงาน

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และการวิจัยเชิงนวัตกรรม เน้นรับบทความทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ในกลุ่มสาขาวิชาดังนี้

1. กลุ่มสาขาวิศวกรรมศาสตร์
   - 1.1 วิศวกรรมโยธา
   - 1.2 วิศวกรรมเครื่องกล
   - 1.3 วิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์
   - 1.4 วิศวกรรมเกษตรและแปรรูปอาหาร
   - 1.5 วิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์
   - 1.6 วิศวกรรมคอมพิวเตอร์และซอฟแวร์
   - 1.7 วิศวกรรมอุตสาหการและโลจิสติกส์
   - 1.8 วิศวกรรมระบบราง ขนส่งและยานยนต์

2. กลุ่มสาขาวิทยาศาสตร์
    2.1 เคมี
    2.2 คณิตศาสตร์
    2.3 ฟิสิกส์
    2.4 วัสดุศาสตร์
    2.5 นาโนเทคโนโลยี
3. กลุ่มสาขาวิชาสหวิทยาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
4. กลุ่มสาขานวัตกรรมการศึกษา หรือที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์ศึกษาและวิศวศึกษา หรือสาขาอื่นที่เกี่ยวข้อง

ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประพันธ์ ยาวระ	รองอธิการบดีประจำวิทยาเขตขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นทยา กัมพลานนท์	ผู้ช่วยอธิการบดีประจำวิทยาเขตขอนแก่น
อาจารย์บุญกิจ อุ่นพิกุล	ผู้ช่วยอธิการบดีประจำวิทยาเขตขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภฤกษ์ ชามงคลประดิษฐ์	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ ดร.ทศพล แจ้งน้อย	รองคณบดีฝ่ายบริหาร
รองศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร แสงอรุณ	รองคณบดีฝ่ายวิชาการและวิจัย
อาจารย์ขุนแผน ปฏิมาประกร	รองคณบดีฝ่ายแผนและประกันคุณภาพการศึกษา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิเรก จันตะคุณ	รองคณบดีฝ่ายพัฒนานักศึกษา
นางสาวรัชนิวัลย์ มูลสีละ	หัวหน้าสำนักงานคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร. วิเชียร แสงอรุณ	มทร.อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.วิทยา เรืองพรวิสุทธิ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ แสงสุระ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.นาวี กังวาลย์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดมรัตน์ ทิพวรรณ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย สะตะ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมกฤช ปิติฤกษ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.สุวัตร นานันท์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ตรีรุจิราภาพงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิษณุ ทองเล็ก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ระวี ระวีกุล	มทร.อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ปนัสย์ชัย เชษฐ์โชติศักดิ์	มทร.อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิติกานต์ สมบูรณ์	มทร.อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัจฉรียา เจียรศิริสมบูรณ์	มทร.อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

ผู้ประสานงาน

นางประวีณา เนื่องรินทร์ มทร.อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

การพิจารณาบทความ

ต้นฉบับบทความจะได้รับการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review) ในสาขาวิชานั้น ๆ ไม่น้อยกว่า 3 ท่าน โดยเป็นการประเมินแบบอำพรางสองฝ่าย (Double Blind) และส่งผลการพิจารณาแก่ผู้เขียน เพื่อปรับปรุงแก้ไข บทความ หรือพิมพ์ต้นฉบับใหม่แล้วแต่กรณี เมื่อบทความผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิและกองบรรณาธิการแล้ว ผู้เขียนจะได้รับการตอบรับตีพิมพ์บทความในวารสาร

กำหนดเผยแพร่

จัดพิมพ์เผยแพร่ ปีละ 2 ฉบับ (วารสารราย 6 เดือน)
ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม - มิถุนายน
ฉบับที่ 2 เดือนกรกฎาคม – ธันวาคม

ลิขสิทธิ์

งานบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
150 หมู่ 6 ถนนศรีจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000
อาคาร 50 ปี เทคนิค ไทย-เยอรมัน ขอนแก่น ชั้น 2 (ห้องแผนกงานวิชาการและวิจัย)
โทรศัพท์ 043-283700 กด 83120 โทรสาร 043-338870
E-mail : jeir.eng.rmuti@gmail.com
Website : https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/JEIRKKC

พิมพ์ที่

โรงพิมพ์ ค้ำคูณดี-ไซน์ 123 หมู่ 8 ตำบลน้ำพอง อำเภอน้ำพอง จังหวัดขอนแก่น 40140
เบอร์โทร 081-1472506, 089-7136877

สาส์นจากคณบดี

ในโอกาสที่วารสาร วิศวกรรมศาสตร์และการวิจัยเชิงนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ได้ดำเนินงานก้าวเข้าสู่ปีที่ 3 นับเป็นช่วงเวลาที่มีความหมายยิ่ง เนื่องจากเป็นทั้งการสะท้อนถึงความมุ่งมั่นในการพัฒนาวารสารอย่างต่อเนื่อง และเป็นก้าวสำคัญในการเตรียมความพร้อมเพื่อเข้าสู่การประเมินคุณภาพวารสารตามเกณฑ์ฐานข้อมูล Thai-Journal Citation Index (TCI)

ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา วารสารฉบับนี้ได้ทำหน้าที่เป็นเวทีทางวิชาการในการเผยแพร่ผลงานวิจัย บทความวิชาการ และนวัตกรรมด้านวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง โดยยึดมั่นในหลักคุณภาพ ความถูกต้องทางวิชาการ และจริยธรรมการวิจัย บทความทุกเรื่องผ่านกระบวนการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิในแต่ละสาขาอย่างรอบคอบ อันเป็นพื้นฐานสำคัญในการยกระดับมาตรฐานวารสารให้เป็นที่ยอมรับในวงวิชาการ

การเตรียมเข้าสู่การประเมินฐาน TCI ในครั้งนี้ มิได้เป็นเพียงเป้าหมายเชิงระบบเท่านั้น หากแต่เป็นโอกาสในการทบทวน พัฒนา และปรับปรุงกระบวนการดำเนินงานของวารสารในทุกมิติ เพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐานสากล ทั้งด้านคุณภาพบทความ ระบบการจัดการวารสาร และความโปร่งใสของกระบวนการพิจารณา ซึ่งจะนำไปสู่การสร้างความเชื่อมั่นแก่ผู้เขียนและผู้อ่านอย่างยั่งยืน

ในนามของคณะวิศวกรรมศาสตร์ ขอขอบคุณคณะกรรมการกองบรรณาธิการ ผู้ทรงคุณวุฒิ ผู้เขียนบทความ ตลอดจนผู้อ่านทุกท่าน ที่มีส่วนร่วมในการสนับสนุนและผลักดันการดำเนินงานของวารสารมาโดยตลอด ความร่วมมือและความมุ่งมั่นของทุกท่านคือพลังสำคัญที่ทำให้วารสารก้าวมาถึงจุดนี้ได้อย่างมั่นคง

ท้ายที่สุดนี้ ขออำนวยพรให้วารสาร วิศวกรรมศาสตร์และการวิจัยเชิงนวัตกรรม ประสบความสำเร็จในการประเมินฐาน TCI และก้าวสู่การเป็นวารสารวิชาการที่มีคุณภาพ ได้รับการยอมรับในระดับประเทศและนานาชาติ อันจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาองค์ความรู้ด้านวิศวกรรม วิทยาศาสตร์ และนวัตกรรมเพื่อสังคมและประเทศชาติในอนาคต

ด้วยความปรารถนาดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภฤกษ์ ชามงคลประดิษฐ์

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

บทบรรณาธิการ

นับเป็นความภาคภูมิใจอย่างยิ่งของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่วารสารวิศวกรรมศาสตร์และการวิจัยเชิงนวัตกรรม ได้ดำเนินการอย่างต่อเนื่องและก้าวเข้าสู่ ปีที่ 3 ฉบับที่ 2 ด้วยความมั่นคง โดยมีเป้าหมายสำคัญคือการเป็นสื่อกลางในการเผยแพร่ผลงานวิจัย บทความวิชาการ และนวัตกรรมด้านวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง ทั้งในระดับประเทศและระดับนานาชาติ เพื่อส่งเสริมการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ ประสบการณ์ และแนวคิดเชิงสร้างสรรค์ที่สามารถตอบโจทย์การพัฒนาเทคโนโลยีและสังคมในยุคปัจจุบัน

วารสารฉบับนี้รวบรวมบทความที่สะท้อนถึงความหลากหลายทางวิชาการและการบูรณาการศาสตร์อย่างชัดเจน อาทิ งานวิจัยด้านวิศวกรรมโยธาที่มุ่งเน้นทั้งคุณสมบัติเชิงกลและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เช่นบทความเรื่อง “ผลกระทบของการแทนที่หินย่อยด้วยกรวดแม่น้ำต่อสมบัติเชิงกลและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของคอนกรีต” และ “อิทธิพลของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อสมบัติเชิงกลของปูนซีเมนต์แมกนีเซียมฟอสเฟตสำหรับงานซ่อมแซมผิวถนนคอนกรีต” ซึ่งสะท้อนถึงการประยุกต์องค์ความรู้ทางวิศวกรรมเพื่อแก้ไขปัญหาเชิงโครงสร้างพื้นฐานได้อย่างเป็นรูปธรรม

ในด้านวิศวกรรมไฟฟ้าและพลังงาน บทความเรื่อง “เปรียบเทียบการใช้พลังงานสำหรับการเดินเครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ร่วมกับเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่ในระบบสูบน้ำดิบ” ได้นำเสนอแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ซึ่งมีความสำคัญต่อการบริหารจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืน ขณะเดียวกัน วารสารยังเปิดพื้นที่ให้กับงานวิจัยเชิงทฤษฎีทางคณิตศาสตร์และสถิติผ่านบทความ “On fuzzy α-ideals in ordered semigroups” ซึ่งช่วยเสริมสร้างฐานองค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ที่เป็นรากฐานสำคัญของงานวิศวกรรมขั้นสูง

บทความทุกเรื่องในวารสารฉบับนี้ได้ผ่านกระบวนการพิจารณาอย่างรอบคอบและเข้มข้นจากผู้ทรงคุณวุฒิในแต่ละสาขา เพื่อรับประกันคุณภาพ ความถูกต้อง และความน่าเชื่อถือทางวิชาการ อันเป็นหัวใจสำคัญของการพัฒนาวารสารให้ก้าวสู่มาตรฐานที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ในโอกาสนี้ คณะผู้จัดทำขอขอบคุณคณะกรรมการกองบรรณาธิการ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ผู้เขียนบทความ และผู้อ่านทุกท่าน ที่มีส่วนร่วมในการสนับสนุนและผลักดันการดำเนินงานของวารสาร วิศวกรรมศาสตร์และการวิจัยเชิงนวัตกรรม หวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารฉบับนี้จะเป็นแหล่งข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการเรียนรู้ การสืบค้น และการต่อยอดองค์ความรู้ด้านวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ เพื่อการพัฒนาเชิงนวัตกรรมที่สร้างคุณค่าให้กับสังคมในอนาคต

ด้วยความเคารพอย่างสูง

รองศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร แสงอรุณ

บรรณาธิการวารสาร

สารบัญ

บทความ **หน้า**

- **ผลกระทบของการแทนที่หินย่อยด้วยกรวดแม่น้ำต่อสมบัติเชิงกลและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของคอนกรีต** 1
  นภาพร พิมพ์ทอง และเจริญชัย ฤทธิรุทธ

- On fuzzy α-ideals in ordered semigroups 9
  Nuchanat Tiprachot, Somsak Lekkoksung and Nareupanat Lekkoksung

- **อิทธิพลของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อสมบัติเชิงกลของปูนซีเมนต์ แมกนีเซียมฟอสเฟตสำหรับงานซ่อมแซมผิวถนนคอนกรีต** 16
  ธนัญญา สังสีแก้ว และเจริญชัย ฤทธิรุทธ

- **เปรียบเทียบการใช้พลังงานสำหรับการเดินเครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ร่วมกับเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่ในระบบสูบน้ำดิบ** 25
  วิวัฒน์ อ่อนนาคคล้ำ

ผลกระทบของการแทนที่หินย่อยด้วยกรวดแม่น้ำต่อสมบัติเชิงกลและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของคอนกรีต

Effect of crushed limestone replacement with river gravel on the mechanical properties and economic viability of concrete

นภาพร พิมพ์ทอง และ เจริญชัย ฤทธิรุทธ*

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40000

*Corresponding Author: Charoenchai.ri@rmuti.ac.th

Received 8 July 2025; Received in revised form 3 September 2025; Accepted 1 October 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลกระทบเชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของการแทนที่หินย่อยบางส่วนด้วยกรวดแม่น้ำ ที่จัดหาได้ในท้องถิ่น ต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีต โดยศึกษาภายใต้เงื่อนไขที่จำลองการปฏิบัติงานจริงซึ่งมีการปรับปริมาณน้ำเพื่อให้ได้ความสามารถในการเทได้ที่เหมาะสม การทดลองได้ออกแบบส่วนผสมโดยแทนที่หินย่อยด้วยกรวดแม่น้ำในอัตราส่วน 0%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% และ 100% โดยน้ำหนักของมวลรวมหยาบ ซึ่งส่งผลให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) มีค่าลดลงจาก 0.457 ในส่วนผสมที่ใช้หินย่อย 100% เหลือ 0.424 ในส่วนผสมที่ใช้กรวดแม่น้ำ 100% ผลการทดสอบที่อายุ 28 วัน พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงอย่างเป็นระบบตามปริมาณกรวดแม่น้ำที่เพิ่มขึ้น จาก 278 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) ในส่วนผสมควบคุม เหลือ 188 ksc ในส่วนผสมที่ใช้กรวดแม่น้ำ 100% ซึ่งคิดเป็นการลดลงประมาณ 32% ในทางตรงกันข้าม กำลังต้านทานแรงดึงแบบผ่าซีกกลับมีพฤติกรรมที่แตกต่างออกไป โดยมีค่าสูงสุดที่ 29.7 ksc ในส่วนผสมที่ใช้กรวดแม่น้ำ 70% (30C70G) ซึ่งสูงกว่าส่วนผสมควบคุมถึง 16% การวิเคราะห์เชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ชี้ให้เห็นว่า ส่วนผสมที่แทนที่ด้วยกรวดแม่น้ำ 50% (50C50G) เป็นจุดที่เหมาะสมที่สุด โดยสามารถรักษากำลังรับแรงอัดได้ถึง 250 ksc (98% ของกำลังที่ออกแบบ) ในขณะที่สามารถลดต้นทุนค่ามวลรวมหยาบได้ประมาณ 29.7% เมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ใช้หินย่อยเพียงอย่างเดียว ดังนั้น การใช้กรวดแม่น้ำแทนที่หินย่อยบางส่วนจึงเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพในการผลิตคอนกรีตสำหรับงานโครงสร้างทั่วไปในพื้นที่ที่สามารถจัดหากรวดแม่น้ำได้ในราคาที่ต่ำกว่า

คำสำคัญ: มวลรวมหยาบ, กรวดแม่น้ำ, หินย่อย, สมบัติเชิงกล, การวิเคราะห์ต้นทุน

Abstract

This research aims to evaluate the technical and economic effects of partially replacing crushed limestone (C) with locally sourced river gravel (G) on the mechanical properties of concrete, under conditions simulating practical field applications where water content is adjusted to achieve suitable workability. The experimental program involved mix designs with river gravel replacement levels of 0%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, and 100% by weight of

coarse aggregate. This adjustment resulted in a decrease in the water-to-cement (W/C) ratio from 0.457 for the 100% crushed stone mix to 0.424 for the 100% river gravel mix. The 28-day test results indicated a systematic decrease in compressive strength as the river gravel content increased, from 278 ksc in the control mix to 188 ksc in the 100% gravel mix, a reduction of approximately 32%. Conversely, the splitting tensile strength exhibited a different behavior, peaking at 29.7 ksc for the mix with 70% river gravel (30C70G), which was 16% higher than the control mix. A techno-economic analysis identified the 50% replacement mix (50C50G) as the optimal balance, achieving a compressive strength of 250 ksc (98% of the design strength) while reducing coarse aggregate costs by approximately 29.7% compared to the mix using only crushed stone. Therefore, the partial replacement of crushed stone with river gravel presents a viable alternative for producing structural concrete in regions where river gravel is an economically advantageous local resource.

Keywords: Coarse aggregate, River gravel, Crushed stone, Mechanical properties, Cost analysis

บทนำ

คอนกรีตนับเป็นวัสดุโครงสร้างพื้นฐานที่มีบทบาทสำคัญที่สุดในอุตสาหกรรมการก่อสร้างสมัยใหม่ โดยมีมวลรวม เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งคิดเป็นร้อยละ 60–75 ของปริมาตรรวมทั้งหมด คุณสมบัติและต้นทุนของมวลรวมจึงเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกล ความทนทาน และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของคอนกรีต [1] โดยทั่วไป มวลรวมหยาบที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างคือหินย่อย (crushed limestone, C) ซึ่งได้จากการระเบิดและย่อยหินจากแหล่งหินธรรมชาติ ลักษณะเหลี่ยมมุมและผิวหยาบของหินย่อยส่งเสริมการยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวม ทำให้คอนกรีตที่ใช้หินย่อยมีความแข็งแรงสูง ทั้งในแง่กำลังอัดและกำลังดัด [2-3] อย่างไรก็ตาม ในหลายพื้นที่ของประเทศไทย โดยเฉพาะพื้นที่ราบลุ่มแม่น้ำ การจัดหาหินย่อยมักมีต้นทุนสูงจากค่าขนส่ง ขณะที่กรวดแม่น้ำ (river gravel, G) เป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในท้องถิ่นและมีราคาถูกกว่า จึงนับเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการนำมาใช้แทนหินย่อยเพื่อลดต้นทุนการก่อสร้าง [4-5]

ความแตกต่างทางกายภาพระหว่างหินย่อยและกรวดแม่น้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมสมบัติของคอนกรีต โดยหินย่อยมีพื้นผิวหยาบและเหลี่ยมมุมซึ่งก่อให้เกิดการยึดเหนี่ยวเชิงกล (mechanical interlock) ที่แข็งแรงและช่วยเพิ่มคุณภาพของบริเวณรอยต่อระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์ (interfacial transition zone: ITZ) ส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของคอนกรีต ในทางตรงกันข้าม กรวดแม่น้ำมีลักษณะกลมมนและผิวเรียบจากการขัดสีตามธรรมชาติ ทำให้แรงยึดหน่วงกับซีเมนต์เพสต์ลดลงและอาจกลายเป็นจุดอ่อนของคอนกรีต งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเมื่อใช้กรวดแม่น้ำแทนหินย่อยทั้งหมด กำลังอัดของคอนกรีตมักลดลงร้อยละ 4-7 ซึ่งสอดคล้องกับหลักการดังกล่าว [5-6]

แม้จะมีข้อด้อยด้านกำลังรับแรง แต่กรวดแม่น้ำก็มีข้อดีที่สำคัญในด้านสมบัติของคอนกรีตสด กล่าวคือ รูปทรงกลมมนช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคมวลรวม ทำให้ส่วนผสมคอนกรีตมีความสามารถในการเทได้ดีขึ้น ดังนั้น ในการผลิตคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเท่ากัน คอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำจะต้องการปริมาณน้ำน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้หินย่อย ซึ่งปริมาณน้ำที่ลดลงนี้ส่งผลให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ลดลง และตามกฎของ Abram’s law การลดลงของ W/C จะส่งผลให้กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์สูงขึ้น [7-8]

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่างานวิจัยในห้องปฏิบัติการส่วนใหญ่มักควบคุมอัตราส่วน W/C ให้

คงที่เพื่อแยกศึกษาผลกระทบของชนิดมวลรวม แม้จะช่วยให้เข้าใจกลไกได้ชัดเจน แต่ไม่สะท้อนสภาวะจริงที่ผู้ควบคุมงานมักปรับปริมาณน้ำให้เหมาะกับการทำงาน ส่งผลให้อัตราส่วน W/C เปลี่ยนแปลงเมื่อแทนที่หินย่อยด้วยกรวดแม่น้ำ จึงเกิดช่องว่างองค์ความรู้เกี่ยวกับผลกระทบสุทธิ (net effect) ที่ประกอบด้วยสองด้านที่ขัดแย้งกัน คือ (1) ผลเชิงลบจากแรงยึดหน่วงต่ำของกรวดแม่น้ำ และ (2) ผลเชิงบวกจากการลดลงของ W/C งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลกระทบของการแทนที่หินย่อยด้วยกรวดแม่น้ำในสัดส่วนต่าง ๆ ต่อกำลังอัดและกำลังต้านทานแรงดึงแบบผ่าซีก วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของ W/C ที่เกิดขึ้น และทำการวิเคราะห์เชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์เพื่อหาสัดส่วนการแทนที่ที่เหมาะสมที่สุด ทั้งด้านสมบัติเชิงกลและความคุ้มค่า

วัสดุและวิธีการทดลอง

1. วัสดุที่ใช้

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ทรายแม่น้ำ (มวลรวมละเอียด), น้ำประปา, และมวลรวมหยาบ 2 ชนิด ได้แก่ หินย่อยดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นหินปูนย่อยเบอร์ 3/4 นิ้ว ขนาดใหญ่สุด 19 มิลลิเมตร จากแหล่ง อ.ภูผาม่าน จ.ขอนแก่น

รูปที่ 1 หินย่อย จังหวัดขอนแก่น

กรวดแม่น้ำดังแสดงในรูปที่ 2 เป็นกรวดแม่น้ำโขงเบอร์ 1 ขนาดใหญ่สุด 25 มิลลิเมตร จากแหล่ง อ.หว้านใหญ่ จ.มุกดาหาร ในการศึกษานี้ มวลรวมหยาบทั้งสองชนิดถูกนำมาใช้ ตามสภาพที่จัดหาได้เพื่อสะท้อนถึงการใช้งานจริงในพื้นที่

รูปที่ 2 กรวดแม่น้ำโขง จังหวัดมุกดาหาร

2. การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสมควบคุม (100C0G) ถูกออกแบบตามมาตรฐาน ACI 211.1-91 ให้มีกำลังรับแรงอัดเป้าหมายที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 255 ksc (25.0 MPa) จากนั้นจึงออกแบบส่วนผสมอื่นๆ โดยการแทนที่หินย่อยด้วยกรวดแม่น้ำตามสัดส่วนโดยน้ำหนักที่กำหนด ปริมาณปูนซีเมนต์และทรายถูกกำหนดให้คงที่ในทุกส่วนผสม ส่วนปริมาณน้ำได้รับการปรับลดลงในส่วนผสมที่มีสัดส่วนกรวดแม่น้ำสูงขึ้น โดยค่ายุบตัวกำหนดไว้ที่ 10 ± 2.5 เซนติเมตร รายละเอียดของสัดส่วนผสมและอัตราส่วน W/C ที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบ ต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

สัดส่วนผสม	ซีเมนต์ (kg.)	ทราย (kg.)	หินย่อย (kg.)	กรวดแม่น้ำ (kg.)	น้ำ (kg.)
100C0G	328	851	1028	0	150
50C50G	328	851	514	514	147
40C60G	328	851	411	617	145
30C70G	328	851	308	720	143
20C80G	328	851	206	822	140
10C90G	328	851	103	925	140
0C100G	328	851	0	1028	139

3. การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุได้ดำเนินการตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การวิเคราะห์ขนาดคละของมวลรวม (AASHTO T 27), การหาค่าดัชนีความแบนและความยาว (BS 812), การทดสอบความต้านทานการสึกหรอโดยเครื่องลอสแอนเจลีส (ASTM C 131), การหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด (AASHTO T 84) และมวลรวมหยาบ (AASHTO T 87) รวมถึงการหาค่าหน่วยน้ำหนักและช่องว่างในมวลรวม (ASTM C29/C29M) สำหรับการเตรียมตัวอย่างคอนกรีต ได้ทำการหล่อตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM C192/C192M-14 โดยใช้ตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 10×10×10 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 14 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39/C39M-21 และตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาด 15×30 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงแบบผ่าซีก (splitting tensile strength) ที่อายุ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C496/C496M–17

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

1. คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม

ผลการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดแสดงในตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ข้อสังเกตที่สำคัญคือ หินย่อย (C) มีค่าความถ่วงจำเพาะรวม (2.71) และร้อยละช่องว่าง (41%) สูงกว่ากรวดแม่น้ำ (G) ซึ่งมีค่า 2.61 และ 35% ตามลำดับ ความแตกต่างนี้สะท้อนถึงลักษณะทางกายภาพที่ต่างกัน โดยหินย่อยมีรูปทรงเหลี่ยมมุมทำให้มีการจัดเรียงตัวที่ไม่แน่นเท่ากรวดที่มีลักษณะกลมมนกว่า ซึ่งส่งผลให้มีปริมาณช่องว่างระหว่างอนุภาคมากกว่า [9]

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมหยาบ

ผลการทดสอบคุณสมบัติ	หินย่อย	กรวดแม่น้ำ
ค่าโมดูลัสความละเอียด (fineness modulus)	8.26	9.09
ดัชนีความแบน %	20	27
ดัชนีความยาว %	27	25
ร้อยละความต้านทานการขัดสี %	27.8	25.2
ความถ่วงจำเพาะรวม	2.71	2.61
ร้อยละช่องว่าง	41	35

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมละเอียด

รายการ	ผลการทดสอบ
ค่าโมดูลัสความละเอียด (fineness modulus)	2.50
ค่าเฉลี่ย ความถ่วงจำเพาะ สภาพ (oven-dry)	2.60
ค่าเฉลี่ย ความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD)	2.62
ค่าเฉลี่ย ความถ่วงจำเพาะแท้จริง	2.67
ค่าเฉลี่ยการดูดซึมน้ำ (%)	1.05

2. กำลังรับแรงอัด (compressive strength)

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 14 และ 28 วัน แสดงในตารางที่ 4 และ 5 ตามลำดับ แนวโน้มที่ชัดเจนคือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อสัดส่วนของกรวดแม่น้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น โดยกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ลดลงจาก 278 ksc ในส่วนผสมควบคุม (100C0G) เหลือเพียง 188 ksc ในส่วนผสมที่ใช้กรวดแม่น้ำ 100% (0C100G) คิดเป็นการลดลงถึง 32.4%

การลดลงของกำลังอัดนี้มีสาเหตุหลักมาจากคุณสมบัติทางกายภาพของกรวดแม่น้ำที่มีผิวเรียบและรูปทรงกลมมน ซึ่งส่งผลให้เกิดแรงยึดหน่วง (bond strength) ที่อ่อนแอบริเวณรอยต่อระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์ (ITZ) เมื่อคอนกรีตรับแรงอัด รอยร้าวขนาดเล็ก (microcracks) มีแนวโน้มที่จะเริ่มต้นและขยายตัวไปตามแนวรอยต่อนี้ได้ง่ายกว่าเมื่อเทียบกับหินย่อยที่มีผิวหยาบและเป็นเหลี่ยมมุมซึ่งสร้างการขัดประสานเชิงกลที่ดีกว่า [10]

อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์จำเป็นต้องพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วน W/C ที่เปลี่ยนแปลงไปควบคู่กันด้วย จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนกรวดแม่น้ำ ปริมาณน้ำที่ต้องการเพื่อให้ได้ความสามารถในการเทได้ที่เหมาะสมลดลง ส่งผลให้อัตราส่วน W/C ลดลงจาก 0.457 เป็น 0.424 การลดลงของ W/C นี้โดยทฤษฎีแล้วจะทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความหนาแน่นสูงขึ้นและมีกำลังสูงขึ้น ดังนั้นกำลังอัดที่วัดได้จึงเป็นผลลัพธ์สุทธิของสองปัจจัยที่ขัดแย้งกัน คือ (1) การลดลงของกำลังเนื่องจากแรงยึดหน่วงที่อ่อนแอของกรวด และ (2) การเพิ่มขึ้นของกำลังเนื่องจากคุณภาพของซีเมนต์เพสต์ที่ดีขึ้นจาก W/C ที่ต่ำลง ผลการทดลองที่แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดยังคงลดลงอย่างชัดเจน บ่งชี้ว่าผลกระทบเชิงลบจากคุณสมบัติของผิวกรวดแม่น้ำมีอิทธิพลมากกว่าผลกระทบเชิงบวกจากการลดลงของอัตราส่วน W/C ในการศึกษานี้

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ที่อายุ 14 วัน

สัดส่วนผสม	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (ksc.)	กำลังรับแรงอัด/กำลังรับแรงอัดที่กำหนด
100C0G	260	1.02
50C50G	245	0.96
40C60G	234	0.92
30C70G	229	0.90
20C80G	211	0.83
10C90G	190	0.74
0C100G	176	0.69

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน

สัดส่วนผสม	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (ksc.)	กำลังรับแรงอัด/กำลังรับแรงอัดที่กำหนด
100C0G	278	1.09
50C50G	250	0.98
40C60G	244	0.96
30C70G	237	0.93
20C80G	220	0.86
10C90G	203	0.80
0C100G	188	0.74

3. กำลังต้านทานแรงดึงแบบผ่าซีก (splitting tensile strength)

ตารางที่ 6 แสดงผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึง พบพฤติกรรมที่น่าสนใจและแตกต่างจากกำลังรับแรงอัดอย่างชัดเจน กล่าวคือ เมื่อเพิ่มสัดส่วนการแทนที่ด้วยกรวดแม่น้ำ ค่ากำลังต้านทานแรงดึงกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่สัดส่วน 30C70G (กรวด 70%) ซึ่งให้ค่ากำลังดึงสูงถึง 29.7 ksc สูงกว่าส่วนผสมควบคุม (25.5 ksc) ถึง 16.5% หลังจากนั้นค่ากำลังดึงจึงเริ่มลดลง พฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) นี้ชี้ให้เห็นว่ากลไกการต้านทานแรงดึงและแรงอัดในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมผสมนั้นมีความซับซ้อน สมมติฐานหนึ่งที่เป็นไปได้คือ การผสมผสานระหว่างหินย่อยที่มีเหลี่ยมมุมกับกรวดที่มีความกลมมนในอัตราส่วนที่เหมาะสม (เช่น 30C70G) อาจช่วยปรับปรุงการจัดเรียงตัวของโครงสร้างมวลรวม (aggregate skeleton) ให้มีความหนาแน่นและต่อเนื่องกันมากขึ้น ซึ่งการจัดเรียงตัวที่ดีนี้อาจสร้างเส้นทางการขยายตัวของรอยร้าวที่คดเคี้ยวกว่า (more tortuous crack path) เมื่อรับแรงดึง ทำให้ต้องใช้พลังงานในการแตกหักสูงขึ้น ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงดึงสูงขึ้นตามไปด้วย [11]

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน

สัดส่วนผสม	ความหนาแน่นเฉลี่ย (kg/m^3)	กำลังรับแรงดึงเฉลี่ย (ksc.)
100C0G	2460	25.5
50C50G	2440	26.1
40C60G	2450	27.9
30C70G	2410	29.7
20C80G	2430	26.1
10C90G	2440	25.5
0C100G	2390	24.7

4. การวิเคราะห์เชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ (techno-economic analysis)

ผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 7 พบว่าการแทนที่หินย่อยด้วยกรวดแม่น้ำสามารถลดต้นทุนค่ามวลรวมหยาบได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยการใช้กรวดแม่น้ำ 100% สามารถลดต้นทุนได้ถึง 59% เมื่อเทียบกับการใช้หินย่อย 100%

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์ต้นทุนมวลรวมหยาบต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม. (ราคาประมาณการ ณ ไตรมาส 1 ปี 2568)

สัดส่วนผสม	ราคา G (บ.)	ราคา C (บ.)	รวมราคา (บ.)	% การลดต้นทุน (เทียบกับ 100C0G) (%)
100C0G	0	763.27	763.27	0.0
50C50G	155.62	381.64	537.26	29.7
40C60G	186.81	305.16	491.97	35.5
30C70G	217.99	228.68	446.67	41.5
20C80G	248.87	152.95	401.82	47.4
10C90G	280.06	76.48	356.53	53.3
0C100G	311.24	0.00	311.24	59.2

หมายเหตุ คำนวณจากราคาประมาณการ: กรวดแม่น้ำ 550 บาท/ลบ.ม., หินย่อย 1,200 บาท/ลบ.ม. (รวมค่าขนส่งมายังแหล่งผลิตสมมติใน จ.ขอนแก่น) โดยอ้างอิงข้อมูลจากดัชนีราคาวัสดุก่อสร้าง

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ในตารางที่ 5 และต้นทุน ในตารางที่ 7 จะเห็นได้ว่าส่วนผสม 50C50G เป็นจุดที่น่าสนใจที่สุดในเชิงปฏิบัติ โดยให้กำลังอัด 250 ksc ซึ่งใกล้เคียงกับกำลังที่ออกแบบ (255 ksc) หรือคิดเป็น 98% ของเป้าหมาย แต่สามารถลดต้นทุนค่ามวลรวมหยาบได้ถึง 29.7% ในขณะที่การเพิ่มสัดส่วนกรวดแม่น้ำมากกว่านี้ แม้จะช่วยลดต้นทุนได้มากขึ้น แต่ก็ต้องแลกมากับกำลังอัดที่ลดลงต่ำกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับงานโครงสร้างทั่วไป

สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาผลกระทบของการแทนที่หินย่อยด้วยกรวดแม่น้ำต่อสมบัติเชิงกลและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของคอนกรีต สามารถสรุปผลได้ดังนี้

ผลต่อกำลังรับแรงอัด การเพิ่มสัดส่วนการแทนที่หินย่อยด้วยกรวดแม่น้ำส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงอย่างเป็นระบบ สาเหตุหลักมาจากแรงยึดหน่วงที่อ่อนแอกว่าบริเวณรอยต่อระหว่างผิวกรวดที่เรียบมนกับซีเมนต์เพสต์ อย่างไรก็ตาม ผลกระทบเชิงลบนี้ได้รับการบรรเทาลงบางส่วนจากการที่ส่วนผสมที่ใช้กรวดต้องการน้ำน้อยลง ส่งผลให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดต่ำลง ซึ่งช่วยเพิ่มคุณภาพของเนื้อซีเมนต์เพสต์

ผลต่อกำลังต้านทานแรงดึง กำลังต้านทานแรงดึงแบบผ่าซีกมีพฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นและจุดสูงสุดที่สัดส่วนการแทนที่ด้วยกรวด 70% ก่อนที่จะลดลง ซึ่งบ่งชี้ว่าการผสมผสานมวลรวมสองชนิดในอัตราส่วนที่เหมาะสมอาจช่วยปรับปรุงโครงสร้างภายในเพื่อต้านทานการขยายตัวของรอยร้าวได้ดีขึ้น

ความคุ้มค่าเชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ การวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่าสัดส่วนการแทนที่ 50% (50C50G) เป็นทางเลือกที่สมดุลและเหมาะสมที่สุดในทางปฏิบัติ โดยสามารถรักษากำลังรับแรงอัดได้สูงถึง 98% ของกำลังที่ออกแบบไว้ ในขณะที่สามารถลด

ต้นทุนค่ามวลรวมหยาบได้เกือบ 30% ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับงานก่อสร้างในพื้นที่ที่สามารถจัดหากรวดแม่น้ำได้สะดวกและมีราคาถูก

การใช้กรวดแม่น้ำเป็นส่วนผสมทดแทนหินย่อยบางส่วนเป็นกลยุทธ์ที่มีศักยภาพในการลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตโดยยังคงสมบัติเชิงโครงสร้างที่ยอมรับได้ อย่างไรก็ตาม ผู้ออกแบบควรพิจารณาถึงการลดลงของกำลังอัดและทำการออกแบบส่วนผสมให้เหมาะสมกับความต้องการของโครงการ

ข้อเสนอแนะ

สำหรับการศึกษาต่อไปควรมุ่งเน้นการประเมินสมบัติความทนทานระยะยาวของคอนกรีตที่ผสมกรวดแม่น้ำ เช่น ความต้านทานการซึมผ่าน การกัดกร่อนเหล็กเสริม และการทนต่อวัฏจักรแช่-เยือกแข็ง ตลอดจนการพัฒนาวิธีปรับปรุงคุณภาพของกรวดเพื่อเสริมแรงยึดหน่วงระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์ นอกจากนี้ การวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมเชิงวงจรชีวิตและการผสมผสานวัสดุทดแทนชนิดอื่นร่วมกับกรวดแม่น้ำ จะช่วยสร้างองค์ความรู้ที่รอบด้านและสนับสนุนการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืนในงานคอนกรีตต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน สาขาวิศวกรรมโยธา และฝ่ายตรวจสอบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ศูนย์สร้างทางขอนแก่น กรมทางหลวง ที่ให้การสนับสนุนวัสดุ อุปกรณ์ และห้องปฏิบัติการสำหรับการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Muhit, I.B., Haque, S. and Alam, M.R. (2013). Influence of crushed coarse aggregates on properties of concrete, *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, vol. 1(5), pp 103-106.

[2] Poloju, K.K., Anil, V. and Manchiryal, R. (2017). Properties of concrete as influenced by shape and texture of fine aggregate, *American Journal of Applied Scientific Research*, vol. 3(3), pp. 28-36.

[3] Kadir, S.S. (2006). Properties of high-strength fibrous concrete with crushed stone as coarse aggregate, *Journal of Zankoy Sulaimani - Part A*, vol. 9(1), pp. 59-68.

[4] Ezawa M. (1967) On the beneficiation of gravel and crushed stone, *FLOTATION*, vol. 1967(33), pp. 36-42.

[5] Limantara, A.D., Widodo, A., Winarto, S., Krisnawati, L.D. and Mudjanarko, S.W. (2018). Optimizing the use of natural gravel brantas river as normal concrete mixed with quality fc = 19.3 Mpa, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 140, pp. 012104.

[6] Silva, M.A., Pepe, M., Andrade, R.G.M.D., Pfeil, M. and Filho, R.D.T. (2017). Rheological and mechanical behavior of high strength steel fiber-river gravel self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, vol. 150, pp. 606–618.

[7] Li, C., Sun, Q. and Li, F. (2011). Proportion design of concrete with gravel-crushed Proto-Machine-Made sand, *Advanced Materials Research*, vols. 295-297, pp. 436-439.

[8] Odeyemi, S.O. (2021). Mechanical properties of granite-gravel porous concrete, *International Journal of Engineering Research in Africa*, vol. 57, pp. 115-123.

[9] Daukšys, M., Dunauskas, A. and Juočiūnas S. (2023). Effect of coarse aggregate characteristics on the permeability properties of pervious concrete, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1276, pp. 012004.

[10] Kosaka, Y. and Tanigawa, Y. (1975). Effect of coarse aggregate on fracture of concrete : part 2 : study on microscopic obserbation, *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, vol. 231, pp. 1-11.

[11] Yehia, S., Abdelfatah, A. and Mansour, D. (2020). Effect of aggregate type and specimen configuration on concrete compressive strength, *Crystals*, vol. 10(7), pp. 625.

On fuzzy α-ideals in ordered semigroups

Nuchanat Tiprachot[1], Somsak Lekkoksung[2] and Nareupanat Lekkoksung[2*]

[1] Demonstration School of Khon Kaen University, Faculty of Education, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

[2] Division of Mathematics, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus, Khon Kaen 40000, Thailand

*Corresponding Author: nareupanat.le@rmuti.ac.th

Received 14 August 2025; Received in revised form 4 October 2025; Accepted 10 October 2025

Abstract

The concept of fuzzy α-ideals in ordered semigroups is introduced as a generalized concept of several fuzzy ideals. Based on the reduction relations of full words, we provide the interconnection of among various α-ideals in ordered semigroups. Moreover, a description of fuzzy α-ideals in ordered semigroups is provided through an associative binary operation defined on the set of all fuzzy sets.

Keywords: ordered semigroup; fuzzy ideal; fuzzy α-ideal

1. Introduction

The concept of ordered semigroups forms an associative structure that has been extensively studied in recent years. A fundamental tool used in the investigation of ordered semigroups is the concept of *ideals*, of which several types have been introduced to explore structural properties.

One significant generalization of ideals in ordered semigroups is the concept of α-ideals, first introduced by Towwun and Changphas in 2013. They provided a comprehensive description of the fundamental properties of α-ideals in this context (see [1]). Subsequently, in 2022, Tiprachot *et al.* characterized various regularity conditions in ordered semigroups using the framework of α-ideals. In the same study, the interconnections among α-ideals were also examined (see [2]). In 2025, Lekkoksung generalized α-ideals to the notion of partition ideal elements. This

notion can illustrate the complexity of the connections of several α-ideals (see [3]).

The concept of *fuzzy sets* was originally introduced by Zadeh in 1965 as a generalization of classical (crisp) sets. While membership in crisp sets is binary (0 or 1), fuzzy sets allow degrees of membership ranging between 0 and 1. This framework has been widely applied in mathematics to generalize various algebraic structures. In particular, fuzzy ideals in ordered semigroups have been studied extensively (see [4]).

In this paper, we introduce the concept of fuzzy α-ideals in ordered semigroups, as a unification and generalization of several existing types of fuzzy ideals. We also investigate the interrelationships among fuzzy α-ideals using the reduction relation on full words as a central tool. We also characterize fuzzy α-ideals in ordered semigroups through a particular associative binary operation.

2. Preliminaries

In this section, we review the notions of full words, including the reduction relations of full words, and ordered semigroups. Some fundamental properties of these concepts are also provided. For more details, the readers can find all the terminologies needed in this paper in [1-3, 5-10]. Throughout this paper, we denote the set of all natural numbers by $\mathbb{N}$, that is, $\mathbb{N} := \{1,2,3,\dots\}$. Moreover, for any $n \in \mathbb{N}$, the set $\{1,2,3,\dots,n\}$ is denoted by $[n]$.

For any set X, we let X^* the *free monoid* over X. The neutral element of X^* is called the *empty word* and is denoted by ε. The *free semigroup* over X is denoted by X^+, that is, $X^+ = X^* \setminus \{\varepsilon\}$. The length of any $\alpha \in X^*$ is denoted by $|\alpha|$, where $|\alpha| = 0$ if $\alpha = \varepsilon$. The free semigroup over $\{0,1\}$ is denoted by B. We define $\mathrm{F} := \{0,1\}^* \setminus (\{0\}^* \cup \{1\}^*)$ to be the set of all *full words*.

Let $C = \{0,1\} \cup \{\varepsilon\}$. We define a totally order $\leq_C$ to be the set containing all identity relations on C including $(\varepsilon,0),(\varepsilon,1)$ and $(0,1)$. Then, we obtain a totally ordered set $\mathbf{C} := \langle C; \leq_C \rangle$.

For any $\alpha \in B$, and $n \in \mathbb{N}$ with $n \geq |\alpha|$, an n-tuple $(\alpha_1,\dots,\alpha_n)$ over C is called a *canonical tuple* of α with length n if $\alpha = \alpha_1 \cdots \alpha_n$, $\alpha_1 \neq \varepsilon$, and, if $\alpha_i \neq \varepsilon$, then $\alpha_{i-1} \neq 1$ for all $1 < i \leq n$. The set of all canonical tuple of α with length n is denoted by $\mathrm{C}_n(\alpha)$.

Let $\alpha,\beta \in \mathrm{B}$ and $n \geq \max(|\alpha|,|\beta|)$. Suppose that $\boldsymbol{u} = (u_1,\dots,u_n)$ and $\boldsymbol{v} = (v_1,\dots,v_n)$ be a canonical tuple of α and β with length n, respectively. We say that $\boldsymbol{u}$ is a *reduction* of $\boldsymbol{v}$, denoted by $\boldsymbol{u} \leq \boldsymbol{v}$ if $u_i \leq_C v_i$ for all $i \in [n]$. In particular, if $\alpha,\beta \in \mathrm{F}$, we say that α is a *reduction* of β, denoted by $\alpha \leq \beta$, if $\boldsymbol{u} \leq \boldsymbol{v}$ for some $\boldsymbol{u} \in \mathrm{C}_{|\beta|}(\alpha)$ and $\boldsymbol{v} \in \mathrm{C}_{|\beta|}(\beta)$ (see [3]).

It was proved that the set of all full words F together with the reduction relation $\leq$ forms a partially ordered set.

Let $\alpha \in \mathrm{B}$. For any $n \geq |\alpha|$ and $\boldsymbol{u} = (u_1, \ldots, u_n) \in \mathrm{C}_n(\alpha)$, we denote

$$1_n(\boldsymbol{u}) := \{i \in [n] : u_i = 1\}.$$

When $n = |\alpha|$ and $\boldsymbol{u} \in \mathrm{C}_{|\alpha|}(\alpha)$, we simply write $1(\alpha)$ for $1_n(\boldsymbol{u})$.

An *ordered semigroup* is a mathematical structure $\langle S; \cdot, \leq \rangle$ consisting of a nonempty set S, an associative operation $\cdot$, and a partial order $\leq$ on S such that $\leq$ preserves the operation $\cdot$. By the associativity of the operation $\cdot$, we can write any product of elements S without using parentheses. For any elements $a_1, \ldots, a_n \in S$, we simply write the product $a_1 \cdots a_n$ by a_1^n. We usually denote an ordered semigroup $\langle S; \cdot, \leq \rangle$ with the boldface $\mathbf{S}$ of its underlying set.

The binary operation $\cdot$ on an ordered semigroup $\mathbf{S}$ can be extended as follows: for any subsets A and B of S, we define $AB = \{ab : a \in A, b \in B\}$. We note here that $AB = \emptyset$ if A or B is an empty set. Moreover, the partial order of $\mathbf{S}$ induces the operator $(\cdot]$ defined by $(A] = \{x \in S : x \leq a \text{ for some } a \in A\}$ for every subset A of S. We also note that $(\emptyset] = \emptyset$.

Next, we present some notation used to compute the multiplication of our objects of interest.

Let $\mathbf{S}$ be an ordered semigroup, and $\alpha = \alpha_1 \cdots \alpha_n \in \mathrm{B}$, where $|\alpha| = n$ for some $n \in \mathbb{N}$. A mapping $\overline{\alpha} : S \to S$ is defined by $\overline{\alpha}(A) := X_1 \cdots X_n$ for any $A \subseteq S$, where

$$X_i = \begin{cases} A \text{ if } \alpha_i = 1, \\ S \text{ if } \alpha_i = 0, \end{cases}$$

for all $i \in [n]$.

The concept of α-ideals in ordered semigroups is defined as follows. Let $\mathbf{S}$ be an ordered semigroup, and A a nonempty subset of S such that $(A] \subseteq A$. Then, A is said to be an *α-ideal* of $\mathbf{S}$ if A is a subsemigroup of $\mathbf{S}$, that is, $AA \subseteq A$, and $\overline{\alpha}(A) \subseteq A$. By this definition, we can see that several ideals in ordered semigroups can be viewed as a special case of α-ideals. For example, an (m, n)-ideal is a 1^m01^n-ideal, and an n-interior ideal is a 01^n0-ideal.

Next, we recall the concept of fuzzy sets and fuzzy ideals in ordered semigroups. Let X be a nonempty set. A mapping $f : X \to [0,1]$ is called a *fuzzy set* of X. We denote the set of all fuzzy sets of X by $\mathrm{F}(X)$. A well-known fuzzy set is the *characteristic function* of A in X, and is defined by, for any $A \subseteq X$,

$$\chi_A(x) = \begin{cases} 1 \text{ if } x \in A, \\ 0 \text{ otherwise}, \end{cases}$$

for all $x \in X$. For any $u \in [0,1]$, can be also defined a fuzzy set of X by $u(x) = u$ for all $x \in X$. We define a relation $\subseteq$ on the set $\mathrm{F}(X)$ as follows: $f \subseteq g$ if $f(x) \leq g(x)$ for all $x \in X$.

The concept of fuzzy sets can be applied to ordered semigroups as follows. Let $\mathbf{S}$ be an ordered semigroup. For $f \in \mathrm{F}(\mathbf{S})$, we

mean a fuzzy set f of the underlying set of $\mathbf{S}$. For any $x \in S$, we define $\mathbf{S}_a := \{(u,v) \in S \times S : a \leq uv\}$. We define a binary operation $\circ$ on $\mathrm{F}(\mathbf{S})$ as follows. For any $f, g \in F(S)$,

$$(f \circ g)(x) = \begin{cases} \bigvee\limits_{(u,v)\in S_x} [f(u) \wedge g(v)] & \text{if } \mathbf{S}_x \neq \emptyset, \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases}$$

for all $x \in S$. We note here that the operations $\vee$ and $\wedge$ are a supremum and an infimum, respectively.

It was proved in [5, 6] that the operation $\circ$ defined on $\mathrm{F}(\mathbf{S})$ is associative. Therefore, the mapping $\overline{\alpha}$ defined on S can be extended to $\mathrm{F}(\mathbf{S})$ as follows. Let $\alpha = \alpha_1 \cdots \alpha_n \in \mathrm{B}$, where $|\alpha| = n$ for some $n \in \mathbb{N}$. A mapping $\overline{\alpha} : \mathrm{F}(\mathbf{S}) \to \mathrm{F}(\mathbf{S})$ is defined by $\overline{\alpha}(f) := f_1 \circ \cdots \circ f_n$ for any $f \in \mathrm{F}(\mathbf{S})$, where

$$f_i = \begin{cases} f \text{ if } \alpha_i = 1, \\ 1 \text{ if } \alpha_i = 0, \end{cases}$$

for all $i \in [n]$. We note that 1 is a fuzzy set of S assigning any element in S to 1.

Remark 2.1. Let $\mathbf{S}$ be an ordered semigroup, $x \in S$, and $\alpha = \alpha_1 \cdots \alpha_n \in \mathrm{F}$, where $|\alpha| = n$ for some $n \in \mathbb{N}$. We suppose more that that $f \in \mathrm{F}(\mathbf{S})$ and $\mathbf{S}_x \neq \emptyset$. Then, there exist elements $u_1, \ldots, u_n = u'_{n-1}, u'_1, \ldots, u'_{n-2} \in S$ such that

$$\begin{aligned} &\overline{\alpha}(f)(x) \\ &= \bigvee_{(u_1,u'_1)\in \mathbf{S}_x} [\overline{\alpha_1}(f)(u_1) \wedge \overline{\alpha_2 \cdots \alpha_n}(f)(u'_1)] \\ &= \bigvee_{(u_1,u'_1)\in \mathbf{S}_x} \left[\overline{\alpha_1}(f)(u_1) \wedge \bigvee_{(u_2,u'_2)\in \mathbf{S}_{u'_1}} (\overline{\alpha_2}(f)(u_2) \wedge \overline{\alpha_3 \cdots \alpha_n}(f)(u'_2)) \right] \\ &\vdots \\ &= \bigvee_{(u_1,u'_1)\in \mathbf{S}_x} \cdots \bigvee_{(u_{n-1},u'_{n-1})\in \mathbf{S}_{u'_{n-2}}} \left[\bigwedge_{i=1}^{n} \overline{\alpha_i}(f)(u_i) \right]. \end{aligned}$$

We note that if $|\alpha| = 2$, then there exist $u_1, u_2 \in S$ such that

$$\overline{\alpha}(f)(x) = \bigvee_{(u_1,u_2)\in \mathbf{S}_x} [\overline{\alpha_1}(f)(u_1) \wedge \overline{\alpha_2}(f)(u_2)].$$

As we know, the concept of fuzzy sets is a generalization of crisp sets. We can extend the concept of the α-ideal in ordered semigroups as follows.

Let $\mathbf{S}$ be an ordered semigroup and $\alpha \in \mathrm{F}$, where $|\alpha| = n$ for some $n \in \mathbb{N}$. We call a fuzzy set f of S a *fuzzy subsemigroup* of $\mathbf{S}$ if $f(xy) \geq f(x) \wedge f(y)$ for all $x, y \in S$. A fuzzy subsemigroup f of $\mathbf{S}$ such that $x \leq y \Rightarrow f(x) \geq f(y)$ is said to be a *fuzzy α-ideal* of $\mathbf{S}$ if $f(x_1^n) \geq \bigwedge_{i\in 1(\alpha)} f(x_i)$ for all $x_1, \ldots, x_n \in S$.

3. Main Results

In this section, we illustrate the interconnection of fuzzy α-ideals in ordered semigroups in terms of the reduction relation of full words. Moreover, we characterize fuzzy α-ideals in ordered semigroups using the multiplication over the set of all fuzzy sets defined on an ordered semigroup.

The following is an auxiliary result that helps examine our theorem.

Lemma 3.1. Let $\alpha, \beta \in \mathrm{B}$ such that $|\beta| = n$ for some $n \in \mathbb{N}$. If $\alpha \leq \beta$, then $1_n(\boldsymbol{u}) \subseteq 1(\beta)$ for some $\boldsymbol{u} \in \mathrm{C}_n(\alpha)$.

Proof. Assume that $\alpha \leq \beta$. Then, there exists $\boldsymbol{u} = (u_1, \ldots, u_n) \in \mathrm{C}_n(\alpha)$ such that $\boldsymbol{u} \leq_C \boldsymbol{v}$, where $\boldsymbol{v} = (v_1, \ldots, v_n) \in \mathrm{C}_n(\beta)$. Let $i \in 1_n(\boldsymbol{u})$. Then, $u_i = 1$. Since $\boldsymbol{u} \leq_C \boldsymbol{v}$, $v_i = 1$. This

implies that $i \in 1_n(\boldsymbol{v}) = 1(\beta)$. Therefore, we complete the proof. ■

By the above result, it is not difficult to verify that $1_n(\boldsymbol{u}) \subseteq 1(\beta)$ for all $\boldsymbol{u} \leq_C \boldsymbol{v}$, where $\boldsymbol{v} \in \mathrm{C}_n(\beta)$.

Theorem 3.2. Let $\mathbf{S}$ be an ordered semigroup, $\alpha, \beta \in \mathrm{F}$, and f a fuzzy set of S. Suppose that $\alpha \leq \beta$. We have that if f is a fuzzy α-ideal of $\mathbf{S}$, then it is a fuzzy β-ideal of $\mathbf{S}$.

Proof. Assume that f is a fuzzy α-ideal of $\mathbf{S}$. For the convenience, suppose that $|\alpha| = m$ and $|\beta| = n$ for some $m, n \in \mathbb{N}$. It is sufficient to illustrate that

$$f(x_1^n) \geq \bigwedge_{i \in 1(\beta)} f(x_i)$$

for all $x_1, \ldots, x_n \in S$. Let $x_1, \ldots, x_n \in S$. Since $\alpha \leq \beta$, there exists $\boldsymbol{u} = (u_1, \ldots, u_n) \in \mathrm{C}_n(\alpha)$ such that $1_n(\boldsymbol{u}) \subseteq 1(\beta)$. Suppose that $I = \{i_1, \ldots, i_m\} \subseteq [n]$ be the set of all indices such that $u_i \neq \varepsilon$ for all $i \in I$. By this setting, we observe that $\alpha = u_{i_1} \cdots u_{i_m}$. We put

$$y_k = x_{i_k} \cdots x_{i_{k+1}-1}$$

for all $k \in [m]$. Then, for any $k \in [m]$ such that $u_{i_k} = 1$, we have that $y_k = x_{i_k}$. Thus,

$$\begin{aligned} f(x_1^n) &= f(y_1^m) \\ &= \bigwedge_{k \in 1(\alpha)} f(y_k) \\ &= \bigwedge_{k \in 1(\alpha)} f(x_{i_k}) \\ &= \bigwedge_{k \in 1_n(\boldsymbol{u})} f(x_i) \\ &\geq \bigwedge_{k \in 1(\beta)} f(x_i) \end{aligned}$$

Therefore, f is a fuzzy β-ideal of $\mathbf{S}$. ■

The following theorem characterizes fuzzy α-ideals in ordered semigroups in terms of the operation $\circ$.

Lemma 3.3 ([7]). Let $\mathbf{S}$ be an ordered semigroup and $f \in \mathrm{F}(\mathbf{S})$. Then, f is a fuzzy subsemigroup of $\mathbf{S}$ if and only if $f \circ f \subseteq f$.

The auxiliary result considered in [7] can be formulated into the concept of fuzzy α-ideals as follows.

Proposition 3.4. Let $\mathbf{S}$ be an ordered semigroup and $f_1, \ldots, f_n \in \mathrm{F}(\mathbf{S})$. Then, we have that $(f_1 \circ \cdots \circ f_n)(x_1^n) \geq f_1(x_1) \wedge \cdots \wedge f_n(x_n)$ for all $x_1, \ldots, x_n \in S$.

Theorem 3.5. Let $\mathbf{S}$ be an ordered semigroup, $f \in \mathrm{F}(\mathbf{S})$, and $\alpha = \alpha_1 \cdots \alpha_n \in \mathrm{F}$, where $|\alpha| = n$ for some $n \in \mathbb{N}$. Suppose that $x \leq y \Rightarrow f(x) \geq f(y)$. Then, the following statements are equivalent.

1. f is a fuzzy α-ideal of $\mathbf{S}$.
2. $f \circ f \subseteq f$ and $\overline{\alpha}(f) \subseteq f$.

Proof. $(1) \Rightarrow (2)$. Assume that f is a fuzzy α-ideal of $\mathbf{S}$. By Lemma 3.3, we have $f \circ f \subseteq f$. Let $x \in S$. If $\mathbf{S}_x = \emptyset$, then $\overline{\alpha}(f)(x) = 0 \leq f(x)$. Suppose that $\mathbf{S}_x \neq \emptyset$. By Remark 2.1, there exist $u_1, \ldots u_n, u_1', \ldots u_{n-2}' \in S$ such that

$$\begin{aligned} &\overline{\alpha}(f)(x) \\ &= \bigvee_{(u_1, u_1') \in \mathbf{S}_x} \cdots \bigvee_{(u_{n-1}, u_n) \in \mathbf{S}_{u_{n-2}'}} \left[\bigwedge_{i=1}^{n} \overline{\alpha_i}(f)(u_i) \right] \\ &= \bigvee_{(u_1^{n-1}, u_n) \in \mathbf{S}_x} \left[\bigwedge_{i \in 1(\alpha)} f(u_i) \right] \\ &\leq \bigvee_{(u_1^{n-1}, u_n) \in \mathbf{S}_x} f(u_1^n) \\ &\leq f(x). \end{aligned}$$

Therefore, we obtain our claim.

$(1) \Rightarrow (2)$. Assume that $f \circ f \subseteq f$ and $\overline{\alpha}(f) \subseteq f$. By Proposition 3.4 and $f \circ f \subseteq f$, we have that f is a fuzzy subsemigroup of $\mathbf{S}$. Finally, let $x_1, \ldots, x_n \in S$. Then,

$$\begin{aligned} f(x_1^n) &\geq \overline{\alpha}(f)(x_1^n) \\ &\geq \bigwedge_{i=1}^{n} \overline{\alpha_i}(f)(x_i) \\ &= \bigwedge_{i \in 1(\alpha)} f(x_i). \end{aligned}$$

Thus, we complete the proof. ■

4. Discussion

This paper introduces the concept of fuzzy α-ideals in ordered semigroups. This notion generalizes several fuzzy ideals, for example, fuzzy left (resp., right, bi-, interior, (m,n)-, n-interior) ideals. We obtain the interrelation among fuzzy α-ideals under the formation of the reduction relation. This result illustrates our complete understanding of their connections. Moreover, a complete characterization of fuzzy α-ideals is provided. For the future work, the readers may consider how fuzzy α-ideals share a connection to α-ideals in ordered semigroups.

5. Acknowledgement

The authors would like to thank the anonymous reviewers for their comments, which helped us improve the manuscript. The corresponding authors would like to thank the Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus, for providing partial financial support for the project.

6. References

[1] Towwun, P. and Changphas, T. (2013). On complete α-ideals in ordered semigroups, *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 86(3), pp. 465–470.

[2] Tiprachot, N., Lekkoksung, N. and Pibaljommee, B. (2022). On regularities of ordered semigroups, *Asian-European Journal of Mathematics*, vol. 15(12), pp. 2250207.

[3] Lekkoksung, N. (2025). On a reduction of full words and its applications to ideal elements in le-semigroups, *Asian-European Journal of Mathematics*, in press, DOI:10.1142/S1793557125500925.

[4] Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, vol. 8(3), pp. 338-353.

[5] Kehayopulu, N. and Tsingelis, M. (2003). The embedding of an ordered groupoid into a *poe*-groupoid in terms of fuzzy sets, *Information Sciences*, vol. 152, pp. 231–236.

[6] Kehayopulu, N. and Tsingelis, M. (2007). Fuzzy ideals on ordered semigroups, *Quasigroups and Related Systems*, vol. 15(2), pp. 279–289.

[7] Davvaz, B., Chinram, R., Lekkoksung, S. and Lekkoksung, N. (2023). Characterizations of generalized fuzzy ideals in ordered semigroups, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 45(2), pp.2367–2380.

[8] Jun, Y. B., Tinpun, K. and Lekkoksung, N. (2024). Exploring regularities of ordered semigroups through generalized fuzzy ideals, *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, vol. 24(2), pp. 141–152.

[9] Lekkoksung, S., Davvaz, B. and Lekkoksung, N. (2024). An Application of generalized fuzzy ideals in ordered semigroups, *European Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 17(4), pp. 2962–2984.

[10] Xie, X. Y. and Tang, J. (2010). Regular ordered semigroups and intra-regular ordered semigroups in terms of fuzzy subsets, *Iranian Journal of Fuzzy Systems*, vol. 7(2), pp. 121–140.

อิทธิพลของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อสมบัติเชิงกลของปูนซีเมนต์แมกนีเซียมฟอสเฟตสำหรับงานซ่อมแซมผิวถนนคอนกรีต

Effect of sand-to-binder and water-to-binder ratios on the mechanical properties of magnesium phosphate cement mortar for concrete pavement repair

ธนัญญา สังสีแก้ว และ เจริญชัย ฤทธิรุทธ*

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40000

*Corresponding Author: Charoenchai.ri@rmuti.ac.th

Received 15 July 2025; Received in revised form 16 September 2025; Accepted 21 October 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (S/B) และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและความต้านทานการขัดสีของมอร์ตาร์ซีเมนต์แมกนีเซียมฟอสเฟต (MPC) สำหรับงานซ่อมแซมผิวจราจรคอนกรีต สัดส่วนผสมถูกออกแบบโดยกำหนดอัตราส่วนโมลาร์ของแมกนีเซียมออกไซด์ต่อโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (M/P) คงที่ที่ 2.25 และใช้บอแรกซ์เป็นสารหน่วงการก่อตัวในปริมาณร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนักของ MgO ตัวแปรในการศึกษาประกอบด้วยอัตราส่วน S/B ที่ 1.0, 1.2 และ 1.4 และอัตราส่วน W/B ที่ 0.35, 0.375 และ 0.40 สมบัติของมอร์ตาร์ถูกประเมินผ่านการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1, 3 และ 28 วัน และการทดสอบความต้านทานการขัดสี ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าอัตราส่วน W/B ที่ 0.35 ให้สมบัติเชิงกลและความทนทานดีที่สุดอย่างสม่ำเสมอ โดยให้ค่ากำลังอัดสูงสุด (29 MPa) และการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีต่ำที่สุด (0.12%) ในทางกลับกัน อิทธิพลของอัตราส่วน S/B มีความสัมพันธ์โดยตรงกับสมบัติที่ต้องการ อัตราส่วน S/B ที่ 1.4 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด (26 MPa) ในขณะที่อัตราส่วน S/B ที่ 1.0 ให้ความต้านทานการขัดสีดีที่สุด (สูญเสียน้ำหนัก 0.14%) ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความจำเป็นในการปรับสัดส่วนผสมของ MPC ให้สอดคล้องกับสมบัติที่ต้องการในงานซ่อมแซมแต่ละประเภท ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการออกแบบทางวิศวกรรม

คำสำคัญ: ปูนซีเมนต์แมกนีเซียมฟอสเฟต, อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน, อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน, ความต้านทานการขัดสี, กำลังอัด

ABSTRACT

This research aims to investigate the effects of the sand-to-binder ratio (S/B) and water-to-binder ratio (W/B) on the mechanical properties and abrasion resistance of magnesium phosphate cement (MPC) mortar for concrete pavement repair applications. The mix designs were based on a fixed molar ratio of MgO to KH_2PO_4 (M/P) of 2.25, with borax added at 7.5% by weight of MgO as a retarder. The studied variables included S/B ratios of 1.0, 1.2, and 1.4, and

W/B ratios of 0.35, 0.375, and 0.40. Mortar properties were evaluated through compressive strength tests at 1, 3, and 28 days, and an abrasion resistance test. The results consistently indicated that a W/B ratio of 0.35 provided the best overall mechanical and durability performance, yielding the highest compressive strength (29 MPa) and the lowest abrasion loss (0.12%). Conversely, the effect of the S/B ratio was property dependent. An S/B ratio of 1.4 achieved the highest compressive strength (26 MPa), whereas an S/B ratio of 1.0 provided the best abrasion resistance (0.14% weight loss). This study highlights the critical need to tailor MPC mix proportions to the specific performance requirements of different repair applications, providing essential data for engineering design.

Keywords: Magnesium Phosphate Cement, Sand-to-Binder Ratio, Water-to-Binder Ratio, Abrasion Resistance, Compressive Strength

บทนำ

โครงสร้างพื้นฐานคอนกรีต เช่น ถนน ทางด่วน และสะพาน เป็นองค์ประกอบสำคัญของการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคม แต่โครงสร้างเหล่านี้ต้องเผชิญกับการเสื่อมสภาพอย่างต่อเนื่องจากปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมและการรับน้ำหนักบรรทุก ซึ่งนำไปสู่ความเสียหายที่จำเป็นต้องได้รับการซ่อมแซมอย่างเร่งด่วน การซ่อมแซมที่ล่าช้าไม่เพียงแต่ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัย แต่ยังก่อให้เกิดความสูญเสียทางเศรษฐกิจจากการหยุดชะงักของการจราจร [1-2] ดังนั้น ความต้องการวัสดุซ่อมแซมที่สามารถก่อตัวและพัฒนากำลังได้อย่างรวดเร็วจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

ปูนซีเมนต์แมกนีเซียมฟอสเฟต (magnesium phosphate cement, MPC) ได้รับการยอมรับว่าเป็นวัสดุทางเลือกที่มีศักยภาพสูงสำหรับงานซ่อมแซมเร่งด่วน MPC เป็นวัสดุประสานที่เกิดจากปฏิกิริยาการสะเทินกรด-เบส (acid-base reaction) ระหว่างแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ที่เผาแบบ dead-burned กับสารละลายฟอสเฟต[3-4] เช่น โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ผลิตภัณฑ์หลักของปฏิกิริยาคือ k-struvite ($MgKPO_4 \cdot 6H_2O$) ซึ่งเป็นผลึกไฮเดรตที่ทำหน้าที่เป็นสารยึดประสานหลักในระบบ [5-6] คุณสมบัติเด่นของ MPC ที่ทำให้เหมาะกับงานซ่อมแซม ได้แก่ การก่อตัวที่รวดเร็วมาก การพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นที่สูง การยึดเกาะที่ดีเยี่ยมกับคอนกรีตเดิม และความทนทานในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง [7]

อย่างไรก็ตาม การนำ MPC มาใช้งานอย่างแพร่หลายยังคงมีความท้าทายหลายประการ คุณสมบัติที่โดดเด่นที่สุดคือระยะเวลาก่อตัวที่สั้นมาก ซึ่งอาจสั้นเพียงไม่กี่นาทีหากไม่มีการใช้สารหน่วงการก่อตัว ทำให้การทำงานภาคสนามเป็นไปได้ยาก [8] นอกจากนี้ ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ MPC ยังเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนสูง (highly exothermic) ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเค้นจากความร้อน (thermal stress) [9] และการแตกร้าวในงานซ่อมแซมที่มีปริมาตรขนาดใหญ่ และยังพบว่า MPC อาจมีการสูญเสียกำลังเมื่อแช่อยู่ในน้ำเป็นเวลานาน ปัจจัยเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าการออกแบบสัดส่วนผสม (mix design) เป็นหัวใจสำคัญในการควบคุมสมบัติของ MPC ให้เหมาะสมกับการใช้งาน

ในการออกแบบสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ ปัจจัยพื้นฐานที่มีอิทธิพลอย่างสูงต่อสมบัติของวัสดุคืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (S/B) งานวิจัยจำนวนมากยืนยันว่าการลดอัตราส่วน W/B จะนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดและความหนาแน่นของโครงสร้างจุลภาค เนื่องจากปริมาณน้ำส่วนเกินที่ลดลงส่งผลให้ความพรุนในเนื้อวัสดุต่ำลง [10–12] ในขณะที่ผลของอัตราส่วน S/B มีความซับซ้อนกว่า อัตราส่วนนี้ส่งผล

ต่อการจัดเรียงตัวของอนุภาค (particle packing) ความหนาของชั้นฟิล์มเพสต์ (paste film thickness) และสมดุลระหว่างโครงสร้างของมวลรวมกับปริมาณวัสดุประสาน การเลือกอัตราส่วน S/B ที่เหมาะสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงกลได้ แต่หากไม่เหมาะสมอาจทำให้กำลังลดลงได้

แม้ว่าอิทธิพลของอัตราส่วน W/B และ S/B จะเป็นที่ทราบกันดีในหลักการทั่วไป แต่ยังขาดการศึกษาเชิงระบบที่เปรียบเทียบผลกระทบของตัวแปรทั้งสองนี้ต่อสมบัติที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ได้แก่ สมบัติเชิงกลโดยรวม (bulk mechanical property) เช่น กำลังอัด และสมบัติด้านความทนทานของพื้นผิว (surface durability property) เช่น ความต้านทานการขัดสี ภายใต้แผนการทดลองเดียวกัน การทำความเข้าใจความสัมพันธ์นี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในทางปฏิบัติ เนื่องจากงานซ่อมแซมแต่ละประเภทมีความต้องการที่แตกต่างกัน เช่น การซ่อมแซมโครงสร้างรับแรงต้องการกำลังอัดสูง ในขณะที่การซ่อมแซมผิวจราจรต้องการความต้านทานการขัดสีสูง การค้นหาสัดส่วนผสมที่ เหมาะสมที่สุด จึงไม่ใช่การหาคำตอบเดียว แต่เป็นการทำความเข้าใจความสัมพันธ์เชิงแลกเปลี่ยน (trade-off) เพื่อเลือกสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแต่ละการใช้งาน งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วน S/B และ W/B ต่อกำลังอัดและความต้านทานการขัดสีของมอร์ตาร์ MPC อย่างเป็นระบบ เพื่อสร้างองค์ความรู้ที่สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบวัสดุซ่อมแซมประสิทธิภาพสูงสำหรับงานวิศวกรรมโยธา

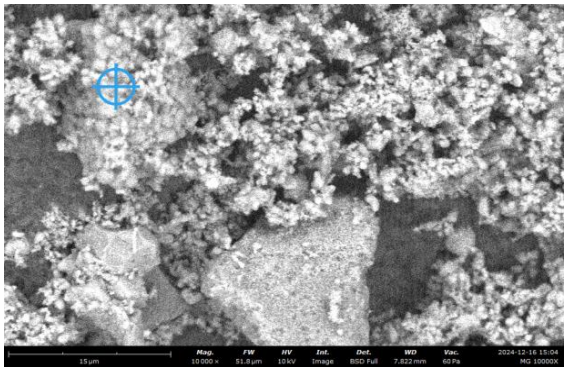
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (S/B) ที่มีต่อกำลังอัดและความต้านทานการขัดสีของมอร์ตาร์ MPC
2. เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและความต้านทานการขัดสีของมอร์ตาร์ MPC
3. เพื่อระบุสัดส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับงานซ่อมแซมที่ต้องการสมบัติเชิงกลและสมบัติด้านความทนทานของพื้นผิวที่แตกต่างกัน

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุ

แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักมีความละเอียดผ่านตะแกรงขนาด 75 ไมโครเมตร คุณสมบัติทางกายภาพของผง MgO ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพื้นผิวด้วยเทคนิคการกระเจิงรังสีเอกซ์เชิงพลังงาน (EDX) ดังแสดงในรูปที่1 พบว่าองค์ประกอบของ MgO บริเวณผิวประกอบด้วยธาตุแมกนีเซียมประมาณ 35–49% โดยน้ำหนัก และตรวจพบออกซิเจนกับคาร์บอนในปริมาณสูง ซึ่งบ่งชี้ถึงปฏิกิริยาการคาร์บอเนตที่ผิวของอนุภาค MgO ลักษณะดังกล่าวอาจส่งผลต่อสมบัติการก่อตัวและสมบัติเชิงกลของ MPC ในเวลาต่อมา องค์ประกอบธาตุของผง MgO แสดงใน ตารางที่ 1 ส่วนองค์ประกอบทางเคมีโดยรวมของ MgO แสดงในตารางที่ 2 ด้านวัสดุประสานฟอสเฟต ใช้โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ที่มีความบริสุทธิ์ไม่ต่ำกว่า 99% และใช้บอแรกซ์ (sodium tetraborate) เป็นสารหน่วงการก่อตัว โดยในการทดลองนี้เลือกใช้บอแรกซ์ปริมาณคงที่ที่ร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนักของ MgO ส่วนมวลรวมใช้ทรายแม่น้ำเป็นวัสดุผสมละเอียด มีค่าดัชนีความละเอียด (fineness modulus) เท่ากับ 2.6 และใช้น้ำกลั่นในการผสมทั้งหมด



รูปที่ 1 ลักษณะผิวแมกนีเซียมออกไซด์กำลังขยาย 10,000 เท่า และตำแหน่งยิง EDX

ตารางที่ 1 องค์ประกอบธาตุของแมกนีเซียมออกไซด์

สัญลักษณ์	ธาตุ	สัดส่วนธาตุ	สัดส่วนของมวล
C	Carbon	17.172	11.2
O	Oxygen	45.575	39.6
Mg	Magnesium	37.252	49.2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของแมกนีเซียมออกไซด์

องค์ประกอบทางเคมี	(%)
SiO_2	3.00
MgO	92.00
Al_2O_3	0.50
Fe_2O_3	0.50
CaO	1.50
LOI	4.00

2. สัดส่วนผสม

ในการศึกษานี้ อัตราส่วนโมลาร์ M/P ถูกกำหนดค่าคงที่เท่ากับ 2.25 และปริมาณบอแรกซ์คงที่ที่ร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนักของ MgO แผนการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ชุดหลัก ดังแสดงในตารางที่ 2

ชุดการศึกษาผลของอัตราส่วน S/B: กำหนดอัตราส่วน W/B คงที่ที่ 0.375 และปรับเปลี่ยนอัตราส่วน S/B เป็น 1.0, 1.2 และ 1.4

ชุดการศึกษาผลของอัตราส่วน W/B: กำหนดอัตราส่วน S/B คงที่ที่ 1.2 และปรับเปลี่ยนอัตราส่วน W/B เป็น 0.35, 0.375 และ 0.40

นอกจากนี้ยังมีการเตรียมตัวอย่างควบคุม (Control) ซึ่งเป็นมอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC1) และประเภทที่ 3 (OPC3) ที่มีอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2.75 และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ให้ค่าการไหลแผ่ (flow value) เท่ากับ 110±5%

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ MPC

ชื่อตัวอย่าง	อัตราส่วน S/B	อัตราส่วน W/B	อัตราส่วน M/P	บอแรกซ์ (% ของ MgO)
ชุดการศึกษา S/B				
(2.25MP)1.0SB	1	0.375	2.25	7.5
(2.25MP)1.2SB	1.2	0.375	2.25	7.5
(2.25MP)1.4SB	1.4	0.375	2.25	7.5
ชุดการศึกษา W/B				
(2.25MP)0.35WB	1.2	0.35	2.25	7.5
(2.25MP)0.375WB	1.2	0.375	2.25	7.5
(2.25MP)0.40WB	1.2	0.4	2.25	7.5

3. ขั้นตอนการผสมและการเตรียมตัวอย่าง

ขั้นตอนการผสมเริ่มต้นด้วยการผสมส่วนผสมแห้งได้แก่ MgO, KH_2PO_4 และบอแรกซ์ เข้าด้วยกันเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นจึงเติมน้ำกลั่นและผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วต่ำจนเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นค่อยๆ เติมทรายลงไปพร้อมกับผสมอย่างต่อเนื่องจนส่วนผสมทั้งหมดเข้ากันดี ขั้นตอนการผสมทั้งหมดตั้งแต่เริ่มเติมน้ำจนถึงการเทลงแบบหล่อต้องเสร็จสิ้นภายใน 5 นาที เพื่อให้ทันก่อนที่วัสดุจะเริ่มก่อตัว

ตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังอัดถูกหล่อในแบบหล่อลูกบาศก์ขนาด 50×50×50 มม. และถอดแบบหลังจาก 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C และความชื้นสัมพัทธ์ 50% จนถึงอายุที่ต้องการทดสอบ (1, 3 และ 28 วัน) สำหรับการทดสอบการขัดสี ตัวอย่างถูกเตรียมโดยการเคลือบผิวหน้าด้วยมอร์ตาร์ MPC หนา 25 มม. และบ่มในสภาวะเดียวกันเป็นเวลา 3 วันก่อนทำการทดสอบ

4. วิธีการทดสอบ

ระยะเวลาก่อตัวปลาย (Final Setting Time) วัดตามมาตรฐาน ASTM C191 เนื่องจากปฏิกิริยาของ MPC เกิดขึ้นเร็วมาก การวัดระยะเวลาก่อตัวต้นจึงทำได้ยากและไม่แม่นยำ ดังนั้นจึงวัดเฉพาะระยะเวลาก่อตัวปลาย

การพัฒนาความร้อน (Heat Evolution) ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรด (Infrared Thermography) เพื่อประเมินอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชัน

กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109 ที่อายุ 1, 3 และ 28 วัน

ความต้านทานการขัดสี (Abrasion Resistance) ประเมินการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีตามมาตรฐาน ASTM C944 ที่อายุ 3 วัน

ผลการศึกษา

1. ระยะเวลาก่อตัวปลาย

ผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวปลายของมอร์ตาร์ MPC เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ OPC สรุปใน ตารางที่ 4 โดยพบว่ามอร์ตาร์ MPC ทุกสูตรมีระยะเวลาก่อตัวปลายสั้นกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างชัดเจน: OPC ประเภทที่ 1 และ OPC ประเภทที่ 3 มีค่าระยะเวลาก่อตัวปลายประมาณ 300 นาที และ 180 นาที ตามลำดับ ขณะที่มอร์ตาร์ MPC ที่มี W/B = 0.350 และ 0.375 มีระยะเวลาก่อตัวปลายเพียง 18 นาที และเมื่อเพิ่ม W/B เป็น 0.400 ระยะเวลาก่อตัวปลายจะยาวขึ้นเล็กน้อยเป็น 22 นาที สำหรับผลของ S/B พบว่า MPC ที่ S/B = 1.0 และ 1.2 ให้ค่าระยะเวลาก่อตัวปลายใกล้เคียงกันคือ 16 และ 15 นาทีตามลำดับ ในขณะที่เมื่อเพิ่ม S/B เป็น 1.4 ระยะเวลาก่อตัวปลายจะเพิ่มขึ้นเป็น 23 นาที แนวโน้มดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า MPC สามารถก่อตัวได้เร็วกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) อย่างมาก เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาแบบกรด–เบสระหว่าง MgO กับ KH_2PO_4 ซึ่งนำไปสู่การตกผลึกของ Struvite-K อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้วัสดุแข็งตัวในเวลาอันสั้น [13] แม้ว่าการเพิ่มปริมาณน้ำ (W/B) หรือทราย (S/B) ทำให้สารตั้งต้นในระบบเจือจางลง ส่งผลให้ระยะเวลาก่อตัวปลายยาวนานขึ้นเล็กน้อย แต่มอร์ตาร์ MPC ทุกสูตรยังคงก่อตัวได้ภายในเวลาประมาณ 15–23 นาที ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการใช้งานงานซ่อมแซมฉุกเฉิน ในเชิงปฏิบัติ การควบคุมอัตราส่วน W/B ให้อยู่ระหว่าง 0.350–0.375 และ S/B ไม่เกิน 1.2 จะช่วยรักษาสมดุลระหว่างความเร็วในการก่อตัวกับความสามารถในการทำงานของวัสดุได้ดี

ตารางที่ 4 ผลระยะเวลาก่อตัวปลายและอุณหภูมิสูงสุดบนผิวตัวอย่าง

ชื่อตัวอย่าง	ระยะเวลาก่อตัวปลาย (นาที)	อุณหภูมิสูงสุดบนผิวตัวอย่าง (°C)
OPC1	300	-
OPC3	180	-
(2.25MP)1.0SB	16	65.7
(2.25MP)1.2SB	15	57.6
(2.25MP)1.4SB	23	55.6
(2.50MP)0.35WB	18	57.9
(2.50MP)0.375WB	18	54.7
(2.50MP)0.40WB	22	53.6

2. อุณหภูมิสูงสุดบนผิว

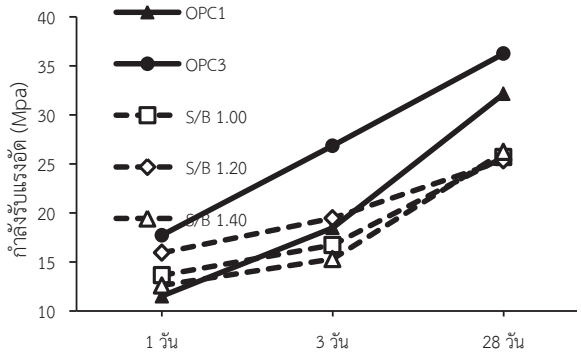
จากข้อมูลใน ตารางที่ 4 อุณหภูมิผิวสูงสุดที่วัดได้บนชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ MPC มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วน S/B และ W/B กล่าวคือ เมื่อ S/B เพิ่มจาก 1.0 เป็น 1.2 และ 1.4 ค่าอุณหภูมิผิวสูงสุดลดจาก 65.7 °C เป็น 57.6 °C และ 55.6 °C ตามลำดับ ขณะที่การเพิ่ม W/B จาก 0.350 เป็น 0.375 และ 0.400 ทำให้ค่าอุณหภูมิสูงสุดลดจาก 57.9 °C เป็น 54.7 °C และ 53.6 °C ตามลำดับ แนวโน้มนี้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณทราย ซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อยทางเคมี ช่วยดูดซับพลังงานความร้อนของปฏิกิริยา ทำให้อุณหภูมิสูงสุดลดลง [14] และการเพิ่มปริมาณน้ำก็ทำให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นในระบบลดลง จึงเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนในอัตราที่ช้าลงและให้ความร้อนสะสมลดลงตามไปด้วย แม้ว่าการใช้อัตราส่วน S/B และ W/B สูงขึ้นจะเป็นผลดีในแง่การลดความรุนแรงของปฏิกิริยาคายความร้อน แต่ดังที่จะได้กล่าวต่อไป อัตราส่วนที่สูงเกินไปย่อมส่งผลเสียต่อกำลังและความทนทานของมอร์ตาร์ ดังนั้นจึงต้อง

พิจารณาเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างการจำกัดความร้อนและสมบัติเชิงกลที่ดีของวัสดุ

3. กำลังรับแรงอัด

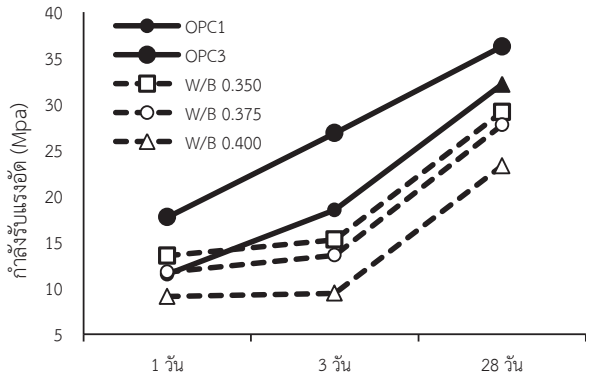
ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ MPC ที่อายุต่างๆ แสดงในรูปที่ 1 และ 2 จะเห็นได้ว่ามอร์ตาร์ MPC สามารถพัฒนากำลังอัดได้อย่างรวดเร็ว โดยมีกำลังอัดที่อายุ 1 วันสูงอย่างมีนัยสำคัญ

อิทธิพลของอัตราส่วน W/B รูปที่ 1 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างอัตราส่วน W/B และกำลังอัด โดยกำลังอัดจะลดลงเมื่ออัตราส่วน W/B เพิ่มขึ้นในทุกช่วงอายุการทดสอบ ที่อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่มีอัตราส่วน W/B เท่ากับ 0.35 มีกำลังอัดสูงสุดที่ 29 MPa ในขณะที่ตัวอย่างที่มีอัตราส่วน W/B เท่ากับ 0.40 มีกำลังอัดเพียงประมาณ 20 MPa ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้จากโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ อัตราส่วน W/B ที่ต่ำจะส่งผลให้มีปริมาณน้ำส่วนเกินในระบบน้อยลง หลังจากที่น้ำถูกใช้ไปในปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้ว ปริมาณช่องว่างหรือความพรุน (porosity) ที่เหลืออยู่ในเนื้อซีเมนต์เพสต์จะน้อยกว่า ทำให้โครงสร้างมีความหนาแน่นและแข็งแรงมากขึ้น [15]



รูปที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอายุและกำลังอัดของมอร์ตาร์ MPC ที่อัตราส่วน S/B

อิทธิพลของอัตราส่วน S/B จากรูปที่ 2 ผลของอัตราส่วน S/B ต่อกำลังอัดมีความน่าสนใจและแตกต่างจากแนวโน้มของ W/B โดยกำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน S/B เพิ่มขึ้นจาก 1.0 เป็น 1.4 ที่อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่มีอัตราส่วน S/B เท่ากับ 1.4 ให้กำลังอัดสูงสุดที่ 26 MPa ซึ่งสูงกว่าตัวอย่างที่มี S/B เท่ากับ 1.0 (ประมาณ 22 MPa) การที่กำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้นนี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการจัดเรียงตัวของอนุภาคในโครงสร้างคอมโพสิตของมอร์ตาร์ ที่อัตราส่วน S/B ต่ำ (1.0) [16] ปริมาณวัสดุประสานมีมากเกินไปเมื่อเทียบกับปริมาณทราย ทำให้โครงสร้างโดยรวมเป็นแบบที่อนุภาคทรายกระจายตัวอยู่ในเนื้อเพสต์ แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วน S/B เป็น 1.4 สัดส่วนระหว่างทรายและวัสดุประสานจะเข้าใกล้จุดที่เหมาะสมมากขึ้น อนุภาคทรายสามารถสร้างโครงสร้างหลัก (aggregate skeleton) ที่รับแรงได้ดีขึ้น และวัสดุประสานทำหน้าที่เติมเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคทรายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่มีความหนาแน่นและกำลังรับแรงสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม หากเพิ่มอัตราส่วน S/B มากเกินไป อาจทำให้ปริมาณวัสดุประสานไม่เพียงพอที่จะเคลือบผิวและยึดเหนี่ยวอนุภาคทรายทั้งหมด ซึ่งจะส่งผลให้กำลังอัดลดลงในที่สุด [17]



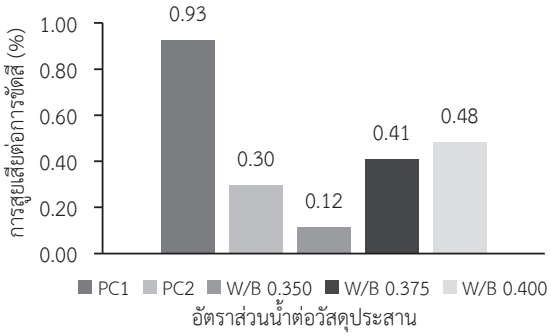
รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอายุและกำลังอัดของมอร์ตาร์ MPC ที่อัตราส่วน W/B

4. การสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสี

ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีแสดงในรูปที่ 4 และ 5 ซึ่งสะท้อนถึงความทนทานของพื้นผิววัสดุ

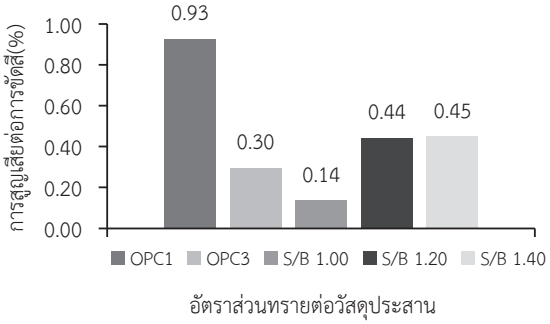
อิทธิพลของอัตราส่วน W/B รูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีเพิ่มขึ้นอย่างมี

นัยสำคัญเมื่ออัตราส่วน W/B เพิ่มขึ้น ตัวอย่างที่มีอัตราส่วน W/B เท่ากับ 0.35 มีการสูญเสียน้ำหนักต่ำที่สุดเพียง 0.12% ในขณะที่ตัวอย่างที่มี W/B เท่ากับ 0.40 มีการสูญเสียน้ำหนักสูงถึง 0.48% ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับผลกำลังอัดและสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลเดียวกัน คือ อัตราส่วน W/B ที่ต่ำทำให้เกิดโครงสร้างพื้นผิวที่หนาแน่น มีความพรุนน้อย และมีความแข็งสูง จึงทนทานต่อการขัดสีได้ดีกว่า



รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์การสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วน W/B

อิทธิพลของอัตราส่วน S/B รูปที่ 5 แสดงแนวโน้มที่ตรงกันข้ามกับผลของกำลังอัดอย่างสิ้นเชิง การสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีมีค่าต่ำที่สุด (0.14%) ที่อัตราส่วน S/B ต่ำสุด คือ 1.0 และเพิ่มขึ้นเป็น 0.44% และ 0.45% เมื่ออัตราส่วน S/B เพิ่มขึ้นเป็น 1.2 และ 1.4 ตามลำดับ การที่ความต้านทานการขัดสีลดลงเมื่อมีปริมาณทรายมากขึ้นนี้ เป็นการชี้ให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างสมบัติเชิงกลโดยรวม (bulk property) และสมบัติของพื้นผิว (surface property) ความต้านทานการขัดสีขึ้นอยู่กับคุณภาพของชั้นผิววัสดุโดยตรง ที่อัตราส่วน S/B เท่ากับ 1.0 พื้นผิวของมอร์ตาร์จะอุดมไปด้วยวัสดุประสาน (paste-rich) ทำให้เกิดชั้นผิวของ K-struvite ที่แข็งและต่อเนื่อง ซึ่งมีความทนทานต่อการเสียดสีสูง ในทางกลับกัน ที่อัตราส่วน S/B สูงขึ้น (1.4) พื้นผิวจะประกอบด้วยอนุภาคทรายและวัสดุประสานในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคทรายกับเนื้อเพสต์ (interfacial transition zone) จะกลายเป็นจุดอ่อนที่การขัดสีสามารถเริ่มต้นได้ง่ายและอนุภาคทรายเองก็อาจถูกขัดหลุดออกจากพื้นผิวได้ง่ายกว่า ส่งผลให้ความต้านทานการขัดสีโดยรวมลดลง [18]



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์การสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วน S/B

5. การอภิปรายผลเพื่อการออกแบบสัดส่วนผสมสำหรับการใช้งานจริง

ผลการทดลองทั้งหมดชี้ให้เห็นว่าการเลือกสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด สำหรับมอร์ตาร์ MPC นั้นขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้งานเป็นสำคัญ ไม่สามารถระบุสัดส่วนผสมเดียวที่ให้สมบัติดีที่สุดในทุกด้านได้

สำหรับงานที่ต้องการกำลังอัดสูง เช่น การซ่อมแซมโครงสร้างรับน้ำหนัก การอุดรูโพรง หรือการยึดสลักเกลียว ควรเลือกใช้อัตราส่วน W/B ที่ต่ำที่สุดเท่าที่ความสามารถในการทำงาน (workability) จะเอื้ออำนวยในที่นี้คือ 0.35 และเลือกใช้อัตราส่วน S/B ที่สูงในที่นี้คือ 1.4 เพื่อให้ได้โครงสร้างที่รับแรงได้ดีที่สุด

สำหรับงานที่ต้องการความทนทานของพื้นผิวสูง เช่น การซ่อมแซมผิวจราจร พื้นโรงงานอุตสาหกรรม หรือบริเวณที่ต้องรับการเสียดสีบ่อยครั้ง ควรเลือกใช้อัตราส่วน W/B ที่ต่ำ เช่น 0.35 และเลือกใช้อัตราส่วน S/B ที่ต่ำ เช่น 1.0 เพื่อให้ได้พื้นผิวที่อุดมด้วยวัสดุประสานที่มีความแข็งและทนทานต่อการขัดสีสูง

สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (S/B) และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ต่อสมบัติของมอร์ตาร์ซีเมนต์แมกนีเซียมฟอสเฟต สามารถสรุปผลได้ดังนี้

อิทธิพลของอัตราส่วน W/B การลดอัตราส่วน W/B ลงเหลือ 0.35 ส่งผลดีต่อสมบัติของมอร์ตาร์ MPC อย่างชัดเจน ทั้งในด้านการเพิ่มกำลังรับแรงอัดและเพิ่มความต้านทานการขัดสี เนื่องจากทำให้เกิดโครงสร้างจุลภาคที่หนาแน่นและมีความพรุนต่ำ

อิทธิพลของอัตราส่วน S/B อิทธิพลของอัตราส่วน S/B มีลักษณะเป็นความสัมพันธ์เชิงแลกเปลี่ยน (trade-off) ระหว่างสมบัติเชิงกลโดยรวมและสมบัติของพื้นผิว

อัตราส่วน S/B ที่สูง (1.4) เหมาะสมที่สุดสำหรับงานที่ต้องการ กำลังรับแรงอัดสูงสุด เนื่องจากการจัดเรียงตัวของมวลรวมเกิดเป็นโครงสร้างที่รับแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อัตราส่วน S/B ที่ต่ำ (1.0) เหมาะสมที่สุดสำหรับงานที่ต้องการ ความต้านทานการขัดสีสูงสุด เนื่องจากทำให้เกิดชั้นผิวที่อุดมด้วยวัสดุประสานซึ่งมีความแข็งและทนทาน

ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาครั้งต่อไป ควรพิจารณาผลของการเติมเถ้าลอย (Fly Ash) ต่อสมบัติเชิงกลและความทนทานระยะยาวของปูนซีเมนต์แมกนีเซียมฟอสเฟต

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานเทศบาลนครขอนแก่น และสาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่ได้สนับสนุนห้องปฏิบัติการและอุปกรณ์ ในการทดสอบวัสดุ และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น สนับสนุนทุนวิจัย ครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

[1] Ding, W. and Wu, J. (2023). Interregional economic impacts of an extreme storm flood scenario considering transportation interruption: A case study of Shanghai, China, *Sustainable Cities and Society*, vol. 88, pp. 104296.

[2] Trestanto, F., Hadiwardoyo, S, Sumabrata, J. and Lumingkewas, R.H. (2024). Road repair delay costs in improving the road rehabilitation strategy through a comprehensive road user cost model, *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, vol. 14(3), pp. 254-270.

[3] Jia, X., Luo, J., Zhang, W., Qian, J., Li, J., Wang, P. and Tang, M. (2020). Preparation and application of self-curing magnesium phosphate cement concrete with high early strength in severe cold environments, *Materials*, vol. 13, pp. 5587.

[4] Xing, S. and Wu, C. (2018). Preparation of magnesium phosphate cement and application in concrete repair, *MATEC Web of Conferences*, vol. 142, pp. 02007.

[5] Gardner L.J., Walling, S.A., Corkhill, C.L., Bernal, S.A., Lejeune, V., Stennett M.C., Provis, J.L. and Hyatt, N.C. (2021). Temperature transformation of blended magnesium potassium phosphate cement binders, *Cement and Concrete Research*, vol. 141, pp. 106332.

[6] Rouzic, M.L., Rouzic, M.L., Chaussadent, T., Platret, G. and Stefan, L. (2017). Mechanisms of k-struvite formation in magnesium phosphate cements, *Cement and Concrete Research*, vol. 91, pp. 117-122.

[7] Wang, J., Gao, L., Zhang, Y., Wang, L. and Xu, C. (2024). Early properties of magnesium phosphate cement repairing material used in slab track, *Heliyon*, vol. 10, pp. e28913.

[8] Qiao, F., Chau, C.K. and Li, Z. (2009). Setting and strength development of magnesium phosphate cement paste,

Advances in Cement Research, vol. 21(4), pp. 175-180.

[9] Wekwejt, M., Wojtala, M., Mielewczyk-Gryń, A., Kozień, D., Ronowska, A., Kozłowska, J. and Gbureck, U. (2024). Injectable biocomposite cement: a dual-setting formula with magnesium potassium phosphate and κ-carrageenan hydrogel for orthopedic advancements, *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 383, pp. 137922.

[10] He, S.S., Wang L.M., Zhang, R. and Shi, Z. (2018). Influence of water-binder ratio on the microstructure of air-entrained concrete, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 392, pp. 022001.

[11] Kandaswamy, S., Sundaram, H., Rajamanickam, S. and Rajendran, Y. (2025). Durability of high-performance concrete at high temperatures: effects of water-binder ratios and use of silica fume, *Matéria (Rio de Janeiro)*, vol. 30(2), pp. e20240704.

[12] Hani, N., Nawawy, O., Ragab, K. and Kohail, M. (2018). The effect of different water/binder ratio and nano-silica dosage on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, vol. 165, pp. 504-513.

[13] Yang, N., Shi, C., Yang, J. and Chang, Y. (2014). Research progresses in magnesium phosphate cement–based materials, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 26(10), pp. 04014071.

[14] Liu, J., Yan, Y., Li, Z., Yang, F., Hai, R. and Yuan M. (2023). Investigation on the potassium magnesium phosphate cement modified by pretreated red mud: basic properties, water resistance and hydration heat, *Construction and Building Materials*, vol. 368, pp. 130456.

[15] Liu, Y., Zhang, S., Fang, Z., Sun, M., Fan, Y. and Shah, S.P. (2025). Influence of water-to-binder ratio on autogenous shrinkage and electrical resistivity of cement mortar, *Buildings*, vol. 15(9), pp. 1444.

[16] Phoo-ngernkham, T., Hanjitsuwan, S., Detphan, S., Thumrongvut, J., Suksiripattanapong, C., Damrongwiriyanupap, N., Chindaprasirt, P. and Hatanaka, S. (2018). Shear bond strength of FA-PC geopoylmer under different sand to binder ratios and sodium hydroxide concentrations. International, *Journal of GEOMATE*, vol. 14(42), pp. 52-57.

[17] Vu, N.T. and Tang, V.L. (2024). Studying the effect of the ratio of water to binder and sand to aggregate on the hardness of concrete mixtures and compressive strength of roller-compacted concrete by experimental method. *Ministry of Science and Technology Vietnam*, online first, DOI:10.31276/vjst.2024.0003.

[18] Mikhalchenkov, A., Mikhalchenkova, M., Feskov, S. and Kononenko A. (2019). Effect of concentration and dispersion of filler fractions on adhesive strength and abrasion resistance of an epoxy and sand composite, *MATEC Web of Conferences*, vol. 298, pp. 00042.

เปรียบเทียบการใช้พลังงานสำหรับการเดินเครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ร่วมกับเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่ ในระบบสูบน้ำดิบ

Comparison energy consumption for combined VSD pump with constant speed pump in raw water pumping

วิวัฒน์ อ่อนนาคคล้ำ*

โรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ การประปานครหลวง

*Corresponding Author: wp_js38@hotmail.com

Received 31 August 2025; Received in revised form 26 October 2025; Accepted 28 October 2025

บทคัดย่อ

ระบบสูบน้ำดิบ ทำหน้าที่สูบน้ำจากแหล่งน้ำเข้าสู่ระบบผลิต โดยอาศัยเครื่องสูบน้ำต่อร่วมกันแบบขนาน การควบคุมอัตราการสูบน้ำทำได้โดยการปรับความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำเพิ่มขึ้นหรือลดลง เพื่อเพิ่มหรือลดอัตราการสูบน้ำ แต่การติดตั้งอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบให้กับเครื่องสูบน้ำทุกเครื่องจะต้องใช้เงินลงทุนสูง การติดตั้งอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบกับเครื่องสูบน้ำบางเครื่องจึงเป็นแนวทางลดเงินลงทุนได้ ในการทดลองนี้จะทดลองเดินเครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ร่วมกับเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่ และหาจุดที่เหมาะสมในการเดินเครื่องสูบน้ำในระบบสูบน้ำดิบให้ประหยัดพลังงานมากที่สุด ในอัตราการสูบน้ำ 8, 8.8, 9.6 และ 10.4 m^3/sec โดยการปรับความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำร่วมกับจำนวนเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่ จำนวน 1, 2 และ 3 เครื่อง ผลการทดลองพบว่า อัตราการสูบน้ำ 8 และ 8.8 m^3/sec การเดินเครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ จำนวน 4 เครื่อง จะมีประสิทธิภาพโดยรวมสูงที่สุด คือ 55.1 และ 55.3% ตามลำดับ และอัตราการสูบน้ำ 9.6 และ 10.4 m^3/sec การเดินเครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ จำนวน 2 เครื่อง ร่วมกับเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่ จะมีประสิทธิภาพโดยรวมสูงที่สุด คือ 56.4 และ 53.4 % ตามลำดับ สรุปได้ว่าการเดินเครื่องสูบน้ำให้มีจำนวนที่เหมาะสมกับอัตราการสูบน้ำ และเครื่องสูบน้ำต้องมีความเร็วรอบมากกว่า 85 % จะส่งผลให้มีประสิทธิภาพโดยรวมมีค่ามากกว่า 53 % การเดินเครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ร่วมกับเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่ จะต้องใช้เครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่จำนวน 1-2 เครื่องเท่านั้น เพื่อให้เครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ที่เหลือ มีความเร็วรอบไม่ต่ำกว่า 85 % เพื่อให้เครื่องสูบน้ำสามารถทำงานอยู่ในช่วง Best Efficiency point(BEP) และสามารถรักษาประสิทธิภาพโดยรวมให้มีค่ามากกว่า 50 % ได้

คำสำคัญ: การจัดการพลังงาน, ระบบสูบน้ำดิบ, เครื่องสูบน้ำ, อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบ

Abstract

The raw water pumping system functions to pump raw water from the source into the production system by using pumps connected in parallel. The control of the pumping rate is achieved by adjusting the pump speed to increase or decrease the pumping rate. However, installing variable speed drive on every pump requires a high investment cost. Installing variable speed drive on only some pumps is therefore a cost-saving approach. In this experiment, pumps with adjustable speeds are operated together with pumps of fixed speed, and the

optimal operating point for the raw water pumping system is determined to maximize energy savings at pumping rates of 8, 8.8, 9.6, and 10.4 $m^3/\sec$. This is done by adjusting the speed of the variable-speed pumps in combination with 1, 2, and 3 constant-speed pumps. The results show that at pumping rates of 8 and 8.8 $m^3/\sec$, operating 4 variable-speed pumps yields the highest overall efficiency of 55.1 % and 55.3 %, respectively. At pumping rates of 9.6 and 10.4 $m^3/\sec$, operating 2 variable-speed pumps together with constant-speed pumps yields the highest overall efficiency of 56.4 % and 53.4 %, respectively. In summary, operating an appropriate number of pumps according to the pumping rate, with pump speeds above 85 %, results in an overall efficiency greater than 53 %. When operating variable-speed pumps together with constant-speed pumps, only 1-2 constant-speed pumps should be used so that the remaining variable-speed pumps maintain speeds not lower than 85 %, thereby preserving high overall efficiency more than 50 %.

Keywords: Energy management, Raw water pumping, Pump, Variable speed drive

บทนำ

เครื่องสูบน้ำ เป็นเครื่องจักรที่ทำหน้าที่ในการสูบน้ำเพื่อนำน้ำไปใช้หมุนเวียนในระบบผลิต น้ำในอุตสาหกรรมจะใช้น้ำดิบจากแหล่งน้ำดิบเข้าสู่ระบบผลิต และนำมาปรับปรุงคุณภาพ เพื่อนำน้ำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม โดยทั่วไป แหล่งน้ำดิบจะอยู่ต่ำกว่าระดับพื้นดิน เพื่อทำหน้าที่ในการกักเก็บน้ำดิบ สำรองไว้สำหรับกิจกรรมในอุตสาหกรรม ดังนั้น เครื่องสูบน้ำที่นิยมใช้สูบน้ำดิบจากแหล่งน้ำดิบ จะเป็นเครื่องสูบน้ำชนิด Vertical Mixed Flow จะทำการสูบน้ำจากแหล่งน้ำที่ระดับต่ำกว่าได้

ระบบสูบน้ำดิบสำหรับระบบผลิตน้ำประปา จะสูบน้ำดิบจากแหล่งน้ำผิวดิน เข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปา และยกเฮดของน้ำให้สูงกว่าระบบผลิต เพื่อสามารถลำเลียงน้ำดิบไปตามระบบผลิตได้ โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก โดยทั่วไป ระบบสูบน้ำดิบจะใช้เครื่องสูบน้ำดิบ ตั้งแต่ 2 เครื่องขึ้นไป ต่อร่วมกันแบบขนานเพื่อเพิ่มอัตราการสูบน้ำดิบเข้าระบบผลิต และควบคุมความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำเพื่อปรับอัตราการไหลให้สอดคล้องกับความต้องการ

ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการไหล, เฮด และกำลังของเครื่องสูบน้ำกับความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำ ดังสมการ (1), (2) และ (3)

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (1)$$

$$\frac{H_2}{H_1} = (\frac{N_2}{N_1})^2 \quad (2)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = (\frac{N_2}{N_1})^3 \quad (3)$$

โดย Q_1 คือ อัตราการไหลก่อน
Q_2 คือ อัตราการไหลหลัง
N_1 คือ ความเร็วรอบก่อน
N_2 คือ ความเร็วรอบหลัง
H_1 คือ เฮดก่อน
H_2 คือ เฮดหลัง
P_1 คือ กำลังก่อน
P_2 คือ กำลังหลัง

การประเมินประสิทธิภาพโดยรวมของระบบสูบน้ำดิบ จะเปรียบเทียบในอัตราส่วนของกำลังด้าน Output ต่อกำลังด้าน Input Hydraulic Power ของน้ำ กับ กำลังรวมของเครื่องสูบน้ำทุกเครื่อง ดังสมการ (4)

$$\eta = \frac{\rho g Q H}{P} \quad (4)$$

โดย P คือ กำลังของเครื่องสูบน้ำ (W)

ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)

Q คือ อัตราการไหล $(m^3/\sec)$

H คือ Total Head (m)

η คือ ประสิทธิภาพ $(\%)$

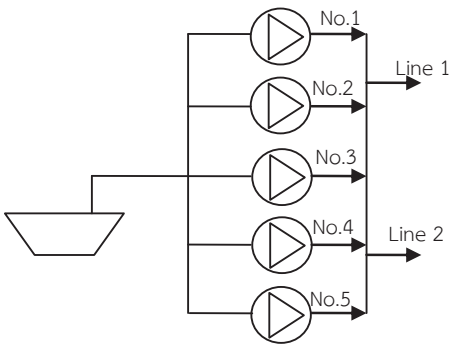
การเดินเครื่องสูบน้ำดิบ โดยทั่วไปจะติดตั้งการอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบ (Variable Speed Drive, VSD) เข้ามาช่วยปรับความเร็วของเครื่องสูบน้ำ เพื่อปรับอัตราการสูบน้ำดิบให้สอดคล้องกับความต้องการและลดการใช้พลังงานได้ [1-3] แต่ชุด VSD เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าและมีความสูญเสียในอุปกรณ์เช่นกัน การติดตั้ง VSD อาจจะไม่ได้ประหยัดพลังงานในทุกกรณีไป ดังนั้น การเดินเครื่องสูบน้ำควรเดินเครื่องสูบน้ำให้ทำงานในช่วงใช้งานที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด (Best Efficiency Point, BEP) เพื่อให้สามารถเดินเครื่องสูบน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิผลที่ดีด้านพลังงาน และการปรับรูปแบบการเดินเครื่องสูบน้ำให้สอดคล้องอัตราการสูบน้ำ (Pumping Pattern) โดยพิจารณาการใช้พลังงานให้ต่ำที่สุดจะสามารถลดการใช้พลังงานได้เช่นกัน [4-6]

โดยทั่วไป ในระบบสูบน้ำดิบ จะติดตั้งเครื่องสูบน้ำในจำนวนเครื่องที่มากกว่าการใช้งานจริง เพื่อการบำรุงรักษาและการรักษาเสถียรภาพในระบบสูบน้ำดิบ ถึงแม้ว่า การติดตั้ง VSD ให้กับเครื่องสูบน้ำจะสามารถควบคุมอัตราการสูบน้ำได้ ในช่วงกว้าง และประหยัดพลังงานได้จากการปรับลดความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำ การติดตั้ง VSD ให้กับเครื่องสูบน้ำทุกเครื่อง จะสามารถลดการใช้พลังงานได้แต่จะต้องใช้เงินลงทุนที่สูงเช่นกัน [7]

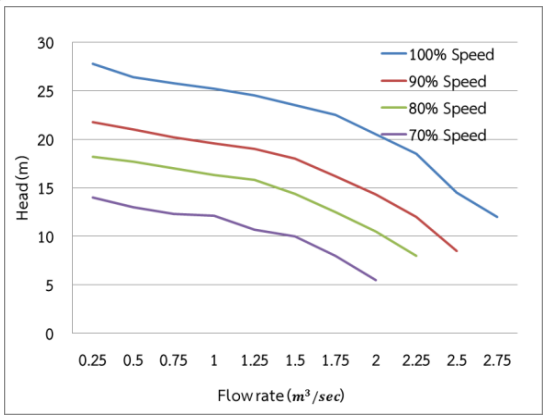
บทความนี้ จะศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยรวม ในการเดินเครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ร่วมกับเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่ ในระบบสูบน้ำดิบ โดยมีวัตถุประสงค์ คือ การหาสภาวะทำงานที่ทำให้การเดินเครื่องสูบน้ำให้ประหยัดพลังงานมากที่สุด (Pumping Pattern Optimization) ในกรณี 1.เปรียบเทียบการเดินเครื่องสูบน้ำจำนวน 4 เครื่องและ 5 เครื่อง ในอัตราการสูบน้ำเดียวกัน 2. เปรียบเทียบการเดินเครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ร่วมกับเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วคงที่จำนวน 1, 2 และ 3 เครื่อง

วิธีดำเนินงาน

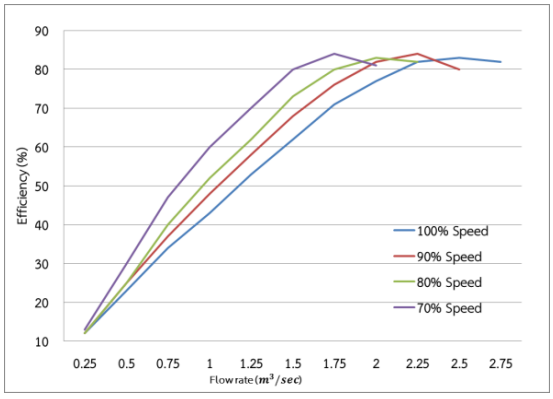
ระบบสูบน้ำดิบในระบบผลิตน้ำประปาโรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ จะสูบน้ำจากแหล่งน้ำผิวดินและสูบเข้าระบบผลิต ดังแสดงในรูปที่ 1 ดังนี้ 1. เครื่องสูบน้ำชนิด Centrifugal Mixed Flow จำนวน 5 เครื่อง ขนาด 530 kW, ความเร็วรอบ 740 รอบต่อนาที, Head 16 เมตร, อัตราการไหล 2.5 $m^3/\sec$, Performance ของเครื่องสูบน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2 เครื่องสูบน้ำต่อร่วมกันแบบขนาน และสูบน้ำจากแหล่งน้ำดิบเข้าสู่ท่อร่วม และ จ่ายน้ำออกเข้าสู่ไลน์การผลิต จำนวน 2 ไลน์ โดยมีอัตราการผลิตรวม 8.0-10.4 $m^3/\sec$ ควบคุมอัตราการไหลโดยการปรับวาล์วและควบคุมความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำ 2. แหล่งน้ำผิวดิน มีระดับน้ำ EL +0.20 เมตร ต่ำกว่าตัวเรือนเครื่องสูบน้ำที่ระดับน้ำ EL +2.50 เมตร น้ำดิบจะถูกส่งไปยังระดับท่อทางออกที่ ระดับ EL +10.25 เมตร และมีความสัมพันธ์ของเฮดและอัตราการสูบน้ำ (System curve) เป็นสมการโพลิโนเมียล $H = 10.05 + 0.0326Q^2$ ดังแสดงในรูปที่ 3



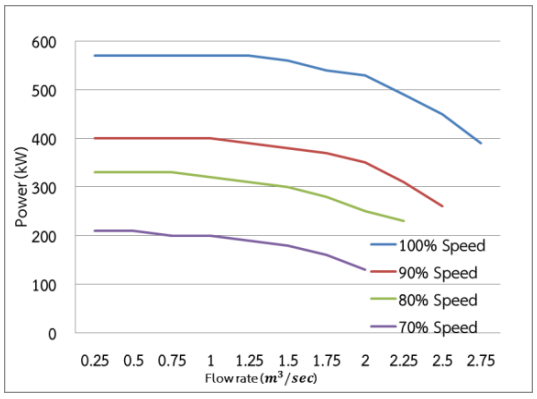
รูปที่ 1 Flow Diagram ระบบสูบน้ำดิบ



(ก)



(ข)



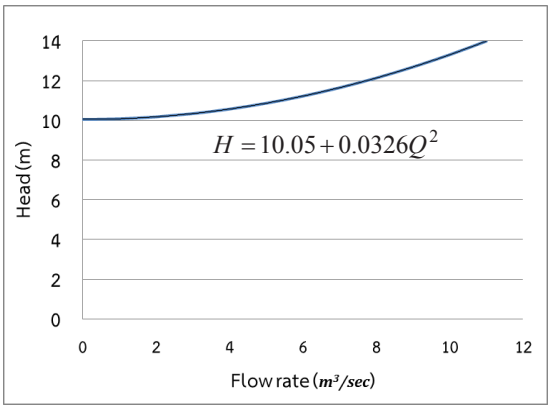
(ค)

รูปที่ 2 Performance curve ของเครื่องสูบน้ำ (ก) H-Q Curve (ข) Efficiency Curve (ค) Power Curve

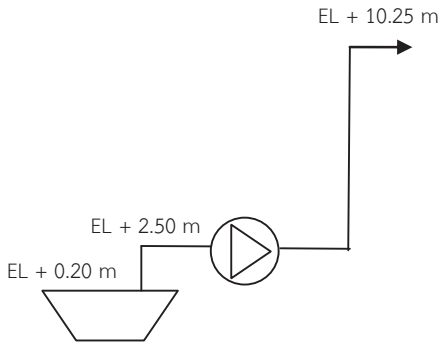
การทดลองนี้ จะศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยรวมในการเดินเครื่องสูบน้ำ 1. เปรียบเทียบระหว่างการเดินเครื่องสูบน้ำ 4 เครื่อง โดยการใช้ความเร็วรอบสูง และการเดินเครื่องสูบน้ำ 2. เปรียบเทียบจำนวนเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วคงที่ 100 % มาทดแทนเครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ โดยที่เครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้เครื่องอื่นจะปรับลดความเร็วรอบเพื่อควบคุมอัตราการสูบน้ำให้ได้ตามต้องการ และหาจำนวนเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่ ที่ประสิทธิภาพโดยรวมดีที่สุด 5 เครื่อง โดยการใช้ความเร็วรอบต่ำ

1. การเดินเครื่องสูบน้ำ

1.1 เครื่องสูบน้ำ 1 เครื่อง ความเร็วรอบ 100 %, เฮด 13 เมตร, อัตราการสูบน้ำ 2.5 m^3/sec กรณีอัตราการสูบน้ำรวม 8.0, 8.8 และ 9.6 m^3/sec สามารถเดินเครื่องสูบน้ำ 4 เครื่อง โดยใช้ความเร็วรอบสูงได้ หรือเดินเครื่องสูบน้ำ 5 เครื่อง โดยใช้ความเร็วรอบต่ำ



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 System curve และระดับน้ำของระบบสูบน้ำดิบ (ก) System curve (ข) ระดับน้ำของแหล่งน้ำ, เครื่องสูบน้ำและท่อทางออก

1.2 เดินเครื่องสูบน้ำ 5 เครื่อง และควบคุมอัตราสูบน้ำรวม 10.4 m^3/sec

1.3 ทำการทดลองซ้ำข้อ 1.1 และ 1.2 โดยการเดินเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่ 100 % ทดแทนเครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ จำนวน 1, 2 และ 3 เครื่อง ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4

2. การจำลองการเดินเครื่องสูบน้ำ

ใช้โปรแกรม Epanet 2.0 ในการจำลองการเดินเครื่องสูบน้ำ เพื่อหาค่าทางชลศาสตร์ โดยให้การสูญเสียทางด้านมอเตอร์ไฟฟ้าตามมาตรฐาน มอก. 866 เล่ม 30(1) กรณี มอเตอร์ตามมาตรฐาน IE3 ขนาด 250 – 1000 kW มีค่าประสิทธิภาพ 95 % หรือ คิดเป็นความสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้า 5 %[8] และอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมีค่าประสิทธิภาพ 92-98 % คิดเป็นค่าความสูญเสียในอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบเฉลี่ย 5 % [9]

3. การวิเคราะห์

3.1 คำนวณค่าประสิทธิภาพโดยรวมของระบบสูบน้ำดิบตามสมการ (4)

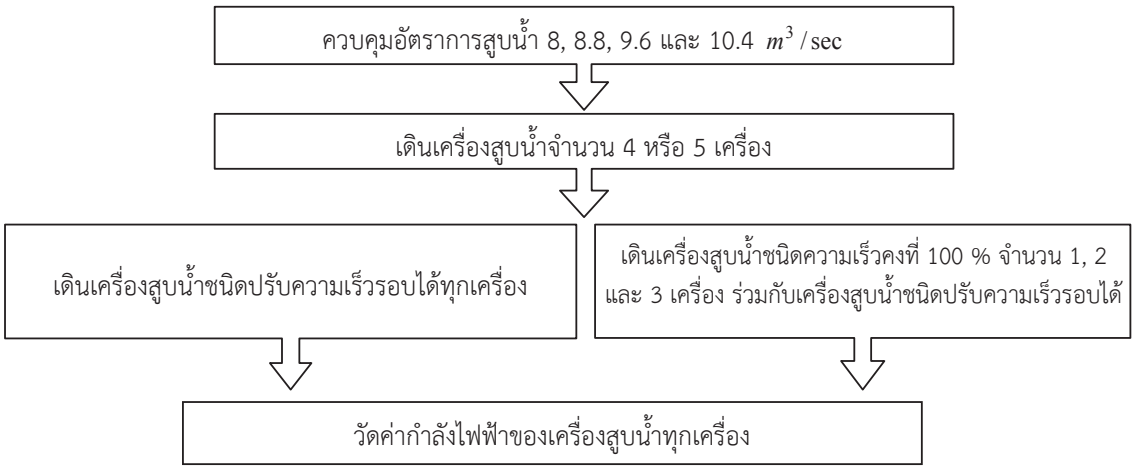
3.2 เปรียบเทียบการทดลองแต่ละการทดลองในอัตราการผลิตเดียวกัน เพื่อหาสภาวะทำงานที่ทำให้ประสิทธิภาพการเดินเครื่องสูบน้ำดีที่สุด

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

จากตารางที่ 1 ผลการทดลองการเดินเครื่องสูบน้ำในระบบสูบน้ำดิบ พบว่า อัตราการผลิตรวม 8 m^3/sec การเดินเครื่องสูบน้ำ จำนวน 4 เครื่อง และมีการเดินเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่ จำนวน 1, 2 และ 3 เครื่อง (การทดลองที่ 1-3) เดินเครื่องสูบน้ำปรับความเร็วรอบได้ 4 เครื่อง (การทดลองที่ 4) พบว่า การเดินเครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ 4 เครื่อง มีค่าประสิทธิภาพโดยรวมสูงที่สุด เท่ากับ 55.1 % และการเดินเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่ จำนวน 1 เครื่อง มีค่าประสิทธิภาพโดยรวมรองลงมา เท่ากับ 53.5 %

การเดินเครื่องสูบน้ำจำนวน 5 เครื่อง (การทดลองที่ 5-8) พบว่า การเดินเครื่องสูบน้ำปรับความเร็วรอบได้ 5เครื่อง มีค่าประสิทธิภาพโดยรวมสูงที่สุด เท่ากับ 49.0% และการเดินเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่ จำนวน 1 เครื่อง มีค่าประสิทธิภาพโดยรวมรองลงมา เท่ากับ 47.7 %

อัตราการผลิต 8.8 m^3/sec การเดินเครื่องสูบน้ำจำนวน 4 เครื่อง (การทดลองที่ 9-12) พบว่า การเดินเครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ 4 เครื่อง และการเดินเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่ จำนวน 1 เครื่อง มีค่าประสิทธิภาพโดยรวมสูงที่สุด เท่ากับ 55.3 % และ การเดินเครื่องสูบน้ำชนิด



รูปที่ 4 Flow Diagram วิธีการทดลอง

ความเร็วรอบคงที่ จำนวน 2 เครื่อง มีค่าประสิทธิภาพโดยรวมรองลงมา เท่ากับ 54.9 %

การเดินเครื่องสูบน้ำจำนวน 5 เครื่อง (การทดลองที่ 13-16) พบว่า การเดินเครื่องสูบน้ำปรับความเร็วรอบได้ 5 เครื่อง มีค่าประสิทธิภาพโดยรวมสูงที่สุด เท่ากับ 51.7 % และการเดินเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่ จำนวน 1 เครื่อง มีค่าประสิทธิภาพโดยรวมรองลงมา เท่ากับ 50.6 %

อัตราการผลิต 9.6 m^3/sec การเดินเครื่องสูบน้ำจำนวน 4 เครื่อง (การทดลองที่ 17-20) พบว่า การเดินเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่ จำนวน 2 เครื่อง มีค่าประสิทธิภาพโดยรวมสูงที่สุด เท่ากับ 56.4 % และ การเดินเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่ จำนวน 1 เครื่อง มีค่าประสิทธิภาพโดยรวมรองลงมา เท่ากับ 56.1 %

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องสูบน้ำของระบบสูบน้ำดิบ

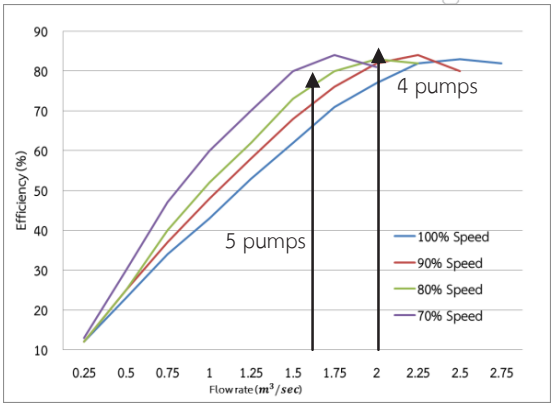
ลำดับ	อัตราการสูบน้ำ (m^3/sec)	เครื่องสูบน้ำ										η (%)	หมายเหตุ
		No.1		No.2		No.3		No.4		No.5			
1	8	197	481	453	740			453	740	453	740	50.2	1 pump 65% speed, 3 pumps 100% speed
2	8	299	548	445	740			445	740	299	548	52.5	2 pumps 74% speed, 2 pumps 100% speed
3	8	338	607			338	607	447	740	338	607	53.5	3 pumps 82% speed, 1 pump 100% speed
4	8	354	636	354	636			354	636	354	636	55.1	4 pumps 86% speed
5	8	319	577	319	577	319	577	319	577	319	577	49.0	5 pumps 78% speed
6	8	298	540	445	740	298	540	298	540	298	540	47.7	4 pumps 73% speed, 1 pump 100% speed
7	8	271	503	445	740	271	503	445	740	271	503	45.9	3 pumps 68% speed, 2 pump 100% speed
8	8	238	518	477	740	477	740	477	740	238	518	41.0	2 pumps 70% speed, 3 pump 100% speed Dimmed Valve
9	8.8	277	511	445	740	445	740	445	740			53.3	1 pump 69% speed, 3 pumps 100% speed
10	8.8	337	607	446	740			446	740	337	607	54.9	2 pumps 82% speed, 2 pumps 100% speed
11	8.8	369	651			369	651	447	740	369	651	55.3	3 pumps 88% speed, 1 pump 100% speed
12	8.8	388	673	388	673			388	673	388	673	55.3	4 pumps 91% speed
13	8.8	332	599	332	599	332	599	332	599	332	599	51.7	5 pumps 81% speed
14	8.8	312	570	447	740	312	570	312	570	312	570	50.6	4 pumps 77% speed, 1 pump 100% speed
15	8.8	294	525	446	740	294	525	446	740	294	525	48.4	3 pumps 71% speed, 2 pumps 100% speed
16	8.8	266	481	447	740	447	740	447	740	266	481	45.8	2 pumps 65% speed, 3 pumps 100% speed
17	9.6	342	614	447	740	447	740	447	740			55.6	1 pump 83% speed, 3 pumps 100% speed
18	9.6	385	673	446	740			446	740	385	673	56.4	2 pumps 91% speed, 2 pumps 100% speed
19	9.6	408	696	446	740	408	696			408	696	56.1	3 pumps 94% speed, 1 pump 100% speed
20	9.6	430	710	430	710			430	710	430	710	54.5	4 pumps 96% speed
21	9.6	358	629	358	629	358	629	358	629	358	629	52.4	5 pumps 85% speed
22	9.6	333	599	447	740	333	599	333	599	333	599	52.6	4 pump 81% speed, 1 pump 100% speed
23	9.6	309	562	449	740	309	562	449	740	309	562	51.3	3 pump 76% speed, 2 pumps 100% speed
24	9.6	271	503	446	740	446	740	446	740	271	503	49.8	2 pump 68% speed, 3 pumps 100% speed
25	10.4	383	659	383	659	383	659	383	659	383	659	53.0	5 pumps 89% speed
26	10.4	363	636	452	740	363	636	363	636	363	636	53.3	4 pumps 86% speed, 1 pump 100% speed
27	10.4	334	599	448	740	334	599	448	740	334	599	53.4	3 pumps 81% speed, 2 pumps 100% speed
28	10.4	301	540	447	740	447	740	447	740	301	540	52.2	2 pumps 73% speed, 3 pumps 100% speed

การเดินเครื่องสูบน้ำจำนวน 5 เครื่อง (การทดลองที่ 21-24) พบว่า การเดินเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่ จำนวน 1 เครื่อง มีค่าประสิทธิภาพโดยรวมสูงที่สุด เท่ากับ 52.6 % และ การเดินเครื่องสูบน้ำปรับความเร็วรอบได้ 5 เครื่อง มีค่าประสิทธิภาพโดยรวมรองลงมา เท่ากับ 52.4 % อัตราการผลิต 10.4 $m^3/\sec$ การเดินเครื่องสูบน้ำ จำนวน 5 เครื่อง (การทดลองที่ 25-28) พบว่า การเดินเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่ จำนวน 2 เครื่อง มีค่าประสิทธิภาพโดยรวมสูงที่สุด เท่ากับ 53.4 % และการเดินเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่ จำนวน 1 เครื่อง มีค่าประสิทธิภาพโดยรวมรองลงมา เท่ากับ 53.3 %

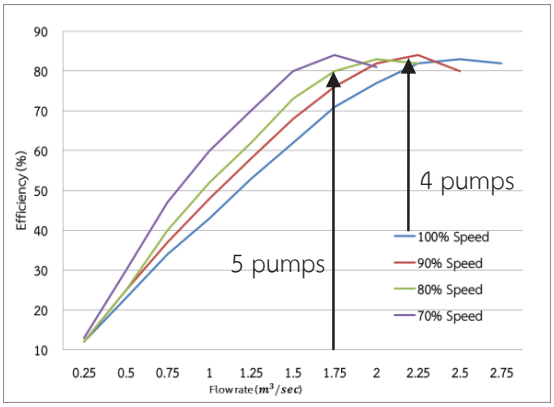
1. เปรียบเทียบการเดินเครื่องสูบน้ำจำนวน 4 และ 5 เครื่อง

อัตราการสูบน้ำ 8, 8.8 และ 9.6 $m^3/\sec$ สามารถเดินเครื่องสูบน้ำจำนวน 4 เครื่องได้ และจะให้ค่าประสิทธิภาพโดยรวมมีค่าสูงกว่า การเดินเครื่องสูบน้ำจำนวน 5 เครื่อง เนื่องจากการเดินเครื่องสูบน้ำ 4 เครื่อง จะทำให้จุดใช้งานของเครื่องสูบน้ำอยู่ในจุดที่มีประสิทธิภาพต่อเครื่องสูงกว่าการเดินเครื่องสูบน้ำ 5 เครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 5 การเดินเครื่องสูบน้ำจำนวน 5 เครื่อง แม้จะลดความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำลง และส่งผลให้กำลังของเครื่องสูบน้ำลดลงได้ แต่ทำให้ประสิทธิภาพต่อเครื่องลดลงด้วย เนื่องจากเมื่อลดความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำลง จะส่งผลให้เฮดของเครื่องสูบน้ำลดลงด้วย และจุดทำงานของเครื่องสูบน้ำไม่อยู่ในช่วง BEP

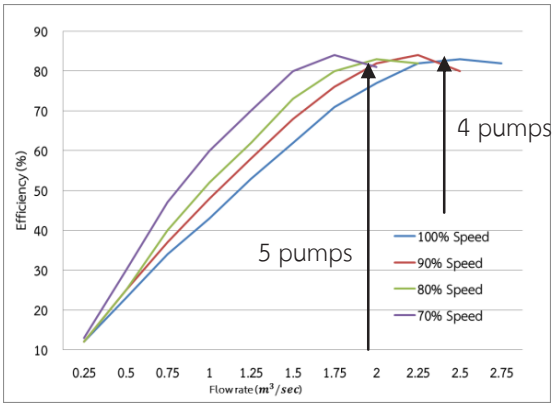
กรณีอัตราการสูบน้ำ 10.4 $m^3/\sec$ จะต้องเดินเครื่องสูบน้ำจำนวน 5 เครื่อง เนื่องจากเครื่องสูบน้ำ 1 เครื่อง ที่ เฮด 13 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3 จะมีอัตราการสูบน้ำ 2.5 $m^3/\sec$ ต่อเครื่อง พบว่า ไม่สามารถเดินเดินสูบน้ำเพียง 4 เครื่อง ได้เนื่องจากอัตราการสูบน้ำไม่เพียงพอการสูบน้ำในอัตราดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 2(ก)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5 ประสิทธิภาพต่อเครื่องของเครื่องสูบน้ำ กรณีเดินเครื่องสูบน้ำ จำนวน 4 และ 5 เครื่อง

(ก) อัตราการสูบน้ำ 8 $m^3/\sec$

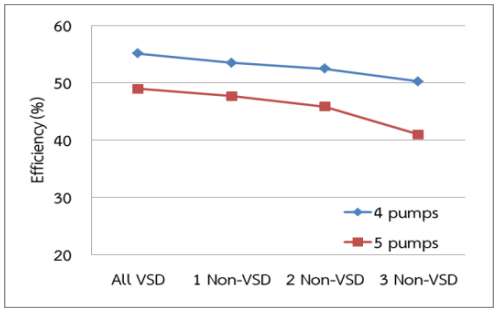
(ข) อัตราการสูบน้ำ 8.8 $m^3/\sec$

(ค) อัตราการสูบน้ำ 9.6 $m^3/\sec$

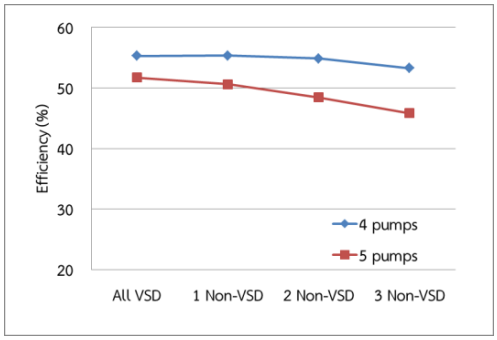
2. เปรียบเทียบการเดินเครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ร่วมกับเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่

การเดินเครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ร่วมกับเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่ จะส่งให้เครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้จำเป็นต้องลดความเร็วรอบลงมาก เพื่อลดอัตราการสูบน้ำลงชดเชยกับเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่ที่ไม่สามารถปรับความเร็วรอบได้ จึงส่งผลให้จุดใช้งานของเครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ ไม่ได้อยู่ในช่วง BEP จึงมีค่าประสิทธิภาพต่ำ

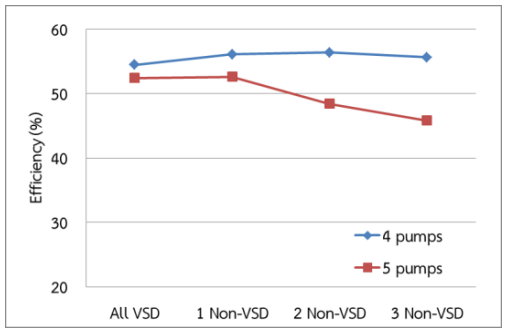
จากรูปที่ 2(ข) จะพบว่า ช่วง BEP ของเครื่องสูบน้ำมีดังนี้ 1.กรณีความเร็วรอบ 70% อัตราการสูบน้ำ 1.5-1.9 m^3/sec 2.กรณีความเร็วรอบ 80% อัตราการสูบน้ำ 1.75–2.25 m^3/sec 3.กรณีความเร็วรอบ 90% อัตราการสูบน้ำ 2.0–2.5 m^3/sec 4.กรณีความเร็วรอบ 100% อัตราการสูบน้ำ 2.25–2.75 m^3/sec จากรูปที่ 3 พิจารณาอัตราสูบน้ำ 8.8-10.4 m^3/sec จะได้เฮดของระบบสูบน้ำดิบมีค่า 12-13 เมตร และจากรูปที่ 2 พบว่าการเดินเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วคงที่ 1 เครื่อง จะให้อัตราการสูบน้ำ 2.6 m^3/sec ดังนั้น หากอัตราการสูบน้ำต่ำ (8 m^3/sec) การเดินเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วคงที่จะทำให้เครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้เครื่องอื่น จะต้องลดความเร็วรอบลงมากเพื่อลดอัตราการสูบน้ำ จึงทำให้เครื่องสูบน้ำไม่ได้ใช้งานในช่วง BEP ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำจึงลดลงและทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมลดลงด้วย ดังแสดงในรูปที่ 6 สำหรับกรณีอัตราการสูบน้ำสูง (8.8, 9.6 และ 10.4 m^3/sec) การเดินเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่ จำนวน 1 และ 2 เครื่อง พบว่า ค่าประสิทธิภาพโดยรวม เมื่อเทียบกับการเดินเครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ทุกเครื่อง มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากอัตราการสูบน้ำสูงจะทำให้เครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้เครื่องอื่น มีความเร็วรอบมากกว่า 80% และอยู่ในช่วง BEP จึงทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำยังมีค่าสูงและส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบมีค่าสูงเช่นกัน



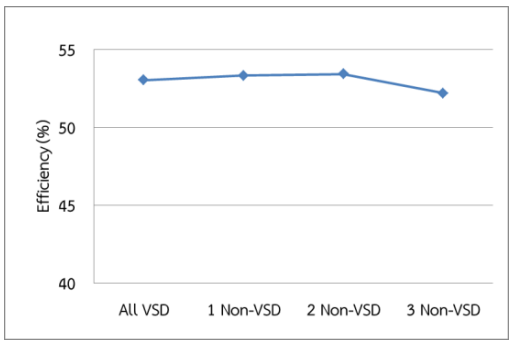
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 6 ประสิทธิภาพโดยรวม กรณีเดินเครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ร่วมกับเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วคงที่ (ก) อัตราการสูบน้ำ 8 m^3/sec
(ข) อัตราการสูบน้ำ 8.8 m^3/sec
(ค) อัตราการสูบน้ำ 9.6 m^3/sec
(ง) อัตราการสูบน้ำ 10.4 m^3/sec

การเดินเครื่องสูบน้ำในระบบท่อเดียวกัน ความดันในเส้นท่อจะเท่ากันในทุกเครื่องสูบน้ำ แต่เมื่อเครื่องสูบน้ำเดินเครื่องด้วยความเร็วรอบที่ไม่เท่ากัน เครื่องสูบน้ำที่ความเร็วรอบต่างกันจะสร้างเฮดได้ต่าง ดังรูปที่ 2 จึงทำให้เครื่องสูบน้ำที่ความเร็วรอบต่ำกว่า ซึ่งสร้างเฮดได้ต่ำกว่า แต่เมื่อต้องเดินร่วมกับเครื่องสูบน้ำที่ความเร็วรอบสูงกว่า เฮดสูงกว่า จะทำให้จุดทำงานถอยหลัง อัตราการสูบน้ำลดลง และประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำลดลง

การเดินเครื่องสูบน้ำที่ความเร็วรอบใกล้เคียงกันจะทำให้เครื่องสูบน้ำแต่ละเครื่องสร้างเฮดที่ใกล้เคียงกันจะทำให้เครื่องสูบน้ำแต่ละเครื่องสามารถสมดุลย์ความดันในระบบท่อ และสามารถใช้ความเร็วรอบเครื่องสูบน้ำให้เหมาะสมกับการเดินเครื่องได้

3. การหาสภาวะทำงานที่ทำให้การเดินเครื่องสูบน้ำประหยัดพลังงาน

การต่อเครื่องสูบน้ำร่วมกันแบบขนาน เป็นการต่อเครื่องสูบน้ำเพื่อเพิ่มอัตราการสูบน้ำ ในการทดลองนี้เป็นเครื่องสูบน้ำชนิด Centrifugal Mixed Flow

การเดินเครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ทุกเครื่องจะมีประสิทธิภาพโดยรวมมีค่าสูง ทั้งกรณีเดินเครื่องสูบน้ำ 4 และ 5 เครื่องเนื่องจาก Efficiency Curve ของเครื่องสูบน้ำ เมื่อปรับลดความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำลงมา จะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำยังมีค่าสูงและส่งผลให้จุดทำงานของเครื่องสูบน้ำมีความใกล้เคียงกับจุด BEP ของแต่ละช่วงความเร็วรอบมากที่สุด ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องสูบน้ำมีค่าสูงและประหยัดพลังงานได้

การพิจารณาจำนวนเครื่องสูบน้ำให้เหมาะสมกับอัตราการผลิต กรณีอัตราการผลิต 8 $m^3/\sec$ การเดินเครื่องสูบน้ำจำนวน 4 เครื่อง จะได้อัตราการผลิตที่เพียงพอกับความต้องการและมีค่าประสิทธิภาพโดยรวมดีกว่าการเดินเครื่องสูบน้ำจำนวน 5 เครื่อง เนื่องจากอัตราการผลิต 8 $m^3/\sec$ การเดินเครื่องสูบน้ำจำนวน 5 เครื่อง จะส่งผลให้เครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบจะต้องลดความเร็วรอบลงเหลือ 70-75 % และจุดใช้งานไม่ได้อยู่ในช่วง BEP จึงส่งผลให้เครื่องสูบมีค่าประสิทธิภาพโดยรวมที่ต่ำกว่าการเดินเครื่องสูบน้ำจำนวน 4 เครื่อง ซึ่งจะใช้ความเร็วรอบ 75-85% และกรณีอัตราการผลิต 8.8 $m^3/\sec$ จะเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับอัตราการผลิต 8 $m^3/\sec$

สำหรับอัตราการสูบน้ำ 8.8, 9.6 และ 10.4 $m^3/\sec$ การเดินเครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ร่วมกับเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่ จำนวน 1 เครื่อง จะพบว่า มีค่าประสิทธิภาพโดยรวมสูงที่สุด เนื่องจากอัตราการสูบน้ำดังกล่าว เครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้มีความเร็วรอบมากกว่า 80 % จึงทำให้เครื่องสูบน้ำทั้งชนิดปรับความเร็วรอบได้และชนิดความเร็วรอบคงที่มีอัตราการสูบไม่แตกต่างกันมากนัก

จากรูปที่ 3(ก) อัตราการสูบน้ำ 8.8-10.4 $m^3/\sec$ จะมีเฮดอยู่ในช่วง 12.5-13.5 เมตร ซึ่งเฮดของเครื่องสูบน้ำที่ความเร็วรอบ 70 และ 80 % จะมีอัตราการสูบน้ำ 1 และ 1.75 $m^3/\sec$ ตามลำดับ พบว่า จุดทำงานของเครื่องสูบน้ำจะไม่ได้อยู่ในช่วง BEP จึงทำให้ประสิทธิภาพต่อเครื่องมีค่าต่ำ และกรณีเดินเครื่องสูบน้ำที่ความเร็วรอบมากกว่า 85 % จะได้อัตราการสูบน้ำมากกว่า 2 $m^3/\sec$ และจุดทำงานของเครื่องสูบน้ำอยู่ในช่วง BEP จึงทำให้ประสิทธิภาพต่อเครื่องมีค่าสูง ดังแสดงในรูปที่ 2

การลงทุนติดตั้งอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบ สำหรับเครื่องสูบน้ำขนาด 530 kW จะใช้เงินลงทุน 8 ล้านบาทต่อเครื่อง พิจารณาอัตราการสูบน้ำ 9.6 $m^3/\sec$ ค่าพลังงานไฟฟ้า 4 บาท/kWh จะพบว่า การติดตั้งอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบ 1 เครื่อง จะมีระยะคืนทุน 1 ปี และมีผลประหยัด 12.3 % แต่เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ผลประหยัดที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก อีกทั้งยังส่งผลให้ระยะคืนทุนเพิ่มขึ้นตามจำนวนอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบที่ติดตั้งเพิ่มอีกด้วย ดังแสดงในตารางที่ 2

สำหรับการทดลองนี้เมื่อพิจารณา ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบสูบน้ำดิบ ผลประหยัดจากการติดตั้งอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบและเงินลงทุนจากการติดตั้งอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบ พบว่า การติดตั้ง

อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบให้กับเครื่องสูบน้ำจำนวน 2 เครื่อง ใช้เงินลงทุน 16 ล้านบาทและมีระยะคืนทุน 1.8 ปี แต่จะสามารถประหยัดพลังงานในระบบสูบน้ำดิบได้สูงสุด 13.4 % แต่ถ้าพิจารณาถึงอัตราการสูบน้ำตลอดช่วง 8.0-10.4 m^3/sec จะพบว่า การติดตั้งอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบให้กับเครื่องสูบน้ำจำนวน 3 เครื่อง แม้จะต้องใช้เงินลงทุน 24 ล้าน ระยะคืนทุน 2.7 ปี สามารถประหยัดพลังงานได้ 13.0 % แต่ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมในอัตราการสูบน้ำ 8.0-10.4 m^3/sec มีค่าประสิทธิภาพที่ดีในทุกอัตราการสูบน้ำ

เครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ จะสามารถปรับอัตราการสูบน้ำได้ในช่วงกว้าง โดยอาศัยการปรับความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำ[10] เพื่อเพิ่มหรือลดอัตราการสูบน้ำ และ เฮด โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างตาม Affinity Law [11] นอกจากนี้ยังสามารถประหยัดพลังงานได้จากการลดความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำ แต่จะมีการสูญเสียพลังงานในอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบเพิ่มขึ้นมา เงินลงทุนและค่าใช้จ่ายด้านการบำรุงรักษา ส่วนเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่ จะอาศัยการหรี่วาล์วเพื่อลดอัตราการสูบน้ำ ซึ่งสามารถควบคุมอัตราการสูบน้ำได้ส่วนหนึ่งแต่จะไม่สามารถลดการใช้พลังงานลงได้

การเดินเครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ร่วมกับเครื่องสูบชนิดความเร็วรอบคงที่ ควรเดินเครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบไม่ได้จำนวน 1 หรือ 2 เครื่อง โดยที่เครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ จะต้องมีความเร็วรอบไม่น้อยกว่า 85% เพื่อให้เครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ สามารถใช้งานในช่วง BEP ได้ ดังนั้น การเดินเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่ร่วมกับเครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการลดเงินลงทุนในการติดตั้งอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบ โดยการติดตั้งเท่าที่จำเป็นและยังสามารถบริหารจัดการให้ระบบสูบน้ำดิบมีประสิทธิภาพโดยรวมที่ดีและสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า

สรุปผลการทดลอง

การเดินเครื่องสูบน้ำในระบบสูบน้ำดิบจะเดินเครื่องสูบน้ำหลายเครื่องต่อร่วมกันแบบขนานเพื่อเพิ่มอัตราการสูบน้ำ ระบบสูบน้ำจากแหล่งน้ำดิบที่ระดับต่ำกว่าเครื่องสูบน้ำเข้าสู่ระบบผลิต

1. การพิจารณาเลือกจำนวนเครื่องสูบน้ำให้เหมาะสมกับอัตราการสูบน้ำ จะทำให้เครื่องสูบน้ำสามารถเดินเครื่องในช่วง BEP ได้
2. การเดินเครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ทุกเครื่อง เหมาะสมกับอัตราการสูบน้ำในช่วงอัตราการสูบต่ำ – สูง สามารถใช้งานได้ในช่วงกว้าง
3. การเดินเครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ร่วมกับเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่ จำนวน 1 - 2 เครื่อง จะให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบสูบน้ำดีที่สุด

ตารางที่ 2 ผลประหยัดจากการติดตั้งอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบ

สถานะ	Energy Consumption (kWh/ปี)	Energy Saving (kWh/ปี)	% Saving	ระยะคืนทุน (ปี)
4 pumps 100% Dimmed Valve	16,819,200			
3 pumps 100% + 1 VSD-pump	14,743,080	2,076,120	12.3%	1.0
2 pumps 100% + 2 VSD-pumps	14,559,120	2,260,080	13.4%	1.8
1 pump 100% + 3 VSD-pumps	14,629,200	2,190,000	13.0%	2.7
4 VSD-pumps	15,067,200	1,752,000	10.4%	4.6

หมายเหตุ : 1. กรณีอัตราการสูบน้ำ 9.6 m^3/sec
2. ค่าพลังงานไฟฟ้า 4 บาท/kWh

การเดินเครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ จะสามารถควบคุมอัตราการสูบน้ำได้ในช่วงกว้างโดยอาศัยการปรับความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำแต่การติดตั้งอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบจะมีค่าใช้จ่ายในงานติดตั้ง งานบำรุงรักษาและการสูญเสียในอุปกรณ์การเดินเครื่องสูบน้ำชนิดปรับความเร็วรอบได้ร่วมกับเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วรอบคงที่ จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการบริหารจัดการ

เอกสารอ้างอิง

[1] Sookkumnerd, C., Priprem, S., Hnunwong, A., Nadpoa, T. and Pholkor, P. (2008). Energy conservation of raw water pump at nampong power plant by using variable speed drive, paper presented in *The 4th Conference on Energy Network of Thailand*, Chonburi, Thailand.

[2] Oshurbekov, S., Kazakbaev, V., Prakht, V., Dmitrievskii, V. and Gevorkov, L. (2020). Energy consumption comparison of a single variable-speed pump and a system of two pumps: variable-speed and fixed speed, *Applied Sciences*, vol. 10(24), pp. 8820.

[3] Jilani, A. and Razali, A. (2018). Variable speed pump performance characteristics for domestic application, paper presented in *MTEC Web of Conferences 225*, Pahang, Malaysia.

[4] Pipathattakul, M. and Thadniam, V. (2011). Effect of rotational speed on pump performance, *Pathumwan Academic Journal*, vol. 1(1), pp. 59-64.

[5] Kalaiselvan, A.S.V., Subramaniam, U., Shanmugam, P. and Hanigovszki, N. (2016). A comprehensive review on energy efficiency enhancement initiatives in centrifugal pumping station, *Applied Energy*, vol. 181, pp. 495-513.

[6] DeBenedictis, A., Haley, B., Woo, C.K. and Cutter, E. (2013). Operational energy-efficiency improvement of municipal water pumping in California, *Energy*, vol. 53, pp. 237-243.

[7] Meetara, T. (2013). *Study on energy management system for water supply generating system: case study of provincial waterworks authority Lopburi* (Master dissertation). King Mongkut University of Technology Thonburi.

[8] Thai Industrial Standards Institute. (2017). Rotating electrical machines – Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code). Thai Industrial Standards Institute.

[9] Pooley, E.I.J. (2022). Variable speed drives, *Energy in building & industry*, pp. 17-20.

[10] Nugroho, D.O.W., Soehartanto, T. and Wibiwo, T.A. (2020). Performance of water pump on distribution and transmission process using variable speed drive, *IPTEK Journal of Engineering*, vol. 6(2), 2013, pp. 22-27.

[11] Bogarrasa, K. (2022). The effect of rotational speed variation on the performance in the centrifugal pump, *Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering*, vol. 10(1), pp. 1-7.

งานบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
โทรศัพท์ 043-283700 กด 83120 โทรสาร 043-338870
อีเมล์ gs.eng.kkc@rmuti.ac.th, gs.eng.rmuti.kkc@gmail.com
Website : www.eng.rmuti.ac.th