สารตัวเติมสำหรับยางล้อที่ช่วยประหยัดน้ำมัน

ในสภาวการณ์ปัจจุบันที่น้ำมันเชื้อเพลิงมีราคาสูงขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ผู้ขับขี่ยานยนต์ตระหนักถึงการประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น มีรายงานในปี ค.ศ. 2006 [1] ว่าถ้าสามารถออกสูตรยางล้อให้มีความต้านทานการหมุน (rolling resistance) ลดลงร้อยละ 10 จะช่วยประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงได้ถึงร้อยละ 2 การปรับปรุงสมบัติความต้านทานการหมุนดังกล่าวทำได้หลายวิธี เช่น การปรับเปลี่ยนชนิดของยางหรือชนิดของสารตัวเติม เป็นต้น

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1990 เป็นต้นมา มีการศึกษาการใช้ซิลิกาแทนเขม่าดำในการผลิตยางล้อกันอย่างแพร่หลายรวมถึงระบบสารตัวเติมผสมระหว่างเขม่าดำและซิลิกาที่ช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของยางล้อ เช่น ลดความต้านทานการหมุนของยางล้อลง นอกจากนั้นยังมีการศึกษาการใช้เส้นใยอะรามิดที่ผ่านการดัดแปรมาใช้ผสมกับสารตัวเติม (เขม่าดำหรือซิลิกา) เพื่อช่วยเสริมแรงและช่วยลดความต้านทานต่อการสึกกร่อนของยางล้อด้วย ซึ่งในอนาคตความต้องการใช้ยางล้อที่มีความต้านทานการหมุนต่ำเพื่อประหยัดน้ำมันจะมีเพิ่มสูงขึ้น

โดยทั่วไปแล้ว การเติมสารตัวเติมลงไปในยางเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ยาง จะทำให้ยางมีค่าความแข็ง โมดุลัสความทนต่อแรงดึงสูงขึ้น ซึ่งสารตัวเติมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสามารถ แบ่งตามประสิทธิภาพการเสริมแรงได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. สารตัวเติมเสริมแรง เช่น เขม่าดำ ซิลิกา
2. สารตัวเติมไม่เสริมแรง เช่น ทัลคัม แคลเซียมคาร์บอเนต เคลย์

ทั้งนี้สารตัวเติมยังมีลักษณะแตกต่างกันสามารถแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่

1. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเม็ด (particulated fillers) เช่น เขม่าดำ ซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต
2. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (fibrous fillers) เช่น ใยไม้ ใยฝ้าย
3. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเรซิน (resinous fillers) เช่น ไฮสไตรีนเรซิน ฟีนอลิกเรซิน

ชนิดสารตัวเติม

<u>เขม่าดำ</u>

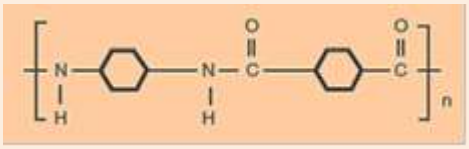
เขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่ใช้กันค่อนข้างมากในอุตสาหกรรมยางล้อ เพราะนอกจากจะช่วยเสริมแรงให้แก่ยางแล้วยังสามารถช่วยลดต้นทุนในการผลิตลงได้ด้วย ซึ่งประสิทธิภาพการเสริมแรงของเขม่าดำในยางขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคปฐมภูมิของเขม่าดำ กล่าวคือ เขม่าดำเกรดที่มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิเล็กจะมีประสิทธิภาพเสริมแรงสูงกว่าเขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิใหญ่ นอกจากขนาดอนุภาคปฐมภูมิแล้ว “โครงสร้าง” ของเขม่าดำมีผลต่อสมบัติบางประการของยาง ซึ่งเขม่าดำที่มี “โครงสร้าง” แบบสูง (มีรูพรุนหรือช่องว่างระหว่างอนุภาคมาก) จะทำให้ยางมีความแข็ง โมดุลัสและความหนืดสูงกว่าเขม่าดำที่มี “โครงสร้าง” แบบต่ำ (มีรูพรุนหรือมีช่องว่างระหว่างอนุภาคน้อย)

ซิลิกา

ซิลิกาที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางจะมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิอยู่ในช่วง 10-40 นาโนเมตร ซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่มีข้ัวสูง ผสมเข้ากับยางที่ไม่มีขั้วได้ค่อนข้างยาก จึงต้องมีการใช้สารคู่ควบไซเลน (silane coupling agent) ซึ่งสารคู่ควบไซเลนจึงทำหน้าที่เสมือนสะพานเชื่อมระหว่างยางกับซิลิกา ทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกามีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลต่างๆ ดีขึ้น

สารตัวเติมชนิดอื่น

- เม็ดเส้นใยอะรามิดที่ผ่านการปรับผิว (treated aramid fiber granule) หรือ Sulfron 3001 ผลิตได้จากการดัดแปรทางเคมีของพาราฟีนิลลิน เทเรพทาลาไมด์ มีสูตรโครงสร้างทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่ง Sulfron 3001 สามารถนำไปผสมกับสารตัวเติมเสริมแรงได้โดยที่ไม่จำกัดอุณหภูมิผสม



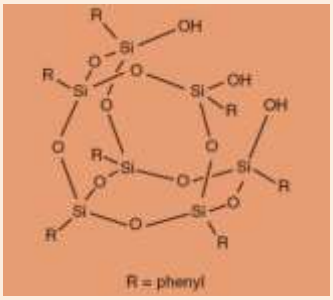
รูปที่ 1 โครงสร้างของพาราฟีนิลลิน เทเรพทาลาไมด์

- บิวทาไดอีน-อะคริเลตเทอร์โพลิเมอร์ (butadienes acrylate terpolymer) มีขนาดอนุภาค 50 นาโนเมตร มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Tg) -75°C

ในปี ค.ศ. 2012 Flanigan, C. และคณะ [1] ได้ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของการใช้สารตัวเติมชนิดใหม่ (novel fillers) ได้แก่ 1) ไซลานอล (silanol) 2) บิวทาไดอีน-อะคริเลตเทอร์โพลิเมอร์ (butadiene acrylate terpolymer) 3) เม็ดเส้นใยอะรามิดที่ผ่านการปรับผิว (treated aramid fiber granule) 4) เขม่าดำไฮบริด (hybrid CB-silica) และ 5) เขม่าดำแอกกรีเกต ดังแสดงในรูปที่ 2 ร่วมกับสารตัวเติมที่นิยมใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรมยาง (เขม่าดำและซิลิกา) ในสูตรคอมพาวด์ดอกยาง ดังนี้

สารตัวเติมที่ใช้ศึกษา ได้แก่

- เขม่าดำเกรด N234 เป็นเกรดที่มีอนุภาคขนาดเล็ก มี “โครงสร้าง” แบบสูง มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง (126 m^2/g)
- เขม่าดำแอกกรีเกต (broad aggregated CB) มีชื่อทางการค้า คือ Vulcan 1436 มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 100 m^2/g
- สารตัวเติมผสมระหว่างเขม่าดำและซิลิกา (carbon-silica dual phase fillers; CSDPF) ที่มีชื่อทางการค้าว่า CRX 4210A หรืออาจจะเรียกว่าเขม่าดำไฮบริด
- พรีซิพิเทตซิลิกา (precipitated silica) ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 170 m^2/g (วัดโดยใช้เทคนิคการดูดซับไนโตรเจน (BET))
- ไซลานอล (silanol) หรือ trisilanol-phenyl silsequioxane สูตรทางเคมี $C_{42}H_{38}O_{12}Si_7$ (สูตรโครงสร้างแสดงในรูปที่ 2) มีน้ำหนักโมเลกุล 931 ชื่อทางการค้า trisilanolphenyl POSS® [1,5]



รูปที่ 2 โครงสร้างเคมีของไซลานอล

3(ก) ไซลานอล | 3(ข) บิวทาไดอีน-อะคริเลต เทอร์โพลิเมอร์ | 3(ค) เม็ดเส้นใยอะรามิดที่ผ่านการปรับผิว | 3(ง) เขม่าดำไฮบริด | 3(จ) เขม่าดำแอกกรีเกต

รูปที่ 3 สารตัวเติมชนิดใหม่ (novel fillers) ที่ใช้ในการศึกษา [1]

สูตรคอมพาวด์ที่ใช้ศึกษา

<u>คอมพาวด์ดอกยางสูตรที่ใช้ซิลิกาเป็นหลัก</u>

ซิลิกาสูตร 1 (สูตรควบคุม) ใช้ซิลิกา 65 phr และเขม่าดำ (เกรด N234) 15 phr

ซิลิกาสูตร 2 คือ ซิลิกาสูตร 1 เติมไซลานอล 3.5 phr

ซิลิกาสูตร 3 คือ ซิลิกาสูตร 1 เติมบิวทาไดอีน-อะคริเลต เทอร์โพลิเมอร์ 10 phr

<u>คอมพาวด์ดอกยางสูตรที่ใช้เขม่าดำเป็นหลัก</u>

เขม่าดำสูตร 1 (สูตรควบคุม) ใช้เขม่าดำ (เกรด N234) 75 phr

เขม่าดำสูตร 2 คือ เขม่าดำสูตร 1 เติมเม็ดเส้นใยอะรามิดที่ผ่านการปรับผิว (หรือ sulfron 3001) 2 phr

เขม่าดำสูตร 3 คือ สูตรที่มีการใช้สารตัวเติมผสมระหว่างเขม่าดำกับซิลิกา (หรือเขม่าดำไฮบริด (hybrid CB-silica)) 75 phr ทดแทนเขม่าดำจากสูตรควบคุม และเติมสารคู่ควบไซเลน 2.7 phr

เขม่าดำสูตร 4 คือ สูตรที่มีการใช้เขม่าดำแอกกรีเกต (broad aggregated) 75 phr ทดแทนเขม่าดำจากสูตรควบคุม

สูตรผสมเคมียางดังตารางที่ 1 เมื่อผสมยางและสารเคมีแล้ว นำยางคอมพาวด์มาทำการวัลคาไนซ์และขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบกดอัด (compression molding) แล้วทดสอบสมบัติเชิงกล เช่น ค่าความแข็ง ความทนต่อแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และการทดสอบสมบัติเชิงพลวัต ดังรูปที่ 4

ตารางที่ 1 สูตรผสมเคมียาง [1]

สูตรผสมเคมียาง	ปริมาณ (phr)						
	สูตรซิลิกา			สูตรเขม่าดำ			
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4
ยาง S-SBR (Buna VSL 5025-2) (oil extended)	103.12	103.12	103.12	103.12	103.12	103.12	103.12
ยาง S-BR (Budene 1207)	25	25	25	25	25	25	25
เขม่าดำ N234	15	15	15	75	75	-	-
ซิลิกา (highly dispersible silica)	65	65	65	-	-	-	-
สารคู่ควบไซเลน (Si-69)	5.2	5.2	5.2	-	-	2.7	-
ไซลานอล	-	3.5	-	-	-	-	-
บิวทาไดอีน-อะคริเลต เทอร์โพลิเมอร์	-	-	10	-	-	-	-
เม็ดเส้นใยอะรามิดที่ผ่านการปรับผิว (sulfron 3001)	-	-	-	-	2	-	-
สารตัวเติมผสมระหว่างเขม่าดำและซิลิกาหรือเขม่าดำไฮบริด (hybrid CB-Silica)	-	-	-	-	-	75	-
เขม่าดำแอกกรีเกต (broad aggregated)	-	-	-	-	-	-	75
น้ำมัน TDAE	10	10	10	10	10	10	10
ซิงก์ออกไซด์	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
ไข (microcrystalline wax)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
6PPD	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Wingstay 100	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
กรดสเตียริก	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
สารช่วยการแปรรูป	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
กำมะถัน	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
CBS	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
DPG	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

หมายเหตุ: S-SBR = solution styrene-butadiene rubber

S-BR = solution polybutadiene

6PPD = N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylene diamine

CBS = N-cyclohexyl-2-benzothiazyl-sulfenamide

DPG =Diphenyl quinidine

การทดสอบเชิงกล

ค่าความแข็ง

กรณียางสูตรที่ใช้ซิลิกา พบว่า ยางสูตรที่ใช้ไซลานอล (ซิลิกาสูตร 2) มีค่าความแข็งต่ำกว่ายางสูตรซิลิกาควบคุม แต่การใช้บิวทาไดอีน-อะคริเลตเทอร์โพลิเมอร์ (ซิลิกาสูตร 3) ไม่มีผลต่อค่าความแข็งของยาง ส่วนกรณียางสูตรที่ใช้เขม่าดำ พบว่ายางสูตรที่ใช้สารตัวเติมผสมเขม่าดำ-ซิลิกา (เขม่าดำสูตร 3) จะมีค่าความแข็งต่ำกว่ายางสูตรอื่นๆ ส่วนยางสูตรที่ใช้เม็ดใยอะรามิดที่ผ่านการปรับผิว (เขม่าดำสูตร 2) และยางสูตรที่ใช้เขม่าดำแอกกรีเกต (เขม่าดำสูตร 4) มีค่าความแข็งสูงขึ้น

ค่าความทนต่อแรงดึง

ยางสูตรต่างๆ มีค่าความทนต่อแรงดึงค่อนข้างจะใกล้เคียงกับยางสูตรควบคุม (ทั้งสูตรซิลิกาและสูตรเขม่าดำ) ยกเว้นยางสูตรที่ใช้เขม่าดำไฮบริด (เขม่าดำสูตร 3) ที่มีค่าความทนต่อแรงดึงต่ำกว่ายางสูตรควบคุม

การยืดตัว ณ จุดขาด

กรณีของยางสูตรที่ใช้ซิลิกา พบว่า ยางสูตรที่ใช้ไซลานอล (ซิลิกาสูตร 2) และสูตรที่ใช้บิวทาไดอีนอะคริเลตเทอร์โพลิเมอร์ (ซิลิกาสูตร 3) จะมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาด สูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับยางสูตรซิลิกาสูตรควบคุม ส่วนในกรณียางสูตรที่ใช้เขม่าดำพบว่าการใช้สารตัวเติมชนิดใหม่ทั้ง 3 สูตร จะมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดต่ำกว่ายางสูตรเขม่าดำควบคุม

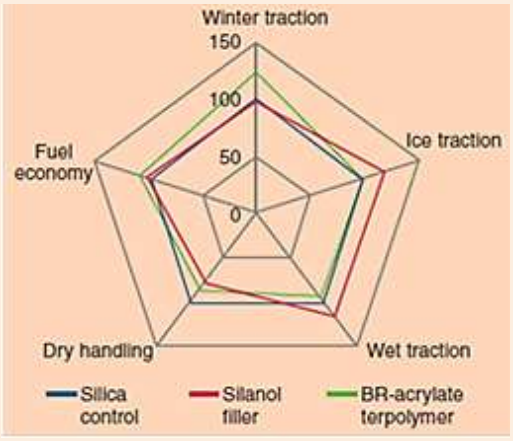
100% โมดุลัส

กรณีของยางสูตรที่ใช้ซิลิกา พบว่ายางสูตรที่ใช้สารตัวเติม (ซิลิกาสูตร 1 และซิลิกาสูตร 2) จะมีค่า 100% โมดุลัสลดลงเมื่อเทียบกับยางสูตรซิลิกาควบคุม ส่วนกรณียางสูตรที่ใช้เขม่าดำพบว่ายางสูตรที่ใช้สารตัวเติมชนิดใหม่ทุกสูตรมีค่า 100% โมดุลัสสูงกว่ายางสูตรเขม่าดำควบคุม ซึ่งยางสูตรที่ใช้เขม่าดำแอกกรีเกต (เขม่าดำสูตร 4) มีค่า 100% โมดุลัสสูงกว่ายางสูตรที่ใช้เม็ดเส้นใยอะรามิดที่ผ่านการปรับผิว (เขม่าดำสูตร 2) และยางสูตรที่ใช้เขม่าดำไฮบริด (เขม่าดำสูตร 3) ตามลำดับ

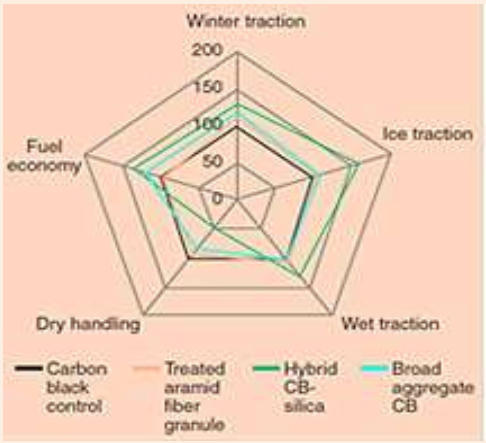
การทดสอบสมบัติเชิงพลวัต

โดยในภาพรวมนั้นสิ่งที่สำคัญสำหรับยางรถยนต์ คือ ความปลอดภัยในการขับขี่ ดังนั้น การยึดเกาะถนนเปียก (wet traction) จึงเป็นสมบัติที่สำคัญสามารถดูได้จากค่าแทนเดลต้าที่อุณหภูมิ 0°C ถ้าค่าดังกล่าวสูงแสดงว่ายางล้อมีการยึดเกาะถนนที่ดีและมีความปลอดภัยสูง นอกจากนี้ค่าความต้านทานการหมุน ดูได้จากค่าแทนเดลต้าที่ 60°C ถ้าค่าดังกล่าวต่ำแสดงว่ายางช่วยประหยัดน้ำมันได้ดี

นอกจากนี้สมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำของยางล้อที่ใช้ในต่างประเทศที่มีอากาศหนาวก็ต้องพิจารณาสมบัติอื่นๆ เพิ่มเติม ได้แก่ สมบัติการยึดเกาะบนพื้นหิมะโดยการวัดโมดุลัสสะสมเชิงพลวัต (dynamic storage modulus, E') ที่อุณหภูมิ -20°C ถ้ามีค่าต่ำแสดงว่ายางล้อมีสมบัติการยึดเกาะบนพื้นหิมะ (winter traction) สูง รวมถึงการพิจารณาสมบัติการยึดเกาะบนน้ำแข็ง (ice traction) ที่ดูได้จากค่าแทนเดลต้าที่อุณหภูมิ -10°C ซึ่งถ้าค่าดังกล่าวสูงแสดงว่ายางล้อมีการยึดเกาะบนน้ำแข็งสูง ซึ่งสมบัติต่างๆข้างต้นของยางที่ใช้สารตัวเติมแต่ละชนิดแสดงไว้ในรูปที่ 4



4 (ก) ซิลิกา



4 (ข) เขม่าดำ

รูปที่ 4 การวิเคราะห์ทางเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical analysis) ของยางสูตรต่างๆ

จากรูปที่ 4 (ก) พบว่ายางสูตรที่ใช้ซิลิกาสูตร 3 บิวทาไดอีนอะคริเลตเทอร์โพลิเมอร์ ประหยัดน้ำมันได้ดีกว่าซิลิกาสูตรอื่นๆ ยางสูตรที่ใช้ไซลานอล (ซิลิกาสูตร 2) จะมีสมบัติการยึดเกาะถนนเปียก (wet traction) ดีกว่ายางสูตรอื่นๆ แต่ยางสูตรที่ใช้สารตัวเติมทั้งสองสูตร (ซิลิกาสูตร 2 และซิลิกาสูตร 3) จะสูญเสียสมบัติทางด้านการควบคุมการขับขี่บนพื้นแห้ง (dry handling) เมื่อเทียบกับยางสูตรซิลิกาควบคุม

สำหรับยางสูตรที่ใช้เขม่าดำ (ดูรูป 4 (ข) ประกอบ) พบว่า ยางสูตรที่ใช้เขม่าดำไฮบริด (เขม่าดำสูตร 3) จะช่วยประหยัดน้ำมัน รวมถึงช่วยปรับปรุงสมบัติการยึดเกาะที่ดีขึ้น (ทั้งยึดเกาะบนพื้นเปียก หิมะ และน้ำแข็ง) เมื่อเทียบกับยางสูตรที่ใช้เขม่าดำสูตรอื่นๆ แต่จะสูญเสียสมบัติทางด้านการควบคุมการขับขี่บนพื้นแห้ง (dry handling) ไป ส่วนยางสูตรที่ใช้เส้นใยอะรามิดที่ผ่านการปรับผิว (เขม่าดำสูตร 2) จะสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติการยึดเกาะถนนเปียกดีขึ้นเล็กน้อย แต่สมบัติอื่นๆ เช่น การยึดเกาะบนหิมะค่อนข้างใกล้เคียงกับยางสูตรเขม่าดำควบคุม สำหรับยางสูตรที่ใช้เขม่าดำแอกกรีเกต (เขม่าดำสูตร 4) จะช่วยปรับปรุงสมบัติการยึดเกาะพื้นถนน (traction) และค่าความต้านทานการหมุนรวมถึงการประหยัดน้ำมันที่ดีกว่ายางสูตรเขม่าดำควบคุมเล็กน้อย

สรุป

โดยในภาพรวมสูตรคอมพาวด์ดอกยางที่ใช้เขม่าดำหรือซิลิการ่วมกับสารตัวเติมชนิดใหม่ สามารถที่จะช่วยลดความต้านทานการหมุนลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งยางสูตรซิลิกากับบิวทาไดอีนอะคริเลตเทอร์โพลิเมอร์จะช่วยลดค่าความต้านทานการหมุนลงต่ำกว่ายางสูตรที่ใช้เขม่าดำ ซึ่งจะทำให้ยางล้อช่วยประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงได้ นอกจากนี้ยางสูตรที่ใช้ซิลิกากับไซลานอลจะให้มีค่าแทนเดลต้าที่ 0°C สูงพอๆ กับยางสูตรที่ใช้เขม่าดำไฮบริด แสดงให้เห็นว่ายางทั้งสองสูตรมีสมบัติการยึดเกาะถนนที่เปียกที่ดี

เอกสารอ้างอิง

1. Transportation Research Board Special Report 286, “Tire and Passenger Vehicle Fuel Economy. “National Research Council of the National Academies, ISBN 0-309-09421-6, 2006
2. Flanigan, C.M. et al Rubber World Feb 2012, 18-31
3. Michael, D. M., and Theo, A. C., “Advanced tire filler materials to reduce fuel consumption of commercial vehicles” Rubber World, 241(5),15-18, 25, 2010
4. http://www.cabot-corp.com/wcm/download/en-us/rb/CRP-01-05.pdf
5. http://www.hybridplastics.com/docs/msds/chem/so/SO1458.pdf
6. พงษ์ธร แซ่อุย สารเคมียาง พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
7. พงษ์ธร แซ่อุย วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง ปีที่ 3 ฉบับที่ 2 2552, 11-17
8. พงษ์ธร แซ่อุย วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง ปีที่ 1 ฉบับที่ 2 2550, 30-38
9. ชญาภา นิ่มสุวรรณ วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง ปีที่ 5 ฉบับที่ 2 2554, 3-16
10. นิตยา รัตนโสมและธนัญญา เสาวภาคย์ วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง ปีที่ 2 ฉบับที่ 4 2551,28-38
11. พรพรรณ นิธิอุทัย สารเคมียาง มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

ดารณี เจริญสุข
เครือข่ายพัฒนาอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางและไม้ยางพารา
กระทรวงอุตสาหกรรม

วันที่ 30 พฤษภาคม 2559