

Template Innovation Technology Database

1. ชื่อเทคโนโลยี (Technology Title) :								
เทคโนโลยีรีไซเคิลของเสียจากเศษหรือควูลเพื่อนำมาผลิตกระเบื้องมุงหลังคา								
2. ประเภทกลุ่มอุตสาหกรรม (Industrial Sector) :								
	อุตสาหกรรมแร่		อุตสาหกรรมโลหการ	X		อุตสาหกรรมรีไซเคิล		
3. ระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (Technology Readiness Levels) :								
ระดับต่ำ			ระดับสูง					
TRL 1	TRL 2	TRL 3	TRL 4	TRL 5	TRL 6	TRL 7	TRL 8	TRL 9
Basic principle observed and reported	Technology concept and/or application formulated	Concepts demonstrated analytically or experimentally	Key elements demonstrated in laboratory environment	Key elements demonstrated in simulated environment	Representative of the deliverable demonstrated in relevant environments	Final development version of the deliverable demonstrated in operational environment	Actual deliverable qualified through test and demonstration	Operational use of deliverable
└────────────────────────────────┘			└────────────────────────────────┘		└────────────────────────────────┘			
องค์ความรู้และการวิจัยพื้นฐาน			ต้นแบบห้องปฏิบัติการ		ต้นแบบภาคสนาม			
4. รายละเอียดโดยสังเขป (Details Description) :								
แนวคิด :	<p>กระเบื้องมุงหลังคาเป็นส่วนสำคัญของที่พังกาศัย กระเบื้องมุงหลังคามีหลายประเภทตามวัสดุที่ใช้ ในปัจจุบันจึงมีความพยายามที่จะพัฒนากระเบื้องซีเมนต์ที่ใช้เส้นใยชนิดอื่นแทนแร่ใยหิน (Asbestos) ที่มีอันตรายต่อสุขภาพ โดยคงคุณสมบัติการเป็นฉนวนกันความร้อน และความแข็งแรงเช่นเดียวกับแร่ใยหิน</p> <p>ร็อกวูล (Rock wool) หรือ สโตนวูล (Stone wool) หรือใยหิน คือหินอัคนีที่ผ่านกระบวนการหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงถึง 1300 องศาเซลเซียส แล้วปั่นเป็นเส้นใย โดยเส้นใยเหล่านี้จะถูกเคลือบด้วยสารพริกที่เป็นเทอร์โมเซตติง ซึ่งเมื่อบ่มด้วยความร้อนแล้วจะเชื่อมเส้นใยเข้าด้วยกันเป็นผืน จากนั้นจะถูกตัดเป็นขนาดต่างๆ แล้วนำไปใช้งานต่อไป สมบัติที่สำคัญของร็อกวูล คือมีความสามารถในการเป็นฉนวนกันความร้อน เป็นวัสดุที่ไม่ติดไฟ และไม่มีสารที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย แต่อย่างไรก็ตาม การใช้ร็อกวูลที่ผลิตได้มาใช้เป็นส่วนผสมกระเบื้องซีเมนต์โดยตรงยังไม่เป็นที่นิยมเพราะสามารถนำมาผสมได้ไม่มากนัก แต่ด้วยคุณสมบัติของเศษร็อกวูลเองด้านฉนวนกันความร้อน และเป็นวัสดุที่ไม่ติดไฟ จึงมีความสนใจที่จะนำเศษร็อกวูลที่ผ่านการใช้งานมาแล้วกลับมาใช้เป็นส่วนผสมในกระเบื้องดินเผา มุงหลังคาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเป็นฉนวนกันความร้อนของกระเบื้องมุงหลังคา อีกทั้งเป็นการช่วยลดปริมาณกากของเสียที่ต้องนำไปกำจัดด้วยวิธีฝังกลบ</p>							

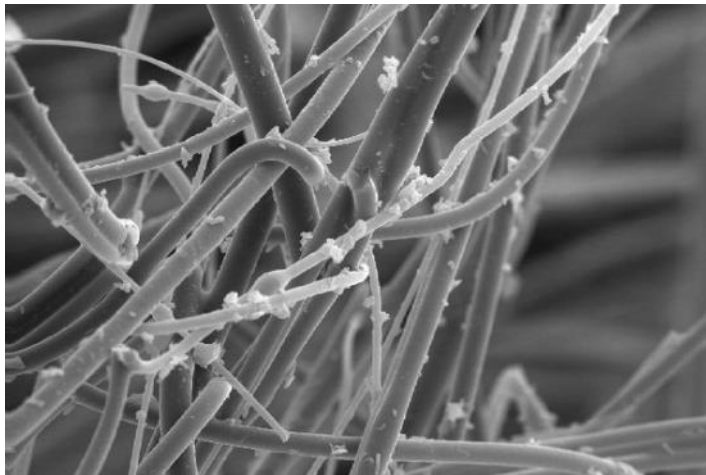
ลักษณะและองค์ประกอบของวัสดุตั้งต้น:

International Agency for Research on Cancer (IARC) ขององค์การอนามัยโลกได้จัดรื้อควูลไว้ในหมวดหมู่ของใยแร่ กลุ่มที่ 3 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งต่อมนุษย์ในปี 2001 และด้วยคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีเยี่ยมในช่วงอุณหภูมิ -240°C ถึง $+820^{\circ}\text{C}$ รวมถึงการเก็บเสียงและไม่ติดไฟ (จุดหลอมเหลวมากกว่า 1000°C) ส่งผลให้มีการนำรื้อควูลมาใช้อย่างกว้างขวางมากขึ้น ตัวอย่างเช่น การใช้ในกิจการผลิตกระแสไฟฟ้า อุตสาหกรรมต่างๆ ระบบปรับอากาศ และระบบกันไฟของอาคาร

เศษรื้อควูลที่ใช้ในการศึกษานี้มาจากผลิตภัณฑ์ฉนวนกันความร้อนที่หมดอายุการใช้งานจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทแห่งหนึ่ง โดยเศษรื้อควูลที่ได้เป็นของแข็งสีน้ำตาลเทา มีลักษณะเป็นเส้นใยคล้ายสาลี



โดยเศษรื้อควูลดังกล่าวมีขนาดความยาวเส้นระหว่าง 200 – 1000 ไมโครเมตร หนาประมาณ 10-20 ไมโครเมตร



เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของรื้อควูล พบว่ามีซิลิกา (SiO_2) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก

	พารามิเตอร์	องค์ประกอบ	Method
	Sulfur content (%)	<0.01	EPA 6200
	SiO ₂ (%)	14.23	EPA 200
	Al ₂ O ₃ (%)	1.08	EPA 200
	Fe ₂ O ₃ (%)	14.16	EPA 200
	CaO (%)	16.72	EPA 200
	Chloride Content (%)	0.03	USEPA 6200
ลักษณะและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ :	<p>ส่วนผสมหลักของกระเบื้องมุงหลังคาดินเผาประกอบด้วย ดินเหนียวอ่างทอง (ดินแห้ง)(ทำการผสมด้วยมือ) แล้วนำมาผสมน้ำเพื่อให้ได้ความชื้นประมาณร้อยละ 20 ผึ่งทิ้งไว้ 3 วัน แล้วขึ้นรูปเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด กว้าง 6 เซนติเมตร ยาว 18 เซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงนำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส รอให้เย็นแล้วนำออกมาจากเตาเผา ในการศึกษาทดลองนี้ใช้เศษรีโอคิวลเป็นส่วนผสมโดยทดแทนส่วนผสมของดินเหนียว</p>		
ชนิดของเทคโนโลยี :	<p>เทคโนโลยีรีไซเคิล</p> <p>เนื่องด้วยรีโอคิวลมีคุณสมบัติทางกลที่ดี ไม่นำความร้อน ทนต่อความร้อนได้สูง ไม่ย่อยสลายทางชีวภาพ ทนต่อสภาวะกรดและด่าง และไม่ดูดซับของเหลว จึงมีการศึกษาเกี่ยวกับการนำเศษรีโอคิวลไปเป็นส่วนผสมในวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ต่างๆ เพื่อเพิ่มสมบัติการป้องกันความร้อน การทนไฟ หรือเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุ</p>		
5. การรวบรวมองค์ความรู้และการวิจัยพื้นฐาน (Literature Review)			
<p>จากรายงานวิจัยในต่างประเทศ พบว่า การใช้เศษรีโอคิวล (Rock wool particles) มาเป็นส่วนผสมในวัสดุคอมโพสิตที่มีซีเมนต์เป็นองค์ประกอบหลัก (Cement-based composites) สามารถช่วยเพิ่มความต้านทานแรงอัด (compressive strength) ซึ่งเป็นผลมาจากเศษรีโอคิวลช่วยเพิ่มการเชื่อมประสานของแคลเซียมซิลิเกต (CSH) และยังลดการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าสู่เนื้อคอนกรีตซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยปรับปรุงความคงทนและอายุการใช้งานของคอนกรีตอีกด้วย(Wei-Ting Lin และคณะ, 2013) อย่างไรก็ตาม การผสมเศษรีโอคิวลในสัดส่วนที่มากในงานคอนกรีตและงานมอร์ตาร์จะมีผลต่อการไหลของคอนกรีต ดังนั้นการศึกษาโดยทั่วไปจึงใช้ส่วนผสมอยู่ระหว่างร้อยละ 0.1-5 โดยน้ำหนัก</p> <p>ในประเทศไทยมีการศึกษาถึงแนวทางการนำเศษรีโอคิวลมาใช้ประโยชน์เช่นเดียวกัน ตัวอย่างเช่น กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ร่วมกับสถาบันเหล็กกล้าแห่งประเทศไทยได้ทำการศึกษาทดลองนำเศษรีโอคิวลมาเป็นส่วนมวลรวมในคอนกรีตสำหรับงานก่อสร้าง แล้วทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการและทดลองในระดับโรงงานต้นแบบ พบว่า การผสมเศษรีโอคิวลในคอนกรีตจะส่งผลให้การไหลตัวของคอนกรีตลดลงทำให้ลำบากในการเทลงแบบหล่อขึ้นงาน และพบว่าค่าการทนต่อแรงอัดเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของเศษรีโอ</p>			

ควูลที่เพิ่มขึ้น (ระหว่าง ร้อยละ 0.1 ถึง 1 โดยปริมาตร) เนื่องจากเส้นใยของรื้อควูลได้เข้าไปลดช่องว่างที่อยู่ในเนื้อคอนกรีต ซึ่งที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 0.5 สามารถเพิ่มค่าการทนต่อแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเศษรื้อควูลมากกว่า 22% (16.75 Mpa เทียบกับ 13.69 Mpa ตามลำดับ) และยังพบว่าที่อัตราส่วนผสมรื้อควูลร้อยละ 0.5 และ 1.0 สามารถป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีตที่เกิดจากการหดตัวได้เป็นอย่างดี ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกการผสมเศษรื้อควูลในอัตราส่วนโดยปริมาตรร้อยละ 0.5 ไปทำการทดลองเทลงบนถนนและสรุปว่าการใช้เศษรื้อควูลเป็นส่วนผสมในคอนกรีตถนนสามารถเพิ่มกำลังอัดและยังช่วยประหยัดต้นทุนวัสดุดิบได้ประมาณร้อยละ 5.5

ในประเทศไทยพบว่ามีการศึกษาการนำของเสียเพียงแค่ว่า เศษแก้ว และตะกรันมาผสมทำกระเบื้องดินเผาและกระเบื้องเซรามิกส์ (Ceramic tile) โดยของเสียเหล่านี้มีองค์ประกอบหลักเป็น ซิลิกา(SiO₂) และอะลูมินา (Al₂O₃) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักเดียวกับรื้อควูล และจากการศึกษาดังกล่าวพบว่าได้กระเบื้องที่มีความแข็งแรง ไม่บิดเบี้ยว มีสีน้ำตาลเข้มและมีคุณสมบัติเทียบเคียงกระเบื้องทั่วไป (วรพงษ์ เทียมสอน, 2554) ดังนั้นเศษรื้อควูลน่าจะมีความสามารถนำมาผสมเป็นกระเบื้องดินเผาเช่นเดียวกัน และจะนำไปผสมเพื่อผลิตกระเบื้องมุงหลังคาดินเผาการศึกษาทดลองนี้ทำในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติความแข็งแรง ได้แก่ 1)การทนต่อแรงกดตามขวาง (Transverse strength) 2) การดูดซึมน้ำ (Water absorption) อีกทั้งสมบัติเชิงความร้อน ได้แก่ สภาพการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของกระเบื้องมุงหลังคาที่มีส่วนผสมเศษรื้อควูลในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน แล้วคัดเลือกผลการทดลองที่เหมาะสมที่สุดเพื่อไปศึกษาต่อในระดับโรงงานต้นแบบ (Pilot Scale) ในลำดับต่อไป

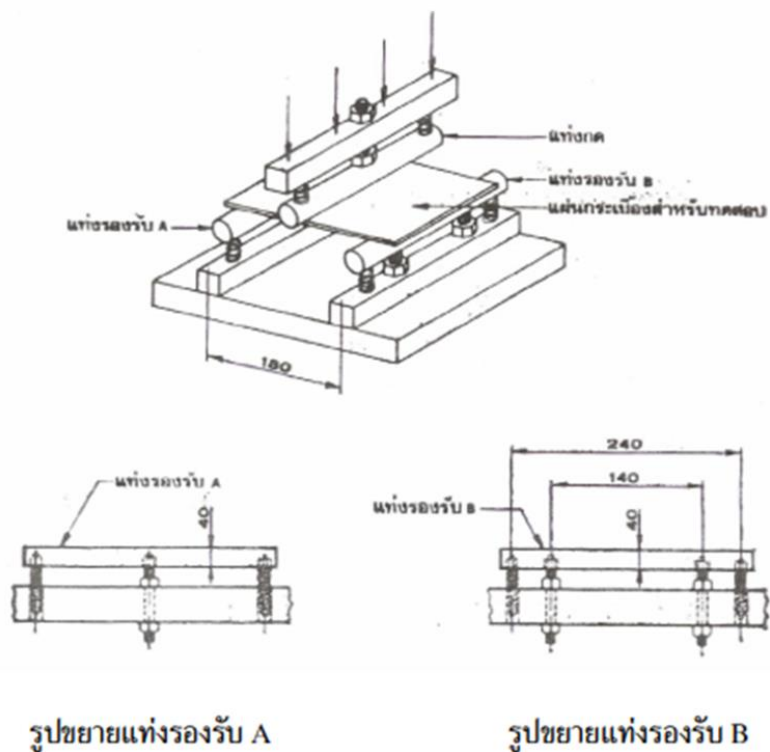
6. การทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab Scale) :

วัสดุ/อุปกรณ์ /สารเคมี :	<p>วัสดุดิบที่ใช้</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. ดินเหนียวอ่างทองชนิดแห้ง 2. น้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำประปา 3. เศษรื้อควูล <p>อุปกรณ์</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. เครื่องชั่ง (Balance) อ่านได้ละเอียด 0.1 กรัม 2. นาฬิกาจับเวลา 3. กระจกบอกตวง (Measuring Cylinder) ความจุ 100 มิลลิลิตร 4. เวอร์เนีย (Vernier Caliper) 5. เครื่องทดสอบกำลัง (Testing Machine) แบบไฮดรอลิกส์ หรือเกลียวหมุนโดยช่วงระหว่างพื้นหน้าของแป้นบนและแป้นล่าง 6. เครื่องมือทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal
---------------------------------	---

	<p>conductivity) ด้วยเครื่อง Hot Disk Thermal Constant Analyser (Hot Disk AB)</p>
<p>ขั้นตอนการทดลอง :</p>	<p>ทำกระเบื้องด้วยการทำด้วยมือ ใช้ดินเหนียวผสมกับเศษรีโอควูลตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น เติมน้ำ นวด ผสมให้เข้ากัน แล้วอัดลงในแบบพิมพ์ ปาดให้เรียบถอดกระเบื้องออกจากแม่พิมพ์นำไปฝั่งต่อจนแห้งสนิท นำเข้าเตาเผาเผาเนื้อกระเบื้อง</p> <p>ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของกระเบื้องดินเผาungหลังคาใช้สำหรับมุงหลังคาในแนวลาดเอียง โดยต้องผ่านการทดสอบคุณลักษณะสำคัญ ได้แก่ แรงกดแตกตามขวาง การดูดซึมน้ำ สภาพการซึมผ่านได้ เป็นต้น ซึ่งในงานศึกษาทดลองนี้ได้เลือกการทดสอบเฉพาะบางค่าที่สำคัญ เพื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานดังกล่าว ประกอบด้วยลักษณะทั่วไปของกระเบื้องมุงหลังคาดินเผาตาม มอก. 158-2518 คือ ต้องเผาสุกจนเนื้อกระเบื้องมีความแกร่งตัวสม่ำเสมอตลอดแผ่น และกระเบื้องต้องมีรูปร่างเรียบไม่มีรอยแตกร้าวหรือรอยบิ่น จากนั้นจึงนำมาทดสอบคุณสมบัติดังนี้</p> <p>ก) แรงกดตามขวาง</p> <ul style="list-style-type: none"> ● เครื่องมือ เครื่องกดที่อ่านได้ละเอียด 1 นิวตัน ● วิธีเตรียมตัวอย่าง <p>นำแผ่นกระเบื้องตัวอย่างจำนวน 6 แผ่น แชลงในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบแล้วยกออกทดสอบกระเบื้องในภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำทันที</p> <ul style="list-style-type: none"> ● วิธีทดสอบ <p>ใช้ไม้ระแนงที่เป็นชิ้นตรงและมีผิวหน้าเรียบ 2 ชิ้น แต่ละชิ้นกว้าง 50 มิลลิเมตร หนาไม่น้อยกว่า 25 มิลลิเมตร วางหนุนไว้ใต้แผ่นกระเบื้องให้ชิดกับส่วนเกาะระแนงของแผ่นกระเบื้อง และให้แผ่นกระเบื้องวางอยู่ในลักษณะที่มุงหลังคาในแนวราบ ปลายของแผ่นกระเบื้องจะต้องวางให้อยู่ตรงกึ่งกลางของไม้ระแนงขนาดเดียวกัน สำหรับแผ่นกระเบื้องที่มีบัวก้นน้ำต้องระวังไม่ให้บัวก้นน้ำกดกับไม้ระแนงวางแผ่นกระเบื้องบนไม้ระแนงทั้งสองและปรับให้ได้ระดับ แล้วจึงใช้มวลกดเป็นแนวตลอดความกว้างของแผ่นกระเบื้อง โดยมีไม้ระแนงและแท่นกดโค้งตามรูปลอนความกว้าง 50 มิลลิเมตร รองรับแรงกดที่กึ่งกลาง ให้ขนานกับไม้ระแนงที่รองรับแผ่นกระเบื้อง โดยผิวหน้าของไม้ระแนงที่สัมผัสกับแผ่นกระเบื้องให้รองรับด้วยสักลาดหนา 6 มิลลิเมตรหนึ่งชั้น เพิ่มแรงกดด้วยอัตราสม่ำเสมอไม่เกิน 100 นิวตันจนกระทั่งแผ่นกระเบื้องแตก บันทึกค่าเป็นแรงกดแตกตามขวาง แต่ละแผ่นแล้วหาค่าเฉลี่ย</p>

การต้านแรงทางขวาง (transverse strength) ต้องมีค่าแรงทางขวางเฉลี่ย ไม่ต่ำกว่า 7 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (70 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร) เมื่อทดสอบตามวิธีโดยใช้กระเบื้องทดสอบจำนวน 6 แผ่น แช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง แล้วนำขึ้นมาทดสอบทันที

วางกระเบื้องทดสอบบนเครื่องทดสอบตามรูป ประกอบด้วยแท่งรองรับ เหล็กอยู่กึ่งกลาง 40 มิลลิเมตร 2 แท่งวางห่างกัน 180 มิลลิเมตร และมีแท่งกด รูปร่างและขนาดเดียวกัน อยู่กึ่งกลาง ขนานกับแท่งรองรับทั้งสองสำหรับกดลงบนผิว กระเบื้องที่จะทดสอบ ความยาวของเหล็กทั้งสามต้องยาวไม่น้อยกว่าความกว้างของ แผ่นกระเบื้อง ดังแสดงตามรูป อัตราการเพิ่มแรงจะต้องเป็นไปโดยสม่ำเสมอระหว่าง 445 นิวตัน ถึง 667 นิวตันต่อนาที



ข) การดูดซึมน้ำ

การดูดซึมน้ำ (water absorption) ต้องมีค่าการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 13.5 เมื่อทดสอบตามวิธีดังต่อไปนี้

อบกระเบื้องตัวอย่าง จำนวน 6 แผ่น ให้แห้ง จนน้ำหนักคงที่ที่อุณหภูมิ ระหว่าง 110 ± 5 องศาเซลเซียส แล้วปล่อยให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เอาชิ้นซึมน้ำที่เกาะติดอยู่ด้วยผ้าหมาดๆที่สะอาด แล้วรีบนำไปชั่งทันที จะได้น้ำหนักหลังจากแช่แล้ว (W_w) เป็นกรัม

การซั่งให้อ่านละเอียดถึงร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักของกระเบื้องตัวอย่าง และกระเบื้องตัวอย่างแต่ละแผ่นจะต้องซั่งให้เสร็จภายใน 3 นาที หลังจากยกออกมา

- **เครื่องมือ** ตู้อบที่ควบคุมอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 100 ถึง 110 องศาเซลเซียส และมีที่ระบายอากาศออกสู่ภายนอก และเครื่องซั่งน้ำหนักที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม

- **วิธีทดสอบ**

1) ซั่งขึ้นทดสอบที่อุณหภูมิด้วยน้ำแต่ละชั้น แล้วบันทึกมวลไว้เป็นมวลเมื่ออุณหภูมิ

2) อบขึ้นทดสอบในตู้อบระบายอากาศที่อุณหภูมิ 100 ถึง 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3) นำออกมาวางให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ซั่งอีกครั้งหนึ่ง แล้วบันทึกมวลไว้เป็นมวลเมื่อแห้ง

ค) การนำความร้อน

การทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนของกระเบื้องดินเผาไม่ได้เป็นข้อบังคับตาม มอก. 158-2518 แต่การทดสอบนี้สามารถระบุคุณสมบัติการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำกระเบื้องมุงหลังคา โดยใช้เครื่องมือทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity) ด้วยเครื่อง Hot Disk Thermal Constant Analyser (Hot Disk AB) เทคนิคที่ใช้ในการทดสอบคือ Thermal Constant Analysis (TCA) สภาวะในการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง Disk type: (Kapton Insulation (Sensor No.C5501, Radius = 6.403 mm)ทดสอบกับกระเบื้องดินเผาผสมกับเศษรีอควูลตัวอย่างร้อยละ 5, 8 และ 15 ตามลำดับโดยใช้กระเบื้องทดสอบกระเบื้อง 3 แผ่นต่อหนึ่งตัวอย่างดังแสดงในรูป



ผลการทดลอง :

การผสมเศษรีอควูลกับดินเหนียวเพื่อผลิตเป็นกระเบื้องมุงหลังคาดินเผาพบว่าทำให้กระเบื้องมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น 2 ประการคือ มีความต้านทานความร้อนดีขึ้น และการดูดซึมน้ำลดลง โดยเมื่อผสมเศษรีอควูลที่ร้อยละ 15 สามารถลดการนำความร้อนได้ถึงร้อยละ 40 เมื่อเทียบกับกระเบื้องดินเผาธรรมดา และลดการดูดซึมน้ำได้ถึงร้อยละ 2 เมื่อเทียบกับกระเบื้องปกติ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณเศษรีอควูลเพิ่มขึ้น ความต้านทานต่อแรงกดตามขวาง (Transverse Strength) มีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมเศษรีอควูลในกระเบื้องดินเผาungหลังคา โดยตามมาตรฐานกระเบื้องมุงหลังคาดินเผาได้กำหนดความต้านทานต่อแรงกดตามขวางต่ำสุดไว้ที่ 70 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร ผลการทดสอบพบว่า การผสมเศษรีอควูลที่ร้อยละ 15 ยังสามารถทนต่อแรงกดตามขวางได้ถึง 182 ± 33.4 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร ทั้งนี้การเพิ่มปริมาณเศษรีอควูลมากกว่าร้อยละ 15 น่าจะยังผ่านมาตรฐานแรงกดตามขวางของกระเบื้องมุงหลังคาดินเผา แต่มีอาจมีปัญหาในการผสม โดยทางที่ปรึกษาได้ทดลองผสมเศษรีอควูลที่ร้อยละ 20 พบว่าเศษรีอควูลผสมกับดินเหนียวได้ยากขึ้นและทำให้เกิดปัญหาด้านการรั่วซึม ดังนั้นส่วนผสมที่ร้อยละ 15 จึงเป็นส่วนผสมที่เหมาะสมที่จะนำไปผลิตกระเบื้องมุงหลังคาดินเผาในการศึกษาครั้งนี้

7. การทดลองในระดับโรงงานต้นแบบ (Pilot Scale) :

วัสดุ/อุปกรณ์ /สารเคมี :

ขั้นตอนการทดลอง :	
ผลการทดลอง :	
8. การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Feasibility Study):	
NPV :	
B/C :	
IRR:	
9. กฎหมายและกฎระเบียบที่เกี่ยวข้อง :	
10. เอกสารอ้างอิง (References) :	

1. ชื่อเทคโนโลยี (Technology Title) :									
เทคโนโลยีรีไซเคิล Rockwool ด้วยการผลิตในวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน สำหรับงานก่อสร้างถนน									
2. ประเภทกลุ่มอุตสาหกรรม (Industrial Sector) :									
	อุตสาหกรรมแร่		อุตสาหกรรมโลหการ	X	อุตสาหกรรมรีไซเคิล				
3. ระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (Technology Readiness Levels) :									
ระดับต่ำ						ระดับสูง			
TRL 1	TRL 2	TRL 3	TRL 4	TRL 5	TRL 6	TRL 7	TRL 8	TRL 9	
Basic principle observed	Technology concept and/or	Concepts demonstrated analytically or	Key elements demonstrated in laboratory	Key elements demonstrated in simulated	Representative of the deliverable	Final development version of the	Actual deliverable qualified	Operational use of deliverable	



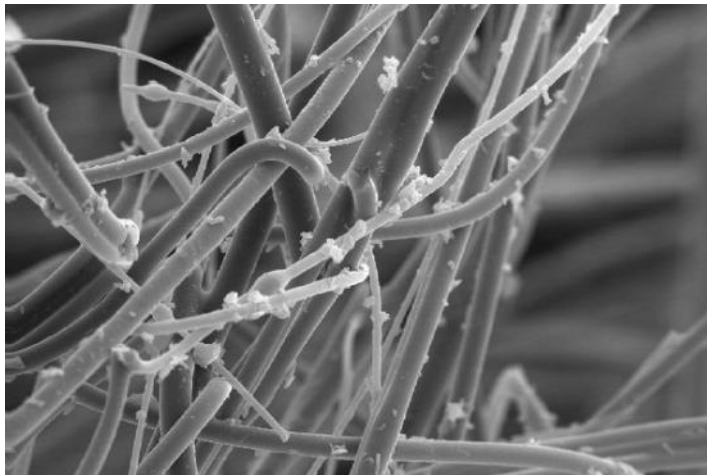
and reported	application formulated	experimentally	environment	environment	demonstrated in relevant environments	deliverable demonstrated in operational environment	through test and demonstration
องค์ความรู้และการวิจัยพื้นฐาน		ต้นแบบห้องปฏิบัติการ		ต้นแบบภาคสนาม			

4. รายละเอียดโดยสังเขป (Details Description) :

<p>แนวคิด :</p>	<p>ปัจจุบัน รูปแบบการจัดการ Rockwool ที่เสื่อมสภาพมักจะดำเนินการด้วยวิธีการฝังกลบ แต่อย่างไรก็ตาม อุตสาหกรรมการก่อสร้างถนนมีเทคโนโลยีในการก่อสร้างที่ต้องการพัฒนาประสิทธิภาพในการใช้งานของถนนแอสฟัลต์ โดยการผสมเส้นใยประเภทต่าง ๆ รวมไปถึงเส้นใยหินลงไปในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต เพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านวิศวกรรมให้กับวัสดุผิวทางประเภท SMA (Stone Mastic Asphalt) และ PA (Porous Asphalt) โดยเส้นใยจะทำหน้าที่เพิ่มประสิทธิภาพในการยึดเกาะระหว่างวัสดุ ลดการเกิด Draindownหรือการแยกตัวกันระหว่างยางมะตอยและหินระหว่างการขนส่งวัสดุจากโรงผลิตไปยังพื้นที่ก่อสร้าง [3]</p> <p>โดยทั่วไป การแก้ปัญหาการเกิด Draindownในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตแบบ SMA หรือ PA จะดำเนินการโดยผลิตส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยแอสฟัลต์ที่มีค่าความหนืดสูงกว่าการผลิตส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตแบบทั่วไป ร่วมกับการผสมเส้นใยประเภทต่าง ๆ ลงในส่วนผสม</p> <p>เส้นใย Rock Wool ไม่ได้มีจุดเด่นมากนัก อีกทั้งยังมีข้อจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตจะบดอัดได้ยากกว่าการใช้เส้นใยประเภทอื่น และคุณสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ไม่ได้ดีไปกว่าการใช้เส้นใยชนิดอื่น จึงไม่เป็นที่นิยมในการใช้งานมากนัก แต่หากมองในเรื่องของประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม ในปัจจุบัน การกำจัดเส้นใย Rock Wool ที่เสื่อมสภาพจากการใช้งานเป็นฉนวนความร้อนนั้น ยังไม่มีวิธีใดที่มีประสิทธิภาพมากไปกว่าการฝังกลบ การนำเส้นใยหินที่หมดสภาพไปผสมเป็นส่วนหนึ่งของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ย่อมมีความคุ้มค่ากว่าการนำวัสดุดังกล่าวไปฝังกลบเพียงอย่างเดียว แม้คุณสมบัติจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยก็ตาม</p>
<p>ลักษณะและองค์ประกอบ :</p>	<p>International Agency for Research on Cancer (IARC) ขององค์การอนามัยโลกได้จัดร็อกวูลไว้ในหมวดหมู่ของใยแร่ กลุ่มที่ 3 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งต่อมนุษย์ในปี 2001 และด้วยคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีเยี่ยมในช่วงอุณหภูมิ -240°C ถึง +820°C รวมถึงการเก็บเสียงและไม่ติดไฟ (จุดหลอมเหลวมากกว่า 1000°C) ส่งผลให้มีการนำร็อกวูลมาใช้อย่างกว้างขวางมากขึ้น ตัวอย่างเช่น การใช้ในกิจการผลิตกระแสไฟฟ้า อุตสาหกรรมต่างๆ ระบบปรับอากาศ และระบบกันไฟของอาคาร</p> <p>เซสร็อกวูลที่ใช้ในการศึกษานี้มาจากผลิตภัณฑ์ฉนวนกันความร้อนที่หมดอายุการใช้งานจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทแห่งหนึ่ง โดยเซสร็อกวูลที่ได้เป็นของแข็งสีน้ำตาลเทา มีลักษณะเป็นเส้นใยคล้ายสาลี</p>



โดยเศษหรือควูลดั่งกล่าวมีขนาดความยาวเส้นระหว่าง 200 – 1000 ไมโครเมตร หนาประมาณ 10-20 ไมโครเมตร



เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของรีอควูล พบว่ามีซิลิกา (SiO_2) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก

พารามิเตอร์	องค์ประกอบ	Method
Sulfur content (%)	<0.01	EPA 6200
SiO_2 (%)	14.23	EPA 200
Al_2O_3 (%)	1.08	EPA 200
Fe_2O_3 (%)	14.16	EPA 200
CaO (%)	16.72	EPA 200
Chloride Content (%)	0.03	USEPA 6200

ชนิดของเทคโนโลยี :

เทคโนโลยีรีไซเคิลด้วยการผสมลงในวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน สำหรับงาน

	<p>ก่อสร้างถนน</p> <p>นำ Rockwool มาใช้เป็นส่วนผสมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน โดยในขั้นตอนเริ่มต้น จะเป็นแนวทางในการผสม Rockwool ในลักษณะของส่วนผสมเพิ่มเติม (Filler) ในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตแบบ Dense-graded ซึ่งเป็นรูปแบบส่วนผสมที่มีการใช้งานมากที่สุดในประเทศไทย ที่มีความซับซ้อนในด้านการออกแบบส่วนผสมและการก่อสร้างสายทางน้อยที่สุด</p>
--	--

5. การรวบรวมองค์ความรู้และการวิจัยพื้นฐาน (Literature Review)

จากรายงานวิจัยในต่างประเทศ พบว่า การใช้เศษร็อกวูล (Rock wool particles) มาเป็นส่วนผสมในวัสดุคอมโพสิตที่มีซีเมนต์เป็นองค์ประกอบหลัก (Cement-based composites) สามารถช่วยเพิ่มความต้านทานแรงอัด (compressive strength) ซึ่งเป็นผลมาจากเศษร็อกวูลช่วยเพิ่มการเชื่อมประสานของแคลเซียมซิลิเกต (CSH) และยังลดการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าสู่เนื้อคอนกรีตซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยปรับปรุงความคงทนและอายุการใช้งานของคอนกรีตอีกด้วย(Wei-Ting Lin และคณะ, 2013) อย่างไรก็ตาม การผสมเศษร็อกวูลในสัดส่วนที่มากในงานคอนกรีตและงานมอร์ตาร์จะมีผลต่อการไหลของคอนกรีต ดังนั้นการศึกษาโดยทั่วไปจึงใช้ส่วนผสมอยู่ระหว่างร้อยละ 0.1-5 โดยน้ำหนัก

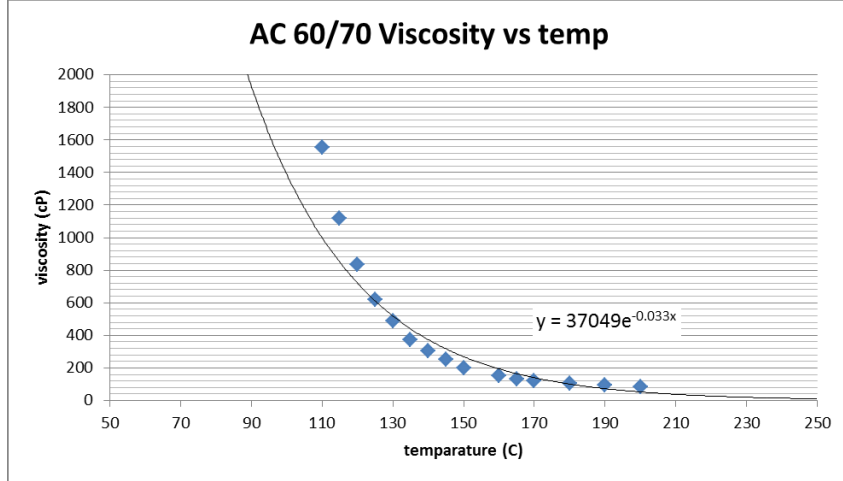
ในประเทศไทยมีการศึกษาถึงแนวทางการนำเศษร็อกวูลมาใช้ประโยชน์เช่นเดียวกัน ตัวอย่างเช่น กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ร่วมกับสถาบันเหล็กกล้าแห่งประเทศไทยได้ทำการศึกษาทดลองนำเศษร็อกวูลมาเป็นส่วนผสมรวมในคอนกรีตสำหรับงานก่อสร้าง แล้วทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการและทดลองในระดับโรงงานต้นแบบ พบว่า การผสมเศษร็อกวูลในคอนกรีตจะส่งผลให้การไหลตัวของคอนกรีตลดลงทำให้ลำบากในการเทลงแบบหล่อขึ้นงาน และพบว่าค่าการทนต่อแรงอัดเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของเศษร็อกวูลที่เพิ่มขึ้น (ระหว่าง ร้อยละ 0.1 ถึง 1 โดยปริมาตร) เนื่องจากเส้นใยของร็อกวูลได้เข้าไปลดช่องว่างที่อยู่ในเนื้อคอนกรีต ซึ่งที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 0.5 สามารถเพิ่มค่าการทนต่อแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเศษร็อกวูลมากกว่า 22% (16.75 Mpa เทียบกับ 13.69 Mpa ตามลำดับ) และยังพบว่าที่อัตราส่วนผสมร็อกวูลร้อยละ 0.5 และ 1.0 สามารถป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีตที่เกิดจากการหดตัวได้เป็นอย่างดี ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกการผสมเศษร็อกวูลในอัตราส่วนโดยปริมาตรร้อยละ 0.5 ไปทำการทดลองเทลงบนถนนและสรุปว่าการใช้เศษร็อกวูลเป็นส่วนผสมในคอนกรีตถนนสามารถเพิ่มกำลังอัดและยังช่วยประหยัดต้นทุนวัสดุได้ประมาณร้อยละ 5.5

6. การทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab Scale) :

ขั้นตอนการทดลอง :	<p>1. การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ด้วยวิธี Marshall Mix Design</p> <p>การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธี Marshall Mix Design ในการทดลองนี้ เป็นการออกแบบส่วนผสมตามมาตรฐานกรมทางหลวง ทล.ม. 408/32 มาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete or Hot-Mix Asphalt) [6] โดยมี</p>
--------------------------	--

รายละเอียดของการออกแบบส่วนผสมดังนี้

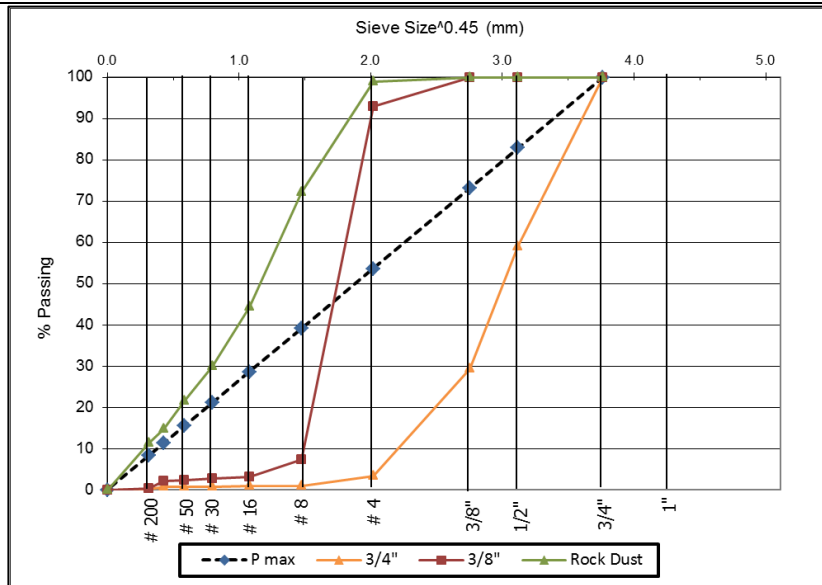
- Asphalt Binder ที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสมเป็นเกรด AC 60/70 โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.03 และความหนืด(viscosity)ของแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิต่างๆตามกราฟ



- มวลรวม เป็นหินปูนจากแหล่งหิน อ.อุ้มทอง จ.สุพรรณบุรีโดยแบ่งเป็นหินขนาดคละ 3/4 นิ้ว 3/8 นิ้ว และหินฝุ่น ผลการวิเคราะห์ขนาดคละด้วย sieve analysis (ASTM C136 Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates)

ผลการวิเคราะห์ขนาดคละของมวลรวมด้วย Sieve Analysis

Sieve	Size, d (mm)	% Passing		
		Cold Bin		
		3/4"	3/8"	Rock Dust
1 in	25	100.00	100.00	100.00
3/4 in	19	100.00	100.00	100.00
1/2 in	12.5	58.85	100.00	100.00
3/8 in	9.5	29.37	100.00	100.00
# 4	4.75	3.37	92.88	98.88
# 8	2.36	1.05	7.37	72.10
# 16	1.18	0.90	3.14	44.33
# 30	0.6	0.84	2.70	29.98
# 50	0.3	0.78	2.45	21.61
# 100	0.15	0.67	2.17	14.76
# 200	0.075	0.14	0.44	11.33
Pan	0			



กราฟผลการวิเคราะห์ขนาดคละของหินขนาดคละ 3/4 นิ้ว 3/8 นิ้ว และหินฝุ่น สำหรับผลการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะ แบ่งออกเป็น 2 การทดสอบ คือ ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ (ASTM C 127: Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate) และความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด (ASTM C 128: Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate)



รูปการทดสอบความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ (Pavement interactive, 2013)

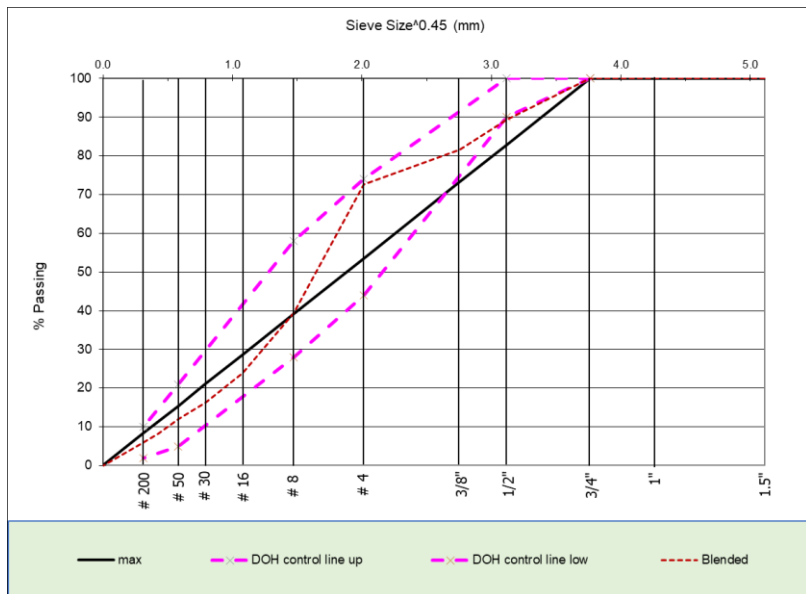


รูปการทดสอบความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด (Pavement intractive, 2013)

ตารางความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยของมวลรวมขนาดต่างๆ

Nominal Size		Avg. Specific Gravity (G_{sb})	%Absorption
3/4"	Coarse Aggregate	2.695	0.555
3/8"	Coarse Aggregate	2.701	0.560
Rock Dust	Fine Aggregate	2.686	0.728
	Dust	2.637(G_{sa})	-

- การคัดเลือกส่วนผสมมาร์แชลล์ ได้ทดลองออกแบบขนาดคละสำหรับชั้นผิวทาง wearing course ที่มีขนาดของ Maximum Aggregate Size เท่ากับ 19 มม. โดยทดลองผสมสัดส่วนของหินทั้ง 3 ขนาดคือ 3/4 นิ้ว 3/8 นิ้ว และหินฝุ่น ให้มีขนาดคละของส่วนผสมโดยรวมอยู่ในขอบเขตตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง ซึ่งอยู่ในสัดส่วน 26% 22% และ 52% ตามลำดับ ดังแสดงด้วยกราฟขนาดคละ



โดยค่าความถ่วงจำเพาะของขนาดคละมวลรวมทดลอง แสดงดังตาราง

Gradation	% in aggregate blend			G_{sb} of each BIN			G_{sb} of blended aggregate
	Aggregate Nominal size			3/4"	3/8"	Rock Dust*	
	3/4"	3/8"	Rock Dust				
	26%	22%	52%	2.695	2.701	2.686	

							ate
trial blend	26	22	52	2.695	2.701	2.678	2.687

*avg. G_{sb} of Rock Dust เป็นผลเฉลี่ยของ G_{sb} fine aggregate และ dust G_{sa}

ในการผลิตก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์ผสมร้อน มวลรวมน้ำหนัก 1,200 กรัมต่อ 1 ตัวอย่างจะถูกนำไปอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิผสมนาน 4 ชั่วโมงก่อนนำไปผสมกับแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิเดียวกันเป็นเวลา 1-2 นาที หลังจากนั้นตัวอย่างแอสฟัลต์ผสมร้อนจะถูกนำไปบ่มที่อุณหภูมิตัดนาน 2 ชั่วโมงเพื่อจำลองการเสื่อมสภาพระยะสั้น (short termed aging) ก่อนนำไปบรรจุในแบบหล่อเพื่อบดอัดด้วยค้อนมาร์แชลล์ จำนวน 75 ครั้ง/ด้าน ทั้งสองด้าน

ในการทดลองผสม หนึ่งส่วนผสมเปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ ประกอบด้วยแอสฟัลต์ผสมร้อนจำนวน 5 ตัวอย่าง ตัวอย่าง 3 ตัวอย่างแรกจะถูกบดอัดเป็นก้อนทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม. สูงประมาณ 65 มม. และมีแอสฟัลต์ผสมร้อนอีก 2 ตัวอย่างที่ถูกเตรียมขึ้นเช่นเดียวกับ 3 ตัวอย่างแรกแต่จะไม่นำไปบดอัด เรียกตัวอย่างนี้ว่า loose sample เพื่อนำไปใช้ทดสอบหาความถ่วงจำเพาะสูงสุด (Theoretical Maximum Specific Gravity) ซึ่งจำเป็นสำหรับการทดสอบหา % Air Void ในก้อนตัวอย่างมาร์แชลล์

- ผลการทดสอบมาร์แชลล์ของส่วนผสมทดลอง

- Theoretical Maximum Specific Gravity (G_{mm})

ผลการทดสอบค่า Theoretical Maximum Density ของส่วนผสมทดลอง ที่เป็นส่วนผสมระหว่างมวลรวมที่เป็นขนาดคละทดลอง ผสมกับแอสฟัลต์ปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แสดงไว้ในตาราง

ผลการทดสอบค่า G_{mm} ของส่วนผสมทดลอง

Gradation	%AC	Average G_{mm}
Trial Blend	4.7	2.527
	5.2	2.500
	5.7	2.489

- Marshall Volumetric Properties and Stability

การทดสอบกับก้อนตัวอย่างมาร์แชลล์ทั้งหมดเริ่มด้วย การทดสอบหาคุณสมบัติเชิงปริมาตรของก้อนตัวอย่าง โดยการชั่งน้ำหนัก 3 สถานะคือน้ำหนักแห้งปกติ (weight in air) น้ำหนักในน้ำ (weight submerged) และน้ำหนักสถานะชุ่มน้ำผิวหมาด (weight saturated surface dry condition) หลังจากนั้นนำก้อนตัวอย่างไปแช่ในน้ำอุ่น 60°C นาน 30 นาทีแล้วจึงนำก้อนตัวอย่างไปกดด้วยเครื่องกด

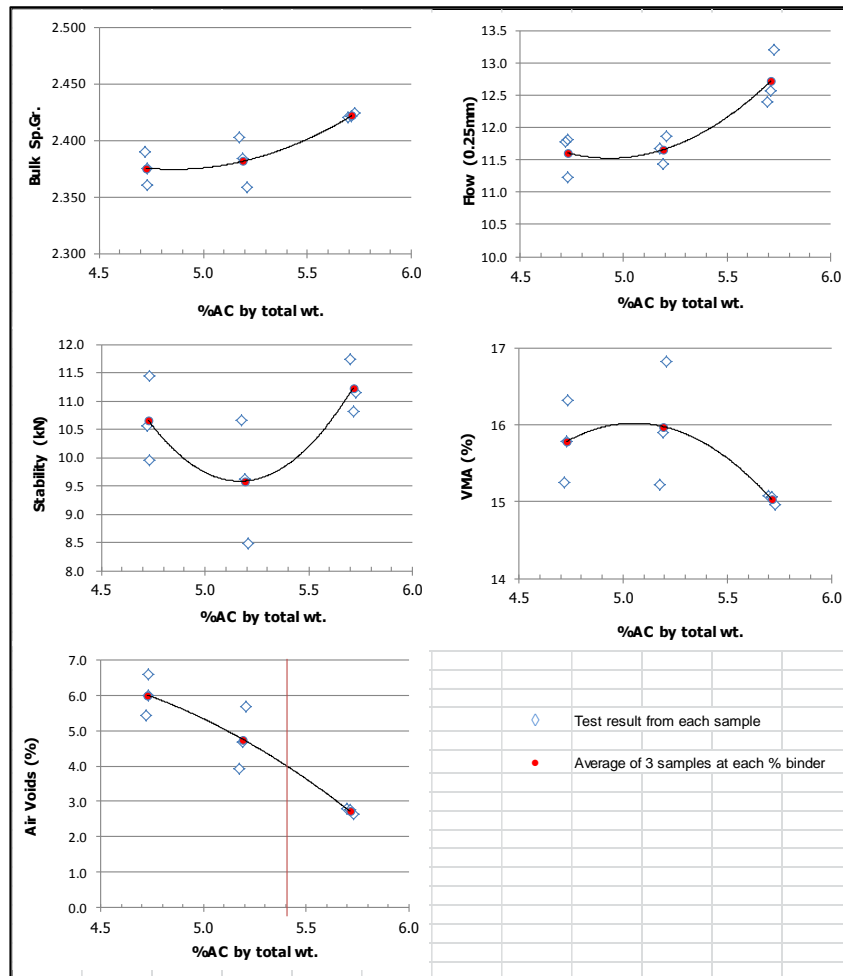
Marshall Stability เพื่อหาค่า Stability และ Flow

ผลการทดสอบก้อนตัวอย่างที่ผลิตตามส่วนผสมทดลอง ที่มีปริมาณแอสฟัลต์ที่แตกต่างกัน แสดงดังตาราง

ผลการทดสอบก้อนตัวอย่างมาร์แชลล์ของส่วนผสมทดลอง

HOT MIX DESIGN DATA BY MARSHALL METHOD												
Project			Rockwool									
Date:			2017-05-18				Sp.Gr. of AC (Gb)				1.03	
Asphalt Grade			AC 60-70				Avg. Bulk Sp.Gr. of Agg. (Gsb)				2.687	
Compaction Level			75		blows/side		%Asphalt Absorption in Agg.(Pba)				0.46	
Aggregate gradation blend:			Trial Blend				Avg. Eff. Sp.Gr. (Gse) by Calc.				2.720	

No.	%AC		Weight		specimen height mm	Bulk S.G. Gmb	Max S.G. Gmm	Air Void %	VMA %	Peak Load kN	Deform. at peak mm	Corr. Ratio
	target %	actual %	Agg. g	AC g								
	1	4.7	4.7	1199.2	59.4	65.5	2.390	2.527	5.4	15.2	11.23	2.94
2	4.7	4.7	1200.0	59.6	66.0	2.360	2.527	6.6	16.3	10.71	2.95	0.93
3	4.7	4.7	1200.1	59.6	65.9	2.375	2.527	6.0	15.8	12.30	2.81	0.93
AVG.		4.73				2.375	2.527	6.0	15.8			
1	5.2	5.2	1201.0	66.0	66.7	2.358	2.500	5.7	16.8	9.21	2.96	0.92
2	5.2	5.2	1200.0	65.7	65.8	2.384	2.500	4.7	15.9	10.35	2.86	0.93
3	5.2	5.2	1202.1	65.6	65.2	2.403	2.500	3.9	15.2	11.22	2.92	0.95
AVG.		5.19				2.381	2.500	4.8	16.0			
1	5.7	5.7	1201.3	73.0	65.2	2.424	2.489	2.6	15.0	11.74	3.30	0.95
2	5.7	5.7	1200.0	72.5	65.3	2.420	2.489	2.8	15.1	12.48	3.10	0.94
3	5.7	5.7	1199.8	72.7	65.2	2.421	2.489	2.8	15.1	11.39	3.14	0.95
AVG.		5.71				2.422	2.489	2.7	15.0			



กราฟสรุปคุณสมบัติมาร์แชลล์ของส่วนผสมทดลอง

จากผลการทดสอบพบว่า ขนาดคละทดลอง ที่มีการกระจายตัวของมวลรวม (Gradation) เป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง เมื่อทำการทดสอบตามวิธีมาร์แชลล์ สามารถผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานได้ โดยมีจุด %optimum asphalt content ที่ 4% air voids เท่ากับ 5.4% โดยน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมดซึ่งคุณสมบัติมาร์แชลล์ของส่วนผสมทดลองที่เหมาะสมที่สุด ได้แสดงไว้ในตาราง

ตาราง คุณสมบัติมาร์แชลล์ของส่วนผสมทดลอง ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง
(max aggregate size 19 mm)

	Unit	Requirements (75 blows/side)	Trial Blend
%Binder selected (of total wt)	%	-	5.4%
% air void (of total volume)	%	3-5%	4%
VMA (of total volume)	%	> 15	15.6
Stability	kN	8	10.2
Flow (0.25mm)	unit	8 - 14	11.7

2.การทดลองผสม Rockwool ในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน

จากที่กล่าวไว้ข้างต้น การทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผสม Rockwool ลงในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน เริ่มจากการศึกษาคุณสมบัติที่จำเป็นของ Rockwool เมื่อต้องนำมาใช้งานกับแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- การเปลี่ยนแปลงสภาพ เมื่อได้รับความร้อน

การผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน วัสดุต้องสัมผัสความร้อนไม่ต่ำกว่า 150°C เป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 2 ชั่วโมง จึงต้องมีการพิจารณาว่า Rockwool เมื่อได้รับความร้อนเป็นเวลานาน จะมีการเปลี่ยนแปลงสภาพเช่นไร ซึ่งทำการทดสอบโดยการนำ Rockwool อบอุ่นเตาอบที่ความร้อน 150°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า ลักษณะทางกายภาพไม่มีความเปลี่ยนแปลง ยังคงเป็นเส้นใยเหมือนเดิม เพียงแต่มีสีที่เข้มขึ้นดังรูป



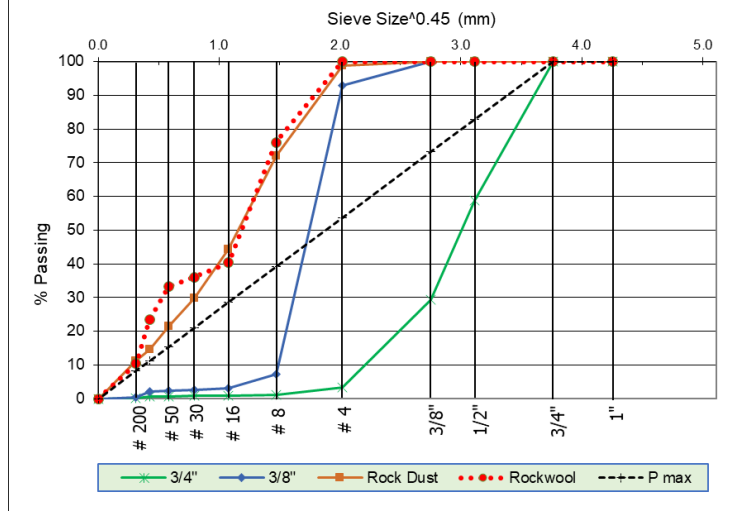
Rockwool หลังจากได้รับความร้อน (บน) เทียบกับก่อนได้รับความร้อน (ล่าง)

- การทดสอบขนาดคละ

ทำการทดสอบ โดยการวิเคราะห์ด้วย Sieve Analysis เช่นเดียวกับมวลรวมประเภทหินปูน พบว่า Rockwool มีขนาดคละที่ใกล้เคียงกับมวลรวมขนาดหินปูน โดยรายละเอียดแสดงดังตาราง

ผลการวิเคราะห์ขนาดคละของ Rock Wool ด้วย Sieve Analysis

Sieve	Size, d (mm)	% Passing
		3/4"
1/2 in	12.5	100.0
3/8 in	9.5	100.0
# 4	4.75	100.0
# 8	2.36	76.0
# 16	1.18	40.4
# 30	0.6	36.0
# 50	0.3	33.2
# 100	0.15	23.4
# 200	0.075	10.4
Pan	0	



ผลการวิเคราะห์ขนาดผลของ Rockwool เทียบกับหินขนาดผล 3/4 นิ้ว 3/8 นิ้ว และหินฝุ่น

- การทดลองผสม Rockwool กับมวลรวม

จากการทดสอบข้างต้น ทำให้ทราบได้ว่าการผสม Rockwool ในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต มีลักษณะคล้ายคลึงกับการเพิ่มมวลรวมส่วนละเอียดในส่วนผสมทั้งหมด แต่อย่างไรก็ตาม ด้วยลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน จึงต้องดำเนินการทดสอบเพื่อพิจารณาว่า Rockwool สามารถผสมเข้ากันได้ดีกับมวลรวมขนาดหินฝุ่นหรือไม่ และสามารถใส่ได้ปริมาณมากขนาดไหน จึงดำเนินการทดสอบโดยการผสมหินฝุ่นจำนวน 1 กิโลกรัม กับ Rockwool ด้วยโม้ผสม โดยเพิ่มน้ำหนักของ Rockwool ไปเรื่อยๆ จนถึง 10% ของน้ำหนักหินฝุ่น และพิจารณาลักษณะของ Rockwool ว่าเข้ากันได้ดีเพียงใด จากการทดสอบ พบว่า การผสม Rockwool ที่สัดส่วน 5% ของน้ำหนักหินฝุ่น สามารถผสมเข้ากันได้ดี แต่เมื่อผสมด้วยสัดส่วนที่มากขึ้นกว่านั้น จนถึง 10% Rockwool บางส่วนจับตัวกันเป็นก้อน และแยกตัวออกจากหินฝุ่นอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูป



หินฝุ่นที่ผสมด้วย Rockwool ในสัดส่วน 5% และ 10% ของน้ำหนักหินฝุ่น

- การทดลองผสม Rockwool กับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต
- จากหัวข้อข้างต้น ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตทดลองที่เหมาะสมที่สุด คือ

ส่วนผสมที่มีสัดส่วนมวลรวมของหินทั้ง 3 ขนาดคือ 3/4 นิ้ว 3/8 นิ้ว และหินฝุ่น ในสัดส่วน 26% 22% และ 52% และปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุด คือ 5.4% ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด ซึ่งหลังจากนี้ จะเรียกส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตรูปแบบนี้ว่า “ส่วนผสมต้นแบบ” ในขั้นตอนนี้จะดำเนินการทดลองผสม Rockwool เข้ากับส่วนผสมดังกล่าว

จากหัวข้อข้างต้น การเติม Rockwool ในสัดส่วน 5 – 6% ของน้ำหนักหินฝุ่น Rockwool สามารถผสมได้เป็นส่วนหนึ่งของมวลรวมได้เป็นอย่างดี ซึ่งเมื่อพิจารณา Rockwool เป็นส่วนหนึ่งของมวลรวม และคำนวณสัดส่วนของส่วนผสมทั้งหมดใหม่อีกครั้ง จะพบว่า Rockwool สัดส่วน 5 – 6% ของน้ำหนักหินฝุ่น จะเทียบเท่ากับการผสม Rockwool ในสัดส่วน 2.5%– 3% ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างสูงมากแล้ว[4] โดยในขั้นตอนนี้จะทดลองออกแบบขนาดคละ 2 แบบ โดยที่คงสัดส่วน Rockwool ไว้ที่ 3% ของน้ำหนักมวลรวม โดยมีรายละเอียดดังนี้

- แบบ A เป็นขนาดคละของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสม Rockwool และปรับแต่งให้มีขนาดคละใกล้เคียงกับส่วนผสมต้นแบบ ที่ไม่ได้ผสม Rockwool
- แบบ B เป็นขนาดคละของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสม Rockwool และปรับแต่งให้ส่วนผสมที่มีสัดส่วนของมวลรวมขนาดใหญ่มากขึ้น เพื่อให้มีช่องว่างให้ Rockwool แทรกตัวได้มากขึ้น

รายละเอียดของขนาดคละแต่ละประเภท จะมีรายละเอียดดังตาราง

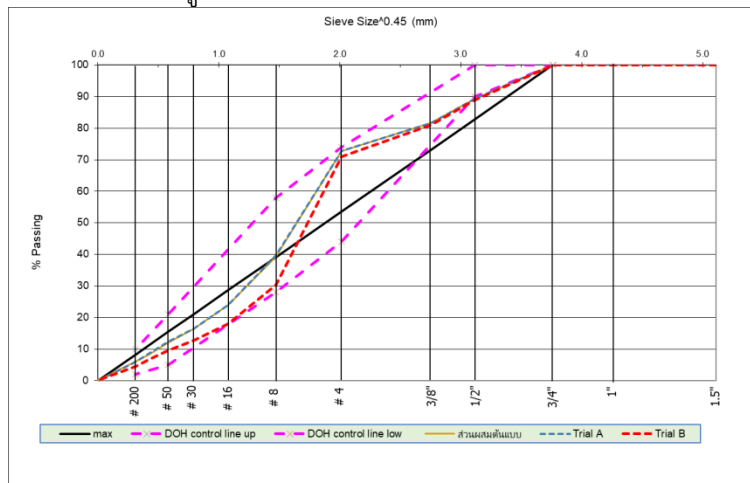
สัดส่วนของมวลรวม และผลการคำนวณความถ่วงจำเพาะ เมื่อผสม Rockwool ที่สัดส่วน 3% ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด

Gradation	% in aggregate blend				G _{sb} of each BIN				G _{sb} of blended aggregate
	Aggregate Nominal size								
	3/4"	3/8"	Rock Dust	Rock wool	3/4"	3/8"	Rock Dust*	Rock wool**	

ส่วนผสม ต้นแบบ	26	22	52	0	2.695	2.701	2.678	-	2.687
Trial A	26.0	22.0	49.0	3.0	2.695	2.701	2.678	2.700	2.688
Trial B	27.0	35.0	35.0	3.0	2.695	2.701	2.678	2.700	2.691

*avg.G_{sb} of Rock Dust เป็นผลเฉลี่ยของ G_{sb} fine aggregate และ dust G_{sa}

**Rockwool ใช้ค่าจากผู้ผลิต



กราฟแสดงขนาดคละของมวลรวม สำหรับขนาดคละต้นแบบ และขนาดคละที่ผสมด้วย Rockwool 3% โดยน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด แบบ Trail A และ Trail B

นำส่วนผสมมวลรวมดังกล่าวทั้งแบบ Trial A และ B ผสมกับแอสฟัลต์ในปริมาณที่แตกต่างกัน 3 ระดับ โดยการเติม Rockwool เข้ากับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจะเป็นการค่อยๆเติม Rockwool ลงไปในหม้อผสมระหว่างที่เครื่องกำลังผสมหินกับยางมะตอยให้เข้ากัน ซึ่งเป็นการจำลองการผสมในลักษณะของการเติม Rockwool เข้าไปใน pugmill โดยตรงของเครื่องผสมระดับอุตสาหกรรม แล้วบดอัดเป็นก้อนตัวอย่าง รวมไปถึงดำเนินการทดสอบอื่น ๆ ที่เป็นไปตามวิธีการทดสอบแบบมาร์แชล เช่นเดียวกับการทดสอบก่อนหน้าสำหรับส่วนผสมทดลอง โดยผลการทดสอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- Theoretical Maximum Specific Gravity (G_{mm})

ผลการทดสอบหาค่า Theoretical Maximum Density ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปริมาณแอสฟัลต์ต่าง ๆ โดยที่มี Rockwool เป็นส่วนผสม ได้แสดงไว้ในตาราง

ผลการทดสอบค่า G_{mm} ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตและ Rockwool

Gradation	%AC by total mix wt	Average G_{mm}
-----------	---------------------	------------------

Trial A	5.5	2.502
	6.0	2.479
	6.5	2.469
Trial B	5.5	2.501
	6.0	2.482
	6.5	2.465

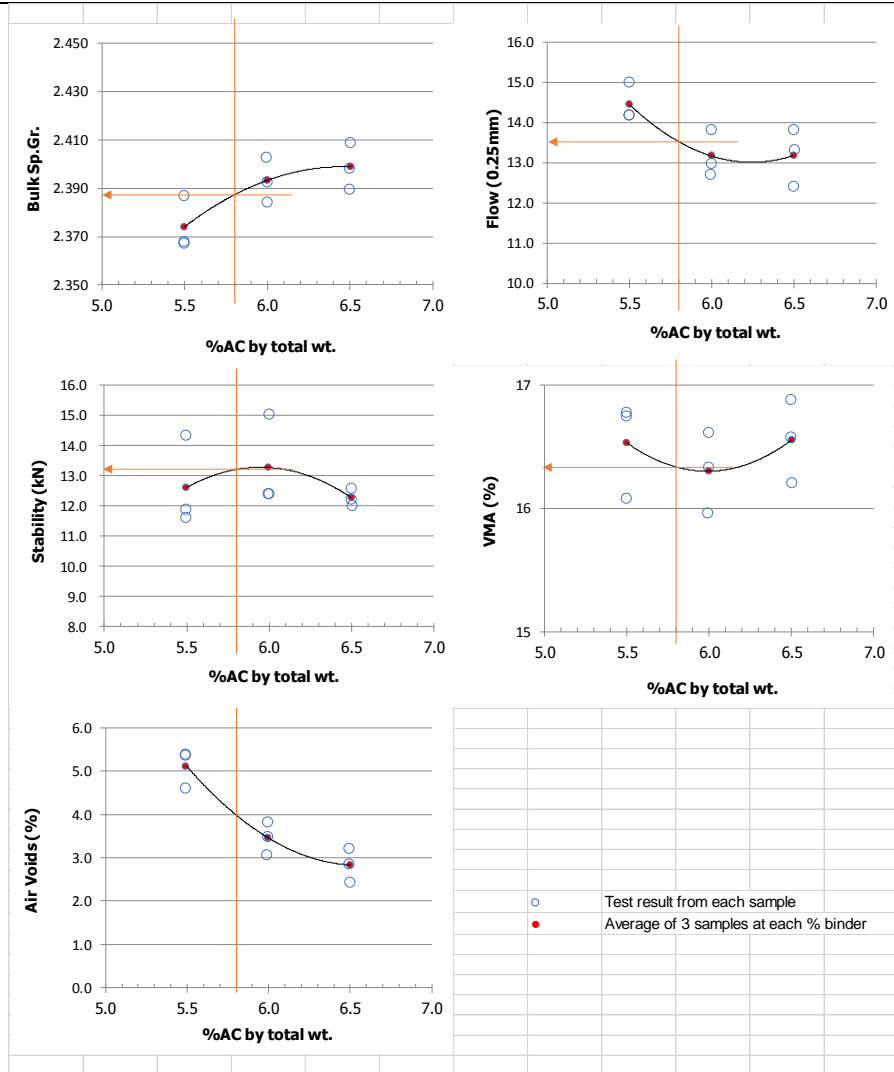
● Marshall Volumetric Properties and Stability

ผลการทดสอบก่อนตัวอย่างที่ผลิตด้วยส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วย Rockwool ที่มีปริมาณแอสฟัลต์ที่แตกต่างกัน

ผลการทดสอบก่อนตัวอย่างมาร์แชลล์ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ขนาด

คละ Trail A

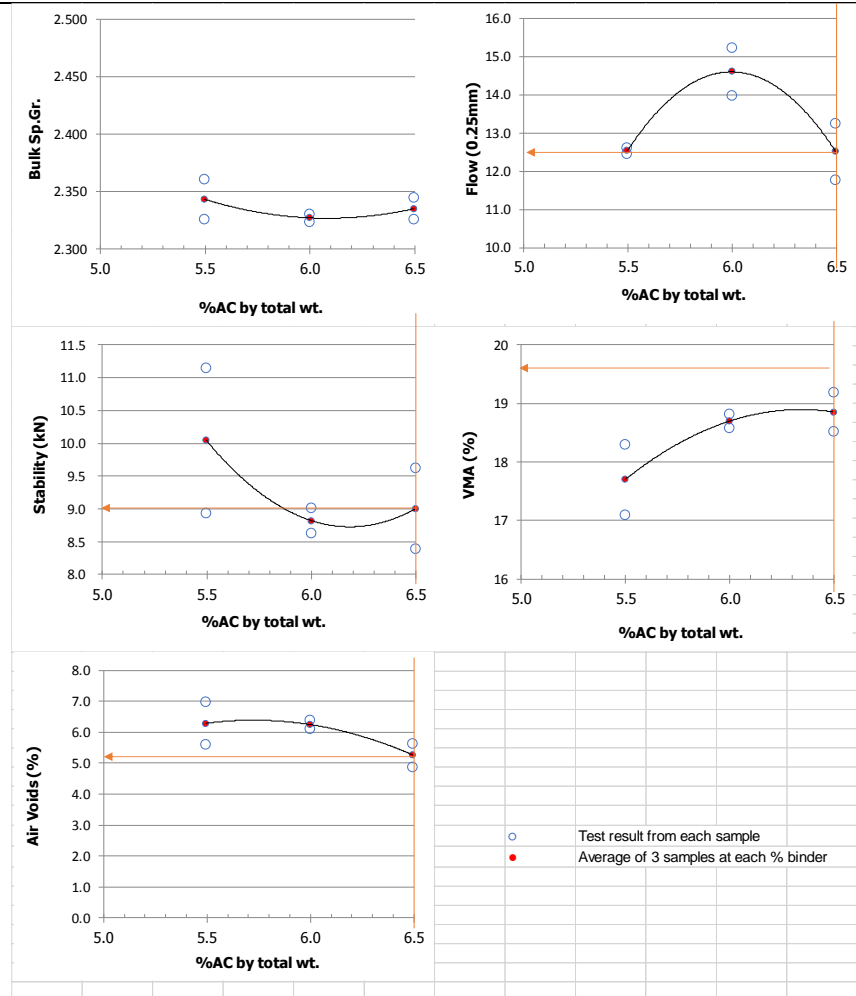
HOT MIX DESIGN DATA BY MARSHALL METHOD															
Project				Rockwool											
Date:				2017-06-28				Sp.Gr. of AC (Gb)				1.03			
Asphalt Grade				AC 60-70				Avg. Bulk Sp.Gr. of Agg. (Gsb)				2.688			
Compaction Level				75		blows/side		%Asphalt Absorption in Agg.(Pba)				0.57			
Aggregate gradation blend:				Trial Blend A				Avg. Eff. Sp.Gr. (Gse) by Calc.				2.729			
No.	%AC		Weight		specimen height	Bulk S.G. Gmb	Max S.G. Gmm	Air Void	VMA	Peak Load	Deform. at peak	Corr. Ratio	Stability		Flow (0.25mm)
	target	actual	Agg.	AC									measured	corrected	
	%	%	g	g	mm			%	%	kN	mm		kN	kN	
1	5.5	5.5	1200.0	69.8	66.9	2.367	2.502	5.4	16.8	13.06	3.55	0.91	13.1	11.9	14.2
2	5.5	5.5	1200.0	69.8	65.7	2.387	2.502	4.6	16.1	15.25	3.55	0.94	15.3	14.3	14.2
3	5.5	5.5	1200.0	69.8	66.2	2.368	2.502	5.4	16.7	12.50	3.75	0.93	12.5	11.6	15.0
AVG.		5.5				2.377	2.502	5.0	16.4				14.2	13.1	14.2
1	6.0	6.0	1200.0	76.6	66.5	2.393	2.479	3.5	16.3	13.48	3.25	0.92	13.5	12.4	13.0
2	6.0	6.0	1200.0	76.6	66.6	2.384	2.479	3.8	16.6	16.35	3.46	0.92	16.4	15.0	13.8
3	6.0	6.0	1200.0	76.5	66.1	2.403	2.479	3.1	16.0	13.33	3.18	0.93	13.3	12.4	12.7
AVG.		6.0				2.393	2.479	3.7	16.5				14.9	13.7	13.4
1	6.5	6.5	1200.0	83.4	66.7	2.398	2.469	2.9	16.6	13.28	3.46	0.92	13.3	12.2	13.8
2	6.5	6.5	1200.0	83.4	67.1	2.389	2.469	3.2	16.9	13.85	3.10	0.91	13.9	12.6	12.4
3	6.5	6.5	1200.0	83.5	66.3	2.409	2.469	2.4	16.2	13.05	3.33	0.92	13.1	12.0	13.3
AVG.		6.5				2.399	2.469	3.0	16.7				13.6	12.4	13.1



กราฟสรุปคุณสมบัติมาร์แชลล์ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ขนาดคละ Trail A

ผลการทดสอบก่อนตัวอย่างมาร์แชลล์ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ขนาดคละ Trail B

HOT MIX DESIGN DATA BY MARSHALL METHOD															
Project			Rockwool												
Date:			2017-06-28				Sp.Gr. of AC (Gb)				1.03				
Asphalt Grade			AC 60-70				Avg. Bulk Sp.Gr. of Agg. (Gsb)				2.691				
Compaction Level			75		blows/side		%Asphalt Absorption in Agg.(Pba)				0.52				
Aggregate gradation blend:			Trial Blend B				Avg. Eff. Sp.Gr. (Gse) by Calc.				2.728				
No.	%AC target	%AC actual	Weight Agg. g	Weight AC g	specimen height mm	Bulk S.G. Gmb	Max S.G. Gmm	Air Void %	VMA %	Peak Load kN	Deform. at peak mm	Corr. Ratio	Stability measured kN	Stability corrected kN	Flow (0.25mm)
1	5.5	5.5	1200.0	69.8	67.4	2.361	2.501	5.6	17.1	12.39	3.12	0.9	12.4	11.2	12.5
2	5.5	5.5	1200.0	69.8	68.4	2.326	2.501	7.0	18.3	10.16	3.15	0.88	10.2	8.9	12.6
AVG.	5.5					2.344	2.501	6.3	17.7				11.3	10.0	12.5
1	6.0	6.0	1200.0	76.6	69.1	2.324	2.482	6.4	18.8	9.92	3.49	0.87	9.9	8.6	14.0
2	6.0	6.0	1200.0	76.6	69.5	2.331	2.482	6.1	18.6	10.49	3.81	0.86	10.5	9.0	15.2
AVG.	6.0					2.327	2.482	6.2	18.7				10.2	8.8	14.6
1	6.5	6.5	1200.0	83.4	69.1	2.326	2.465	5.6	19.2	9.64	3.31	0.87	9.6	8.4	13.2
2	6.5	6.5	1200.0	83.4	68.3	2.345	2.465	4.9	18.5	10.81	2.94	0.89	10.8	9.6	11.8
AVG.	6.5					2.335	2.465	5.3	18.9				10.2	9.0	12.5



กราฟสรุปคุณสมบัติมาร์แชลล์ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ขนาดคละ Trail B

3. การประเมินความเป็นไปได้เบื้องต้น จากผลการทดสอบ

จากข้อมูลผลการทดสอบของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสม Rockwool ที่มีขนาดคละของมวลรวมที่แตกต่างกัน คือ Trial A และ Trial B เมื่อใช้เกณฑ์สัดส่วนช่องว่างอากาศ หรือ % Air Void ที่ 4 % ในการพิจารณาส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ดีที่สุด สำหรับ Trial A และ Trial B เมื่อพิจารณาเทียบกับส่วนผสมต้นแบบ สามารถสรุปเป็นตารางได้ดังตาราง

คุณสมบัติมาร์แชลล์ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจากการทดลอง ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง (max aggregate size 19 mm)

	Requirements	ส่วนผสมต้นแบบ (ไม่มี Rockwool)	Trial A (ผสม RW 3%)	Trial B (ผสม RW 3%)
%Binder selected (of total wt)	(75 blows/side)	-	5.4%	5.8%
				> 6.5%

% air void (of total volume)	%	3-5%	4%	4%	5.4% @ 6.5%AC
VMA (of total volume)	%	> 15	15.6	16.3	12.8 @ 6.5% AC
Stability	kN	8	10.2	13.2	9.0 @ 6.5% AC
Flow (0.25mm)	uni t	8 - 14	11.7	13.5	12.5 @ 6.5% AC

จากตารางข้างต้น จะเห็นได้ว่าส่วนผสมที่ใช้ขนาดคละ Trial B เป็นส่วนผสมที่ให้ผลการทดสอบที่ไม่ดีเท่าที่ควร ค่า %Air Void และค่า VMA มีค่าไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กรมทางหลวงกำหนดไว้ อีกทั้งคุณสมบัติด้านกำลัง (Stability) และค่าการไหลเมื่อวิบัติ (Flow) ยังด้อยกว่าส่วนผสมต้นแบบที่ไม่ได้มี Rockwool เป็นส่วนผสม จึงไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการทดสอบขั้นตอนต่อไป

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ใช้ขนาดคละแบบ Trial A จะเห็นว่า ส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับรูปแบบส่วนผสมนี้ คือ ส่วนผสมที่มีปริมาณ Asphalt Binder ที่ 5.8% โดยน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมด โดยจะเห็นได้ว่าส่วนผสมดังกล่าวมีค่า Stability ที่ดีกว่าส่วนผสมต้นแบบประมาณ 30% และในขณะที่มีค่า Flow ด้อยกว่าส่วนผสมต้นแบบเล็กน้อย ซึ่งในกรณีของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ขนาดคละแบบ Trial A จะมีการใช้ปริมาณแอสฟัลต์ที่มากกว่าส่วนผสมต้นแบบเล็กน้อย เนื่องจาก Rockwool มีคุณสมบัติในการดูดซึมแอสฟัลต์ได้ดี ซึ่งพิจารณาได้จากค่าการดูดซึมแอสฟัลต์ของมวลรวม (Pba) ที่ส่วนผสมต้นแบบมีค่าเท่ากับ 0.46 ขณะที่ส่วนผสมแบบ Trial A มีค่า Pba อยู่ที่ 0.57

กล่าวโดยสรุป สำหรับขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มี Rockwool เป็นส่วนผสม จากการทดสอบคุณสมบัติตามการออกแบบส่วนผสมในระดับเบื้องต้น การผสม Rockwool เข้ากับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน เพื่อการรีไซเคิล Rockwool นั้น สามารถทำได้ เนื่องจากสามารถผสมเข้ากันได้ดี สามารถถอดออกเป็นชิ้นตัวอย่างได้ นอกจากนี้ในการที่จะนำวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนที่ผสมด้วย Rockwool ไปใช้งานบนผิวจราจร ยังต้องการการทดสอบในห้องปฏิบัติการขั้นสูงเพิ่มเติม เพื่อยืนยันสมรรถนะในการรองรับจราจร อาทิเช่น การทดสอบโมดูลัสคืนตัว การทดสอบการยุบตัวถาวรภายใต้แรงกระทำซ้ำ ซึ่งเป็นการทดสอบที่นิยมใช้ในการเปรียบเทียบด้านสมรรถนะของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์

4. การทดสอบสมรรถนะด้านการต้านทานการยุบตัวถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีต

การดำเนินงานในส่วนนี้เป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมใน

ห้องปฏิบัติการชั้นสูง เพื่อยืนยันถึงสัณฐานในการรองรับแรงกระทำจากจราจรได้ โดยเป็นการเปรียบเทียบระหว่างส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตต้นแบบ ที่มีปริมาณแอสฟัลต์ที่ 5.4% ที่ไม่ได้ผสมด้วย Rockwool และส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดผล Trial A ที่มีปริมาณแอสฟัลต์ 5.8% ที่ผสมด้วย Rockwool 3% โดยน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมด ซึ่งการทดสอบที่จะใช้ในการประเมินสมรรถนะในการใช้งาน สำหรับงานศึกษานี้ คือ การทดสอบการต้านทานการเสีรูปของวัสดุภายใต้แรงกระทำซ้ำ แบบ Dynamic Creep ตามมาตรฐานการทดสอบ Australian Standard AS 2891.12.1-1995: Methods of sampling and testing asphalt Method 1 2 . 1 : Determination of the permanent compressive strain characteristics of asphalt - Dynamic creep test ซึ่งเป็นการทดสอบที่สามารถระบุถึงประสิทธิภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดนั้น ๆ ว่าสามารถรองรับปริมาณจราจรได้ในระดับใด จนกระทั่งเกิดความเสียหายแบบการยุบตัวตามแนวร่องล้อบนผิวทาง ซึ่งเป็นการทดสอบที่สะท้อนถึงความเสียหายของผิวทางที่พบได้มากที่สุดในประเทศไทยได้เป็นอย่างดี

แนวคิดในการดำเนินการทดสอบ Dynamic Creep นั้น เป็นรูปแบบหนึ่งของการทดสอบการต้านทานการเสีรูปถาวรของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต โดยรูปแบบของการทดสอบ คือ ให้แรงกระทำในแนวตั้ง (Load) ที่คงที่ค่าหนึ่ง และคลายแรงกระทำ (Unload) นับเป็น 1 รอบการทดสอบ โดยกระทำซ้ำอย่างต่อเนื่องในสภาวะอุณหภูมิควบคุมหนึ่ง ซึ่งเป็นการจำลองสภาวะจากแรงกระทำของน้ำหนัทยานพาหนะจากการจราจรที่วิ่งผ่านวัสดุ ณ จุดนั้นๆ ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง โดยระหว่างการทดสอบอุปกรณ์จะตรวจสอบและบันทึกค่าการยุบตัวของวัสดุอย่างต่อเนื่อง จนถึงจำนวนรอบการทดสอบที่กำหนด หรือวัสดุเกิดการเสีรูป (ยุบตัว) เกินเกณฑ์ที่กำหนด

การทดสอบ Dynamic Creep ในปัจจุบันมีมาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับจำนวนหนึ่ง ซึ่งแต่ละมาตรฐานการทดสอบจะมีรายละเอียดข้อกำหนดในการทดสอบปลีกย่อยที่แตกต่างกัน สำหรับการศึกษาครั้งนี้จะดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน Australian Standard AS 2891.12.1-1995 ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยมีเงื่อนไขในการทดสอบ คือ [10]

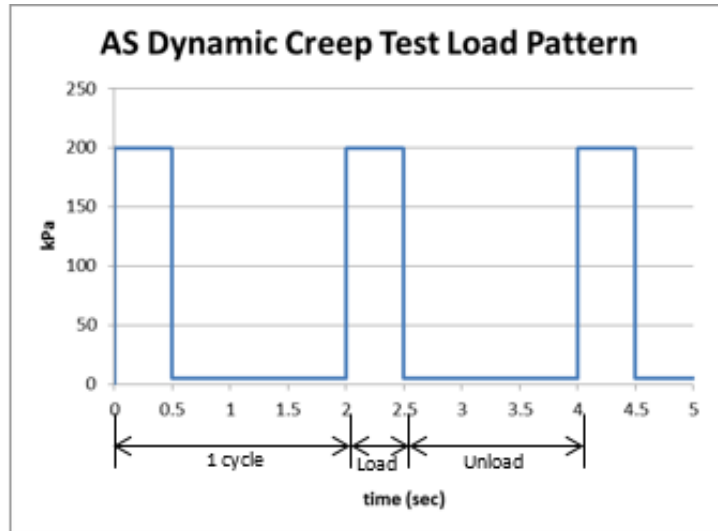
- Air Void ของก้อนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ
5.0±0.5%
- อุณหภูมิในการทดสอบ
50±0.5°C
- หน่วยแรงอัด (Compressive Stress) ที่กระทำต่อตัวอย่าง
200±5 kPa
- ระยะเวลาให้แรง (Load Period)

0.5±0.05 sec

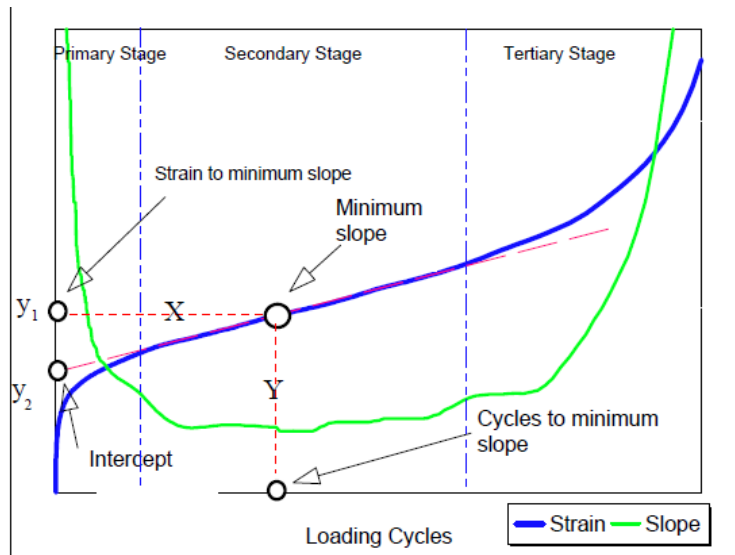
- ระยะเวลาต่อ 1 รอบการทดสอบ (Pulse Period)

2.0±0.05 sec

ลักษณะการให้แรงกระทำระหว่างการทดสอบแก้ตัวอย่าง คือ ให้แรงในรูปแบบของคลื่นสี่เหลี่ยม เป็นระยะเวลา 0.5 วินาที และระยะพัก 1.5 วินาที ดังแสดงในรูป



ลักษณะ Load Pattern ของการทดสอบ AS Dynamic Creep



ลักษณะทั่วไปของผลการทดสอบ AS Dynamic Creep[11]



การทดสอบ AS Dynamic Creep

ในการทดสอบแต่ละก้อนตัวอย่าง ได้ดำเนินการทดสอบที่อุณหภูมิตัวอย่างเท่ากับ 50°C เป็นจำนวน 20,000 รอบการทดสอบ (11.1 ชั่วโมง) หรือเมื่อความเครียดสะสมในแนวแรงกระทำของก้อนตัวอย่างมีค่าถึง 30,000 microstrain การพิจารณาผลการทดสอบ จะพิจารณาค่าผลลัพธ์ต่อไปนี้

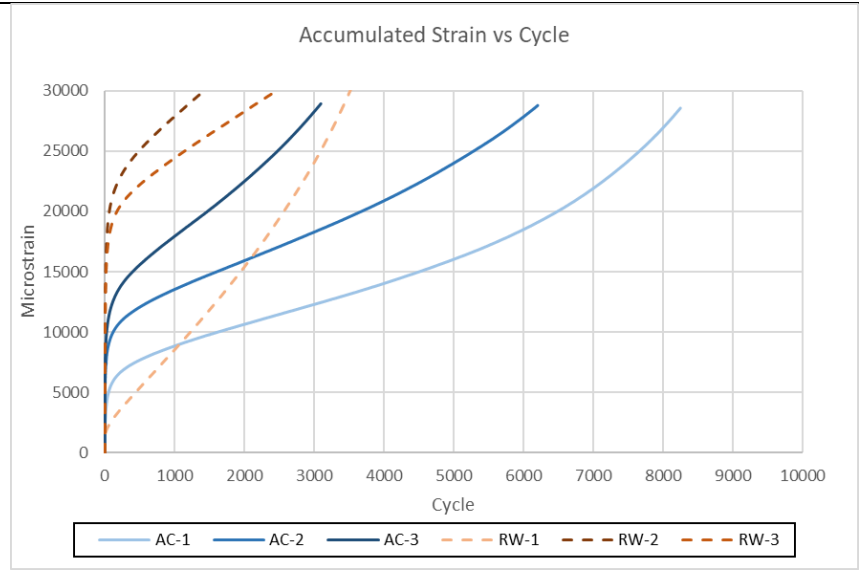
- อัตราการเปลี่ยนแปลง Strain (Strain Rate หรือ dynamic creep slope) ที่ต่ำที่สุด
- รอบการทดสอบ ที่มีค่า Strain Rate ต่ำที่สุด

Australian Standard ได้กำหนดเกณฑ์ในการพิจารณาความสามารถในการความต้านทานการเสีรูปร่างหรือการเกิดร่องล้อของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตนั้นๆ ว่าสามารถรองรับปริมาณจราจรได้ในระดับใด พิจารณาได้จากตารางที่ 5-15 โดยเงื่อนไขที่สอดคล้องกับประเทศไทย คือ Weighted Mean Annual Pavement Temperature (WMAPT) $> 30^{\circ}\text{C}$

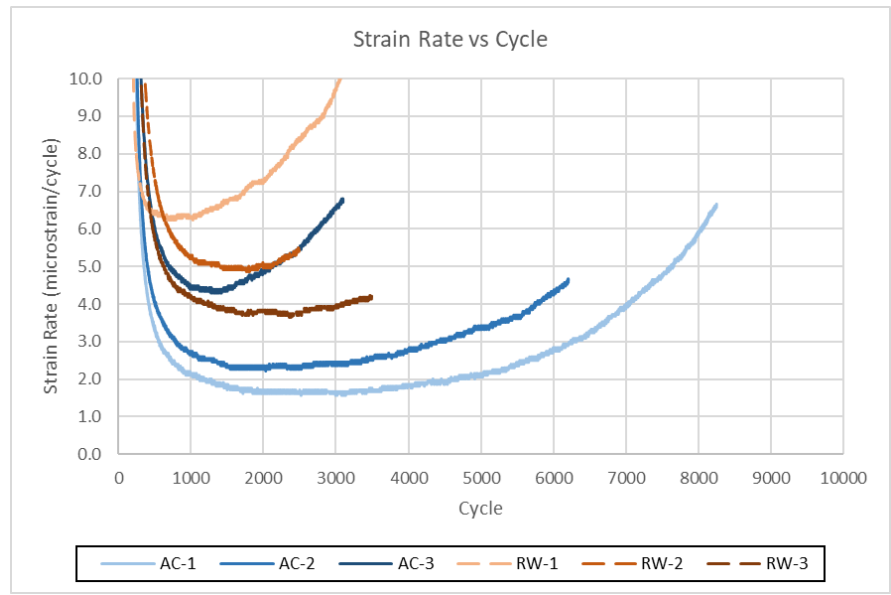
เกณฑ์การพิจารณาความสามารถในการรองรับปริมาณจราจรของแอสฟัลต์คอนกรีต

WMAPT ($^{\circ}\text{C}$)	Traffic			
	Very Heavy	Heavy	Medium	Light
> 30	< 0.5	0.5 – 3	$> 3 - 6$	Not Applicable
20 – 30	< 1	1 – 6	$> 6 - 10$	
10 - 20	< 2	2 - 10	Not Applicable	

สำหรับผลการทดสอบ Dynamic Creep Test ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับการทดสอบในโครงการวิจัยนี้ ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการต้านทานการเสีรูปร่างระหว่างแอสฟัลต์คอนกรีตแบบทั่วไปและแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วย Rockwool



ความสัมพันธ์ระหว่าง Accumulated Strain กับรอบการทดสอบ AS Dynamic Creep ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 2 ประเภท



ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain Rate กับรอบการทดสอบ AS Dynamic Creep ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 2 รูปแบบ

ตารางความสามารถในการรองรับปริมาณจราจรของแอสฟัลต์คอนกรีต จากการทดสอบ AS Dynamic Creep

ตัวอย่าง	รายละเอียด	min Strain Rate (microstrain/cycle)	cycle@min strain rate	Traffic Level @ 30°C WMAPT
AC-1	ส่วนผสมแอสฟัลต์	1.5	3,000	Heavy
AC-2		2.2	2,500	Heavy

AC-3	คอนกรีต ต้นแบบ	4.3	1,400	Medium
RW-1	ส่วนผสม	6.2	900	N/A
RW-2	แอสฟัลต์	5.0	1,600	Medium
RW-3	คอนกรีต + 3% RW	3.7	2,200	Medium

จากผลการทดสอบ พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 2 ประเภท มีประสิทธิภาพในการต้านทานการเสีรูปลาวารที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยRockwool 3%มีสมรรถนะที่ด้อยกว่าส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตต้นแบบ 1 ระดับ กล่าวคือ ส่วนผสมต้นแบบสามารถรองรับปริมาณจราจรได้ในระดับปานกลางถึงสูง ขณะที่แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วย Rockwool สามารถรองรับปริมาณจราจรได้ในระดับต่ำถึงปานกลางเท่านั้น

ผลการทดลอง :

จากผลการดำเนินการศึกษาความเป็นไปได้ในการ Recycle Rockwool ด้วยการผสมเข้าเป็นส่วนหนึ่งของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต โดยเริ่มจากการทดสอบความเป็นไปได้ในการผสม Rockwool กับแอสฟัลต์คอนกรีต พบว่า Rockwool และแอสฟัลต์คอนกรีตสามารถผสมเข้ากันได้เป็นอย่างดี และมีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์การออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีมาร์แชล ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง โดยส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสม Rockwool มีคุณสมบัติด้านการรับกำลัง (Stability) ที่สูงกว่าส่วนผสมต้นแบบเล็กน้อย ขณะที่คุณสมบัติด้านการไหล (Flow) ที่สะท้อนถึงการเสีรูปลเมื่อเกิดการวิบัติ พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสม Rockwool จะมีการเสีรูปลเมื่อวิบัติมากกว่าส่วนผสมต้นแบบ

ขณะที่การทดสอบสมรรถนะที่สะท้อนถึงประสิทธิภาพในการใช้งานบนสถานะการใช้งานจริง ซึ่งการศึกษานี้พิจารณาที่สมรรถนะในการต้านทานการเสีรูปลาวารของวัสดุ เนื่องจากเกี่ยวข้องกับความเสี่ยงบนผิวทางประเภท Rutting หรือการยุบตัวตามแนวร่องล้อ ซึ่งเป็นรูปแบบความเสียหายหลักของถนนในประเทศไทย จากผลการทดสอบพบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วย Rockwool มีสมรรถนะที่ด้อยกว่าส่วนผสมต้นแบบ อย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องย่อหน้าก่อนหน้า ที่กล่าวว่าค่า Flow ของส่วนผสมที่มี Rockwool มีค่าสูงกว่าส่วนผสมต้นแบบอย่างชัดเจน

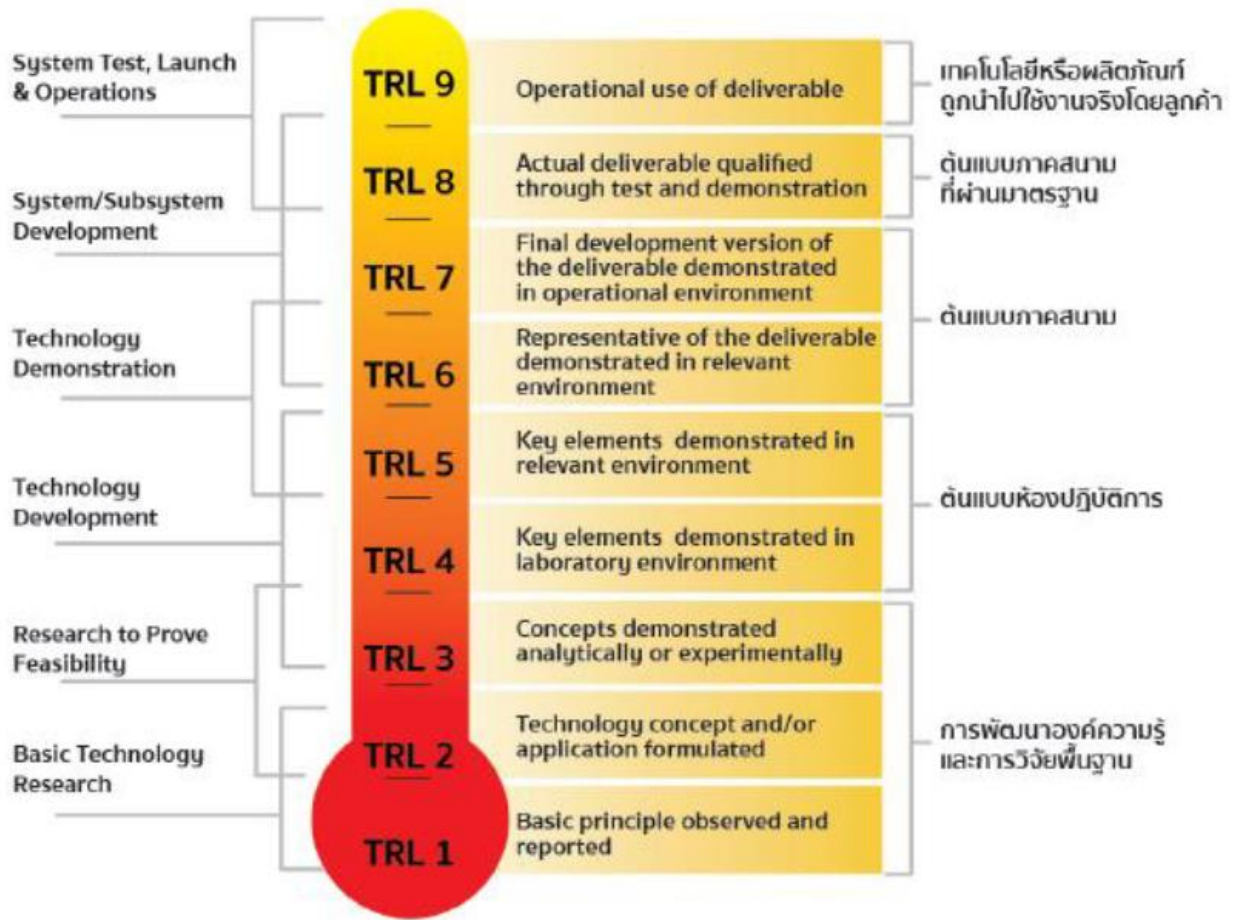
กล่าวโดยสรุป คือ การ Recycle Rockwool ด้วยเทคนิคการผสมเข้ากับวัสดุผิวทางนั้น มีความเป็นไปได้ สามารถนำวัสดุที่ผสม Rockwool ไปก่อสร้างถนน

	<p>ได้จริง แต่ไม่เหมาะกับถนนที่มีปริมาณจราจรสูงถึงสูงมาก เนื่องจากมีสมรรถนะด้านการต้านทานการเสีรูปถาวรที่ต่ำกว่าส่วนผสมต้นแบบ ที่ไม่มีการผสม Rockwool แต่อย่างไรก็ตามความซับซ้อนที่เพิ่มขึ้นในกระบวนการผลิตระดับโรงงานและการก่อสร้าง และต้นทุนการก่อสร้างที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการดูดซึมแอสฟัลต์จำนวนมากของ Rockwool ซึ่งแอสฟัลต์เป็นวัสดุที่มีราคาสูงที่สุดในส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีต จึงเป็นตัวแปรหลักของราคาต่อหน่วยของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน จากผลการทดสอบชี้ว่ามีแนวโน้มที่ต้องใช้ปริมาณแอสฟัลต์ที่เพิ่มขึ้นกว่าส่วนผสมแบบปกติ ดังนั้นความคุ้มค่าในการรีไซเคิล Rockwool ด้วยการผสมในแอสฟัลต์คอนกรีตที่อาจจะมีเหมาะสมกับการก่อสร้างถนนที่มีปริมาณจราจรไม่สูงมากนักนั้น จึงเป็นประเด็นที่อาจจะต้องดำเนินการศึกษาถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ต่อไป</p>
NPV :	-
B/C :	-
IRR:	-
7. กฎหมายและกฎระเบียบที่เกี่ยวข้อง (Related Law and Regulations):	
8. เอกสารอ้างอิง (References) :	

หมายเหตุ

1. ระดับความพร้อมของเทคโนโลยี

Technology Readiness Level (TRL: 1 - 9) TRL เป็นเครื่องมือบริหารจัดการโครงการหรือโปรแกรมที่นำมาประยุกต์ใช้ เพื่อสร้างความเข้าใจร่วมกันระหว่างนักพัฒนาเทคโนโลยีกับผู้ที่นำเทคโนโลยีไปถ่ายทอดสู่ลูกค้า และสามารถเปรียบเทียบความพร้อมและเสถียรภาพของเทคโนโลยีระหว่างเทคโนโลยีที่แตกต่างกันได้



2. การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

ตารางแสดงหลักเกณฑ์ในการพิจารณาความเป็นไปได้ของโครงการโดยการปรับค่าของเงินตามเวลา

NPV	B/C	IRR	ความเป็นไปได้ของการลงทุน
เป็นบวก (NPV > 0)	มากกว่า 1	มากกว่าค่าเสียโอกาส (i)	เป็นไปได้
เป็นศูนย์ (NPV = 0)	เท่ากับ 1	เท่ากับค่าเสียโอกาส (i)	ยังพอไปได้
เป็นลบ (NPV < 0)	น้อยกว่า 1	น้อยกว่าค่าเสียโอกาส (i)	ไม่ควรลงทุน