

การใช้เชื้อเพลิงจากกระบวนการไพโรไลซิส

ดร.นพ. ธีรณัฐ

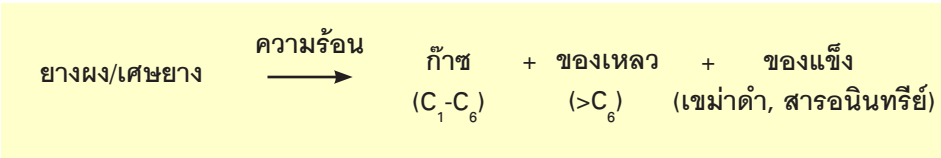
ปัญหามภาวะโลกร้อนกำลังเป็นประเด็นที่สนใจของคนทั่วโลก แนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดปัญหานี้ก็คือ การนำผลิตภัณฑ์ที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ทั้งในรูปของผลิตภัณฑ์เอง (re-use) หรือการนำไปแปรรูปเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ (recycle) เพื่อลดปริมาณขยะที่เกิดขึ้น สำหรับขยะที่เกิดขึ้นจากยางก็เช่นกัน มีความพยายามที่จะนำขยะยางไปรีไซเคิลในรูปแบบต่างๆ ซึ่งหนึ่งในวิธีที่กำลังได้รับความสนใจ คือ การนำขยะจากยางล้อเก่าไปผ่านกระบวนการเผาไหม้ภายใต้สภาวะที่ไร้ออกซิเจน (เรียกกระบวนการนี้ว่า “ไพโรไลซิส”) เพื่อให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่อยู่ทั้งในรูปของของแข็ง ของเหลว และก๊าซ เนื่องจากในยางล้อมีองค์ประกอบที่เป็นเนื้อยางซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอยู่สูงถึงประมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก (ดังแสดงในตารางที่ 1) ดังนั้นการทำไพโรไลซิสจึงส่งผลทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อทดแทนน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติได้ ด้วยเหตุนี้การทำไพโรไลซิสจึงนับเป็นวิธีการรีไซเคิลที่สำคัญเพราะนอกจากจะช่วยลดขยะที่เกิดจากยางล้อแล้วยังอาจช่วยลดการใช้ทรัพยากรน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติได้อีกด้วย

ตารางที่ 1 องค์ประกอบสำหรับการผลิตยางล้อรถยนต์นั่งส่วนบุคคล (passenger tire) และยางล้อรถบรรทุก (truck tire)

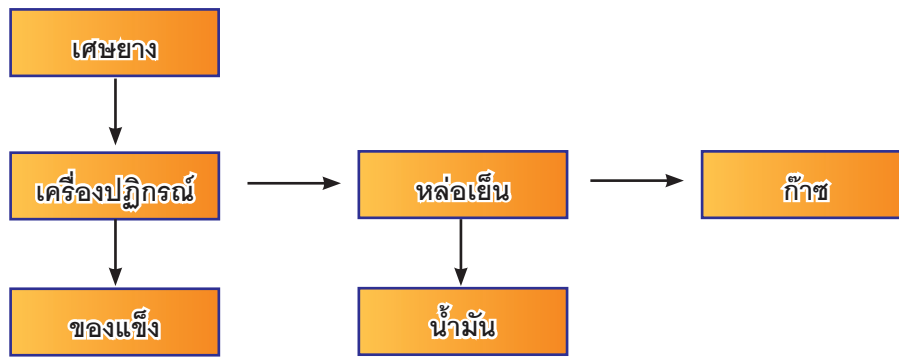
องค์ประกอบ	ปริมาณ (%wt)	
	ยางล้อรถยนต์นั่งส่วนบุคคล	ยางล้อรถบรรทุก
ยางธรรมชาติ	14	27
ยางสังเคราะห์	27	14
เชมดำ	28	28
ลวดเหล็ก	14-15	14-15
สารเคมีต่างๆ เช่น เส้นใย สารตัวเติม สารตัวเร่ง ฯลฯ	16-17	16-17

กระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิส คือ กระบวนการให้ความร้อนกับวัสดุที่อุณหภูมิประมาณ 450-700°C ในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจนหรือมีออกซิเจนเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้ความร้อนจะทำให้วัสดุเกิดการสลายตัวกลายเป็นก๊าซหรือของเหลว เมื่อนำยางที่ใช้งานแล้วไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ความร้อนจะทำให้โมเลกุลของยางเกิดการสลายตัว กล่าวคือ เกิดการตัดขาดของโมเลกุลซึ่งแต่เดิมที่เป็นโมเลกุลสายโซ่ยาวให้เป็นโมเลกุลสายโซ่สั้นลง ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ประกอบไปด้วยก๊าซเชื้อเพลิงซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ระเหยได้ น้ำมัน และยังมีส่วนของแข็งที่เหลือจากกระบวนการนี้อันได้แก่ เชมดำ (carbon black) และถ่านชาร์ (รูปที่ 1) กระบวนการไพโรไลซิสสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 1 การใช้เชื้อเพลิงจากกระบวนการไพโรไลซิส



รูปที่ 2 แผนผังการใช้เคลียยางด้วยกระบวนการไพโรไลซิส

ตารางที่ 2 ชนิดของการไพโรไลซิส

ชนิด	ความเร็วในการให้ความร้อน	อุณหภูมิ (°C)	ผลิตภัณฑ์
slow pyrolysis	< 10°C/sec	400-600	ก๊าซ ของเหลว ของแข็ง
fast pyrolysis	10-100°C/sec	600-650	ก๊าซ ของเหลว ของแข็ง
flash pyrolysis	>100°C/sec	1,000	ก๊าซ

กระบวนการไพโรไลซิสของยางล้อจะให้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของก๊าซ ซึ่งมีทั้งก๊าซไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอน (C₁-C₆) เช่น มีเทน อีเทน ในส่วนของเหลว (น้ำมัน) ที่ได้จากการไพโรไลซิสนั้น ได้แก่ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนมากกว่า 6 อะตอมขึ้นไปที่มีโครงสร้างแบบอะลิฟาติกหรืออะโรมาติก สำหรับของแข็งที่ได้จากการไพโรไลซิสมีทั้งเขม่าดำและสารอินทรีย์ที่เผาไหม้ไม่หมด (ถ่าน) ปนอยู่ ซึ่งสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วในการให้ความร้อน ระยะเวลา สารตัวเร่งปฏิกิริยา เครื่องปฏิกรณ์ (reactor) เป็นต้น ตารางที่ 3 แสดงสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำยางไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิสของคณะวิจัยต่างๆ

ตารางที่ 3 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

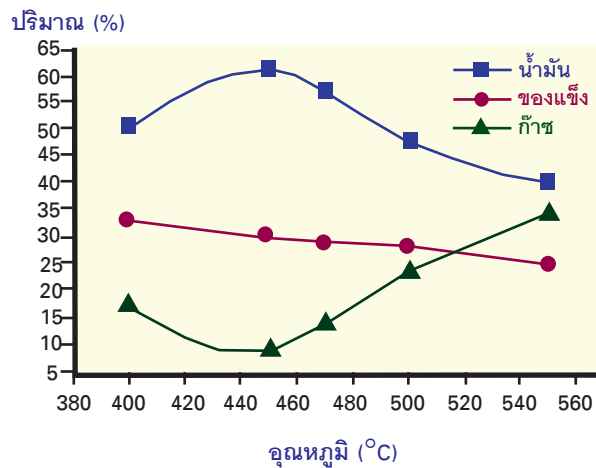
คณะวิจัย	ก๊าซ (%wt)	น้ำมัน (%wt)	ของแข็ง (%wt)	อุณหภูมิ (°C)	ชนิดเครื่องปฏิกรณ์
Cunliffe และคณะ ปี 1998	5-9	53-59	37-38	450-600	static-bed batch reactor
Berrueco และคณะ ปี 2005	50-65	30-45	2.5-4.5	400-700	static-bed batch reactor
Shah และคณะ ปี 2008	6-30	5-35	40-90	300-400	catalytic pyrolysis reactor
Shah และคณะ ปี 2009	1-20	1-30	55-94	300-400	catalytic pyrolysis reactor

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส

1. อุณหภูมิ

ในปี ค.ศ. 1998 Cunliffe และคณะ ได้ศึกษาการไพโรไลซิสเศษยางล้อ (shredded scrap tyre) โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ static-bed batch reactor ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 450-600°C พบว่า การทำไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 475°C จะให้น้ำมันในปริมาณสูงที่สุด (58.2%) การเพิ่มอุณหภูมิในการทำไพโรไลซิสจะให้น้ำมันมีปริมาณลดลงแต่จะมีปริมาณก๊าซเพิ่มขึ้น ในขณะที่ของแข็งอื่นๆ จะมีปริมาณที่ค่อนข้างคงที่ (ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการทำไพโรไลซิส)

ในปี ค.ศ. 2003 Islam และคณะ ได้ศึกษาการไพโรไลซิสเศษยางล้อ (scrap tyre) โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ fixed-bed ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 400-550°C พบว่า การทำไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 450°C จะให้น้ำมันในปริมาณสูงที่สุด (61%) รองลงมา ได้แก่ ของแข็ง (30%) และก๊าซ (9%) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการทำไพโรไลซิสจะทำให้ปริมาณของน้ำมันและของแข็งลดลง แต่จะมีปริมาณก๊าซเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกระบวนการไพโรไลซิสของเศษยางขนาด 5-7 เซนติเมตร ที่อุณหภูมิต่างๆ

2. สารตัวเร่งปฏิกิริยา

ในปี ค.ศ. 2008 Shah และคณะ ได้ศึกษาการไพโรไลซิสของยางโดยใช้สารเร่งปฏิกิริยาช่วย (catalytic pyrolysis) โดยมีแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิในช่วง 300-400°C ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกระบวนการไพโรไลซิสแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกระบวนการไพโรไลซิสของยางใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)/ผลิตภัณฑ์	ปริมาณ (%wt)					
	MgO			CaCO ₃		
	300	350	400	300	350	400
ก๊าซ	6.4 ± 0.20	13.7 ± 0.15	19.3 ± 0.31	19.3 ± 0.30	27.5 ± 0.15	31.9 ± 0.16
น้ำมัน	4.8 ± 0.06	34.1 ± 0.12	27.0 ± 0.20	1.8 ± 0.01	30.2 ± 0.04	29.2 ± 0.01
ของแข็ง	88.7 ± 0.31	52.2 ± 0.23	53.5 ± 0.23	65.9 ± 0.06	42.3 ± 0.25	39.1 ± 0.90

จากตารางที่ 4 จะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ก๊าซที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะมีปริมาณสูงขึ้น การใช้ CaCO_3 เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาจะให้ปริมาณก๊าซที่สูงกว่าการใช้ MgO สำหรับในส่วนของน้ำมันที่ได้จากปฏิกิริยาไพโรไลซิสพบว่าที่อุณหภูมิ 350°C จะได้น้ำมันในปริมาณสูงที่สุด ซึ่งถ้าใช้ MgO จะให้ปริมาณน้ำมันสูงกว่าการใช้ CaCO_3 เล็กน้อย และเมื่อพิจารณาในส่วนของการแข่งขันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสก็จะพบว่าการทำไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 300°C จะให้ของแข็งในปริมาณสูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ MgO เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ได้ปริมาณของแข็งสูงกว่าการใช้ CaCO_3 เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อน้ำมันที่ได้จากการทำไพโรไลซิสไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography; GC) เพื่อศึกษาชนิดของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5 ผลที่ได้แสดงว่าการใช้ MgO หรือ CaCO_3 เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้น้ำมันอะลิฟาติกในปริมาณเท่ากัน คือ ร้อยละ 25 อย่างไรก็ตามที่น้ำมันที่ได้จากการใช้ MgO เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีปริมาณวงแหวนอะโรมาติกในปริมาณที่สูงกว่าในขณะที่มีหมู่ที่มีความเป็นขั้วต่ำกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันที่ได้จากการใช้ CaCO_3 เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 5 ปริมาณของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ

โครงสร้างของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน	ปริมาณน้ำมัน (%wt)	
	MgO	CaCO ₃
อะลิฟาติก	25	25
อะโรมาติก	55	50
สารที่มีขั้ว	20	25

จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบแยกสายแบบใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยา น้ำมันที่ได้จะเป็นของผสมของน้ำมันที่มีโครงสร้างอะโรมาติกผสมกับน้ำมันที่มีโครงสร้างอะลิฟาติก โดยโครงสร้างที่เป็นอะโรมาติกนั้นได้มาจากหน่วยซ้ำของสไตรีนที่มีอยู่ในยางสไตรีนบิวทาไดอีน และโครงสร้างที่เป็นอะลิฟาติกนั้นได้มาจากหน่วยซ้ำของบิวทาไดอีนที่มีอยู่ในยางสไตรีนบิวทาไดอีนที่มีอยู่ในยางสไตรีนบิวทาไดอีน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในการผลิตยางล้อ การที่น้ำมันมีองค์ประกอบของอะโรมาติกในปริมาณที่สูง เนื่องจากโพลิฟินส์เกิดปฏิกิริยาไซโคลเซชัน (cyclization) ตามด้วยปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชัน (dehydrogenation) และปฏิกิริยาดีลส์ อัลเดอร์ (Diels Alder) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีองค์ประกอบเป็นสารอะโรมาติกในปริมาณสูง

นอกจากนั้นในปี ค.ศ. 2009 Shah และคณะ ได้นำขยะยางล้อมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยา โดยขั้นแรกนำยางล้อมาแยกเส้นใยและโลหะออก จากนั้นตัดยางให้มีขนาด 5-10 มิลลิเมตร และนำยางที่ตัดแล้วเข้าสู่กระบวนการไพโรไลซิส โดยใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิด ได้แก่ 1) อะลูมินา (Al_2O_3) 2) ซิลิกา (SiO_2) และ 3) อะลูมินาผสมกับซิลิกา (Al_2O_3 : SiO_2) จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $300\text{-}400^\circ\text{C}$ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากยางล้อใช้แล้วที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส เมื่อใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)/ผลิตภัณฑ์	ปริมาณ (%wt)								
	Al_2O_3			SiO_2			Al_2O_3 : SiO_2		
	300	350	400	300	350	400	300	350	400
ก๊าซ	7.4 ± 0.20	16.7 ± 0.12	20.9 ± 0.31	2.4 ± 0.20	8.0 ± 0.20	15.5 ± 0.12	0.4 ± 0.20	1.5 ± 0.11	5.0 ± 0.20
น้ำมัน	3.7 ± 0.31	17.5 ± 0.30	23.2 ± 0.20	1.8 ± 0.20	8.1 ± 0.12	28.2 ± 0.20	1.2 ± 0.06	13.1 ± 0.12	14.8 ± 0.20
ของแข็ง	95.5 ± 0.03	65.8 ± 0.40	55.7 ± 0.31	96.0 ± 0.11	84.1 ± 0.12	56.3 ± 0.31	98.6 ± 0.42	85.3 ± 0.13	80.1 ± 0.42

จากตารางที่ 6 พบว่า ผลผลิตก๊าซที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอุณหภูมิของการไพโรไลซิส เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดพบว่าอะลูมินาจะให้ปริมาณก๊าซสูงกว่าสารตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆ เมื่อพิจารณาผลผลิตที่น้ำมันที่ได้พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลทำให้น้ำมันที่ได้มีปริมาณสูงขึ้น โดยน้ำมันจะมีปริมาณสูงที่สุดเมื่อทำไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 °C และใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อนำน้ำมันไปวิเคราะห์หาปริมาณของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนแต่ละชนิดด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ปริมาณของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ในน้ำมันเมื่อใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ

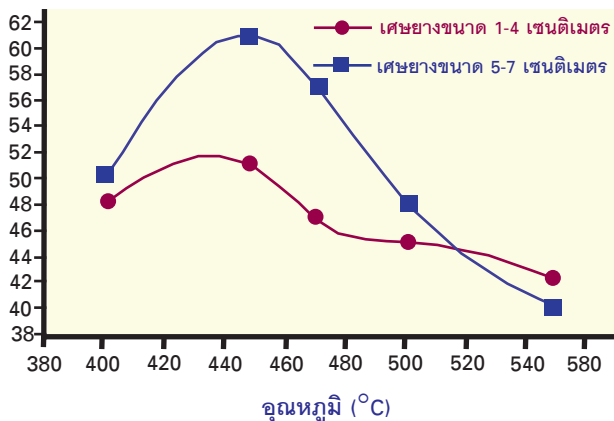
โครงสร้างของ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน	ปริมาณน้ำมัน (%wt)		
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃ : SiO ₂
อะลิฟาติก	25	40	35
อะโรมาติก	35	30	30
สารที่มีซัลเฟอร์	40	30	35

จากตารางที่ 7 จะเห็นว่า การใช้อะลูมินาเป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ได้น้ำมันที่มีซัลเฟอร์ในปริมาณสูง การใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ได้น้ำมันที่มีสัดส่วนของอะลิฟาติกในปริมาณสูง สำหรับการใช้อะลูมินาร่วมกับซิลิกาเป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ได้น้ำมันที่มีโครงสร้างทั้งอะลิฟาติก อะโรมาติก และสารที่มีซัลเฟอร์ในสัดส่วนที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน

3. ขนาดของเศษยาง

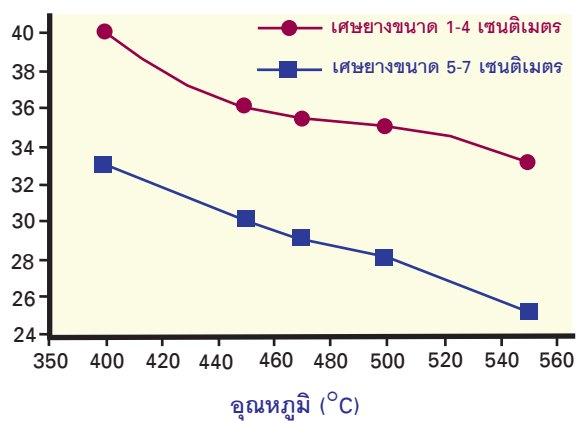
Islam และคณะ ได้ศึกษาขนาดของเศษยางที่นำมาทำไพโรไลซิส พบว่า ขนาดของเศษยางที่ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์มีผลต่อผลผลิตที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4-6

ปริมาณน้ำมัน (%)

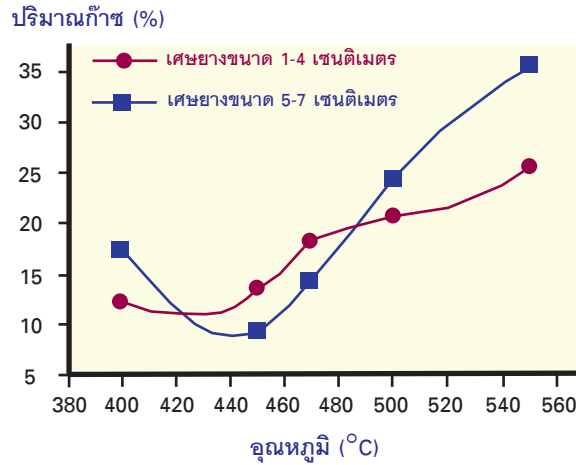


รูปที่ 4 ร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

ปริมาณของแข็ง (%)



รูปที่ 5 ร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส



รูปที่ 6 ร้อยละของผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

จากรูปที่ 4-6 จะเห็นว่าการใช้เศษยางที่มีขนาดใหญ่จะส่งผลทำให้ได้น้ำมันในปริมาณที่สูงเมื่อใช้อุณหภูมิในการไพโรไลซิสต่ำกว่า 520°C และมีปริมาณของแข็งลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้สูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณก๊าซจะเพิ่มขึ้น

การนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสไปใช้งาน

1. ของแข็ง

ในปี ค.ศ. 2001 Rodriguez และคณะ ได้ศึกษาองค์ประกอบของของแข็งที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสยางล้อ ที่อุณหภูมิต่างๆ เทียบกับเขม่าดำเกรดทั่วไปได้ผลดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 องค์ประกอบของของแข็ง (residue) ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเศษยางล้อที่อุณหภูมิต่างๆ เทียบกับเขม่าดำเกรดทั่วไป

องค์ประกอบ (%wt)	อุณหภูมิ (°C)				เขม่าดำเกรดทั่วไป
	400	500	600	700	
คาร์บอน	83.8 ± 0.60	83.5 ± 0.50	83.7 ± 1.00	82.5 ± 2.60	97.1
ไฮโดรเจน	2.4 ± 0.40	0.6 ± 0.40	0.5 ± 0.04	0.5 ± 0.02	0.2
ไนโตรเจน	0.3 ± 0.06	0.3 ± 0.07	0.3 ± 0.05	0.3 ± 0.08	0.2
กำมะถัน	2.3 ± 0.10	2.4 ± 0.10	2.6 ± 0.20	2.3 ± 0.20	1.0
เถ้า	9.0	12.1	12.0	13.2	0.4
ออกซิเจนและสารอื่นๆ	0.7	1.1	0.9	1.2	1.1

จากตารางที่ 8 จะเห็นว่า ของแข็งที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 80 ซึ่งน้อยกว่าเขม่าดำเกรดที่ใช้ทั่วไปค่อนข้างมาก แต่ของแข็งที่ได้จะมีปริมาณไฮโดรเจน ไนโตรเจน และกำมะถันเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่สูงกว่าเขม่าดำเกรดที่ใช้ทั่วไป จากผลการศึกษาพบว่า การทำไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400°C จะได้ของแข็งที่มีปริมาณไฮโดรเจนสูงกว่าการทำไพโรไลซิสที่อุณหภูมิอื่นๆ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมินี้ยังเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ ส่วนเถ้าที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะมีปริมาณที่สูงกว่าเขม่าดำเกรดทั่วไปค่อนข้างมาก ทั้งนี้เพราะในยางที่นำมาทำไพโรไลซิสมีสารอนินทรีย์อื่นๆ (เช่น ซิงก์ออกไซด์) เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย สารอนินทรีย์เหล่านี้มีความทนต่อความร้อนสูงและไม่สลายตัวในระหว่างการทำไพโรไลซิส ด้วยเหตุนี้เมื่อได้รับอุณหภูมิสูง สารอนินทรีย์เหล่านี้จึงหลงเหลืออยู่ในรูปของเถ้า เมื่อผู้วิจัยนำของแข็งที่ได้จากการไพโรไลซิส (ที่อุณหภูมิ 500°C) ไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์สมบัติของแข็งที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

สมบัติ	ผลการวิเคราะห์	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ
Iodine number ¹ (mg/g)	135.2	ASTM D1510
CTAB ² (m ² /g)	59.7	ASTM D3765
ปริมาณเถ้า (%)	12.6	ASTM D1506

จากตารางที่ 9 สามารถสรุปได้ว่าของแข็งที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส สามารถนำไปใช้เป็นสารตัวเติมแบบกึ่งเสริมแรง (semi-reinforcement) ในยางได้ เพราะของแข็งเหล่านี้มีพื้นผิวจำเพาะที่ค่อนข้างสูงดังจะเห็นได้จากค่า CTAB ที่มีค่าสูงถึง 59.7 ตารางเมตรต่อกรัม

2. ของเหลว

ในปี ค.ศ. 2001 Rodriguez และคณะ ได้ศึกษาการไพโรไลซิสเศษยางรถยนต์ โดยนำเศษยางมาไพโรไลซ์ที่อุณหภูมิ 300-700°C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน และนำน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC/MS) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 10 หลังจากนั้นนำน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500°C มากลั่นที่อุณหภูมิ 150-370°C เทียบกับน้ำมันดีเซลได้ผลดังแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 10 สารประกอบในน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

อุณหภูมิ (°C)	อะโรมาติก (%)	อะลิฟาติก (%)	ไนโตรจีน (%)	เบนโซโทอะซิล (%)
300	34.7	59.2	4.5	1.6
400	59.3	34.9	3.7	2.1
500	62.4	31.6	4.2	1.8
600	75.6	19.8	2.6	2.0
700	57.4	37.0	3.8	1.8

ผลในตารางที่ 10 แสดงว่า ที่อุณหภูมิ 300°C สารประกอบที่มีโครงสร้างอะลิฟาติกจะมีปริมาณที่สูงที่สุด (59.2%) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (400-700°C) ปริมาณสารประกอบที่มีโครงสร้างอะโรมาติกจะมีปริมาณสูงกว่าสารประกอบชนิดอื่นๆ โดยที่อุณหภูมิ 600°C จะมีสารประกอบที่มีโครงสร้างแบบอะโรมาติกสูงสุด (75.6%)

¹ Iodine number คือ ค่าการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะของสารตัวเติมที่วัดได้จากการดูดซับไอโอดีน

² CTAB คือ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของสารตัวเติมที่วัดได้จากการใช้เซทิลไธรมเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์เป็นตัวกลาง

ตารางที่ 11 ปริมาตรที่ได้จากการกลั่นน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสและน้ำมันดีเซลที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ	ปริมาตรการกลั่น (%vol)	
	น้ำมันที่ได้จากการกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500°C	น้ำมันดีเซล
157.5	1.0	0.0
160	2.2	0.2
170	7.5	2.0
180	13.3	6.5
190	19.8	10.3
200	24.3	14.8
210	27.5	18.8
220	31.4	22.3
230	35.0	26.4
240	37.7	31.6
250	40.9	25.1
260	44.6	39.9
270	47.8	45.3
280	51.2	51.6
290	54.8	59.4
300	59.3	66.3
310	63.6	71.6
320	67.8	79.9
330	72.5	84.3
340	78.0	89.4
350	84.4	91.4
360	91.7	94.8
370	99.7	96.9

ตารางที่ 11 แสดงผลการกลั่นน้ำมันที่ได้จากการกระบวนการไพโรไลซิสเปรียบเทียบกับ การกลั่นน้ำมันดีเซลที่อุณหภูมิ 150-370°C ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณน้ำมันที่ได้จากการกลั่นน้ำมันที่ได้จากการกระบวนการไพโรไลซิสจะมีสัดส่วนน้ำมันส่วนกลั่นเบา (อุณหภูมิ 150-270°C) และน้ำมันในส่วนกลั่นหนัก (อุณหภูมิ 370°C) ในปริมาณที่มากกว่าน้ำมันดีเซล แต่น้ำมันในส่วนกลั่นกลาง (อุณหภูมิ 280-360°C) มีปริมาณต่ำกว่าน้ำมันดีเซล

การนำน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสมาผสมกับน้ำมันดีเซล

ในปี ค.ศ.1998 Williams และคณะ ได้ศึกษาสมบัติของน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสยางล้อ (whole tyre) เปรียบเทียบกับสมบัติของน้ำมันดีเซล (diesel fuel) และน้ำมันเตาชนิดเบา³ (light fuel oil) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 สมบัติของน้ำมันแต่ละชนิด

การทดสอบ	น้ำมันที่ได้จาก การไพโรไลซิส (tyre oil)	น้ำมันดีเซล	น้ำมันเตาชนิดเบา
กากคาร์บอน (%)	2.2	<0.35	-
ความหนืดที่ 40°C (cSt)	6.3	3.3	21.0
ความหนาแน่น (kg/m ³)	0.91	0.78	0.89
API gravity	15.5	31.0	26.6
จุดวาบไฟ (°C)	20	75	79
จุดเดือดเริ่มต้น (°C)	100	180	200
-จุดเดือดการกลั่นที่ 10%	140	-	-
-จุดเดือดการกลั่นที่ 50%	264	300	347
-จุดเดือดการกลั่นที่ 90%	355	-	-
CV ⁴ (MJ/kg)	42.1	46.0	44.8

จากตารางที่ 12 จะเห็นว่า น้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะมีค่าความร้อนที่ค่อนข้างจะใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลและน้ำมันเตาชนิดเบาที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง (ดูได้จากค่า CV) และในส่วนของจุดวาบไฟนั้น น้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสจะมีจุดวาบไฟที่ต่ำกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดทำให้ต้องใช้ความระมัดระวังในการเก็บรักษาสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซลแต่ต่ำกว่าน้ำมันเตาชนิดเบา

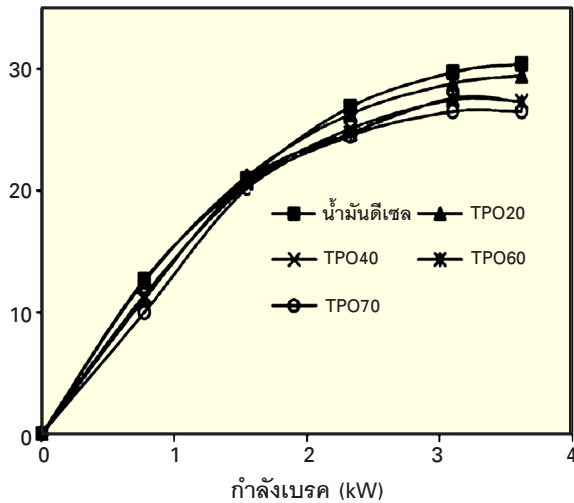
ในปี ค.ศ. 2009 Murugan และคณะ ได้นำเศษยางรถยนต์ไปทำไพโรไลซิสเพื่อให้ได้น้ำมัน (tyre pyrolysis oil; TPO) จากนั้นจึงนำน้ำมัน TPO ไปผสมกับน้ำมันดีเซลในสัดส่วน TPO:น้ำมันดีเซล เท่ากับ 20:80, 40:60, 60:40 และ 70:30 ตามลำดับ แล้วจึงนำน้ำมันผสมที่ได้ไปทดสอบประสิทธิภาพกับเครื่องยนต์ที่มีระบบการจ่ายเชื้อเพลิงแบบหัวฉีดเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลได้ผลดังแสดงในรูปที่ 7-8



³ น้ำมันเตาชนิดเบา มีค่าความหนืด (viscosity) ต่ำ ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อน้ำขนาดเล็ก

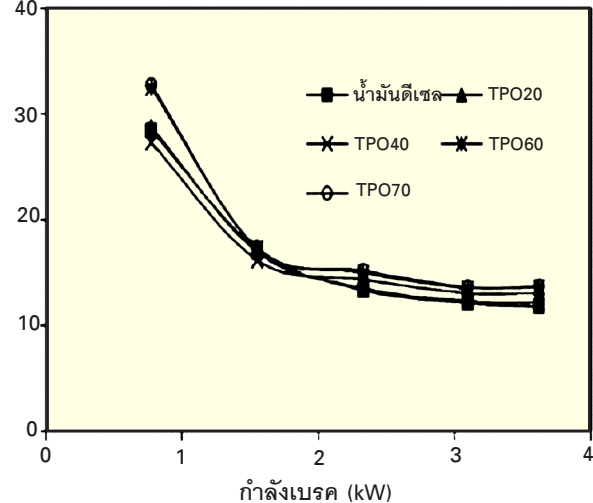
⁴ Calorific value, CV หรือค่าความร้อน คือ ปริมาณความร้อนที่ถูกปล่อยออกมาต่อหน่วยน้ำหนัก

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (%)



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของน้ำมันผสมระหว่างน้ำมัน TPO กับน้ำมันดีเซล

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (%)



รูปที่ 8 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของน้ำมันผสมระหว่างน้ำมัน TPO กับน้ำมันดีเซล

จากรูปที่ 7 จะเห็นว่าน้ำมัน TPO ผสมกับน้ำมันดีเซลจะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อน (brake thermal efficiency)⁵ ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล แต่ถ้าเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันผสมด้วยกันเอง น้ำมัน TPO ผสมน้ำมันดีเซลสัดส่วน 20:80 จะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ดีกว่าน้ำมันผสมสัดส่วนอื่น นอกจากนี้อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (brake specific energy consumption)⁶ ของน้ำมันผสมระหว่างน้ำมัน TPO และน้ำมันดีเซลที่สัดส่วน 40:60 จะสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงน้อยกว่าสัดส่วน 20:80 และ 60:40 (ดูรูปที่ 8 ประกอบ)

3. ก๊าซ

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส นอกจากน้ำมันและของแข็งแล้ว ยังมีก๊าซที่สามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงได้ ในปี ค.ศ. 2005 Berrueco และคณะ ได้วิเคราะห์ก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิสเศษยางล้อที่อุณหภูมิ 400-700°C พบว่า ก๊าซที่ได้มีทั้งก๊าซไฮโดรเจน C_1 (มีเทน) C_2 (อีเทน) C_3 (โพรเพน โพรพิลีน) C_4 (บิวเทน บิวทีน ไอโซบิวทิลีน บิวทาไดอิน) C_5 (เพนทีน) C_6 (เฮกเซน ไสโคลเฮกเซน เบนซีน) และก๊าซอื่นๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ โดยที่ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนจะมีปริมาณสูงที่อุณหภูมิ 550°C

นอกจากนี้ Rodriguez และคณะ ได้ศึกษาปริมาณก๊าซที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสยางล้อที่อุณหภูมิ 400-700°C พบว่าการไพโรไลซิสจะให้ก๊าซที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น มีเทน อีเทน โพรเพน โดยมีการทำไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400°C จะให้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนเบา (C_1 - C_3) ในปริมาณที่ต่ำ แต่จะให้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนหนัก (C_4 - C_6) ในปริมาณที่สูงกว่าการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิอื่นๆ นอกจากก๊าซที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนแล้ว ยังมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์อีกเล็กน้อย ผู้วิจัยระบุว่าก๊าซ CO_x ที่พบเกิดจากการสลายตัวของสารเคมีที่มีอยู่ในยาง เช่น กรดสเตียริก น้ำมันเอ็กเทนเดอร์ แคลเซียมคาร์บอเนต สำหรับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์อาจมาจากกำมะถันที่มีอยู่ในยาง และก๊าซที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะมีค่าความร้อนทั้งหมด (Gross calorific values; GCV)⁷ 39-42 MJ/kg ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้อีกด้วย

⁵ Brake thermal efficiency คือ ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานที่เครื่องยนต์ส่งออก (power output) กับพลังงาน (energy) ที่เกิดจากการสันดาบน้ำมันเชื้อเพลิง

⁶ Brake specific energy consumption คือ จำนวนพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงต่อหนึ่งหน่วยเวลาต่อกำลังการเบรก (brake power) ของเครื่องยนต์ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเป็นกำลังงานเบรกของเชื้อเพลิง

⁷ Gross calorific value; GCV หรือ Higher heating value; HHV คือ ค่าปริมาณความร้อนทั้งหมดที่จะให้ออกมาหลังจากการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ ผลของการสันดาปจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กับไอน้ำซึ่งไอน้ำสามารถกลั่นตัวแล้วคายความร้อนแฝงออกมา

ในปี ค.ศ.2007 Aylon และคณะ ได้ศึกษาก๊าซที่ปลดปล่อยออกมาจากการไพโรไลซิสยางล้อ ซึ่งการวิจัยนี้ใช้เครื่องปฏิกรณ์ 2 เครื่องต่อกัน โดยเครื่องปฏิกรณ์เครื่องแรกเป็นเครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการไพโรไลซิสยางล้อ ส่วนเครื่องที่สองเป็นเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการเผาไหม้ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แรก การทดลองนี้จะไพโรไลซิสยางล้อที่อุณหภูมิ 600°C โดยมีอัตราการให้ความร้อนที่ 50°C/min และใช้อัตราการไหลของไนโตรเจนที่ 10 mln/min ปริมาณก๊าซที่ได้แสดงในตารางที่ 13 หลังจากนั้นนำก๊าซที่ได้จากการไพโรไลซิสมาเผาที่เครื่องปฏิกรณ์เครื่องที่สองที่อุณหภูมิ 850°C และวัดปริมาณสารที่ปลดปล่อยออกมาโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ทางเคมี ผลที่ได้ (ตารางที่ 13) แสดงว่า ก๊าซที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสยางล้อจะมีปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนและมีเทนในปริมาณสูง ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ และตารางที่ 14 แสดงว่าการเผาไหม้ที่ได้จากการไพโรไลซิสยางล้อ จะก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และ NO_x ในปริมาณที่ต่ำกว่าค่าที่กำหนด แต่จะก่อให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในปริมาณที่สูงกว่าค่าที่กำหนด ผู้วิจัยได้วิเคราะห์หาปริมาณโลหะที่ปลดปล่อยออกมา เช่น ปะปน ตะกั่ว พลวง ฯลฯ พบว่ามีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนด ด้วยเหตุนี้ในภาพรวมจึงถือว่าวิธีการไพโรไลซิสยังคงเป็นวิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 13 ปริมาณก๊าซที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสยางล้อ

ก๊าซ	ปริมาณ (%)
ไฮโดรเจน	30.40
คาร์บอนไดออกไซด์	2.90
คาร์บอนมอนอกไซด์	2.38
ไนโตรเจน	9.93
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	1.55
มีเทน	23.27
อีเทน	6.20
เอทิลีน	4.45
โพรเพน	5.17
โพรพิลีน	2.48
ไอโซบิวเทน	1.24
บิวเทน	0.72
ทรานส์-2-บิวทีน	0.72
1-บิวทีน	0.10
ไอโซบิวทิลีน	7.55
2-บิวทีน	0.52
1,3-บิวทาไดอีน	0.41

ตารางที่ 14 สารที่ปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 850°C

สาร	ค่าที่วัดได้ (mg/Nm ³)	ค่าที่กำหนด (mg/Nm ³)
อนุภาค (particulate matter)	6	10
คาร์บอนมอนอกไซด์	5	50
ออกไซด์ไนโตรเจน (NO _x)	118	200
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	4,300	50
สารหนู	<0.0124	0.5
พลวง	<0.3706	0.5
ปรอท	<0.0025	0.05
ตะกั่ว	<0.3706	0.5
แคดเมียม	<0.0124	0.05
นิกเกิล	<0.3706	0.5
โครเมียม	<0.3706	0.5
โคบอลต์	<0.3706	0.5
วานาเดียม	<0.3706	0.5
เทลลูเรียม	<0.0124	0.05
ทองแดง	<0.3706	0.5
แมงกานีส	<0.3706	0.5

การรีไซเคิลยางด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ถือเป็นทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าของเศษยางหรือยางเก่า ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้มีทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งของแข็งที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสสามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมแบบกึ่งเสริมแรงในยาง ของเหลวหรือน้ำมันสามารถนำมาใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิง ส่วนก๊าซก็สามารถนำมาใช้เป็นก๊าซเชื้อเพลิงได้เช่นเดียวกัน ซึ่งจากกระบวนการไพโรไลซิสจะได้ผลิตภัณฑ์ชนิดใดมากหรือน้อยนั้นก็ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ ระยะเวลา ชนิดของยางและสารตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมปัจจัยดังกล่าวเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามต้องการ

เอกสารอ้างอิง

1. Scrap tire, http://www.rma.org/scrap_tire_market, October 2009.
2. Islam, M.N., Khan, M.F.R. and Alam, M.Z., “Production and characterization of scrap tyre pyrolysis oil and its blend” International conference on Mechanical Engineering (ICME 2003), 2003, 26-28 December, Dhaka, Bangladesh.
3. Cunliffe, A.M. and Williams, P.T., “Composition of oils derived from the batch pyrolysis of tyres” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **44**, 131, (1998)
4. Berrueto, C., et al., “Pyrolysis of waste tyres in an atmospheric static-bed batch reactor: Analysis of the gases obtained” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **74**, 245, (2005)
5. Shah, J., Jan, M.R. and Mabood, F., “Catalytic pyrolysis of waste tyre rubber into hydrocarbons via base catalysts” *Iran. J. Chem. Chem. Eng.* **27**, 123, (2008)
6. Shah, J., Jan, M.R. and Mabood, F., “Recovery of value-added products from the catalytic pyrolysis of waste tyre” *Energ Convers Manag*, **50**, 991, (2009)
7. Rodriguez, I. M., et al., “Pyrolysis of scrap tyres” *Fuel Process Technol*, **72**, 9, (2001)
8. Williams, P.T., Bottrill, R.P. and Cunliffe, A.M., “Combustion of tyre pyrolysis oil” *Trans IChemE: Part B*, **76**, 291, (1998)
9. Marugan, S., Ramaswamy, M.C. and Nagarajan, G., “Assessment of pyrolysis oil as an energy source for diesel engines” *Fuel Process Technol*, **90**, 67, (2009)
10. Aylon, E., et al., “Emissions from the combustion of gas-phase products at tyre pyrolysis” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **79**, 210, (2007)

ดาร์ณี เจริญสุข

การศึกษา: ปริญญาโท (ปโทเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถานที่ทำงานปัจจุบัน: เจ้าหน้าที่สารสนเทศ

ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย มหาวิทยาลัยมหิดล