

# การประยุกต์ใช้งานของยางพอง

ดร. พงษ์ธร ธีชัย

ยางพองหรือยางครัมบ์ (crumb rubber) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำขยะยาง (เช่น ยางล้อเก่า เศษยางที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต) ไปผ่านกระบวนการบดโดยใช้เครื่องมือเชิงกลต่างๆ เช่น เครื่องกรนูลเลเตอร์ (granulator) เครื่องพัลเวอร์ไรเซอร์ (pulverizer) เครื่องบดค้อน (hammer mill) เครื่องบดแบบ 2 ลูกกลิ้ง (two-roll mill) ทั้งนี้การบดสามารถทำได้ทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำ โดยทั่วไปการบดที่อุณหภูมิต่ำจะเหมาะกับการผลิตยางผงที่มีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่ ยางผงที่ได้จะมีรูปร่างที่ไม่เป็นระเบียบและมีพื้นผิวขรุขระ หากต้องการยางผงที่มีขนาดอนุภาคเล็กลง จำเป็นต้องนำขยะยางไปผ่านเครื่องบดซ้ำหลายๆ รอบ ซึ่งจะส่งผลทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น ส่วนการบดที่อุณหภูมิต่ำนั้นเป็นวิธีการบดที่มีต้นทุนสูงเพราะต้องใช้ไนโตรเจนเหลวปริมาณมาก วิธีนี้จึงเหมาะสำหรับใช้การผลิตยางผงที่มีอนุภาคขนาดเล็กเท่านั้น ยางผงที่ได้จากการบดด้วยวิธีนี้ส่วนใหญ่จะมีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบ ปัจจุบันได้มีการนำยางผงที่ได้จากการรีไซเคิลไปประยุกต์ใช้งานในหลากหลายรูปแบบ เช่น การนำไปใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมยาง นำไปใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงในพลาสติก นำไปใช้เป็นวัตถุเติมในการผลิตยางรีเคลมและยางเทอร์โมพลาสติก รวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมโยธา ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลการนำยางผงไปประยุกต์ใช้งานต่างๆ ของประเทศสหรัฐอเมริกา

ตารางที่ 1 การประยุกต์ใช้งานของยางพองในประเทศสหรัฐอเมริกา<sup>1</sup>

การใช้งาน	ปริมาณ (%)
วิศวกรรมโยธา (ผสมกับยางมะตอย)	44
อุตสาหกรรมการผลิตยางล้อ	20
ผลิตยางรีเคลม	18
ทำลู่วิ่งลานกรีฑา	8
อุตสาหกรรมยางและพลาสติกอื่นๆ	10

## การประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมยาง

ยางผงได้รับการนำไปใช้เป็นสารตัวเติมทั้งในอุตสาหกรรมยางล้อและในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น แผ่นยางและบล็อกยางปูพื้น พรมปูพื้น ยางบังโคลน แผ่นยางรองใต้พรม แผ่นยางชั้นล่างของลู่วิ่งลานกรีฑาหรือสนามเทนนิส ท่อยาง แผ่นปูพื้นสำหรับคอกปศุสัตว์ กระถางต้นไม้ ยางกันกระแทกท่าเรือ พื้นรองเท้า แผ่นฉนวนกันเสียง การประยุกต์ใช้ยางผงดังกล่าวมีจุดประสงค์หลัก 3 ประการ คือ

- ลดต้นทุนการผลิต
- ดัดแปรหรือปรับปรุงสมบัติเฉพาะบางประการของผลิตภัณฑ์
- ลดมลพิษโดยการนำเอาขยะยางกลับมาใช้ใหม่

เนื่องจากยางผงมีขนาดของอนุภาคที่ค่อนข้างใหญ่ แม้ว่าจะบดให้ละเอียดมากเพียงใด ยางผงก็ยังคงมีขนาดอยู่ในระดับไมโครเมตรซึ่งถือว่ามีความใหญ่เมื่อเทียบกับเขม่าดำและซิลิกาซึ่งมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร ด้วยเหตุนี้ยางผงจึงจัดเป็นสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง การเติมยางผงลงไปในการผลิตยางล้อส่งผลให้ยางมีสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ด้อยลง ซึ่งการด้อยลงของสมบัติเชิงกลจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ชนิดของยางผง ปริมาณยางผง และขนาดของอนุภาคยางผงที่เติมลงไป โดยทั่วไปแล้วการนำยางผงไปใช้เป็นสารตัวเติมจำเป็นต้องพิจารณาประเด็นต่างๆ ดังนี้

1. ยางผงที่จะนำไปใช้เป็นสารตัวเติมจะต้องมีความเข้ากันได้กับยางที่นำไปใช้สูง เช่น ถ้ายางมีความเป็นขี้ผึ้ง ยางผงที่เลือกใช้ก็ควรเป็นยางชนิดที่มีความเป็นขี้ผึ้ง หรือถ้ายางที่มีความเป็นขี้ผึ้งต่ำ ยางผงที่เลือกใช้ก็ควรเป็นชนิดที่มีความเป็นขี้ผึ้งต่ำตามไปด้วยเช่นกัน ถ้าจะให้ดีได้สมบัติที่ดีที่สุด ทั้งยางผงและยางที่นำยางผงไปผสมควรจะเป็นยางชนิดเดียวกัน ถ้าหากยางผงมีระดับความเป็นขี้ผึ้งหรือมีระดับความเข้ากันได้แตกต่างจากยางที่นำไปผสมมาก แรงดึงดูหรืออันตรกิริยาระหว่างยางผงและยางหลักก็จะมีค่าต่ำ ส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลด้อยลงอย่างรวดเร็ว



<sup>1</sup> ข้อมูลปี พ.ศ. 2538

2. ยางผงที่นำไปใช้ควรเป็นยางผงที่มีขนาดอนุภาคเล็ก เพราะเป็นที่ทราบกันดีว่าประสิทธิภาพในการเสริมแรงจะสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจำเพาะ (หรือตามการลดลงของขนาดอนุภาค) การนำยางผงที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ไปใช้เป็นสารตัวเติมนอกจากอาจจะส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ต่ำลงแล้ว ยังอาจส่งผลต่อความเรียบของผิวผลิตภัณฑ์ ทำให้ผิวหยาบขึ้นได้ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูด (extruder) หรือเครื่องคาลเอนเดอร์ (calender)

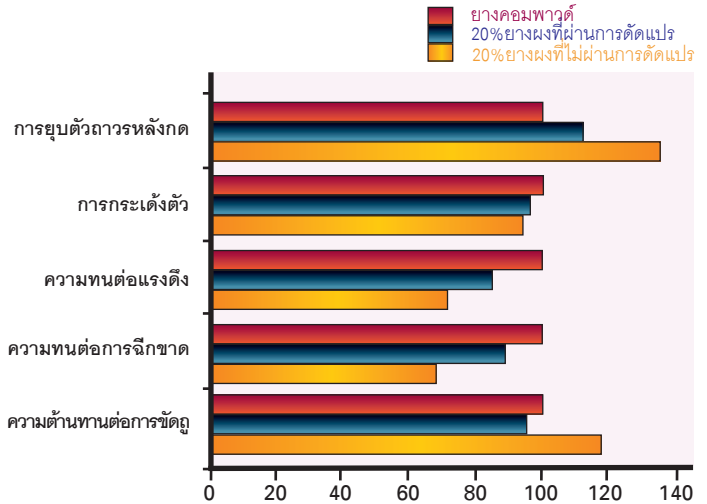
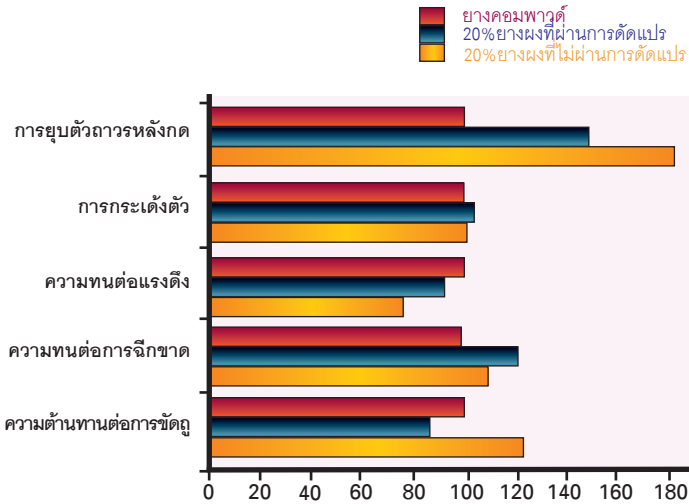
3. ปริมาณของยางผงที่เติมลงไปจะมีผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปแล้วสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางส่วนใหญ่ เช่น ความทนต่อแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการขาด มักจะมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของยางผงที่เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้หากต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติเชิงกลดีอาจจำเป็นต้องจำกัดปริมาณการใช้ยางผงไม่ให้สูงมากเกินไป

เนื่องจากยางผงมีความแข็งสูงกว่ายางดิบค่อนข้างมากเพราะเป็นยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้ว การเติมยางผงลงไปในส่วนยางคอมพาวด์จะทำให้ยางคอมพาวด์มีความเหนียวสูงขึ้น มีฟองอากาศน้อยลง มีการบวมตัวหลังเอ็กซ์ทรูดผ่านดาวยหรือหลังการรีดด้วยเครื่องคาลเอนเดอร์ลดลง ทำให้สามารถเอ็กซ์ทรูดยางคอมพาวด์ออกจากเครื่องเอ็กซ์ทรูดได้เร็วขึ้น และที่สำคัญก็คือ ยางผงจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ยางคอมพาวด์ ทำให้ยางคอมพาวด์ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูดหรือเครื่องคาลเอนเดอร์เกิดการบิดเบี้ยวหรือเสียรูปร่างน้อยลง ตารางที่ 2 แสดงผลของยางผงที่ได้จากการบดที่อุณหภูมิต่ำต่อสมบัติต่างๆ ของยางธรรมชาติ [1] จากตารางจะเห็นได้ว่าการเติมยางผงลงไปส่งผลทำให้ทั้งระยะเวลาสกริชและระยะเวลาการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวด์มีแนวโน้มต่ำลง ซึ่งการลดลงดังกล่าวคาดว่าเป็นผลจากการแพร่ของสารวัลคาไนซ์จากยางผงเข้าสู่เนื้อยางธรรมชาติ ส่วนสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ เช่น ความทนต่อแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด รวมถึงความทนต่อการฉีกขาดก็มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มปริมาณของยางผง

ตารางที่ 2 ผลของปริมาณยางผงที่ได้จากการบดที่อุณหภูมิต่ำต่อสมบัติของยางธรรมชาติ

สมบัติ	ปริมาณยางผง (%)					
	10	20	30	40	50	60
ค่าแรงบิดต่ำสุด (Nm)	1.38	1.56	1.69	1.61	1.58	1.58
ระยะเวลาสกริชที่ 150°C (min)	4.5	4.0	3.7	3.5	3.5	3.5
ระยะเวลาการวัลคาไนซ์ที่ 150°C (min)	8.8	8.5	8.2	8.2	8.2	8.2
ค่าแรงบิดสูงสุด (Nm)	6.8	6.7	6.6	6.5	6.2	5.9
ความทนต่อแรงดึง (MPa)	19.4	16.9	15.2	13.7	13.0	10.8
300% โมดูลัส (MPa)	2.10	2.39	2.79	3.02	3.18	3.15
การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	640	610	590	570	550	500
ความทนต่อการฉีกขาด (N/mm)	41.6	39.3	38.9	35.6	33.3	32.5

แม้ว่าการเติมยางผงลงไปมักจะส่งผลในเชิงลบต่อสมบัติส่วนใหญ่ของยาง แต่การดัดแปรทางเคมีของยางผงก็มีส่วนช่วยทำให้สมบัติต่างๆ ของยางดีขึ้นดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 ซึ่งเป็นผลการทดลองที่ได้จากการเติมยางผงทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปรทางพื้นผิวลงไปในส่วนยางคอมพาวด์โดยสารที่ผลิตจากยางเอสบีอาร์ (SBR) และดอกยางล้อรถบรรทุกที่ผลิตจากยางธรรมชาติ (NR) ตามลำดับ [2] ยางผงที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นยางผงที่ได้จากการบดยางล้อรถบรรทุกซึ่งมีขนาดประมาณ 45 เมช (มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 1-2 ตารางเมตรต่อกรัม) ส่วนยางผงที่ผ่านการดัดแปรนั้นมีชื่อทางการค้าว่า Surcrum ซึ่งผลิตจำหน่ายโดยบริษัท Vredestein การดัดแปรทางพื้นผิวทำโดยการนำยางผงไปผสมกับโพลีเมอร์และสารวัลคาไนซ์ ทำให้ที่พื้นผิวของยางผงสามารถเกิดการวัลคาไนซ์เชื่อมโยงกับยางที่อยู่โดยรอบได้ จากรูปจะเห็นว่า การเติมยางผงทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปรลงไปร้อยละ 20 ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ต่ำลง แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางผงที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปรพบว่า การดัดแปรทางเคมีจะช่วยทำให้สมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ของยางดีขึ้น



รูปที่ 1 ผลของยางพองต่อสมบัติของดอกยางล่อรกโดยสายที่ผลิตจากยางเอสบีอาร์

รูปที่ 2 ผลของยางพองต่อสมบัติของดอกยางล่อรกบรสุทท์ที่ผลิตจากยางธรรมชาติ

การประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมพลาสติก

การนำยางพองไปประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมพลาสติกถือเป็นเรื่องที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งเพราะเราสามารถเติมยางพองลงไปในพลาสติกได้ในปริมาณที่สูงมาก (เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเติมลงไปนยาง) การผสมยางพองลงไปพลาสติกสามารถทำได้ง่ายโดยใช้เครื่องมือที่มีอยู่ในโรงงาน และเนื่องจากอุตสาหกรรมพลาสติกเป็นอุตสาหกรรมที่ใหญ่มาก ในแต่ละปีมีการใช้พลาสติกจำนวนมหาศาล ดังนั้นหากสามารถเติมยางพองลงไปพลาสติกได้แม้เพียงแค่ร้อยละ 10 ของปริมาณพลาสติกที่ใช้ ปริมาณความต้องการของยางพองก็จะสูงขึ้นอย่างมาก

การนำยางพองไปประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมพลาสติกสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเด็นหลักๆ ตามจุดประสงค์ของการนำไปใช้งาน คือ

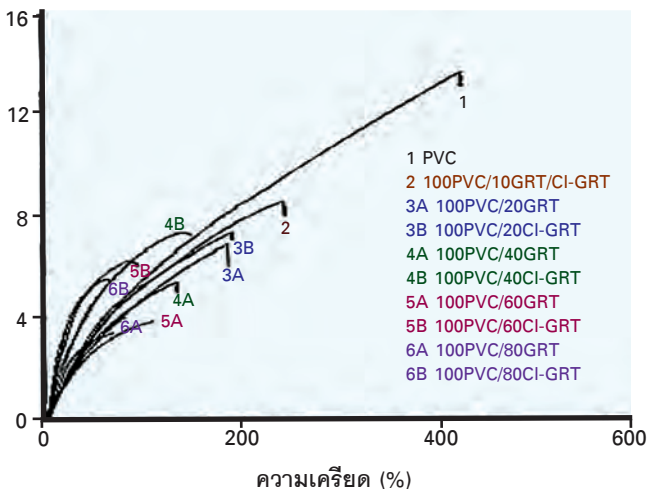
1. การเติมลงไปเพื่อลดต้นทุนหรือปรับปรุงสมบัติเฉพาะบางประการ

เป็นที่ทราบกันดีว่าการเติมยางพองลงไปพลาสติกนอกจากจะช่วยทำให้ต้นทุนต่ำลงแล้ว ยังส่งผลทำให้พลาสติกมีความทนต่อแรงกระแทกได้ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามการนำยางพองที่ได้จากการรีไซเคิลไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกก็มีข้อที่ควรตระหนักด้วยเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากการเติมยางพองลงไปจะส่งผลทำให้พลาสติกมีความสามารถในการไหล (ที่อุณหภูมิหลอมเหลว) ลดลง เพราะยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้วจะยังคงสภาพเป็นของแข็ง ณ อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก ดังนั้นการเติมยางพองลงไปจึงส่งผลในเชิงลบต่อสมบัติในกระบวนการผลิตของพลาสติก

เช่นเดียวกับในกรณีของการเติมยางพองลงไปนยาง การเติมยางพองลงไปพลาสติกแม้ว่าจะช่วยปรับปรุงสมบัติความทนต่อแรงกระแทก แต่ยางพองก็จะส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ของพลาสติก (เช่น ความทนต่อแรงดึง) มีแนวโน้มด้อยลงด้วยเช่นกัน ซึ่งระดับของการด้อยลงของสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลักๆ 3 ตัวแปร ได้แก่ ความเข้ากันได้ระหว่างยางพองกับพลาสติก ปริมาณยางพอง และขนาดอนุภาคของยางพอง หากต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีจึงควรเลือกใช้ยางพองที่มีขนาดอนุภาคเล็กและเติมลงไปนปริมาณเพียงเล็กน้อย ที่สำคัญคือยางพองที่เติมลงไปควรเข้ากันได้ดีกับพลาสติก จากการรายงานพบว่ายางพองที่ได้จากการบดยางล้อเก่า (ซึ่งส่วนใหญ่มียางธรรมชาติ ยางบิวทาไดอินหรือยางสไตรีนบิวทาไดอินเป็นองค์ประกอบหลัก) สามารถเข้ากันได้ดีกับพลาสติกที่มีความเป็นขั้วต่ำและมีปริมาณผลึกน้อย [3] หากยางพองมีความเข้ากันได้กับพลาสติกต่ำหรือมีขนาดอนุภาคใหญ่ ยางพองก็จะทำหน้าที่เสมือนเป็นตำหนิที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีอายุการใช้งานที่สั้นลง

การปรับปรุงสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ได้จากการผสมยางผงและพลาสติกโดยใช้สารช่วยให้เข้ากัน (compatibilizer) หรือโดยการตัดแปรพื้นผิวของยางผงได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง ผลของการศึกษาดังกล่าวแสดงในรูปที่ 3 [4] ซึ่งเป็นผลการทดสอบสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ได้จากการเติมยางผง (ที่ผลิตจากยางล้อเก่า) ปริมาณต่างๆ ลงไปในโพลีไวนิลคลอไรด์หรือพีวีซี โดยยางผงที่ใช้มี 2 ชนิดคือ ยางผงที่ไม่ผ่านการตัดแปรและยางผงที่ผ่านการตัดแปรพื้นผิวทางเคมีโดยใช้กรดไตรคลอโรไอโซไซยาโนริก (trichlorocyanuric acid) เพื่อเพิ่มระดับความเข้ากันได้ระหว่างยางผงกับพีวีซี จากรูปจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการเติมยางผงลงไปส่งผลทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงของพีวีซีลดลง ซึ่งการลดลงของความทนต่อแรงดึงนี้จะเห็นได้ชัดเจนมากขึ้นตามปริมาณของยางผงที่เติมลงไป เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างยางผงที่ผ่านและไม่ผ่านการตัดแปรทางเคมีพบว่า การตัดแปรทางเคมีของยางผงส่งผลทำให้พีวีซีมีค่าความทนต่อแรงดึงและโมดูลัสที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ความเค้น (MPa)

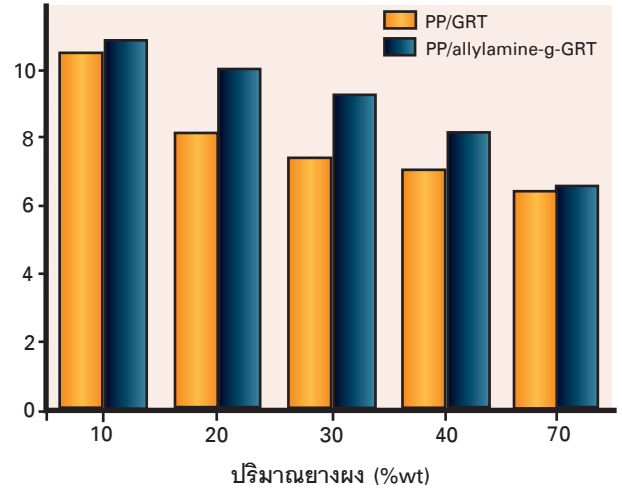


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโพลีไวนิลคลอไรด์สูตรต่างๆ

นอกจากนี้ยังได้มีการรายงานว่าการตัดแปรทางเคมีด้วยการเติมหมู่ฟังก์ชันอัลลิลเอมีน (allylamine) ลงไปบนพื้นผิวของยาง (ที่ได้จากการบดยางล้อเก่า) โดยใช้วิธีการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ร่วมกับการใช้สารไวแสง (photosensitizer) [5] จะทำให้ยางผงมีค่าพลังงานพื้นผิวเพิ่มขึ้น การนำยางผงที่ผ่านการตัดแปรไปผสมกับโพลีโพรพิลีน (PP) จะทำให้สมบัติเชิงกลต่างๆ ของโพลีโพรพิลีนดีขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5 อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้ได้เติมสารช่วยให้เข้ากันเข้าไปด้วยในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของยางผง เพื่อช่วยให้ยางผงกระจายตัวในเนื้อโพลีโพรพิลีนได้ดียิ่งขึ้น โดยสารช่วยให้เข้ากันที่นำมาใช้ในกรณีนี้คือ โพลีโพรพิลีน-กราฟท์-มาลิกอิก

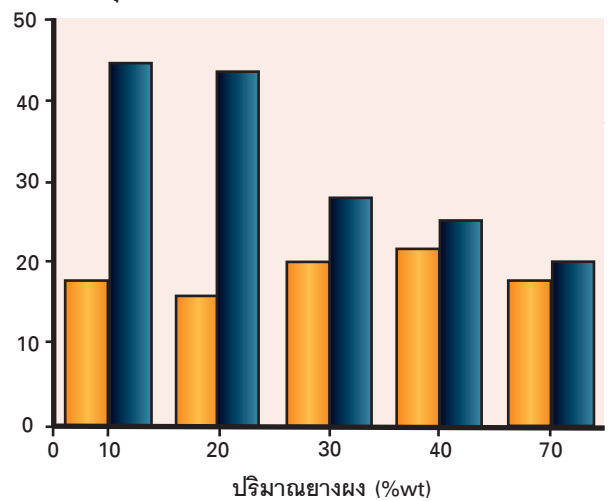
แอนไฮไดรด์ (MA-g-PP) ผลที่ได้พบว่าการเพิ่มปริมาณยางผงทำให้ความทนต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลงในขณะที่การยืดตัว ณ จุดขาดไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ส่วนการตัดแปรทางเคมีของยางผงจะทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดมีแนวโน้มสูงขึ้น

ความทนต่อแรงดึง (MPa)



รูปที่ 4 ผลของปริมาณยางผงต่อความทนต่อแรงดึงของโพลีโพรพิลีน

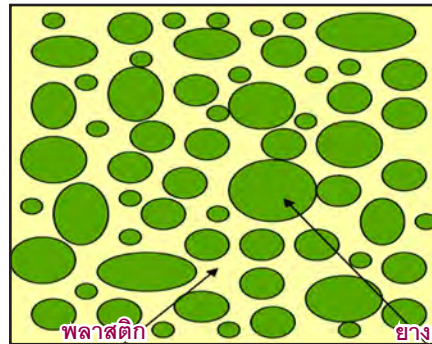
การยืดตัว ณ จุดขาด (%)



รูปที่ 5 ผลของปริมาณยางผงต่อการยืดตัว ณ จุดขาดของโพลีโพรพิลีน

## 2. การนำยางผงไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตยางเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic elastomer; TPE)

ยางเทอร์โมพลาสติก คือ ยางที่สามารถหลอมขึ้นรูปได้เหมือนเทอร์โมพลาสติกทั่วไป กล่าวคือ เมื่อให้ความร้อน ยางเทอร์โมพลาสติกจะนิ่มลงและไหลขึ้นรูปได้และเมื่อเย็นจะแข็งตัวเป็นรูปร่างตามต้องการ ยางเทอร์โมพลาสติกส่วนใหญ่เป็นโคโพลิเมอร์ แต่ก็สามารถเตรียมได้โดยการนำยางไปผสมกับพลาสติกในสัดส่วนที่มียางสูงกว่าพลาสติก (ส่วนใหญ่จะใช้สัดส่วนยาง/พลาสติกในช่วง 60/40 ถึง 80/20) ยางเทอร์โมพลาสติกมีโครงสร้างที่ยางเป็นวัฏภาคกระจายตัวอยู่ในเนื้อพลาสติกดังแสดงในรูปที่ 6 เนื่องจากวัฏภาคนี้นี้มียางเป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นวัสดุนี้จึงนิ่ม มีความยืดหยุ่น สามารถนำไปใช้งานได้เหมือนเช่นยางทั่วๆ ไป แต่จะมีสมบัติในการผลิตเหมือนกับพลาสติกดังกล่าวมาแล้ว นอกจากนี้ยังสามารถนำยางเทอร์โมพลาสติกกลับมาหลอมขึ้นรูปใหม่ได้ จากข้อดีดังกล่าวทำให้ยางเทอร์โมพลาสติกเป็นวัสดุที่กำลังได้รับความสนใจและมีปริมาณการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในปัจจุบัน



รูปที่ 6 สันฐานวิทยาของยางเทอร์โมพลาสติก

ตัวแปรหลักที่ควบคุมสมบัติของยางเทอร์โมพลาสติก คือ สันฐานวิทยาของยางผสม โดยหลักการแล้วยางเทอร์โมพลาสติกจะมีสมบัติที่ดีก็ต่อเมื่อวัฏภาคของยางมีขนาดเล็กและกระจายตัวอยู่ในเนื้อพลาสติกได้อย่างสม่ำเสมอ การทำให้วัฏภาคของยางที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อพลาสติกเกิดการวัลคาไนซ์โดยใช้วิธีการวัลคาไนซ์เชิงพลวัต (dynamic vulcanization) จะทำให้ยางเทอร์โมพลาสติกมีสมบัติต่างๆ ดีขึ้นอย่างชัดเจน โดยทั่วไปยางเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้จากการนำยางไปผสมกับพลาสติกจะมีขนาดของวัฏภาคยางไม่เกิน 5 ไมโครเมตร ซึ่งถือว่าเล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของยางผง ด้วยเหตุนี้การนำยางผงไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตยางเทอร์โมพลาสติกจึงมักจะส่งผลทำให้ยางเทอร์โมพลาสติกที่ได้มีสมบัติเชิงกลต่างๆ ที่ค่อนข้างต่ำมาก ดังนั้นการผลิตยางเทอร์โมพลาสติกด้วยการนำยางผงแต่เพียงอย่างเดียวไปผสมกับพลาสติกจึงไม่เป็นที่นิยมทำ (ยกเว้นเฉพาะในกรณีที่จะนำยางเทอร์โมพลาสติกนั้นไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการสมบัติเชิงกลที่ดีและต้องการราคาที่ถูกมากเท่านั้น) อย่างไรก็ตามการนำยางผงเพื่อไปใช้ทดแทนวัฏภาคของยางบางส่วนในการผลิตยางเทอร์โมพลาสติกก็ยังเป็นทางเลือกที่น่าสนใจซึ่งอาจสามารถทำได้เช่นกัน ดังที่คณะวิจัยของ Naskar [4] ได้รายงานไว้สำหรับในกรณีของยางเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากการผสมระหว่างยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนโมโนเมอร์ (EPDM) และโพลิเอทิลีน-โค-อะโครลิกแอซิดนั้น สามารถใช้ยางผงประมาณร้อยละ 50 แทนที่ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนโมโนเมอร์ได้โดยที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของยางเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้



## การประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมโยธา

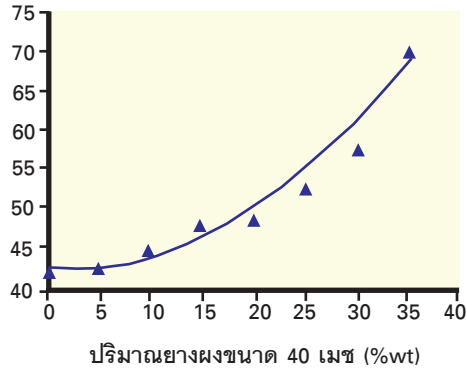
การนำยางผงไปประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมโยธา ถือเป็นแนวทางที่น่าสนใจเนื่องจากงานทางด้านวิศวกรรมโยธาส่วนใหญ่ มักเป็นงานที่มีขนาดใหญ่ ต้องการวัสดุในปริมาณมาก ซึ่งทำให้เกิดความต้องการใช้ยางผงในปริมาณที่มากขึ้นตามไปด้วย แม้ว่ายางผง อาจจะมีราคาที่ไม่สูงเนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีไซเคิล แต่ยางผงก็ไม่ใช้วัสดุราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ ที่ใช้งานใน วิศวกรรมโยธา เช่น หิน ดิน หรือยางมะตอย อย่างไรก็ตามได้มีการนำ ยางผงไปใช้งานอย่างหลากหลายในงานวิศวกรรมโยธาเพราะยาง ผงมีสมบัติเฉพาะที่ทำให้คุณภาพของงานโยธาดีขึ้น ดังนั้นแม้ว่า การเติมยางผงลงไปอาจส่งผลทำให้ต้นทุนในช่วงเริ่มต้นสูงขึ้น (ประมาณร้อยละ 20-25) แต่การเติมยางผงจะส่งผลดีและมีความ คุ่มค่าในระยะยาวเพราะยางผงจะช่วยทำให้ค่าบำรุงรักษาต่ำลง ตัวอย่างที่สำคัญของการประยุกต์ใช้ยางผงในงานวิศวกรรมโยธาก็คือ การนำยางผงไปใช้ผสมกับยางมะตอยเพื่อปูพื้นถนนหรือปูพื้นบ่อน้ำ

เทคโนโลยีการนำยางผงไปผสมกับยางมะตอยได้เริ่มขึ้นใน รัฐอริโซนาของสหรัฐอเมริกาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 สืบเนื่องจากรัฐอริโซนา มีอุณหภูมิที่สูงมากในช่วงหน้าร้อนเพราะอยู่ในแถบทะเลทราย ทำให้ ผิวถนนที่ลาดด้วยยางมะตอยชำรุดได้ง่ายเพราะอุณหภูมิที่สูงทำให้ ยางมะตอยเกิดการเสียวรูปร่างจึงส่งผลให้พื้นผิวถนนเกิดการแตกร้าว และเกิดหลุมหรือร่องล่ออยู่ตลอดเวลา ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการ ซ่อมแซมอย่างมาก ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีโดยเติม ยางผงเข้าไปผสมกับยางมะตอยเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ทั้งนี้ เนื่องจากยางผงมีความยืดหยุ่นสูงกว่ายางมะตอย การเติมยางผงลงไป จึงทำให้พื้นผิวถนนมีความยืดหยุ่นดีขึ้น เมื่อมีการใช้งานที่อุณหภูมิ สูงสามารถลดปัญหาการเกิดร่องหรือหลุมบนพื้นผิวถนน ทำให้ค่าใช้จ่าย ในการบำรุงรักษาลดลง นอกจากนี้ข้อดีดังกล่าวแล้ว ยางผงยังมี ส่วนช่วยในการดูดซับเสียงที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของโครงสร้าง ถนนซึ่งมักพบในถนนที่มีสภาพการจราจรที่คับคั่งดังเช่นถนนที่อยู่ ตามเมืองใหญ่ๆ อีกด้วย การผสมยางผงลงไปยางมะตอยสามารถ ทำได้โดยง่าย ไม่จำเป็นต้องมีการดัดแปลงเครื่องมือใดๆ และที่สำคัญ ยางผงสามารถเติมลงไปยางมะตอยได้ทั้งการผสมแบบร้อน (hot mix) และการผสมแบบเย็น (cold mix) ปริมาณยางผงที่แนะนำให้ใช้ผสม กับยางมะตอยจะอยู่ในช่วงร้อยละ 5-25 โดยน้ำหนักของยางมะตอย การเติมยางผงลงไปปริมาณที่มากเกินไปอาจส่งผลเสียต่อสมบัติบาง ประการของยางมะตอยได้เช่นกัน เมื่อเติมยางผงลงไปยางมะตอย ยางผงจะดูดซึมน้ำมันหรือองค์ประกอบที่มีค่าความเป็นขี้วักไค้เคียง กับยางมะตอย ทำให้ยางผงเกิดการบวมพอง ทั้งยางผงและยางมะตอย จะมีอันตรกิริยาต่อกันแบบกายภาพ (physical interaction) เท่านั้น ในภาพรวมแล้วการเติมยางผงลงไปยางมะตอยส่งผลทำให้สมบัติต่างๆ ของยางมะตอยเปลี่ยนไปดังนี้ [6]

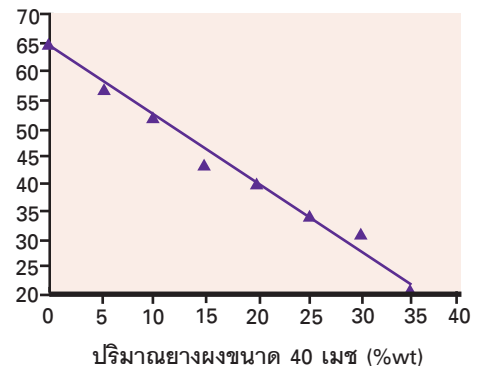
1. จุดอ่อนตัวรวมถึงความเหนียวของยางมะตอยเพิ่มสูงขึ้น ตามปริมาณของยางผง ทำให้ยางมะตอยเสียรูปที่อุณหภูมิสูงได้มากขึ้น (รูปที่ 7)
2. ระดับการทะลุทะลวง (penetration) ของยางมะตอยลดลง ตามการเพิ่มปริมาณยางผง นั่นคือยางมะตอยจะมีความแข็งสูงขึ้น ตามการเพิ่มปริมาณยางผง (รูปที่ 8)
3. จุดวาบไฟ (flash point) (รูปที่ 9) และจุดติดไฟ (fire point) ของยางมะตอยมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มสัดส่วนของยางผง อย่างไรก็ตามหากเติมยางผงลงไปปริมาณที่ไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของยางมะตอย พบว่าทั้งจุดวาบไฟและจุดติดไฟของยางผง ผสมยางมะตอยก็ยังคงมีค่าสูงกว่าค่าวิกฤตค่อนข้างมาก จึงถือได้ ว่าการเติมยางผงลงไปยังคงทำให้ยางมะตอยมีความปลอดภัยต่อ การนำไปใช้งาน
4. การย่นตัว (ductility) ของยางมะตอยมีแนวโน้มลดลง อย่างรวดเร็วตามการเพิ่มปริมาณยางผงในช่วงจากร้อยละ 0-10 หลังจากนั้นก็จะเริ่มมีค่าคงที่ (รูปที่ 10)
5. การเติมยางผงลงไปยางมะตอยเกรดพื้นฐาน เช่น AC 80/100 ส่งผลกระทบต่อช่องว่างที่มีอยู่ในโครงสร้างเพียงเล็กน้อย ซึ่งโดยปกติแล้วยางมะตอยส่วนใหญ่จะมีปริมาณช่องว่างอยู่ ประมาณร้อยละ 3-5 ทั้งนี้ช่องว่างเหล่านี้จะช่วยรองรับการขยายตัว ทางปริมาตรของยางเมื่ออุณหภูมิของผิวถนนเพิ่มสูงขึ้น หากช่องว่าง มีปริมาณต่ำกว่าร้อยละ 3 โอกาสที่ยางมะตอยจะเกิดการโป่งนูนหรือ ไหลล้นขอบถนน (bleeding) ก็จะมีสูง แต่ถ้าหากมีช่องว่างในปริมาณที่ สูงกว่าร้อยละ 5 ก็จะมีผลเสียทำให้เกิดการแตกร้าวได้ง่ายด้วยเช่นกัน
6. การเติมยางผงส่งผลให้ยางมะตอยมีความทนต่อ การล้าตัวสูงขึ้น โดยมีการรายงานว่าปริมาณยางผงลงไปยางมะตอย ประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะทำให้ยางมะตอยมีความทนต่อ การล้าตัวสูงขึ้นถึง 2-3 เท่า



จุดอ่อนตัว (°C)



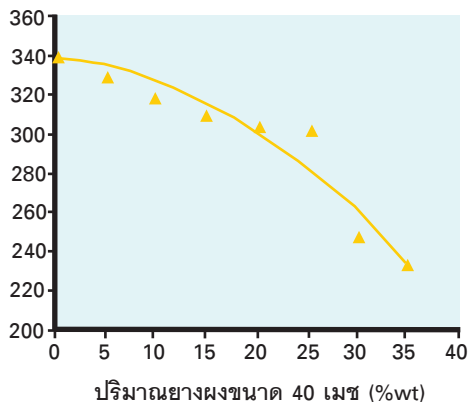
ระดับการทะลุทะลวง (ที่ 0.1 mm)



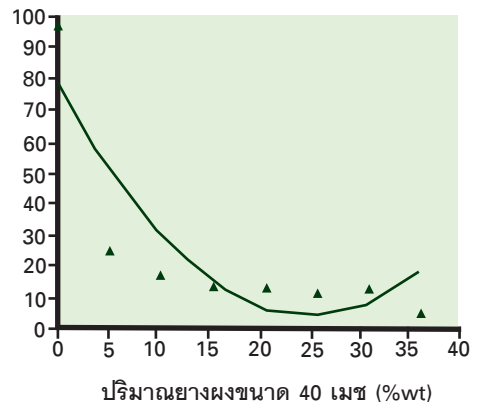
รูปที่ 7 จุดอ่อนตัวของยางมะตอย (AC 60/70) ที่ผสมกับยางผงขนาด 40 เมชในปริมาณต่างๆ

รูปที่ 8 การทะลุทะลวงของยางมะตอย (AC 60/70) ที่ผสมกับยางผงขนาด 40 เมชในปริมาณต่างๆ

จุดวาบไฟ (°C)



การยানตัว (cm)



รูปที่ 9 จุดวาบไฟของยางมะตอย (AC 60/70) ที่ผสมกับยางผงขนาด 40 เมชในปริมาณต่างๆ

รูปที่ 10 การยานตัวของยางมะตอย (AC 60/70) ที่ผสมกับยางผงขนาด 40 เมชในปริมาณต่างๆ

## เอกสารอ้างอิง

1. Phadke, A.A. and De, S.K., “Effect of cryoground rubber on properties of NR”, *J. Appl. Polym. Sci.*, **32**, 4063, (1986)
2. Manuel, H.J. and Dierker, W., “Recycling of Rubber”, Rapra Technology Limited, 1997.
3. Deanin, R.D. and Hashemiolya, S.M., “Polyblend of reclaimed rubber with eleven thermoplastics”, *Polym. Mater. Sci. Eng.*, **8**, 212, (1987)
4. Naskar, A.K., Bhowmick, A.K. and De, S.K., “Melt-processable rubber: Chlorinated waste tire rubber-filled polyvinyl chloride”, *J. Appl. Polym. Sci.*, **84**, 622, (2002)
5. Shanmugharaj, A.M., Kim, J.K. and Ryu, S.H., “UV surface modification of waste tire powder: Characterization and its influence on properties of polypropylene/waste powder composites”, *Polym. Test.*, **24**, 739, (2005)
6. Report on “Development of rubberized asphalt from used rubber tire scrap for infrastructure construction”, Submitted to National Metal and Materials Technology Center by School of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, 2002.

ดร.พงษ์ธร รัชอยู่

การศึกษา: ปริญญาเอก (วิศวกรรมยาง) Loughborough University ประเทศอังกฤษ

สถานที่ทำงานปัจจุบัน: นักวิจัย ฝ่ายวิจัยและพัฒนา

ห้องปฏิบัติการวิจัยยาง ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

นอกจากการปูพื้นผิวถนนแล้ว ยังได้มีการนำยางผสมกับยางมะตอยไปใช้ในการปูบ่อน้ำเพื่อป้องกันน้ำรั่วซึมอีกด้วย แม้ว่าปัจจุบันจะมีการนำวัสดุหลากหลายชนิดไปใช้เพื่อปูพื้นบ่อน้ำ ไม่ว่าจะเป็นดินเหนียว คอนกรีต แผ่นพลาสติก รวมถึงแผ่นยาง แต่วัสดุเหล่านี้ล้วนมีข้อเสียทั้งสิ้น เช่น ดินเหนียวมีความคงทนต่ำ แผ่นพลาสติกมีราคาแพงและฉีกขาดได้ง่ายหากมีสัตว์เลี้ยงลงไปเหยียบในแหล่งน้ำ เพราะวัสดุดังกล่าวมีความยืดหยุ่นต่ำ ส่วนการใช้แผ่นยางแม้ว่าจะมีความยืดหยุ่นสูงกว่า แต่แผ่นยางก็มีราคาแพงกว่าแผ่นพลาสติกโดยเฉพาะในกรณีที่ต้องใช้ยางสังเคราะห์เป็นวัสดุดิบในการผลิต ส่วนการใช้ยางธรรมชาติเป็นวัสดุดิบในการผลิตแม้ว่าจะทำให้ต้นทุนต่ำลงเล็กน้อยแต่ก็ทำให้แผ่นยางมีความทนต่อโอโซนและสภาพอากาศที่ต่ำลงตามไปด้วย ทั้งนี้หากต้องการลดต้นทุนที่ใช้ในการผลิตก็สามารถเติมยางผงหรือยางรีไซเคิลลงไปผสมกับยางใหม่ได้ ส่วนการปูพื้นด้วยคอนกรีตแม้ว่าจะเป็นวิธีการปูพื้นที่ดีที่สุดในกรณีที่มีต้นทุนสูงที่สุดตามไปด้วยเช่นกัน ด้วยเหตุนี้การปูพื้นบ่อน้ำด้วยยางมะตอยจึงดูเหมือนจะเป็นทางเลือกที่น่าสนใจเพราะเป็นวิธีที่มีต้นทุนต่ำและมีความทนทานสูง อย่างไรก็ตามการปูพื้นบ่อน้ำด้วยยางมะตอยเพียงอย่างเดียวก็อาจก่อให้เกิดปัญหาน้ำรั่วจากรอยแตกขนาดเล็ก (micro-cracking) ที่เกิดจากการเสื่อมสภาพของยางมะตอยที่บริเวณผิวหน้าได้ เนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีว่าการเติมโพลีเมอร์บางชนิด (เช่น เอทิลีนไวนิลอะซิเตต (EVA) ยางผง หรือยางรีไซเคิล) ลงไปผสมกับยางมะตอยจะช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้ ดังนั้นโครงการก่อสร้างเขื่อนเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าบางโครงการของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจึงได้เริ่มทดลองนำวัสดุที่ได้จากยางมะตอยผสมกับโพลีเมอร์ปูพื้นอ่างเก็บน้ำเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ดังเช่นที่ เขื่อนลำตะคอง จังหวัดนครราชสีมา

เมื่อพิจารณาในเรื่องความปลอดภัย หลายๆ คนอาจจะสงสัยว่าการปูพื้นบ่อน้ำด้วยยางมะตอยจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำหรือไม่ จากการศึกษาในรายงานต่างๆ พบว่าการปูพื้นบ่อน้ำด้วยยางมะตอยที่ได้จากการผสมแบบร้อน (hot mixed asphalt) มีผลต่อคุณภาพน้ำน้อยมาก จากการทดสอบหาสารปนเปื้อนในน้ำที่กำหนดโดยสำนักงานป้องกันสิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกาจำนวน 40 ชนิด พบว่าสารปนเปื้อนทั้งหมดมีปริมาณที่ต่ำกว่าระดับที่จะก่อให้เกิดอันตราย นอกจากนี้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่สังเคราะห์จากปิโตรเลียมที่ปลดปล่อยออกมาจากยางมะตอยก็มีปริมาณที่น้อยมาก ส่วนใหญ่จะตรวจพบแนวพาสินซึ่งไม่ใช่สารที่ก่อให้เกิดมะเร็ง ด้วยเหตุนี้ในภาพรวมจึงสามารถกล่าวได้ว่าการปูพื้นบ่อน้ำด้วยยางมะตอยด้วยเทคนิคแบบผสมร้อนไม่ก่อให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำ อย่างไรก็ตามการนำยางมะตอยที่อยู่ในรูปของอิมัลชันไปใช้อาจก่อให้เกิดการปนเปื้อนต่อแหล่งน้ำได้เช่นกัน ดังนั้นวิศวกรจึงควรเลือกใช้ชนิดของยางมะตอยให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานด้วย