บทที่ 4
ผลการวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลทดสอบของคอนกรีตกำลังสูงผสมน้ำยางข้น ได้แก่ การทดสอบกำลังอัดคอนกรีตทรงกระบอก ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และการทดสอบการซึมผ่านของน้ำ ทั้งที่ไม่ได้ผสมน้ำยางข้น และที่ผสมน้ำยางข้น ในอัตราส่วนต่าง ๆ ตามที่กำหนดไว้

4.1 ผลการทดสอบการยุบตัวของคอนกรีตสดผสมน้ำยางข้น

จากการทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีตพบว่า คอนกรีตควบคุมที่ไม่มีส่วนผสมของสารลดน้ำพิเศษจะมีค่าการยุบตัวต่ำกว่า 7.5 เซนติเมตร ตามที่ออกแบบไว้ จึงได้ทดลองแบบลองผิดลองถูกจนได้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษร่วมกับหน่วงการก่อตัวเท่ากับร้อยละ 1.25 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ หรือเท่ากับ 6.8 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จึงให้ค่ายุบตัวตามที่ออกแบบไว้ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงใช้สารลดน้ำพิเศษดังกล่าวในปริมาณ 6.8 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรทุกส่วนผสม ซึ่งค่าการยุบตัวที่ได้ของแต่ละส่วนผสมแสดงในตารางที่ 4.1 และยังพบว่าการแทนที่น้ำยางข้นเพิ่มขึ้นจะยิ่งทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการทำงานได้ลดลง ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดผสมน้ำยางข้น

ส่วนผสม	ค่าการยุบตัว(ซม.)
Control	11.5
HRL-0.5	10.2
HRL-1.0	10.0
HRL-1.5	9.6
HRL-2.0	9.0

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

4.2 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงผสมน้ำยางข้น

จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.1 พบว่ากำลังอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีตควบคุมมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดออกแบบเล็กน้อย และพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผสมน้ำยางข้นที่ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของน้ำ และเมื่อผสมปริมาณน้ำยางข้นเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เป็นร้อยละ 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนักของน้ำ พบว่ากำลังอัดลดลงตามลำดับ

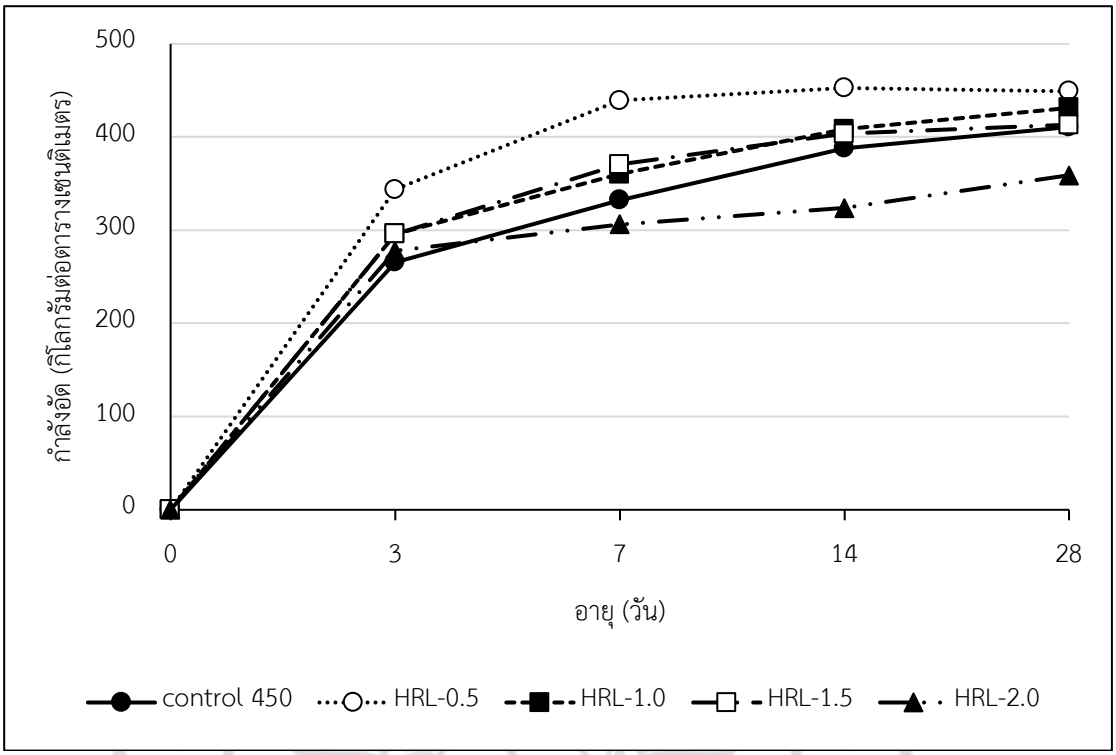
ซึ่งหมายความว่าการใส่น้ำยางข้นมีผลต่อความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงอย่างเห็นได้ชัด ในงานวิจัยนี้ส่วนผสมชุดควบคุมมีความสามารถในการรับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 411 กก/ตร.ซม. สำหรับคอนกรีตที่ผสมน้ำยางข้นร้อยละ HRL-0.5 มีกำลังอายุที่ 28 วัน เท่ากับ 449 กก/ตร.ซม. ซึ่งพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นจากชุดควบคุมเล็กน้อย ส่วน HRL-1.0, HRL-1.5 และ HRL-2.0 มีค่ากำลังอัดที่ 28 วันเท่ากับ 431, 413 และ 359 กก/ตร.ซม. ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.1 จะพบกว่ากำลังอัดที่ 28 วันของชุดทดสอบ HRL-0.5, HRL-1.0 และ HRL-1.5 มีค่าใกล้เคียงกับชุด Control แม้กำลังอัดของ HRL-0.5 จะสูงกว่าอย่างชัดเจนในช่วงอายุต้นๆ ก็ตาม ส่วน HRL-2.0 ที่มีกำลังอัดที่ 28 วัน แตกต่างจากกลุ่มอย่างชัดเจน โดยมีกำลังอัดที่อายุ 28 วันต่ำกว่าคอนกรีตชุด Control ประมาณร้อยละ 13

สาเหตุที่ HRL-0.5 มีกำลังอัดช่วงต้นสูงกว่าชุด Control อย่างชัดเจน อาจเนื่องมาจากเนื้อยางเข้าไปแทรกตัวในรูพรุนของคอนกรีต ซึ่งเนื้อยางเหล่านั้นจะช่วยพยุงโครงสร้างโพรงของคอนกรีตเอาไว้ทำให้พังทลายได้ยากขึ้น แต่เมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น กำลังของคอนกรีตที่ได้ส่วนใหญ่จะมาจากเนื้อคอนกรีตเอง บทบาทของเนื้อยางที่ช่วยค้ำจุนโครงสร้างโพรงไว้จึงลดลง และทำให้มีกำลังอัดใกล้เคียงกันกับคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน ส่วน HRL-1.0 และ 1.5 ก็จะมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับ HRL-0.5 นั่นก็คือจะมีเนื้อยางเข้าไปช่วยคำจุนโครงสร้างโพรงเอาไว้ แต่เนื่องจากคอนกรีตกำลังสูงมีปริมาณโพรงไม่มาก จึงทำให้เนื้อยางในส่วนผสมเกินจำเป็น แม้บางส่วนจะช่วยคำจุนโครงสร้างโพรงไว้แต่ก็จะมีบางส่วนไปขัดขวางการยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวมเช่นกัน ดังแสดงให้เห็นเป็นภาพจำลองได้ดังภาพที่ 4.2 ดังนั้น น้ำยางในปริมาณนี้จึงส่งผลด้านบวกและด้านลบไปพร้อม ๆ กันในส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูง

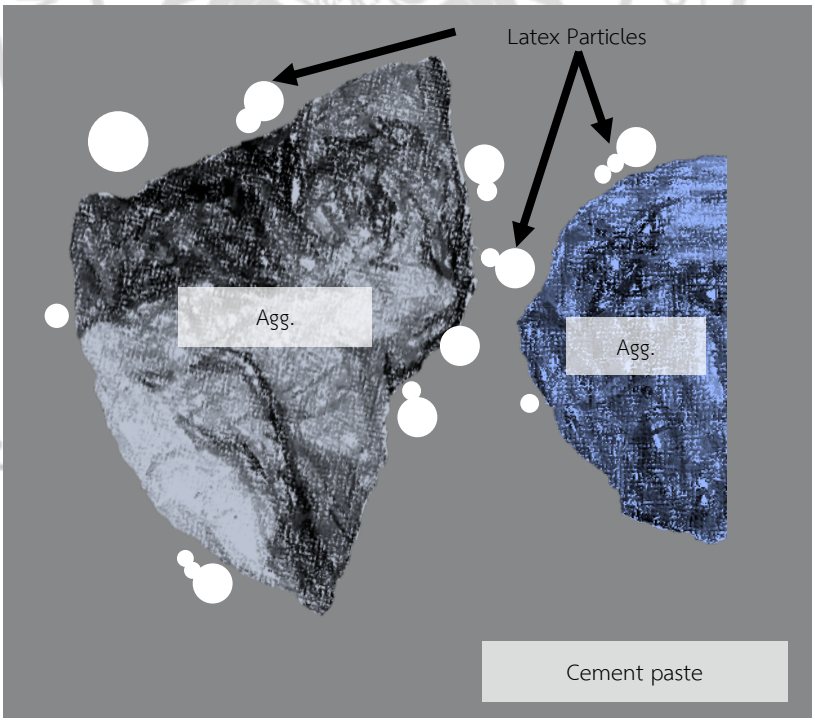
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงผสมน้ำยางข้น

ส่วนผสม	กำลังอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
Control	266	332	388	411
HRL-0.5	344	439	453	449
HRL-1.0	296	360	408	431
HRL-1.5	296	370	404	413
HRL-2.0	278	306	324	359

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี



ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุของคอนกรีตที่ผสมน้ำยางข้น



ภาพที่ 4.2 ภาพจำลองการขัดขวางการยึดเกาะของโมเลกุลน้ำยางข้นในซีเมนต์เพสต์

4.3 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกำลังสูงผสมน้ำยางข้น

ผลทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยของคอนกรีตกำลังสูงผสมน้ำยางข้นที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน แสดงในตารางที่ 4.3 และเมื่อนำค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมาเปรียบเทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตแต่ละก้อนจะได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในภาพที่ 4.3 ซึ่งพบว่าแม้ค่าเชิงตัวเลขที่แสดงในตารางที่ 4.3 จะมีความผันผวนสูง แต่เมื่อแสดงในรูปแบบความสัมพันธ์กับกำลังอัดจะเห็นความสัมพันธ์ที่มีแนวโน้มชัดเจน กล่าวคือ คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงขึ้นจะมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงขึ้นตามทฤษฎี (ACI 318, 2008 : 107) นอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีตทุกส่วนผสมมีแนวโน้มความสัมพันธ์กับกำลังอัดในทิศทางเดียวกัน จึงสามารถสร้างความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 4.1 นอกจากนี้ในภาพที่ 4.3 ได้แสดงค่าความสัมพันธ์ที่นำเสนอโดยสมการของ ACI 318 (2008 : 107) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังอัดจากค่าสถิติ อีกทั้ง ACI ยังระบุว่าความคลาดเคลื่อนจากสมการดังกล่าวยอมรับได้ที่ความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 20 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความผันผวนของความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ทั้งนี้ มีงานวิจัยได้แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์นี้สามารถแปรเปลี่ยนไปได้ด้วยปัจจัยต่าง ๆ เช่น ชนิดของมวลรวมในแต่พื้นที่ เป็นต้น (Malaikah, 2014 : 131 – 142) หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ มวลรวมที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีคุณสมบัติดีกว่ามวลรวมโดยเฉลี่ยที่ ACI ได้ทำสถิติไว้นั่นเอง

$$\mathrm{E} = 175.75\mathrm{f_c}' - 11291 \qquad 4.1$$

เมื่อ E = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และ f_c' คือค่ากำลังอัดของคอนกรีต

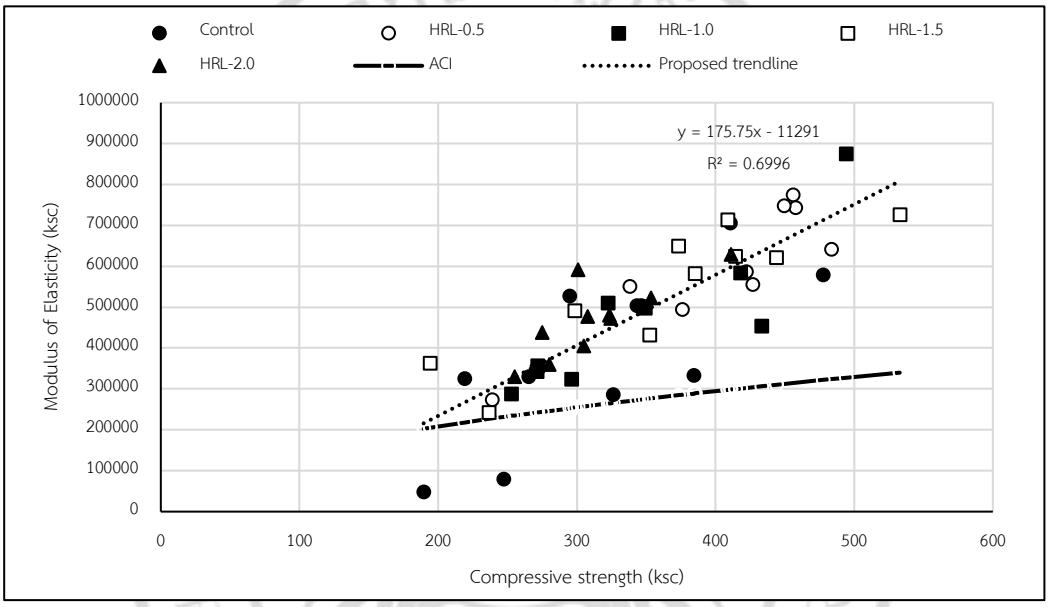
ตารางที่ 4.3 ผลทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกำลังสูงผสมน้ำยางข้น

ส่วนผสม	โมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากาการทดสอบ (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
Control	388474	310540	166351	595493
HRL-0.5	441201	667245	856247	651054
HRL-1.0	410124	563865	575133	404658
HRL-1.5	639042	553993	686358	432368
HRL-2.0	439795	451283	566721	329070

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

อนึ่ง หากแทนค่า $f_c' = 0$ ในสมการที่ 4.1 ที่ได้จากภาพที่ 4.3 จะทำให้ค่า E = -11291 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งไม่สามารถเป็นไปได้จริง ดังนั้นจึงปรับแก้สมการที่ 4.1 ใหม่ เพื่อให้สามารถนำไปใช้ได้จริง ดังแสดงในสมการที่ 4.2

$$E = 175.75f_c' \qquad 4.2$$



ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงผสมน้ำยางข้น

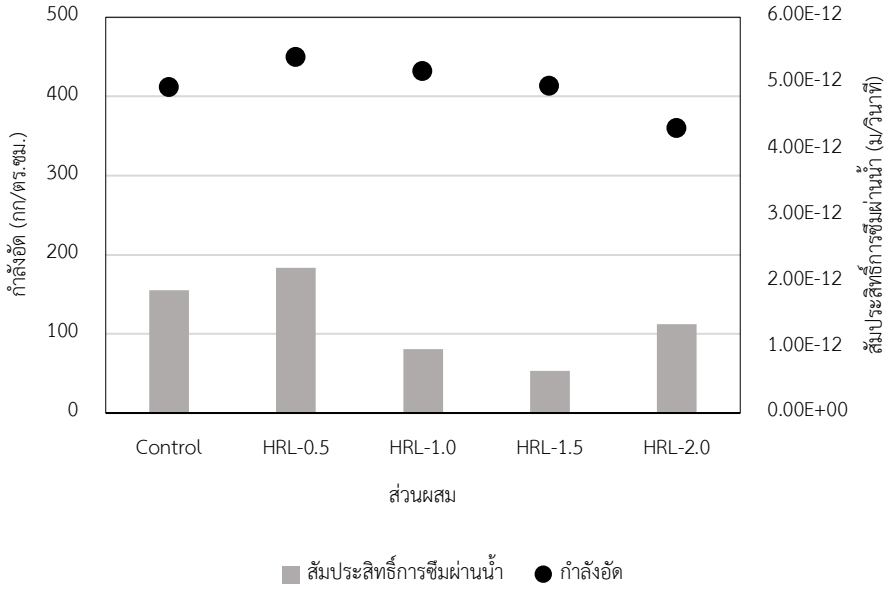
4.4 ผลการทดสอบการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตกำลังสูงผสมน้ำยางข้น

จากการทดสอบการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตกำลังสูงได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของ HRL-0.5 มีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุมเล็กน้อย ในส่วนของ HRL-1.0, HRL-1.5 และ HRL-2.0 มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมร้อยละ มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมประมาณร้อยละ 48, 63 และ 28 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตกำลังสูงผสมน้ำยางข้น

รายการ	Control	HRL-0.5	HRL-1.0	HRL-1.5	HRL-2.0
สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (k)	$1.86\text{x}10^{-12}$	$2.20\text{x}10^{-12}$	$9.73\text{x}10^{-13}$	$6.37\text{x}10^{-13}$	$1.35\text{x}10^{-12}$

จากภาพที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าทั้งกำลังอัดของคอนกรีตผสมน้ำยางข้นที่อายุ 28 วันและค่าการซึมผ่านของน้ำที่อายุ 28 วันต่างก็ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำยางข้นในส่วนผสม แต่ทั้งสองค่ากลับไม่มีความสัมพันธ์ชัดเจน แตกต่างจากความสัมพันธ์ดังกล่าวในคอนกรีตกำลังปกติจากงานวิจัยก่อนหน้า (จักรพันธุ์ วงษ์พา และคณะ, 2563 : 30 – 31) อย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าน้ำยางข้นไม่ได้มีส่วนช่วยในการเพิ่มกำลังอัดให้กับคอนกรีตกำลังสูงเนื่องจากกำลังส่วนใหญ่มาจากกำลังของเนื้อคอนกรีตเองเนื่องจากคอนกรีตกำลังสูงมีความพรุนต่ำ (Bu & Tian, 2016 : 337 – 344) ทำให้เนื้อยางที่แทรกอยู่ตามโพรงมีปริมาณไม่มากและไม่ส่งอิทธิพลต่อกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูง จึงแสดงให้เห็นค่ากำลังอัดที่ 28 วันที่ใกล้เคียงกันตามที่ได้อภิปรายไว้ข้างต้น เว้นแต่ HRL-2.0 ที่มีปริมาณน้ำยางข้นส่วนเกินในปริมาณมากจนทำให้โมเลกุลของเนื้อยางจับกันเป็นเส้น มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและไปขัดขวางการยึดเกาะภายในโครงสร้างคอนกรีต จึงส่งผลให้กำลังอัดต่ำลงอย่างชัดเจน อนึ่ง แม้เนื้อยางดังกล่าวจะไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัด แต่กระทบต่อความทึบน้ำของคอนกรีตโดยตรง เนื่องจากเนื้อยางมีความทึบน้ำสูง และส่วนมากแทรกตัวอยู่ตามโครงสร้างโพรงของคอนกรีต จึงทำให้น้ำไม่สามารถไหลผ่านได้ง่าย จึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำผ่านคอนกรีตลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะในส่วนผสม HRL-1.5 ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำกว่าคอนกรีตปกติถึง 3 เท่า



ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตกำลังสูงกับปริมาณน้ำยางข้น ที่อายุ 28 วัน